

PACS: 81.40.f

Н.И. Даниленко

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ  
ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ В МАТЕРИАЛАХ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ  
УГЛЕРОДА

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины  
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03680, Украина  
E-mail: nick@ipms.kiev.ua

*Методом трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ) проведено исследование градиентной наноструктуры стали 65Г после интенсивной поверхностной пластической деформации. Показано, что в процессе пластической деформации происходят растворение цементита  $Fe_3C$  и перераспределение углерода по границам ячеек, что подавляет процессы возврата. Размер ячеек в приповерхностном слое 20–30 нм.*

### Введение

Для получения сверхмелкозернистой структуры деформационного происхождения широкое применение получили методы интенсивной пластической деформации (ИПД), такие как равноканальное угловое прессование (РКУП) [1,2], винтовая экструзия (ВЭ) [3] и др. Эти методы позволяют создавать деформационную структуру, которая значительно повышает механические характеристики материала: прочность, износостойкость, сопротивление усталости. При этом следует отметить, что методы ИПД могут быть использованы только для чистых или однокомпонентных легкодеформируемых материалов, хотя, по мнению авторов [4], более высокие значения прочности можно получить при деформации, например, высокоуглеродистых сталей. В работах [5,6] было показано, что методы поверхностной пластической обработки могут быть применены для формирования градиентной наноструктуры в сложнолегированных материалах. Поперечный размер ячеек при таких обработках достигает 50–10 нм, что значительно меньше, чем при объемной обработке методами ИПД. Наличие деформационной структуры в приповерхностном слое способствует интенсификации процессов диффузии примесей внедрения из атмосферы, обеспечивая дополнительное упрочнение. Этот эффект рассмотрен в работе [7] при упрочнении поверх-

ности железа в процессе высокоскоростного трения в атмосфере аммиака. При такой обработке в армко-железе образуется слой с мелкодисперсной структурой (размер зерна 3–5  $\mu\text{m}$ ) глубиной 100  $\mu\text{m}$ , который имеет твердость 8000 МПа при твердости исходного материала 2000 МПа. Следует также отметить высокие (до 10 GPa) значения твердости поверхности железнодорожных рельсов при формировании наноструктурного слоя [8].

Информация о структурных изменениях в материале может служить основой для отработки технологических приемов с целью управления процессом создания градиентной структуры в материалах с повышенным содержанием примесей внедрения.

### Материалы и методы исследования

Для исследования была выбрана сталь 65Г, химический состав которой, %: С – 0.55–0.65; Si – 0.17–0.37; Mn – 0.7–1.0 и Cr, Ni меньше 0.3. Поверхность деформировали накаткой: 200 циклов с усилием 200 N при комнатной температуре. Структуру изучали методом ТЭМ на образцах, приготовленных «cross-section» [9].

### Результаты и их обсуждение

Методы ИПД основаны на реализации продольного сдвига (рис. 1), когда за один проход в материале накапливается большая деформация без изменения макроразмеров образца [1]. К сожалению, реализация такой схемы деформации затруднена из-за невозможности закрепления торцевыми захватами. На практике эта проблема решена при использовании специальных методов деформирования: РКУП, ВЭ, деформации кручением под давлением.

С точки зрения практического применения более перспективными являются методы поверхностной обработки: осесимметричное протягивание (рис. 2,а), накатка (рис. 2,б) и др. В процессе обработки в приповерхностном слое реализуется деформация сдвигом, причем интенсивность сдвиговых деформаций изменяется при варьировании размера (рис. 2,а), усилий прижима (рис. 2,б) и количества проходов инструмента.

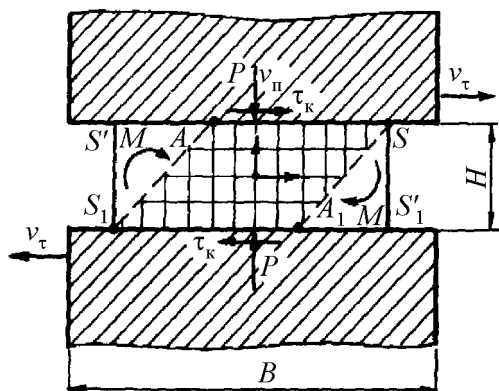


Рис. 1. Схема продольного сдвига [1]

Структура исходного материала представлена на рис. 3,а. Размер перлитных зерен составляет 10–15  $\mu\text{m}$ . После накатки в приповерхностном слое формируется ячеистая структура (рис. 3,б). На микрофотографии можно выделить две зоны деформационной структуры: внутреннюю с размером структурных элементов  $\sim 200$  nm и приповерхностную с размером ячеек 20–40 nm. Приповерхностная зона имеет глубину  $\sim 1$   $\mu\text{m}$ .

