

УДК 539.211+620.1

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СКАНИРУЮЩИМ ДАТЧИКОМ КЕЛЬВИНА

Н. А. Шипица

Институт порошковой металлургии, ул. Платонова 41, г. Минск, Беларусь

Метод Кельвина заключается в измерении контактной разности потенциалов, возникающей между измеряемой поверхностью и поверхностью эталонного образца. При этом измеряемый и эталонный образец образуют плоский конденсатор и не контактируют между собой. Величина контактной разности потенциалов будет определяться разностью работ выхода электрона эталонного образца и исследуемого:

$$U = \frac{\Phi_i - \Phi_s}{e} \quad (1)$$

Вследствие высокой чувствительности метод используют в физико-химических исследованиях [1], при исследовании процессов трения [2], а также при изучении деформации и разрушении металлических твердых тел.

Работа выхода электрона Φ - энергия, которую необходимо затратить для удаления электрона из твердого или жидкого вещества в вакуум. Если электростатический потенциал в вакууме φ_0 , в веществе φ_i , а E_F - энергия Ферми, то работа выхода электрона определяется уравнением [2]:

$$\Phi = (\varphi_i - \varphi_0) - E_F = \Delta\varphi - E_F = 4\pi P_s - E_F \quad (2)$$

Величина $\Delta\varphi$ представляет собой разность между электростатическим потенциалом электрона внутри металла и электростатическим потенциалом электрона вне металла в определенной точке; $\Delta\varphi$ зависит от состояния поверхности металла и, следовательно, от ее структуры. При этом $\Delta\varphi = 4\pi P_s$, где P_s - дипольный момент двойного слоя, приходящейся на единицу площади поверхности. Отсюда следует, что работа выхода зависит как от состояния объема металла E_F , так и от состояния его поверхности P_s . Эта вторая компонента зависит от кристаллографической ориентации поверхности, адсорбированных атомов, наличия на поверхности дефектов, микрошероховатости поверхности и т. д.

В данной работе представлены экспериментальные исследования влияния деформации на изменение работы выхода электрона.

Методика исследований

Эксперименты проводились по трем схемам нагружения:

а) **при одноосном растяжении**. Исследование деформации выполнялись на испытательной машине типа "Instron". Образец соответствующей формы и разме-

ров устанавливался в испытательную машину. Одна из сторон образца шлифовалась, затем полировалась. У подготовленной поверхности образца помещался датчик Кельвина. В процессе рабочего цикла испытательной машины одновременно записывались удлинение образца и работа выхода электрона в зависимости от приложенной нагрузки. Кроме того, после достижения заданной деформации испытания прекращались, образец снимали с машины и проводили регистрацию распределения работы выхода электрона по поверхности образца [3].

б) при сжатии. Образцы кубической формы устанавливались в испытательную машину и подвергались сжатию через стеклянную пластинку в течение 30 с. Затем образцы снимались с испытательной машины для регистрации распределения работы выхода электрона по контактирующей поверхности. Определялся параметр шероховатости контактной поверхности R_a . Описанные выше манипуляции повторялись с постоянно увеличивающейся удельной нагрузкой, что позволяло получить зависимости работы выхода электрона контактной поверхности, а также R_a контактной поверхности от приложенной удельной нагрузки.

в) при точечном нагружении. Образцы устанавливались на столик твердомера Бринелль ТШ-2м, в испытуемый образец вдавливали шарик диаметром 5 мм с нагрузкой 7357 Н ($K = 30$). После нагружения образцы снимались со столика, и проводилось сканирование исследуемой поверхности и регистрация изменения работы выхода электрона по поверхности.

Все исследования топологии работы выхода электрона при деформации проводились на установке для оценки гомогенности прецизионных поверхностей [4].

