

05.1;11

Об особенностях наноиндентирования поверхностного слоя стали Гадфильда после испытаний на трение

© А.В. Колубаев, Е.А. Колубаев, О.В. Сизова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

E-mail: root@ispms.tomsk.ru

Поступило в Редакцию 1 мая 2007 г.

Представлены результаты измерения нанотвердости деформированного поверхностного слоя стали Гадфильда после испытаний на трение. Обнаружено явление восстановления формы поверхности после индентирования, которое сохраняется в течение нескольких дней после испытаний. Высказано предположение о существовании в деформированном материале эффекта, подобного нелинейной упругости.

PACS: 62.20.Qr

Сталь Гадфильда¹ обладает уникальными свойствами — высокой пластичностью, способностью к интенсивному деформационному упрочнению, а также низкой скоростью изнашивания при трении скольжения. Высокая износостойкость данной стали связана с деформационным упрочнением поверхностного слоя, в результате которого при трении формируется градиентная структура поверхностного слоя. Непосредственно на поверхности образуется слой, толщиной несколько микрометров, по механизму ротационной пластичности [1]. Он обеспечивает образование нанодисперсной структуры. Под ним располагается достаточно протяженный слой деформационного аустенита, зерна которого разделены на пачки плоскостями скольжения и двойниками. В границах этих мезодефектов существует структура с высокой плотностью дислокаций [2]. Уровень микротвердости слоя вблизи поверхности трения, по мнению [3], может возрастать в 3–4 раза и достигать 9–11 GPa. Интересно, что в особо нагруженных узлах трения применяется исключительно сталь Гадфильда, несмотря

¹ Р.Гадфильд (R.Hadfield) — английский металлург, запатентовавший состав стали Гадфильда в 1883 г.

на то что имеется много более твердых материалов. Некоторые стали, обладая способностью к наклепу при деформационном воздействии, уступают стали Гадфильда при трении скольжения, сопровождающемся ударными нагрузками или попаданием абразива в зону трения.

При сравнении деформированной структуры поверхностного слоя стали Гадфильда со структурами других сталей, образованными в результате трения скольжения примерно в одинаковых условиях, обнаруживаются существенные различия в характере деформирования. К ним, прежде всего, следует отнести толщину образующегося на поверхности трения слоя с нанокристаллической структурой. У стали Гадфильда она составляет 3–5 μm , что значительно меньше, чем у других сталей. Например, изучение процессов трения скольжения некоторых закаленных сталей — быстрорежущей Р6М5 и цементированной 15НЗМА, а также состаренного сплава 36НХТЮ — показало, что в образцах того же размера ($\sim 10\text{ mm}$) толщина наноструктурированного слоя составляет от 10 до 40 μm [4,5]. Анализ процесса трения других металлических материалов, включая композиционные [6], указывает на единую природу образования поверхностного слоя с ультрадисперсной (нанокристаллической) структурой, толщина которого может достигать 100 μm [7,8]. Особенности формирования данного слоя и его эволюция в процессе трения имеют принципиальное значение, так как структура слоя и его толщина прямо связаны с размерами частиц износа и скоростью изнашивания [8].

Еще одной отличительной чертой поведения стали Гадфильда при трении является образование характерной только для нее деформированной мезоструктуры [9]. О ней можно судить по деформационному рельефу (рис. 1, *a*) на предварительно отполированной торцевой поверхности втулок после проведения испытаний по схеме „вал–втулка“ (рис. 1, *b*). В результате трения полосы скольжения и двойники, присущие деформированной стали Гадфильда, наблюдаются на большом расстоянии от поверхности трения, достигающем более 2 mm при общей толщине образца 4 mm. У других металлов и сплавов деформационный рельеф наблюдался на расстоянии менее 1 mm.

