

Поверхностное упрочнение изделий сложной формы с использованием комплексных схем деформирования

С. А. Фирстов, С. Е. Шейкин*, Ю. Н. Подрезов,
Н. И. Даниленко, В. И. Даниленко, Н. Д. Рудык,
С. Ф. Студенец*, Д. А. Сергач*, А. Г. Рааб**

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: podrezov@ipms.kiev.ua

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев

**Уфимский государственный авиационный технический университет, РФ

Представлены результаты исследования изменения твердости в приповерхностных слоях стальных и титановых заготовок, упрочненных интенсивной поверхностной деформацией. Поверхностное упрочнение осуществляли методами протягивания с вращением, асимметричной накаткой и обжатием с одновременным протягиванием. Показано, что одновременное сочетание нескольких схем деформирования существенно повышает твердость поверхностных слоев. Установлено положительное влияние хладагента на процессы поверхностного упрочнения. Обнаруженные эффекты поверхностного упрочнения при сложных схемах нагружения объясняются особенностями структурообразования нанозерен деформационного происхождения.

Ключевые слова: микротвердость, градиентная деформационная структура, поверхностная интенсивная деформация.

В работе В. М. Сегала [1] показано, что при условии реализации чистого сдвига материал может накапливать большую деформацию, сохраняя макроразмеры во всех трех направлениях. К сожалению, недостаток простой схемы чистого сдвига состоит в том, что ее трудно реализовать из-за невозможности жесткого закрепления образца торцевыми захватами. На практике эта проблема решается использованием специальных схем деформирования: равноканальноуголового прессования [2, 3] или экструзии с кручением [4, 5]. Признавая несомненную прогрессивность этих разработок, следует все же отметить ограниченность их практического применения из-за малых размеров образцов и сложности применяемого оборудования. Методы поверхностной деформационной обработки в последние годы вызывают повышенный интерес. Среди них наиболее известны ударная [6] и ультразвуковая [7] обработки поверхности, поверхностное трение [8], метод волочения со сдвигом [9, 10] и другие.

С точки зрения практического применения в этом ряду особое место занимают технологии поверхностного деформирования изделий сложной формы, разработанные в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины [11, 12]. Это методы асимметричного пластического деформирования: деформирующее протягивание отверстий (рис. 1, а); редуцирование цилиндров (рис. 1, б) и накатывание сферических изделий плоскими

© С. А. Фирстов, С. Е. Шейкин, Ю. Н. Подрезов, Н. И. Даниленко,
В. И. Даниленко, Н. Д. Рудык, С. Ф. Студенец, Д. А. Сергач,
А. Г. Рааб, 2013

