

Влияние условий деформации в камере Бриджмена на структуру и свойства низкоуглеродистой стали

© А.М. Глезер, А.А. Томчук

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, 105005, Россия

Исследовано распределение зерен (по размерам) и микротвердость стали 08кп, подвергнутой деформации в камере Бриджмена. На основе полученных распределений рассчитаны относительные количества фрагментов и рекристаллизованных зерен, проанализирована корреляция между структурой и микротвердостью образцов.

Ключевые слова: деформация, микротвердость, зерно, фрагмент, структура.

Введение. Деформация кручением под давлением представляет собой вид обработки, при которой металлические образцы подвергаются сдвиговой деформации путем вращения одной поверхности тонкого образца относительно другой его поверхности при высоком квазигидростатическом давлении. Процесс мегапластической деформации осуществляется в камере Бриджмена между двух твердосплавных бойков (наковален), при этом нижний баек вращается, а верхний остается неподвижным [1]. Истинная деформация образцов определяется упрощенным выражением с учетом малой толщины $\varphi r \gg h$ [1]:

$$\varepsilon = \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varphi r}{h} \right)^2} \right) + \ln \left(\frac{h_0}{h} \right) \approx \ln \left(\frac{\varphi r h_0}{h^2} \right) = \ln \left(\frac{2\pi N r h_0}{h^2} \right), \quad (1)$$

где N – число оборотов бойка за один непрерывный цикл деформации; $\varphi = 2\pi N$ – угол поворота бойка; r – расстояние от центра образца; h_0 и h – начальная и конечная толщины образца.

Особенностью мегапластической деформации металлов и сплавов является образование фрагментированной структуры с субмикронным размером фрагментов [2], а также одновременное протекание рекристаллизационных процессов при комнатных температурах [3]. В результате деформации материалы приобретают высокие прочностные свойства в сочетании с удовлетворительными пластическими свойствами. В случаях, когда средний размер зерна $d \geq 100$ нм, упрочнение материала описывается законом Холла – Петча [4, 5]:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-n}, \quad (2)$$

где k – постоянная, связанная с распространением деформации через границы зерен; $n \approx 0,5$ (для стали 0,8 кп).

Постановка задачи. В данной работе исследованы структура и свойства материала образцов из низкоуглеродистой стали 08 кп, подвергнутых деформации в камере Бриджмена в соответствии со схемами, приведенными на рис. 1.

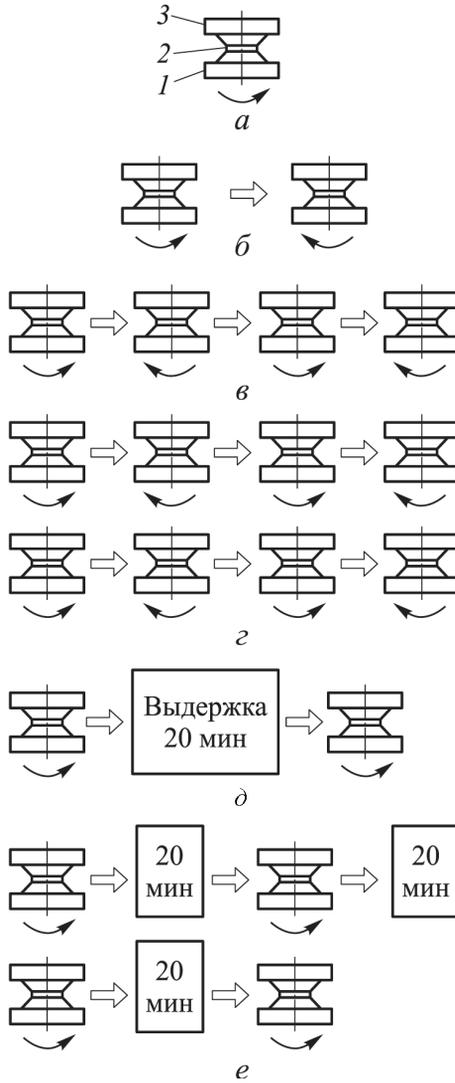


Рис. 1. Схемы деформации образцов в камере Бриджмена:

a – непрерывная деформация ($N=2$); *б, в, г* – деформация способом «вперед-назад» с разным числом смен направлений вращения бойка (N равно 1/2, 1/4 и 1 соответственно); *д, е* – способом «вперед-вперед» с разным числом непрерывных циклов деформации в одном направлении вращения (N равно 1 и 1/2 соответственно); 1, 3 – подвижный и неподвижный бойки; 2 – металлический образец