Но самым удивительным был эффект восстановления формы поверхности, с которым мы столкнулись при измерении микротвердости данной стали после триботехнических испытаний. Заключался он в том, что при определении H_{μ} при нагрузке 0.98 N на боковой поверхности образца, где наблюдался деформационный рельеф, алмазный индентор

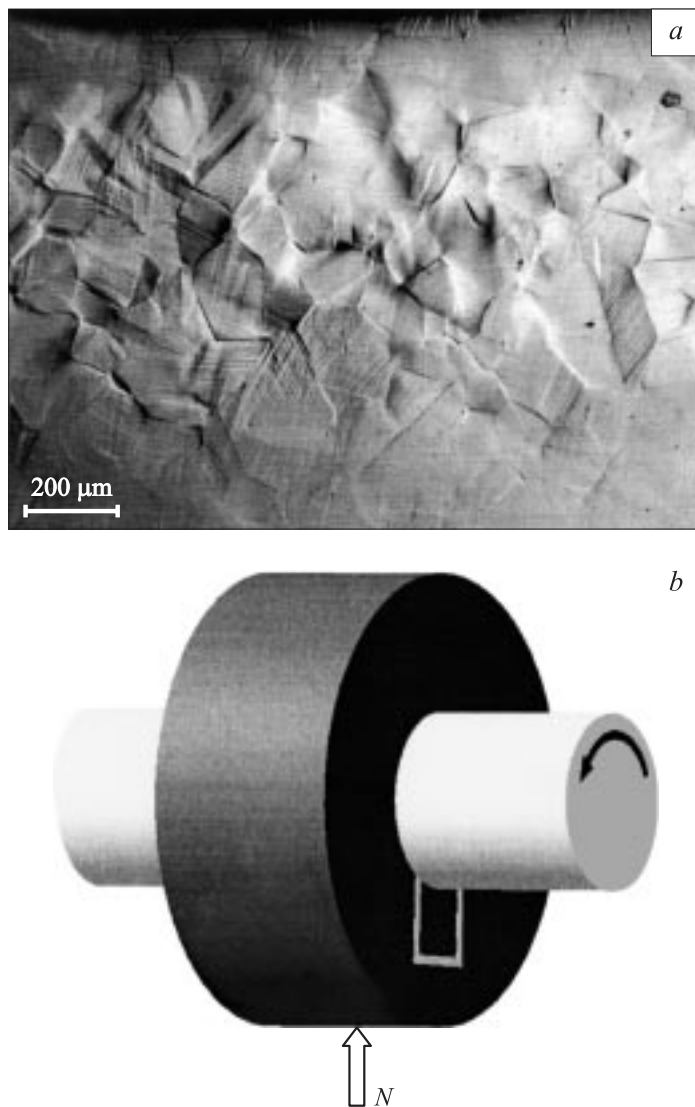


Рис. 1. *a* — деформированная мезоструктура поверхности, образованная в результате трения; *b* — схема испытаний „вал–втулка“; на торцевой поверхности втулки выделен участок поверхности, который показан на рис. *a*.

не оставлял отпечатка на расстоянии до $75\ \mu\text{m}$ от поверхности трения. Так как исследуемая сталь в результате наклепа не становится сверхтвердой, отсутствие отпечатка, по-видимому, обусловлено восстановлением формы поверхности после индентирования. Действительно, последующие исследования показали, что по истечении 8–12 дней после триботехнических испытаний микротвердость вблизи поверхности трения принимала свои обычные значения 7–9 GPa, характерные для стали Гадфильда. Иными словами, структура деформированного слоя сразу же после испытаний на трение является неравновесной и возвращается к равновесному состоянию спустя некоторое время. Достаточная продолжительность времени релаксации свидетельствует о высокой энергии активации процесса перехода к равновесному состоянию, который может быть обусловлен перераспределением атомов, и в первую очередь углерода.

Для проверки этого предположения были выполнены измерения нанотвердости по методу определения кинетической твердости с помощью прибора „Nano Hardness Tester“ фирмы CSEM,² который позволяет исследовать временные зависимости и коэффициенты скоростей чувствительности механических свойств как на стадии нагружения, так и на стадии разгрузки, сопровождающегося частичным восстановлением отпечатка. Нагружение индентора осуществляли с постоянной скоростью в течение 60 s. Максимальная нагрузка составляла в одной серии измерений 300 mN, в другой — 100 mN. Разгрузку проводили равномерно в течение одной и двух минут.