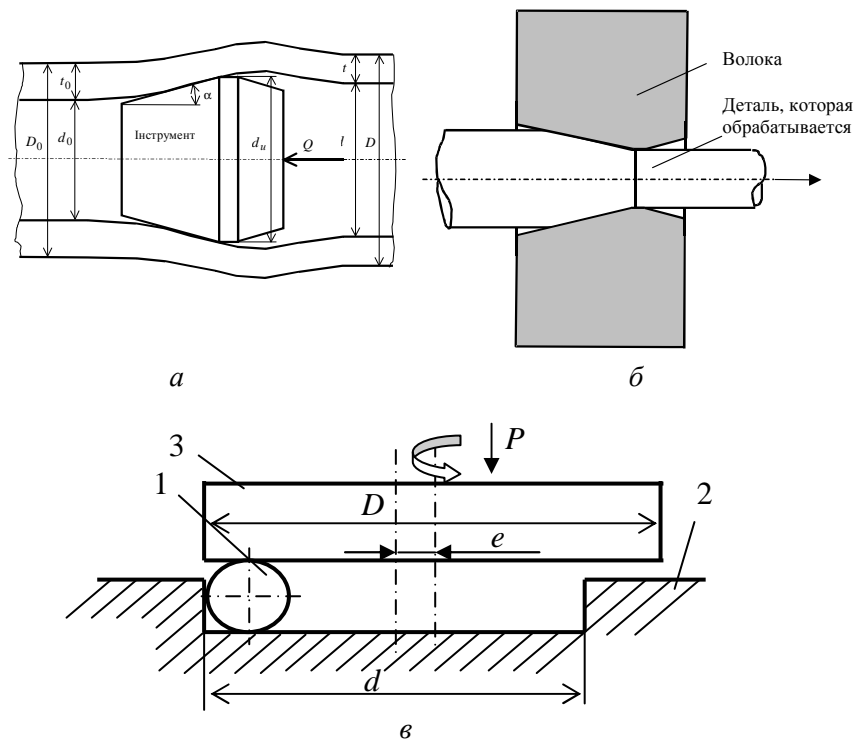


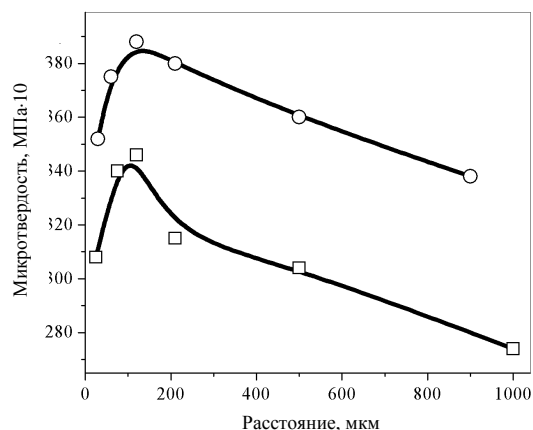
Рис. 1. Схемы процессов поверхностной обработки: деформирующее протягивание (а), редуцирование (б) и накатывание (в).

поверхностями (рис. 1, в). Данные технологии позволяют получать изделия с чрезвычайно высокой точностью геометрических размеров, уникально малой шероховатостью поверхности и вместе с тем с нанодисперсной структурой материала в приповерхностных слоях за счет реализации интенсивной сдвиговой деформации.

В наших предыдущих работах [13, 14] проанализированы законы структурообразования в приповерхностных слоях и продемонстрирована связь между параметрами градиентной структуры и механическими свойствами. Дальнейшее развитие этого научного направления предполагает разработку комплексных схем деформирования, когда одновременно с основной схемой сдвиговой пластической деформации применяется дополнительная схема нагружения. Эффективность такого подхода в последние годы неоднократно демонстрировалась специалистами в области интенсивной пластической деформации [15, 16].

Наиболее простой и показательный пример — реализация протягивания с одновременным прокручиванием заготовки. На рис. 2 представлены результаты экспериментов на трубных образцах, продеформированных по схеме, представленной на рис. 1, а. В одном из экспериментов протягивание осуществляли одновременно с прокручиванием. Дополнительное прокручивание позволяет значительно повысить твердость приповерхностных слоев. Сравнение полученных данных с результатами, полученными на образцах без прокручивания, показало, что прокручивание повышает эффективную деформацию с 0,6 до 1,1, а предел текучести в приповерхностной зоне — с 900 до 1200 МПа.

Рис. 2. Твердость поверхностного слоя образцов стали 35ХГСА после протягивания (□) и протягивания с прокручиванием (○).

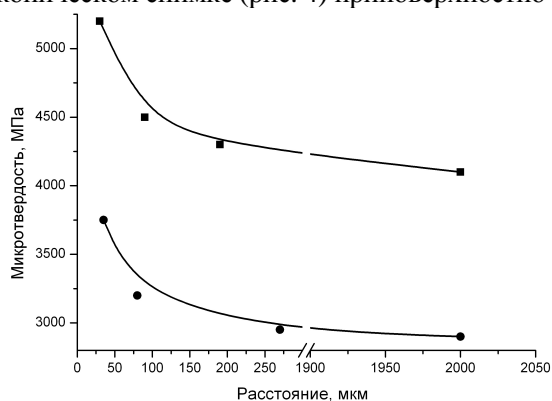


Другим примером комбинированного нагружения является накатывание сферических изделий плоскими поверхностями (рис. 1, в). Для его реализации сферический образец 1 помещают в цилиндрическую камеру 2. Обработку осуществляют вращающимся инструментом 3, который прижимается к заготовке с некоторым усилием. Чтобы контакт сферического изделия с инструментом последовательно охватил всю поверхность, ось инструмента необходимо располагать относительно оси камеры с некоторым эксцентриситетом e . При каждом следующем обороте изделия в камере происходит смещение следа контакта относительно предыдущего положения.

