

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.

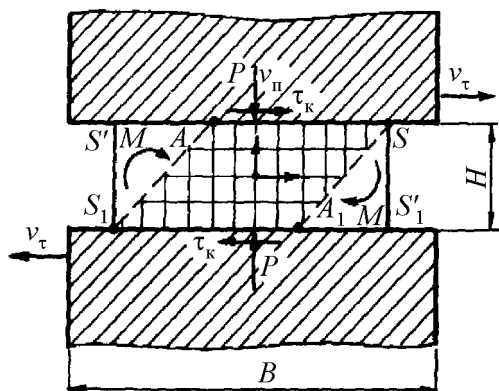


Рис. 1. Схема продольного сдвига [1]

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  $\sim 1$   $\mu\text{m}$ .

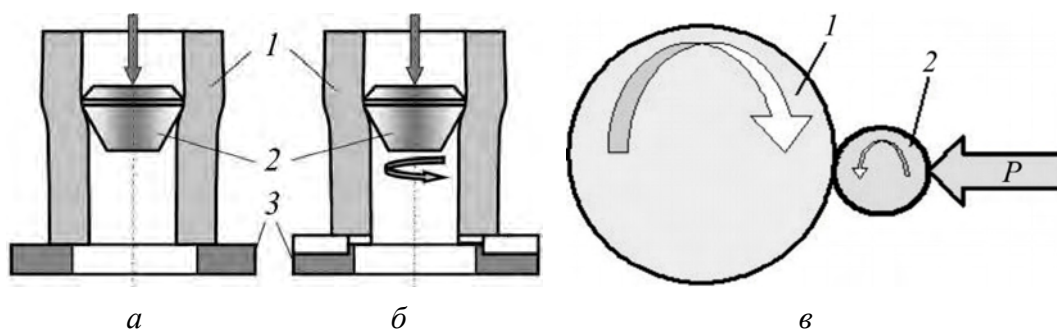


Рис. 2. Схема деформирующего протягивания (*a*), протягивания с вращением (*б*) и накатки (*в*): 1 – образец, 2 – инструмент, 3 – опора

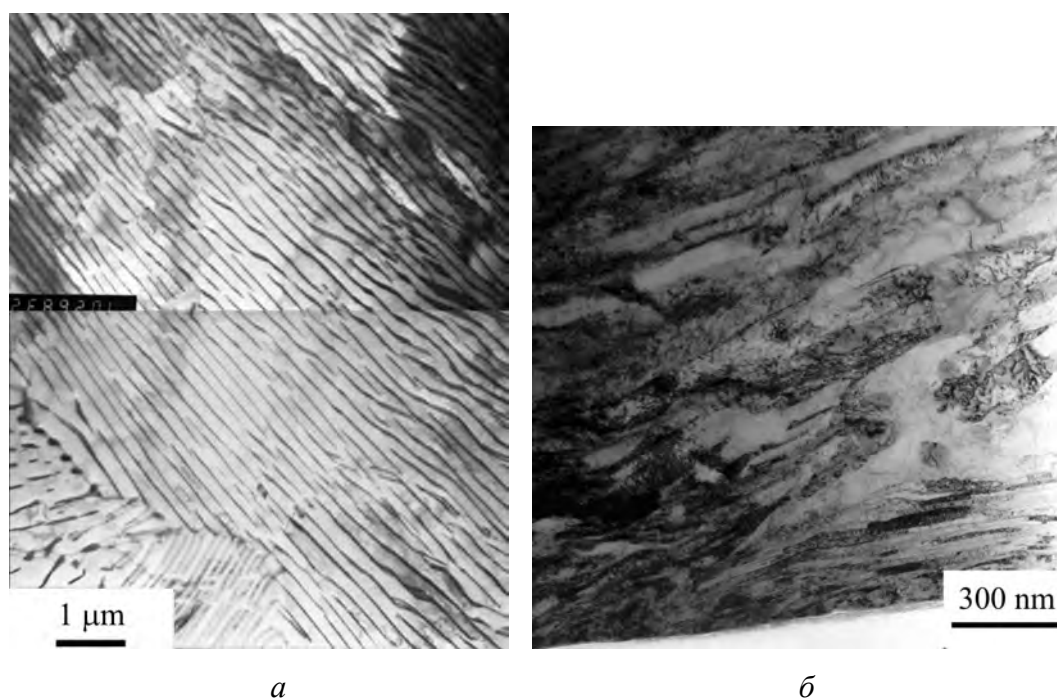


Рис. 3. Структура стали 65Г в исходном состоянии (*a*) и после накатки (*б*)

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 (*b*) and roll forming (*c*): 1 – sample, 2 – tool, 3 – support

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