Измерения нанотвердости показали, что она практически везде совпадает со значениями H_{μ} , за исключением участка торцевой поверхности образца вблизи поверхности трения, на котором были получены кривые напряжений „нагрузка–разгрузка“ самого различного вида. На этом участке нанотвердость принимала значения от 25 (рис. 2, *a*) до 1.9 GPa (рис. 2, *b*), не подчиняясь никаким закономерностям. Кроме того, после разгрузки в месте индентирования отсутствовал отпечаток от алмазной пирамиды (рис. 3). По-видимому, вид данных кривых и величина нанотвердости, которую определяет прибор (рис. 2), зависит от ориентации зерен, плоскостей сдвига и двойников по отношению к оси нагружения. Снижение максимальной нагрузки при индентировании до 100 mN и уменьшение времени разгрузки в два раза показало рекордный результат величины твердости — 43 GPa. В этом случае

² Измерения были выполнены в Центре измерения свойств материалов (г.Томск).

Indentation simple

Max load: 300.00 mN
 Loading rate: 300.00 mN/min
 Unloading rate: 300.00 mN/min
 Date: 11/16/06
 Time: 12:00:45 PM

Vickers indenter

Serial number: V B-06 mlm 280801
 Material: Diamond

Results**Method**

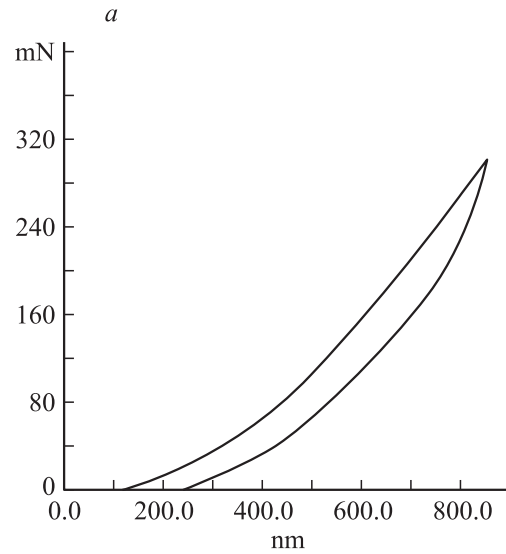
Oliver & Pharr

Main results

Hv = 2450.38 Vickers
 H = 25961.25 MPa
 E = 241.54 GPa

Hypothesis

Poisson = 0.30

**Indentation simple**

Max load: 300.00 mN
 Loading rate: 300.00 mN/min
 Unloading rate: 150.00 mN/min
 Date: 11/16/06
 Time: 12:26:30 PM

Vickers indenter

Serial number: V B-06 mlm 280801
 Material: Diamond

Results**Method**

Oliver & Pharr

Main results

Hv = 182.90 Vickers
 H = 1937.77 MPa
 E = 58.32 GPa

Hypothesis

Poisson = 0.30

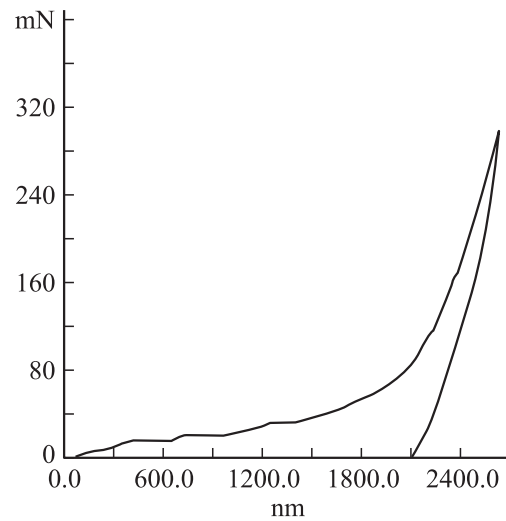


Рис. 2. Кривые „нагрузка–разгрузка“ при наноиндентировании поверхности, на которой не проявлялись отпечатки от индентора. *a* — скорости нагружения и разгрузки равны; *b* — скорость разгрузки в два раза меньше скорости нагружения.