Для исследования структуры и механических свойств деформированные шары разрезали по диаметру на две равные половины. Микротвердость градиентного приповерхностного слоя измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 20 г. Измерения проводили вдоль диаметра шара с шагом 20 мкм. Структуру деформированных слоев изучали методом трансмиссионной электронной микроскопии. Для исследования структуры приповерхностных слоев использовали одностороннюю полировку.

Графики изменения твердости по сечению образцов из титановых сплавов ВТ-6 и ВТ-1,0 представлены на рис. 3. Видно, что твердость шара из технически чистого титана в приповерхностных слоях превышает твердость титана, продеформированного методом ИПД (3200 МПа) и достигает 3800 МПа. При этом деформированный слой имеет достаточно большую глубину, поскольку повышенная твердость сохраняется на глубину >1 мм. Сплав ВТ-6 демонстрирует более высокую поверхностную твердость (до 5200 МПа), однако разупрочнение происходит несколько быстрее. На электронно-микроскопическом снимке (рис. 4) приповерхностного слоя шара сплава ВТ-1,0, обработанного накаткой, наблюдаются разориентированные нанозерна размером 150—200 нм.

Рис. 3. Изменение твердости в глубину от поверхности шаров из титановых сплавов ВТ-6 (■) и ВТ-1,0 (●), подвергнутых асимметричной накатке.



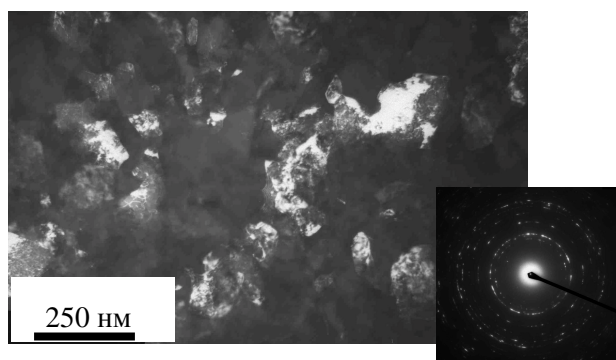


Рис. 4 Электронная микроскопия приповерхностного слоя шара из сплава ВТ-1.0, обработанного накаткой.

Для исследования влияния температуры накатки на закономерности упрочнения шаров проведены сравнительные эксперименты на шарах из стали 20, продеформированных при комнатной температуре и 77 К. Результаты экспериментов представлены на рис. 5. Образец, продеформированный при комнатной температуре, демонстрирует заметное упрочнение и, как и в случае титана технической чистоты, в поверхностных слоях упрочняется до твердости, соответствующей сильно деформированному состоянию. Затем упрочнение постепенно снижается на 1—1,5 мм в глубь образца. Образец, продеформированный в среде жидкого азота, демонстрирует аномально высокое упрочнение. Зафиксированная в приповерхностных слоях твердость 4500 МПа примерно в полтора раза выше твердости сильно деформированной стали 20. Отметим, что даже высокопрочные чугуны, обработанные накаткой при комнатной температуре, несколько уступают по упрочнению изделиям, полученным при обработке стали в хладагенте. Такое сильное упрочнение может быть вызвано особыми условиями образования деформационной наноструктуры. При низких температурах движение дислокаций тормозится высоким напряжением Пайерлса, что способствует возникновению нанозерен малого размера и, как следствие, сильному деформационному упрочнению. Следует учитывать, что при заданном давлении на инструмент (2000 Н) глубина деформированного слоя оказывается сравнительно небольшой (200 мкм).