Экспериментальные исследования

Типичные результаты по изменению работы выхода электрона при простом одноосном растяжении для некоторых материалов представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что до предела пропорциональности, т. е. в области упругих деформаций, работа выхода электрона изменяется незначительно. Наблюдается лишь некоторое увеличение работы выхода электрона с увеличением нагрузки (1 - 1,5 мэВ). Дальнейшая деформация, выше предела пропорциональности, приводит к резкому понижению работы выхода электрона с последующей тенденцией к насыщению (рис. 1).

Следует отметить, что уменьшение работы выхода электрона поверхности при переходе от упругой к пластической деформации наблюдается для всех исследуемых материалов.

В области упругих деформаций происходит сдвиг положения уровня Ферми металла за счет дилатации кристаллической решетки, что, в свою очередь, вызывает повышение работы выхода электрона [5, 6]. При упругом сжатии или растяжении происходит изменение компактности решетки металла, т. е. изменяется объем кристаллической решетки, а следовательно, и объем, занимаемый свободными электронами. Это вызывает изменение положения уровня Ферми и, следовательно, вызывает изменение работы выхода электрона [6, 7].

Более существенное влияние на работу выхода электрона оказывают дефекты кристаллической решетки металла. Особенно большое влияние на работу выхода электрона оказывают линейные дефекты (краевые и винтовые дислокации). Атомы в окрестностях дислокаций испытывают значительное гидростатическое дав-

ление, создаваемое ее полем напряжений. Авторами работы [8] теоретически оценено локальное изменение работы выхода электрона в месте выхода дислокаций на поверхность. Установлено, что у ядра дислокаций работа выхода электрона понижена приблизительно на 0,3 эВ. Поэтому интегральное значение работы выхода электрона поверхности может значительно изменяться с изменениями плотности дефектов. При этом задача ее определения сводится к задаче о пятнистом катоде. Такое рассмотрение, проведенное Минцем и Партенским [9], показало, что дислокации могут приводить к уменьшению работы выхода электрона поверхности на 10^{-2} - 10^{-1} эВ.

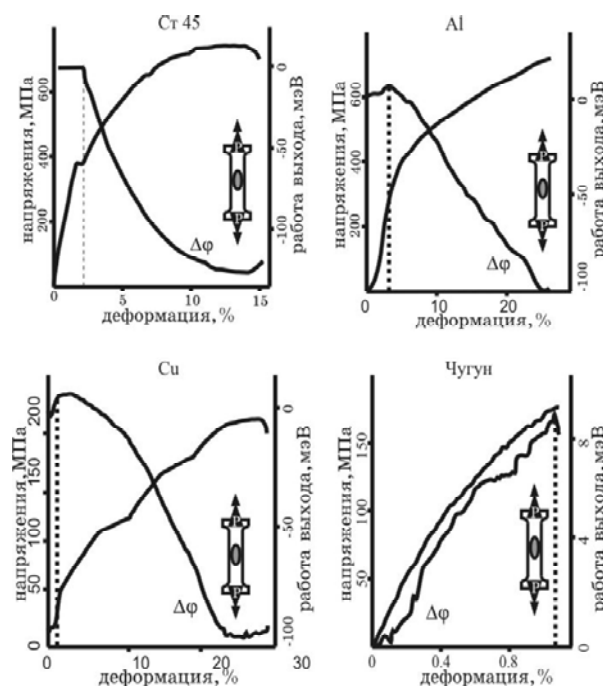


Рис. 1. Изменение работы выхода электрона при одноосном растяжении

Распределение работы выхода электрона по поверхности образцов при различной степени деформации представлено на рис. 2, 3. При напряжениях, меньших предела текучести, на всех образцах наблюдается незначительное изменение работы выхода электрона по поверхности (рис. 2, а). С увеличением степени деформации на алюминиевых образцах последовательно наблюдалось формирование обширной области с пониженной работой выхода электрона (рис. 2, б); ее деление на несколько областей (рис. 2, в), затем формирование узкой области с пониженной работой выхода электрона в зоне образования шейки (рис. 2, г). На образцах из стали и бронзы изменения топологии работы выхода электрона в основном идентичны наблюдаемым на алюминиевых образцах.

