

УДК 539.213: 669.017

*Р.А. Филиппьев, С.В. Коновалов, В.Е. Громов*

## **ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ МЕТАЛЛОВ**

*R.A. Filipiev, S.V. Konovalov, V.E. Gromov*

Siberian State Industrial University,  
42 Kirova St., Novokznetsk, 654007, Russia

### **INFLUENCE OF CONTACT EFFECTS ON MICROHARDNESS OF METALS**

---

Экспериментально исследовано влияние контактных воздействий на микротвердость технически чистых железа, вольфрама и титана. Сравняется характер влияния присоединяемого циркония и меди на микротвердость исследуемых металлов. Установлена скачкообразная зависимость изменения микротвердости при влиянии присоединяемого металла.

МИКРОТВЕРДОСТЬ. КОНТАКТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ. ВОЛЬФРАМ. ТИТАН. ПОСТОЯННАЯ ХОЛЛА. РАБОТА ВЫХОДА.

The influence of contact effects on microhardness of technically pure iron, tungsten and titanium is experimentally investigated. Nature of influence of attached zirconium and copper on microhardness of studied metals is compared. Spasmodic dependence of change of microhardness is established at influence of attached metal.

MICROHARDNESS. CONTACT EFFECTS. TUNGSTEN. TITANIUM. HALL CONSTANT. EXIT WORK.

---

Известно явление облегчения деформации металлов за счет электрического заряжения поверхности при возникновении двойного электрического слоя, приводящего к снижению удельной поверхностной энергии [1]. С этим явлением часто связывают результат воздействия на процессы трения, изнашивания, металлообработки и т. п. Вместе с тем микроскопический механизм разупрочнения изучен слабо. Известно, что в его основе лежит облегчение выхода скользящих дислокаций на поверхность, обусловленное снижением поверхностного потенциального барьера. Возникновение двойного электриче-

ского слоя является результатом взаимодействия соприкасающихся фаз благодаря избыточной поверхностной энергии [1, 2].

Ранее в наших работах [3, 4] было показано, что изменение плотности поверхностной энергии, вызванное электрическим потенциалом (до 5 В), существенно сказывается на таких характеристиках металла, как микротвердость. Изменение микротвердости алюминия и меди при воздействии электрического потенциала приводит к изменению скорости ползучести и релаксации механических напряжений [3, 5, 6]. Отметим, что изучение электрических эффек-

тов, вызванных пластической деформацией, позволяет лучше понять природу упрочнения, усталости и ползучести металлов, позволяет оценить энергию возникновения и движения вакансий.

Цель настоящей работы, продолжающей исследования [3, 4], – установление влияния различных масс металлов, подключаемых к образцам, на микротвердость.

### Материал для исследования и методики испытаний

Настоящие исследования выполнены на образцах технического чистого вольфрама, чистого железа марки 0,08ЖР и технического чистого титана марки ВТ-1. Для подключения к данным образцам использовали пластины циркония и меди, массы которых варьировались до 40 и 25 г, соответственно. Отметим, что выбор как самих металлов, так и их масс связан с наибольшей выраженностью эффекта от их подключений, как показали результаты наших прежних исследований [3 – 5].

Измерение микротвердости осуществлялось на микротвердомере HVS-1000. Величина нагрузки на индентор составляла 1,5 Н для титана и вольфрама и 1 Н для железа. Температура при проведении испытаний составляла 300 К. Как и в работах [3, 4], на исследуемые образцы при измерениях мы воздействовали электрическим потенциалом, возникающим вследствие контактной разности потенциалов при присоединении металла с работой выхода электронов, отличной от исследуемого (рис. 1).

Электрический контакт с образцом во всех экспериментах осуществлялся медным проводом диаметром 1 мм. Во время измерений исследуемый образец и подключаемый металл изолировались от микротвердомера и земли.