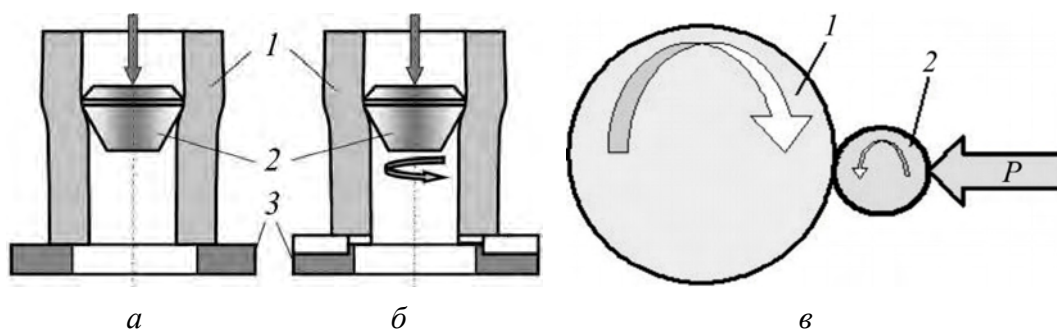


Рис. 2. Схема деформирующего протягивания (а), протягивания с вращением (б) и накатки (в): 1 – образец, 2 – инструмент, 3 – опора

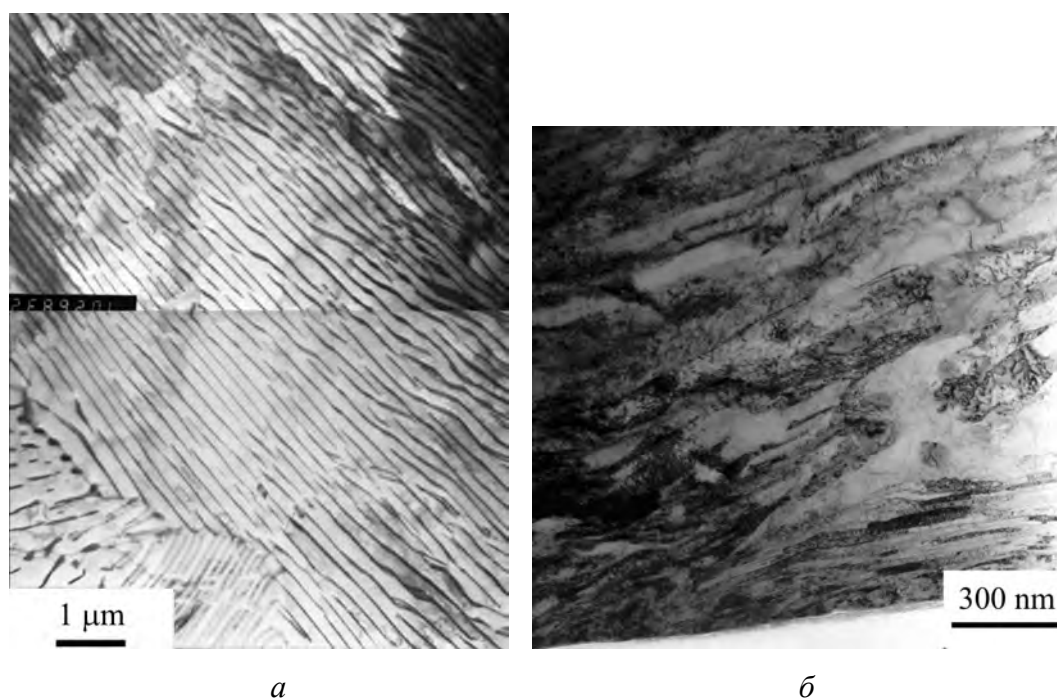


Рис. 3. Структура стали 65Г в исходном состоянии (а) и после накатки (б)

В процессе деформации в приповерхностном слое произошло полное растворение цементитной фазы и сформировалась ячеистая структура. Твердость обработанной поверхности достигает 12 GPa.