Следует подчеркнуть, что и на хрупких материалах также отмечены изменения топологии работы выхода электрона при одноосном растяжении.

В условиях контактной деформации изменения работы выхода электрона аналогичны полученным при растяжении. В области упругих деформаций среднее значение работы выхода электрона изменяется незначительно. Увеличение нагрузки выше некоторого предела приводит к резкому понижению работы выхода электрона с

последующей тенденцией к насыщению. Уменьшение работы выхода электрона наступают практически одновременно с уменьшением параметра шероховатости R_a . Корреляция изменений шероховатости и усредненной работы выхода электрона показывает, что изменение работы выхода электрона связано с пластической деформацией на контакте.

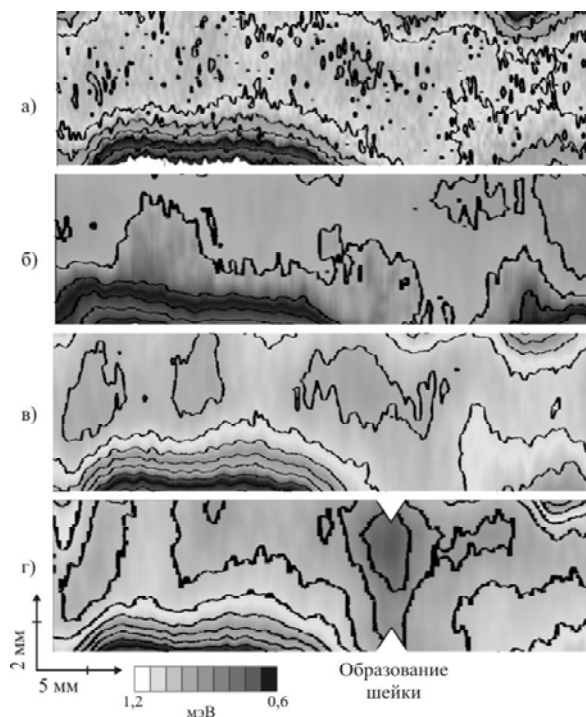


Рис. 2. Топология работы выхода электрона боковой поверхности образцов (Al) при деформации (а – 0.92, б – 4.52, в – 8.56, г – 24.56)

На рис. 3 представлена топология работы выхода электрона контактной поверхности образцов из стали. При небольших нагрузках (до 1 МПа) на поверхности наблюдаются отдельные области с некоторым понижением работы выхода электрона (рис. 3, б, в). С повышением нагрузки отмечено ее увеличение, и при давлении 8 МПа – уменьшение работы выхода электрона практически на всей площади контактной поверхности (рис. 3, г).

Изменение топологии работы выхода электрона после точечного нагружения поверхности приведено на (рис. 4). Следует обратить внимание, что на топологии достаточно хорошо наблюдаются эпюры распределения работы выхода электрона (рис. 4), которые вызваны неоднородностью пластической деформации вблизи точечного нагружения. Область изменения работы выхода электрона вблизи отпечатка больше, чем реальный размер отпечатка, и представляет собой фигуру сложной формы. На рис. 4 сплошным кругом изображен реальный размер отпечатка индентора.

Таким образом, экспериментальные исследования деформации материалов по изменению работы выхода электрона поверхности показали:

- процессы деформации материалов могут быть проконтролированы по регистрации изменений работы выхода электрона. В области упругих деформаций

работа выхода электрона изменяется незначительно, пластическая деформация приводит к резкому понижению работы выхода электрона с последующей тенденцией к насыщению. Большей степени деформации соответствует более значительное уменьшение работы выхода электрона;