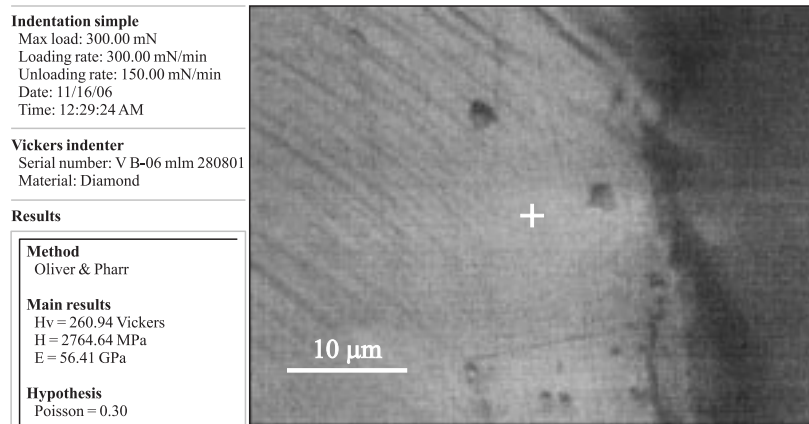


Рис. 3. Участок торцевой поверхности втулки вблизи зоны трения, на котором проводили измерение твердости. Крестиком отмечено место индентирования; слева приведены полученные результаты.

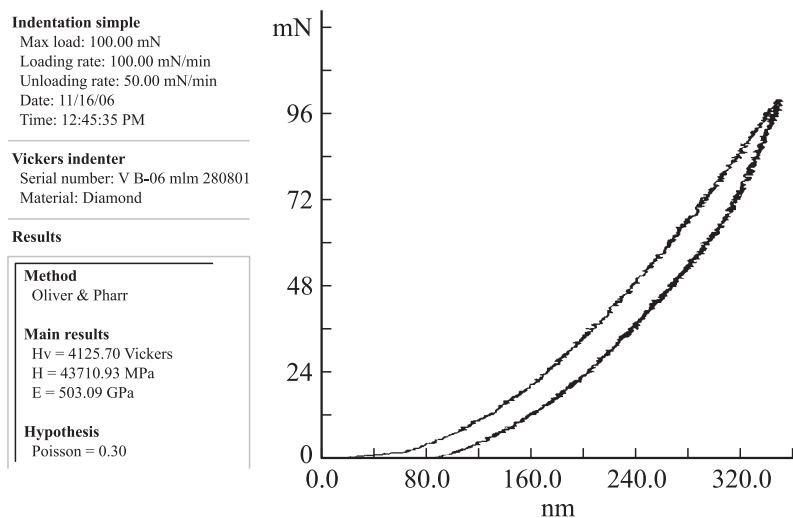


Рис. 4. Кривая „нагрузка–разгрузка“ при наноиндентировании поверхности, показанной на рис. 2, со скоростью нагружения — 100 мН/с и разгрузки — 50 мН/с.

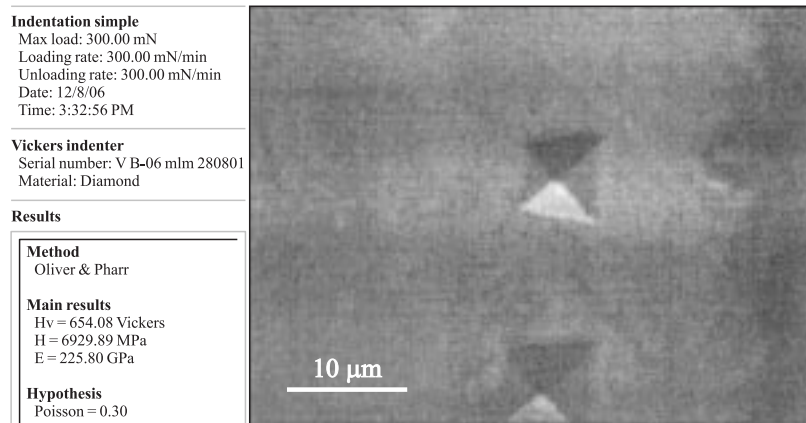


Рис. 5. Отпечатки от алмазного индентора, полученные при измерении нанотвердости, по прошествии 22 дней после испытаний на трение.