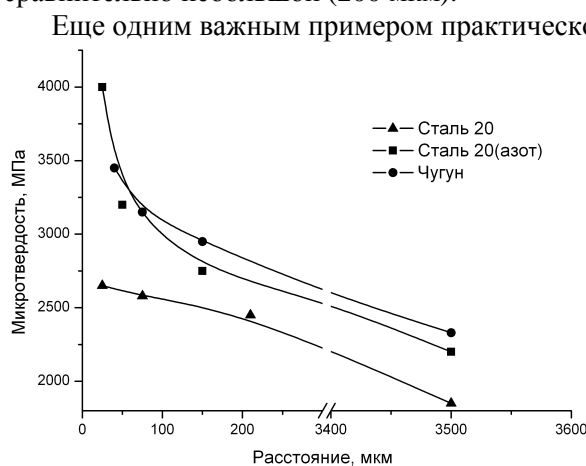


Рис. 5. Изменение твердости в глубину от поверхности шаров из сплавов железа, продеформированных асимметричной накаткой при 77 (▲ — сталь 20) и 293 К (■ — сталь 20 (азот); ● — чугун).

Рис. 6. Шлицевая втулка для железнодорожного транспорта.



промышленная технология изготовления шлицевых втулок для железнодорожного транспорта. В данной технологии применен метод редуцирования на подвижной фасонной оправке. Шлицевая поверхность

втулки (рис. 6) из стали 20Х формируется при использовании комплексной схемы деформирования, сочетающей редуцирование (обжатие) наружной поверхности заготовки специальными волокнами с одновременным вдавливанием внутренней поверхности в профильную оправку. Формирование полного шлицевого профиля происходит не менее

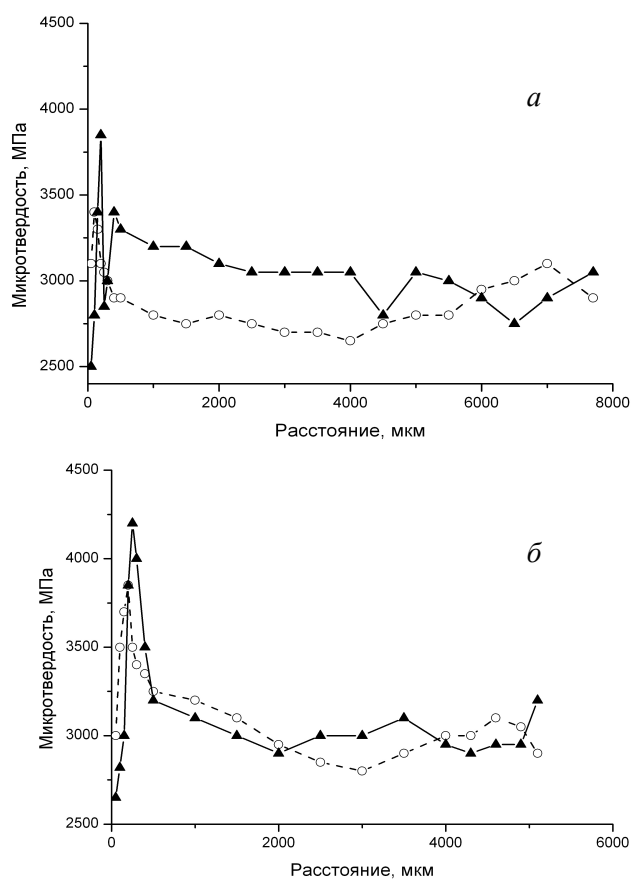


Рис. 7. Твердость от внутренней поверхности шлицевой втулки: в области шлицевого выступа (а) и шлицевой впадины (б): ▲ — плоскость, перпендикулярная оси втулки; ○ — плоскость, расположенная вдоль оси шлица.

чем за три цикла деформирования, причем внутренний диаметр последующей волоки меньше диаметра предыдущей [17]. В результате в рабочей зоне изделия — шлицевом профиле создается наноструктура деформационного происхождения и градиентное упрочнение с достаточно глубокой деформационной проработкой детали.