На рис. 1, *a* представлена схема непрерывной деформации образца за два оборота бойка. Согласно схеме на рис. 1, *б*, образец

подвергался деформации за один оборот бойка в одном направлении вращения, а затем – такой же деформации, но при обратном направлении вращения. Схемы на рис. 1, в, г аналогичны, но в них больше число смен направлений вращения нижнего бойка. В схемах на рис. 1, д и е направление вращения бойка не изменялось, но в процессе деформирования проводились промежуточные остановки в течение приблизительно 20 мин. Суммарная деформация во всех случаях была одинакова и осуществлялась за два полных оборота бойка.

Материал и методика исследования. Образцы стали 08 кп – пластины размером 10×10 мм, толщиной 200 ± 15 мкм – помещали между двумя плоскостями бойков диаметром 8 мм. После сдвиговой деформации образцы представляли собой круглые пластины толщиной приблизительно 100 мкм (рис. 2).



Рис. 2. Образец после деформации, проведенной за два оборота бойка

Исследования микроструктуры материала образцов проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-200СХ при ускоряющем напряжении 160 кВ в режиме темного поля на расстоянии $r = 2 \pm 0,5$ мм от центра образца (рис. 3). Измерения микротвердости выполняли на микротвердомере LECO M = 400 А вдоль радиуса r образца в пределах $r = 0...3,75$ мм при нагрузке 50 г и времени нагружения 5 с.

Результаты исследования. На рис. 4 представлены гистограммы распределения размеров зерен и фрагментов структуры деформированных образцов, полученные на основе данных просвечивающей электронной микроскопии. В соответствии с работой [6] выбран характерный размер $D = \sqrt{S}$, где S – площадь изображения зерна или фрагмента.

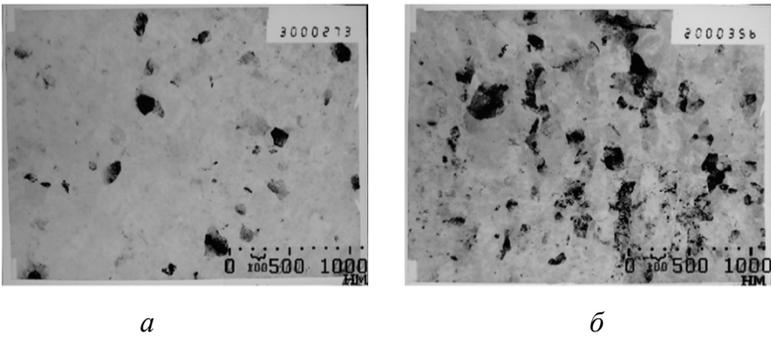


Рис. 3. Темнопольные изображения зерен и фрагментов после деформаций образца ($N = 1/2$):

a – способ «вперед-назад»; *б* – способ «вперед-вперед»

Особенностью этих распределений являются несколько заниженные значения средних размеров фрагментов по сравнению с данными работы [1], что обусловлено соизмеримыми размерами фрагментов и толщины исследуемых образцов.