кривая изменения напряжения при разгрузке лишь незначительно отличалась от кривой нагружения (рис. 4). Объяснение такому явлению можно дать, исходя из способа определения нанотвердости, который основан на регистрации глубины остаточной деформации после индентирования. Эта глубина определяется по моменту отрыва индентора от поверхности образца. Как правило, упругое восстановление формы происходит с большей скоростью, чем скорость подъема индентора. Поэтому по остаточной деформации и можно определять твердость материала. В нашем случае упругость оказалась нелинейной, характеризующейся низкой скоростью восстановления формы после снятия нагрузки. Это и объясняет зависимость вида кривой напряжения от скорости разгрузки и отсутствие отпечатка от алмазной пирамиды после индентирования.

О частичной обратимости деформации в области пластического течения говорится в статье [10], в которой показано, что при растяжении монокристаллов стали Гадфильда с ориентацией в направлении [111] до деформации $\varepsilon = 2.5\%$ наблюдается обратимая деформация $\varepsilon_{rev} = 0.5\%$. Авторы связывают данное явление с изменениями тонкой структуры двойников деформации при нагружении вследствие перехода атомов внедрения (углерода) из октаэдрических междоузлий в тетраэдриче-

ские. Такие двойники могут быть упругими и исчезать при снятии напряжения, что вызывает обратимость деформации. Как отмечают авторы, подобный эффект имеет место и при сжатии монокристаллов с ориентацией [001]. В других направлениях эффект отсутствует.

В наших исследованиях деформированный в результате трения скольжения материал в поверхностном слое (толщиной $\sim 70 \mu\text{m}$) способен полностью восстанавливать форму после внедрения алмазного индентора. Однако по прошествии нескольких дней данный эффект исчезает, и после индентирования на поверхности остаются отпечатки (рис. 5). Величина нанотвердости при этом становится сравнимой с микротвердостью, измеренной в то же время.

Авторы благодарны И.А. Шулепову за оказанную помощь при проведении измерений нанотвердости.

Работа выполнена по проекту № 3.6.2.1 Программы 3.6.2 фундаментальных исследований СО РАН при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-00105-а).

Список литературы

- [1] Иванов Ю.Ф., Алешина Е.А., Колубаев Е.А., Колубаев А.В., Сизова О.В., Громов В.Е. // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 6. С. 83–90.
- [2] Heilmann P., Clark W.A., Rigney D.A. // Acta Met. 1983. V. 31. N 8. P. 1293–1305.
- [3] Коршунов Л.Г. // ФММ. 1992. № 8. С. 3–21.
- [4] Сизова О.В., Колубаев А.В. // Материалы, технологии, инструменты. 2000. Т. 5. № 2. С. 91–96.
- [5] Колубаев А.В., Попов В.Л., Тарасов С.Ю. // Изв. вузов. Физика. 1997. Т. 40. № 2. С. 89–95.
- [6] Колубаев А.В., Фадин В.В., Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1992. № 12. С. 64–68.
- [7] Попов В.Л., Колубаев А.В. // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 6. С. 818–826.
- [8] Panin V., Kolubaev A., Tarasov S., Popov V. // Wear. 2001. V. 249/10–11. P. 860–867.
- [9] Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Вагин И.Н., Сизова О.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 19. С. 6–13.
- [10] Чумляков Ю.И., Шехитоглу Х., Киреева И.В., Литвинова Е.И., Захарова Е.Г., Калашиников И.С. // ДАН. 1998. Т. 361. № 2. С. 192–195.