Результаты измерения твердости представлены на рис. 7 для области шлицевого выступа (рис. 7, а) и шлицевой впадины (рис. 7, б). Исследовано изменение твердости в глубину от поверхности для плоскости, перпендикулярной оси втулки, и для плоскости, расположенной вдоль оси шлица. Максимальная твердость наблюдается вблизи поверхности впадины на расстоянии ~500 мкм. Обращают на себя внимание чрезвычайно высокие значения твердости в приповерхностных слоях (больше 4000 МПа), что соответствует большой степени интенсивной деформации ($e \sim 2\text{—}3$) и большой глубине проработки деформационной субструктуры благодаря объемному обжатию на 15—20%. При этом твердость в плоскости, перпендикулярной оси втулки, заметно выше, чем в продольном направлении. Это объясняется большим обжатием участков вблизи впадины и уменьшением размеров структурных элементов в направлении обжатия.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности замены сложных операций точения и резания с последующей химико-термической обработкой на более простое деформирование холодным пластическим протягиванием, где процесс формообразования сопровождается упрочнением внутренних шлицевых поверхностей за счет создания деформационной наноструктуры.

Выводы

Использование комплексных схем поверхностного деформирования, предполагающих одновременное действие основной схемы сдвиговой пластической деформации и дополнительной схемы нагружения, позволяет значительно повысить поверхностное упрочнение изделий.

Реализация схемы протягивания с одновременным прокручиванием заготовки позволяет значительно повысить твердость приповерхностных слоев. Сравнение полученных данных с результатами, полученными на образцах без прокручивания, показало, что прокручивание повышает эффективную деформацию с 0,6 до 1,1, а предел текучести в приповерхностной зоне — с 900 до 1200 МПа.

Использование асимметричной накатки повышает твердость шара из технически чистого титана до величины 3800 МПа, что значительно выше твердости титана, продеформированного интенсивной пластической деформацией (3200 МПа), при этом деформированный слой имеет достаточно большую глубину, поскольку повышенная твердость сохраняется на глубину больше 1 мм.

Образец стали 20, продеформированный в среде жидкого азота, демонстрирует аномально высокое упрочнение. Отмеченная в приповерхностных слоях твердость 4500 МПа примерно в полтора раза выше твердости сильно деформированной стали 20 и не уступает твердости высокопрочного чугуна.

Использование комбинированного поверхностного деформирования для создания шлицевых втулок позволило значительно повысить

твердость в приповерхностных слоях (больше 4000 МПа) и достигнуть большой глубины проработки деформационной субструктуры. Максимальная твердость наблюдается вблизи поверхности впадины на расстоянии ~500 мкм, общая глубина упрочненного слоя достигает 1—3 мм.

Работа выполнена в рамках программы ДФФД-РФФД, проект № Ф53.7/30.

1. *Segal V. M.* Materials processing by simple shear // *Mater. Sci. Eng. A.* — 2002. — **197**. — P. 157—164.
2. *Сегал В. М.* Процессы структурообразования при пластической деформации металлов / [В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов и др.]. — Минск : Наука и техника, 1994. — 221 с.
3. *Kopilov V. I.* Investigation and application of severe plastic deformation // *Proc. of NATO ARW.* — Moscow, Russia, 1999.
4. *Beygelzimer Y.* On ultrafine grained materials: properties and structure // *Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, D. Orlov // Proc. of the Second Internat. Symp., Los Alamos Nat. Lab. Edition, 2002.* — P. 234—238.
5. *Beygelzimer Y.* Microstructural evolution of titanium under twist extrusion ultrafine grained materials / [Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, D. Orlov et al.] // *Processing and Structure.* — Washington, 2002. — P. 137—142.
6. *Lu K.* Nanostructure surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment / K. Lu, J. Lu // *Mater. Sci. & Eng. A.* — 2004. — **373—377**. — P. 38—45.
7. *Волосевич П. Ю.* Пластическая деформация в ультразвуковом поле и ее возможности применительно к насыщению углеродом поверхностных слоев образцов железа / [П. Ю. Волосевич, А. В. Козлов, Б. Н. Мордюк и др.] // *Металлофиз. новейшие технологии.* — 2003. — **25**, № 5. — С. 679—692.
8. *Belotsky A. V.* Strengthening of steel by friction in nitrogen atmosphere / A. V. Belotsky, A. I. Yurkova // *Technologi and Product Organization.* — 1988. — No. 2. — P. 40—43.
9. *Пат. 2347633 России.* Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом / Г. И. Рааб, А. Г. Рааб. — Опубл. 27.02.2009.
10. *Чукин М. В.* Применение полного факторного эксперимента в процессе волочения со сдвигом / [М. В. Чукин, А. Г. Рааб, В. И. Семенов и др.] // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова.* — Магнитогорск, 2012. — № 4.
11. *Розенберг О. А.* Технологическая механика деформирующего протягивания / О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин. — Воронеж : Гос. технол. акад., 2001.
12. *Розенберг А. М.* Новая комплексная методика испытания технологических смазок для обработки металлов давлением / [А. М. Розенберг, О. А. Розенберг, М. С. Пасечник и др.] // *Технологические смазки.* — Киев, 1971. — С. 32—37.
13. *Danylenko M.* Gradient structure formation by severe plastic deformation / [M. Danylenko, V. Gorban, Yu. Podrezov et al.] // *Nanomaterials by Severe plastic deformation (Ed. by Zenji Horita. Ttp Trans Tech publications switzerland-Germany-UK-USA) // Proc. of the 3th Internat. conf. on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation held in Fukuoka, Japan, September 22—26, 2005.* — P. 787—792.
14. *Розенберг О. А.* Формирование градиентной наноструктуры на поверхности деталей методом пластического деформирования / [О. А. Розенберг, Н. В. Новиков, С. Е. Шейкин и др.] // *Металлофиз. новейшие технологии.* — 2004. — **26**, № 1. — С. 1493—1500.
15. *Пащинская Е. Г.* Особенности пластической деформации малоуглеродистой стали под влиянием комбинированного нагружения кручением с растяжением