Подобная постановка задачи интересна для нахождения величины критической минимальной массы подсоединяемого металла, приводящей к существенному изменению микротвердости. Наблюдаемый эффект, состоящий в изменении микротвердости при указанном выше воздействии, оценивался безразмерным отношением

$$Q = \frac{\overline{HV}_E - \overline{HV}_0}{\overline{HV}_0},$$

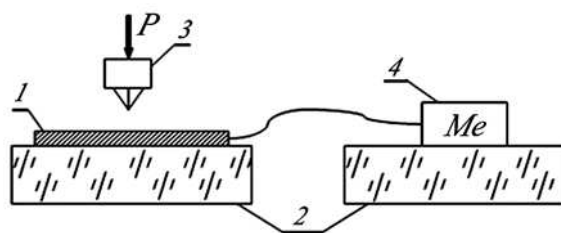


Рис. 1. Схема подключения разнородных металлов (Me) к образцу, исследуемому на микротвердость: 1 – образец, 2 – изоляционный слой, 3 – индентор, 4 – подключаемый металл (P – нагрузка на индентор)

где  $\overline{HV}_E$ ,  $\overline{HV}_0$  – средние значения микротвердости исследуемого металла при заданном электрическом воздействии на него и без этого воздействия, соответственно.

Микротвердость определялась как среднее значение по 30 измерениям. Для обработки данных использовались стандартные методы математической статистики [7].

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты измерений микротвердости различных металлов в зависимости от массы циркония и меди приведены на рис. 2. Видно, что влияние массы подключаемого металла имеет сложный и неоднозначный характер, однако во всех случаях наблюдается тенденция к стабилизации значений микротвердости.

Как и в работе [4], максимальный эффект изменения микротвердости наблюдается при значениях масс подключаемых металлов, не превышающих 5 г. Это указывает на существенное влияние именно малых подключаемых масс. В таблице представлены результаты максимального относительного изменения значений микротвердости металлов в результате присоединения малых масс циркония и меди.

Обращают на себя внимание «двойные» максимумы при подключении циркония (см. кривые 1 на рис. 2, а, в) и меди (кривая 2 на рис. 2, б). Проведенное ранее микроиндентирование алюминия циркония, меди, кремнистого железа при подключении олова, меди, циркония, алюминия (в разных вариациях) [3, 4] показывало только один экстремум.

Из рис. 2, а, в видно, что подключение к железу циркониевых пластин, а к титану мед-

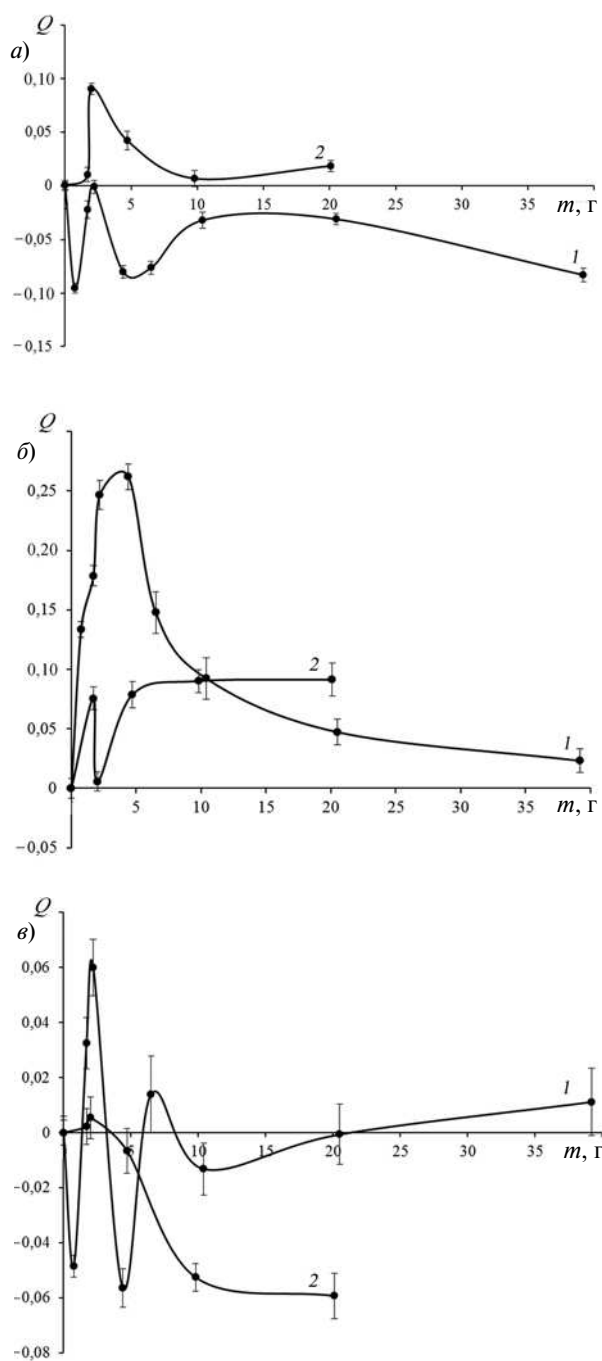


Рис. 2. Зависимости относительного изменения микротвердости железа (а), вольфрама (б), титана (в) от массы присоединенных циркония (1) и меди (2)