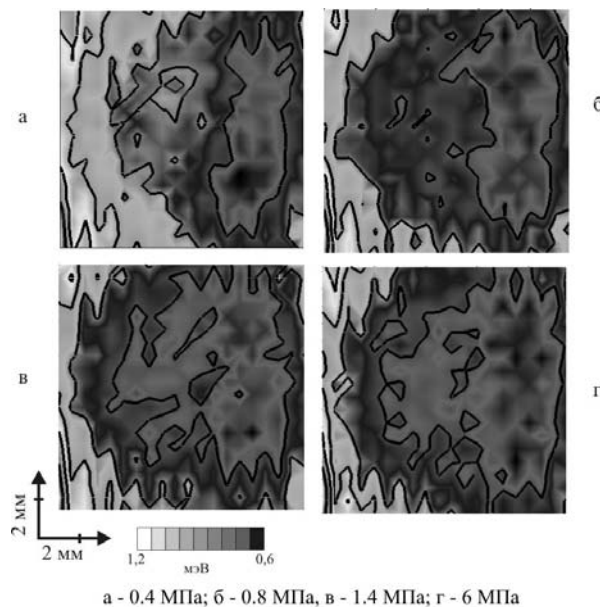


Рис. 3. Топология работы выхода электрона контактной поверхности

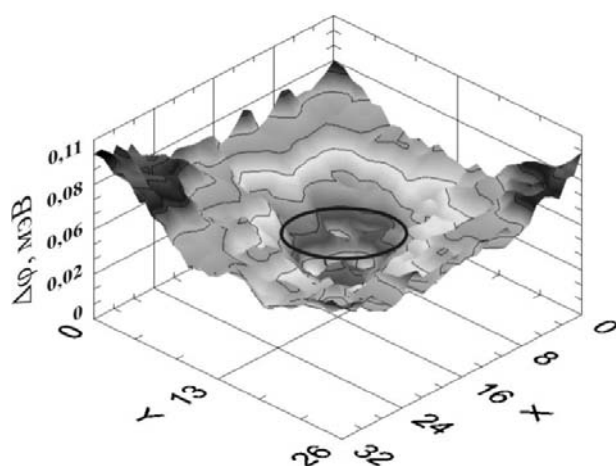


Рис. 4. Изменение работы выхода электрона поверхности Ст.5 после точечного нагружения

- топология (распределение) работы выхода электрона по поверхности образцов при деформации имеет сложную зависимость и определяется распределением плотности дефектов. В областях с повышенной плотностью дефектов работа выхода электрона меньше, чем в среднем по поверхности, и наоборот.

Литература

1. Ибрагимов Х. И., Корольков В. А. Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях. М.: Интермет Инженеринг, 2002. С. 526
2. Жарин А. Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. Мн.: Бестпринт, 1996. С. 240.
3. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. С. 564.
4. Жарин А. Л., Шипица Н. А., Сарока Д. И. Метод исследования поверхности металлов методом Кельвина // 4-й Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии: Сб. докл. Гомель., 24 - 25 октября 2000 г С. 22-26.
5. Генкин В. А., Жарин А. Л., Шипица Н. А., Дмитриевич А. Л., Фишбейн Е. И. Экспериментальное определение деформации материалов // В кн.: Механика и физика разрушения хрупких материалов. Киев, 1990 . С.148- 153.
6. Минц Р. И., Мелехин В. П., Партенский М. Б. Деформационное изменение работы выхода электрона //ФТТ. 1974. Т. 16, № 12. С. 3584-3586.
7. Андреев А. А., Галаев А. А. Исследование поверхности деформированного молибдена методом измерения работы выхода электрона //ФХММ. 1970. Т. 6, № 6. С. 19-24.
8. Крейг, Радека. Исследование зависимости КРП металлов от механического напряжения методом Кельвина //Приборы для научных исследований. 1970. № 2. С. 99-105.
9. Партенский М. Б. Изменение энергии Ферми металлических кристаллов, обусловленная дислокациями // Физика металлов и металловедение, 1971. т. 32, № 3. С.510-514.