- / [Е. Г. Пашинская, И. И. Тищенко, В. В. Столяров, М. А. Кралюк] // Инженерная механика. Научные заметки. — Луцк : ЛДТУ, 2009. — Вып. 25, ч. II. — С. 182—189.
16. *Гогаев К. А.* Применение асимметричной прокатки для упрочнения компактного и пористого титана / [К. А. Гогаев, Н. И. Даниленко, В. С. Воропаев и др.] // Физика и техника высоких давлений. — 2007. — **17**, № 1. — С. 103—109.
17. *Нахайчук О. В.* Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: Монографія / [О. В. Нахайчук, О. О. Розенберг, В. А. Огородніков та ін.]. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 158 с.

Поверхневе зміцнення виробів складної форми з використанням комплексних схем деформації

С. О. Фірстов, С. Е. Шейкін, Ю. М. Подрезов, М. І. Даниленко,
В. І. Даниленко, М. Д. Рудик, С. Ф. Студенець, Д. А. Сергач, А. Г. Рааб

Наведено результати дослідження зміни твердості у приповерхневих шарах сталевих та титанових виробів, зміцнених інтенсивною поверхневою деформацією. Поверхневе зміцнення здійснюється методами протягування з обертанням, асиметричною накаткою та обтисненням з одночасним протягуванням. Показано, що одночасне поєднання кількох схем деформування значно підвищує твердість поверхневих шарів. Встановлено позитивний вплив хладоагентів на процеси поверхневого зміцнення. Виявлені ефекти поверхневого зміцнення при складних схемах навантаження пояснюються особливостями структуроутворення нанозерен деформаційного походження.

Ключові слова: мікротвердість, градієнтна деформаційна структура, поверхнева інтенсивна деформація.

Near - surface work-hardening of wares with complex shapes using a composite schemes of deformation

S. A. Firstov, S. E. Shejkin, Y. M. Podrezov, M. I. Danylenko, V. I. Danylenko,
N. D. Rudyk, C. F. Studenets, D. A. Sergach, A. G. Raab

Results of gradient hardening of steel and titanium billets strengthening by surface severe plastic deformation are proposed. Surface strengthening obtained by different methods: polling with rotation; asymmetric knurling or reduction with polling. It is shown that coincidence deformation obtained by application of some different schemes give essential rise of hardening. Cooling of machining surface may increase hardening, too. Strengthening effects may be considerably explained by mechanism of structural formation under combined technologies of surface plastic deformation

Keywords: microhardness, gradient deformation structure, near-surface severe deformation.