Процессам изменений в карбидной фазе при холодной деформации посвящено много работ. С помощью рентгеноструктурных и магнитных исследований [10], а также эффекта Мёссбауэра [11] было определено, что до 50% цементитной фазы можно растворить в результате холодной деформации. Современные методы исследований позволяют выявить стадийность процесса растворения цементитной фазы [12,13].

Следует отметить, что из-за малого размера ячеек суммарная сегрегационная емкость границ оказывается очень большой [14] и имеющиеся в объеме материала легирующие элементы внедрения, попадая на дефектные участки (дислокации, границы ячеек, тройные стыки и т.д.) [13], подавляют

процессы возврата. В этом случае углерод играет роль «полезных примесей» [15]. Необходимо также отметить, что форма углеродных пиков на оже-спектрах, полученных вдали от обработанной поверхности, соответствует карбидам, а в зоне с ячеистой структурой – свободному углероду. Также наблюдается повышенное содержание кислорода в приповерхностном слое по сравнению с недеформированными участками.

### Выводы

При интенсивной сдвиговой деформации в приповерхностном слое формируется градиентная структура, характерная для больших степеней деформации с размером ячеек 20–30 нм. Растворение цементита в процессе деформации приводит к перераспределению углерода, который, попадая на границы ячеек, играет роль «полезных примесей» и подавляет процессы возврата.

1. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994).
2. V.I. Kopylov, Proc. of NATO ARW, Moscow, Russia (1999), p. 23.
3. Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, D. Orlov, B. Efros, A. Salimgareyev, V. Stolyarov, Microstructural Evolution of Titanium under Twist Extrusion Ultrafine Grained Materials: Processing and Structure, Washington (2002), p. 137–142.
4. D.R. Lesuer, C.K. Syn, O.D. Sherby, Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation, Kluwer Academic Publishers, Series 3. High Technology **80**, 357 (1999).
5. K. Lu, H. Zahng, Y. Zhong, H.J. Fecht, J. Mater. Res. **12**, 923 (1997).
6. M. Danylenko, V. Gorban, Yu. Podrezov, S. Firstov, O. Rozenberg, S. Sheykin, Y. Yamabe-Mitarai, F. Morito, Mater. Sci. Forum **503–504**, 787 (2006).
7. A. Yurkova, A. Belotsky, A. Byakova, Yu. Podrezov, M. Danylenko, Metallic Materials with High Structural Efficiency, 113 (2004).
8. W. Lojkowski, Y. Millman, S.I. Chugunova, I.V. Goncharova, M. Djahanbakhsh, G. Burkle, H.-J. Fecht, Mater. Sci. Eng. **A303**, 209 (2001).
9. D.B. Williams, C.B. Carter, Transmission Electron Microscopy, Plenum Press, New York–London (1996).
10. М.В. Белоус, В.Т. Черепин, ФММ **12**, 685 (1961).
11. V.N. Gridnev, V.G. Gavrilyuk, I.Ya. Dekhtyar, Yu.Ya. Meshkov, P.S. Nizin, V.G. Prokopenko, Phys. Stat. Sol. **A14**, 689 (1972).
12. Yu. Ivanisenko, W. Lojkowski, R.Z. Valiev, H.-J. Fecht, Acta Mater. **51**, 5555 (2003).
13. X. Sauvage, Y. Ivanisenko, J. Mater. Sci. **42**, 1615 (2007).
14. A.V. Krajnikov, V.M. Yurchenko, E.F. Feldman, D.B. Williams, Surface Sci. **515**, 36 (2002).
15. С.О. Фірстов, Т.Г. Рогуль, В.Л. Свєчніков, С.М. Дуб, Фіз.-хім. механіка матеріалів **42**, № 1, 113 (2006).

*N.I. Danylenko*

## GRADIENT NANOSTRUCTURE FORMATION UNDER SEVERE SURFACE DEFORMATION IN HIGH-CARBON MATERIALS

Transmission electron microscopy studying of gradient nanostructure of steel 65Г samples after severe surface plastic deformation has been done. Dissolution of cementite  $\text{Fe}_3\text{C}$  and carbon redistribution on cell boundaries occur during the deformation. The carbon on cell boundaries suppresses the recovery processes. Cell size in surface layer is about 20–30 nm.

**Fig. 1.** A scheme of longitudinal shear [1]

**Fig. 2.** A scheme of broaching (*a*), broaching with rotation (*б*) and roll forming (*в*): 1 – sample, 2 – tool, 3 – support

**Fig. 3.** Structure of steel 65Г: initial state (*a*), after roll forming (*б*)