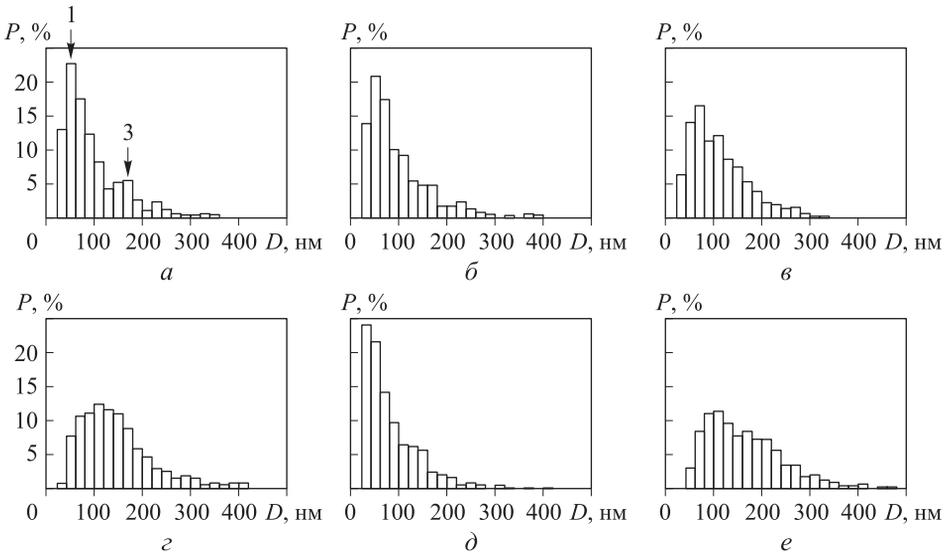


Рис. 4. Гистограммы распределения размеров зерен и фрагментов при различных способах деформации образца ($D = \sqrt{S}$):

a – непрерывная; *б-г* – «вперед-назад» с разным числом смен направлений вращения бойка; *д, е* – «вперед-вперед» с разным числом непрерывных циклов деформации в одну сторону

Анализ распределений (см. рис. 4) показывает наличие двух максимумов (бимодальное распределение), положение и высота которых изменяются в зависимости от способа деформации. При больших значениях N наблюдаются два четких максимума (см. рис. 4, *a*, мак-

симумы 1 и 2). Исходя из анализа микроструктуры, предполагается, что максимум 1 соответствует фрагментам, а максимум 2 – рекристаллизованным зернам, образовавшимся в процессе деформации образца. Разбиение каждого распределения на два гауссовых распределения, с расчетом площадей под их графиками, позволяет получить значения долей зерен и фрагментов для каждого исследуемого случая (рис. 5). На рис. 6 приведены зависимости средних размеров зерен, соответствующих каждому из максимумов, от значения N .

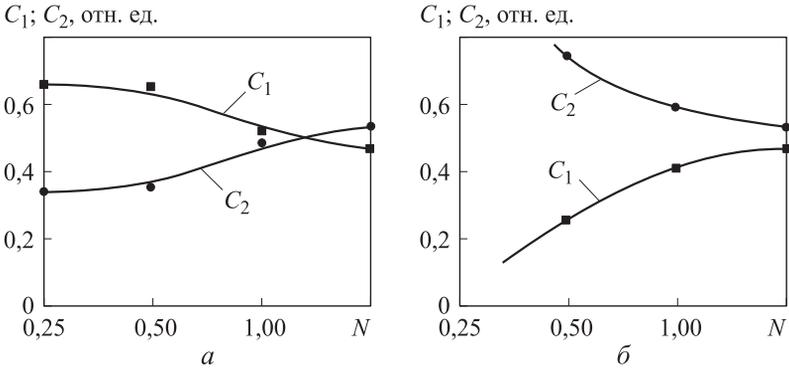


Рис. 5. Соотношения относительных долей рекристаллизованных зерен C_1 и фрагментов C_2 :

a – способ «вперед-назад»; $б$ – способ «вперед-вперед»

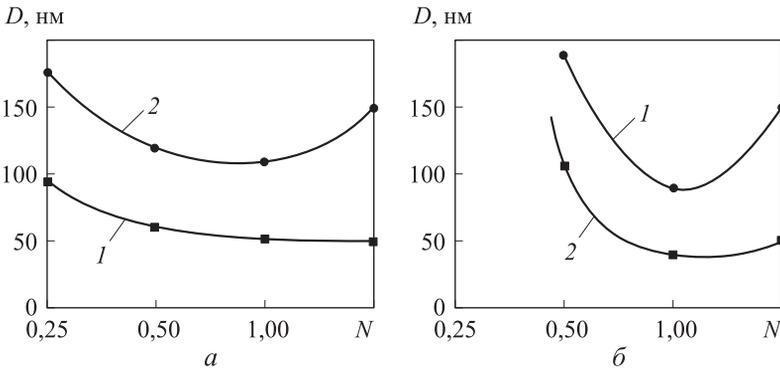


Рис. 6. Зависимость среднего размера фрагментов (1) и рекристаллизованных зерен (2) для каждого максимума:

a – способ «вперед-назад»; $б$ – способ «вперед-вперед»