ных приводит к уменьшению микротвердости. Исследования, проведенные в данной работе и ранее в работах [3, 4] на других металлах, показывали только увеличение микротвердости. По-видимому, физическая природа данных воз-

действий существенно различна и зависит от выбора металла.

#### Изменение микротвердости образцов металлов при возникновении контактной разности потенциалов

Металл образца	Присоединяемый металл (масса пластины, мг)	$Q$ при максимальном эффекте
W	Zr (4,4)	0,262
	Cu (20,1)	0,091
Fe	Cu (2)	0,090
Ti	Zr (2,2)	0,059
	Cu (2)	0,005

Объяснение полученных в работе зависимостей может основываться на фактах различия как знаков, так и значений постоянной Холла, а также значений работы выхода электронов для основного и присоединяемого металлов. Известно, что знак постоянной Холла (знак заряда носителей) свидетельствует о преобладании электронной ( $R < 0$ ) или дырочной ( $R > 0$ ) проводимости [8]. В свою очередь разность работ выхода, отнесенная к заряду электрона, указывает на контактную разность потенциалов, возникающую при контакте металлов.

Роль массы присоединяемого металла, по-видимому, связана с тем, что увеличение этой массы приводит к соответствующему увеличению площади поверхности этого металла и, соответственно, к изменению количества зарядов на его поверхности. Однако пока остается неясной немонотонность кривых, приведенных на рис. 2.

При контакте двух металлов с различными значениями работы выхода электроны от металла с меньшим значением переходят к металлу с большим, и при достижении равновесия первый металл заряжается более положительно по отношению ко второму. Поэтому, чем больше разница значений работы выхода между испытуемым образцом и воздействующим на него, тем сильнее должно быть влияние на микротвердость.

Возникающая при контакте разнородных металлов контактная разность потенциалов [8] вызывает перезарядку имеющихся на их поверхности двойных электрических слоев. Это, в свою очередь, приводит к изменению плотности поверхностной энергии исследуемого материала, что, естественно, вызывает соответствующее изменение механических свойств, в частности микротвердости.

Влияние заряженного поверхностного слоя на микротвердость включает, по-видимому, два эффекта. Первый обусловлен изменением размеров образца вследствие наличия заряда на поверхности (электрострикционный эффект), второй – перемещением дислокаций и других дефектов при изменении характера заряженного поверхностного слоя. Второй эффект, связанный с движением дефектов, предполагает присутствие на них определенного заряда [9].

Поскольку двойной слой не может создавать макроскопические поля вне металла, эти поля должны возникать благодаря наличию макроскопического распределения суммарного электрического заряда на поверхностях. Величина заряда, перераспределенного между поверхностями и ответственного за создание таких внешних полей, чрезвычайно мала по сравнению с величиной заряда, перераспределенного между соседними поверхностными ячейками и ответственного за создание двойного слоя. Соответственно электрическое поле внутри двойного слоя достигает огромных значений по сравнению с величиной внешнего электрического поля, создаваемого суммарным поверхностным зарядом. После установления равновесия электроны в каждом из металлов должны иметь общий химический потенциал. Это достигается путем мгновенного перетока заряда с поверхности одного металла на поверхность другого. Поверхностный заряд на каждом металле создает внутри каждого дополнительный потенциал, который равномерно «поднимает» или «понижает» все глубинные уровни вместе с химическим потенциалом (поэтому объемные свойства внутри металла не меняются).

Поскольку произошла передача заряда, два металла уже не будут иметь равные электростатические потенциалы. Разность потенциалов между любыми двумя гранями двух металлов

можно выразить через их работы выхода, воспользовавшись теми же соображениями, как и при нахождении разности потенциалов между двумя неэквивалентными гранями в образце из одного металла.