На рис. 5 и 6 видно, что бóльшим значениям N соответствуют почти одинаковые доли рекристаллизованных зерен и фрагментов, в то время как их средние размеры различаются, характерный минимум на графиках соответствует $N = 1$.

Зависимость микротвердости образцов от расстояния до их центра представлена на рис. 7. Видно, что с уменьшением N значение

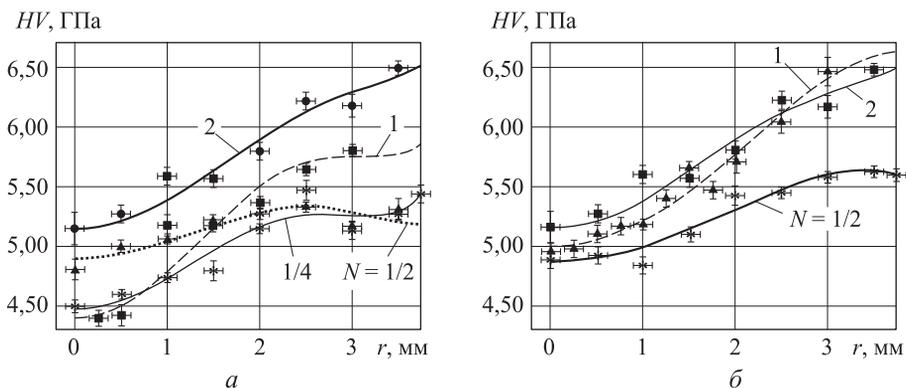


Рис. 7. Зависимость микротвердости HV образцов от расстояния до центра r : a – способ «вперед-назад»; b – способ «вперед-вперед»

микротвердости снижается, уменьшается также разность значений микротвердости в центре и на периферии исследованных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alexander P. Zhilyaev, Terence G. Langdon. Using High-pressure Torsion for Metal Processing: Fundamentals and Applications. *Progress in Materials Science*, 2008, vol. 53, pp. 893–979.
- [2] Рыбин В.В. *Большие пластические деформации и разрушение металлов*. Москва, Металлургия, 1986, 224 с.
- [3] Поздняков В.А., Глезер А.М. Возможные пути эволюции дефектной структуры в процессе больших пластических деформаций: роль релаксационных механизмов. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, 2004, т. 68, № 10, с. 1449–1455.
- [4] Хоникомб Р. *Пластическая деформация металлов* (пер. с англ.). Москва, Мир, 1972.
- [5] Головин Ю.И. *Введение в нанотехнику*. Москва, Машиностроение, 2007, 496 с.
- [6] Быков В.М., Лихачев В.А., Никонов Ю.А., Сербина Л.Л., Шибалова Л.И. Фрагментирование и динамическая рекристаллизация в меди при больших и очень больших пластических деформациях. *Физика металлов и металловедение*, 1978, т. 45, вып. 1, с. 163–169.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:
 Глезер А.М., Томчук А.А. Влияние условий деформации в камере Бриджмена на структуру и свойства низкоуглеродистой стали. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/matsci/865.html>

Глезер Александр Маркович родился в 1946 г., окончил МИСИС в 1969 г. Директор Института металловедения и физики металлов им. Г.В. Курдюмова (ИМФМ) в составе ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина». Автор 370 опубликованных работ. e-mail: a.glezer@mail.ru

Томчук Александр Александрович родился в 1988 г., окончил бакалавриат в 2009 г. и магистратуру в 2011 г. кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Техническая физика». Аспирант, младший научный сотрудник ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина». Область научных интересов: физика твердого тела. Автор двух опубликованных работ. e-mail: tomchuk-a@yandex.ru