По-видимому, в нашем случае при контакте разнородных металлов происходят изменения в электронной подсистеме, оказывающие влияние на движение дислокаций. Возможно образование дефектов, блокирующих перемещение дислокаций. Как известно, поверхностная энергия влияет на механические свойства металлов, и в частности, на величину модуля сдвига [10], энергию взаимодействия дислокаций и энергию дефектов упаковки. В используемой схеме опыта должно происходить изменение поверхностной энергии контактирующих металлов, поскольку вследствие контакта и перетекания электронов по проводнику на поверхности металлов образуются электронные или дырочные дефекты. Теоретическое рассмотрение процесса адсорбции электронов при нарушении контакта металлов позволяет связать наблюдаемые явления с выделением энергии за счет релаксации электронов при установлении термодинамического равновесия [11]. Выделение энергии может приводить к изменению интенсивности перемещения дислокаций при микроиндентировании. Ранее в работе [12] была исследована перестройка дислокационных субструктур при изменении электрического состояния образца (подключение малых потенциалов) в процессе релаксации напряжений. Было показано, что происходит изменение объемных долей полосовой и фрагментированной субструктур при потенциалах 0,5 и 1,0 В.

Однако для более корректного ответа на вопрос о роли массы подключаемых металлов в изменении микротвердости необходимы дополнительные точные прецизионные исследования.

Авторы выражают благодарность докторам физико-математических наук, профессорам Л.Б. Зуеву и В.И. Данилову за плодотворное обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» (Соглашения № 14.В37.21.1166 и 14.В37.21.0391).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кунин, Л.Л.** Поверхностные явления в металлах [Текст] / Л.Л. Кунин. – М.: Металлургиздат, 1955. – 304 с.
2. **Баранов, Ю.В.** Эффект А.Ф. Иоффе на металлах [Текст] / Ю.В. Баранов. – М.: МГИУ, 2005. – 140 с.
3. **Зуев, Л.Б.** О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, Р.А. Филиппьев [и др.] // Металлы. – 2010. – № 4. – С. 39 – 45.
4. **Зуев, Л.Б.** О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов / Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, С.В. Коновалов [и др.] // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – Вып. 6. – С. 1077 – 1080.
5. **Коновалов, С.В.** О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия / С.В. Коновалов, В.И. Данилов, Л.Б. Зуев, Р.А. Филиппьев [и др.] // ФТТ. – 2007. – Т. 49. – Вып. 8. – С. 1389 – 1391.
6. **Невский, С.А.** Изменение параметров релаксации напряжений алюминия А85 под влиянием электрического потенциала при различных температурах [Текст] / С.А. Невский, С.В. Коновалов, В.Е. Громов // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математика. Механика. Физика. – 2010. – Вып. 3. – № 30 (206). – С. 74 – 78.
7. **Митропольский, А.К.** Техника статистических вычислений [Текст] / А.К. Митропольский. – М.: Госизд-во физ.-мат. лит.-ры, 1961. – 479 с.
8. **Ашкрофт, Н.** Физика твердого тела [Текст]: В 2 тт. Т. 1. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – 399 с.
9. **Клыпин, А.А.** О пластической деформации металлов при наличии электрического воздействия [Текст] / А.А. Клыпин // Проблемы прочности. – 1975. – № 7. – С. 20 – 25.
10. **Клыпин, А.А.** Влияние контакта разнородных металлов на ползучесть меди и алюминия [Текст] / А.А. Клыпин, А.А. Лучина // Известия АН СССР. – 1985. – № 2 (отдельный оттиск). – С. 138 – 146.
11. **Клыпин, А.А.** Исследование ползучести при нарушении контакта между металлами [Текст] / А.А. Клыпин, А.А. Лучина // Техническая физика. – 1985. – № 2. – С. 370 – 373.
12. **Иванов, Ю.Ф.** Влияние электрического потенциала на процесс перестройки дислокационных субструктур алюминия при релаксации напряжений [Текст] / Ю.Ф. Иванов, С.А. Невский, С.В. Коновалов [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – № 1(116). – 2011. – С. 78 – 81.

---

**ФИЛИППЬЕВ Роман Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры физики Сибирского государственного индустриального университета.  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
Filipiev@ilve.ru

**КОНОВАЛОВ Сергей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры физики Сибирского государственного индустриального университета.  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
konovalov@physics.sibsiu.ru

**ГРОМОВ Виктор Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Сибирского государственного индустриального университета.  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
gromov@physics.sibsiu.ru