

**Заключение.** Сканирующим методом динамического зонда Кельвина выполнен мониторинг изменения РВЭ деформируемого поверхностного слоя. Предложенные методики исследований позволили установить характер зависимости РВЭ от степени деформации, который для всех исследуемых металлов и сплавов подобен: усредненная, по некоторой площади, РВЭ при нагрузках меньших предела упругости материала изменяется незначительно (~1мэВ), пластическая деформация приводит к резкому понижению РВЭ с последующей тенденцией к насыщению (~100мэВ). Большой степени деформации соответствует более значительное уменьшение РВЭ. Отсюда следует, что параметр РВЭ может характеризовать механические воздействия на поверхность микрообъемов материала как в упругой, так и в пластической области.

#### Список литературы

1. Жарин, А.Л. Влияние контактных деформаций на величину работы выхода электрона поверхностей / А.Л. Жарин, Е.И. Фишбейн, Н.А. Шипица // Трение и износ. – 1995. - № 3. – С. 47-54.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ В МЕТАЛЛАХ ПО ТОПОЛОГИИ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
[nilpt@tut.by](mailto:nilpt@tut.by)*

**Введение.** Напряженно-деформируемое состояние помимо накопления дефектов вызывает ряд процессов на поверхности и в объеме материала. Природа и закономерности этих процессов зависят от свойств деформируемого материала. Так, в сплавах – твердых растворах происходит разрушение ближнего или дальнего порядка в расположении атомов, рост статических смещений, образование сегрегации из атомов легирующего элемента и т.п. В дисперсно-упрочненных сплавах, широко используемых в технике, число процессов, происходящих при деформации оказывается еще большим. В них происходит растворение и образование новых дисперсных фаз, изменение стехиометрического состава и кристаллической структуры, имеющих в них выделений и другие сложные процессы. Изменение свойств материалов определяется не только характером взаимодействия дислокаций и других дефектов кристаллического строения, плотностью и равномерностью их распределения, изменяющихся в процессе температурно-силового нагружения, но и структурой, также изменяющейся во времени. В большинстве работ пластическое течение описывается с позиции общих закономерностей, однако природа взаимосвязи превращений дислокационной субструктуры с другими процессами, происходящими в материалах, остается недостаточно изученной. Знание закономерностей микронеоднородного деформирования важно для более глубокого раскрытия механизма пластической деформации материалов как простой, так и сложной структуры. Все это определяет важность исследований закономерностей эволюции дислокационной подсистемы.

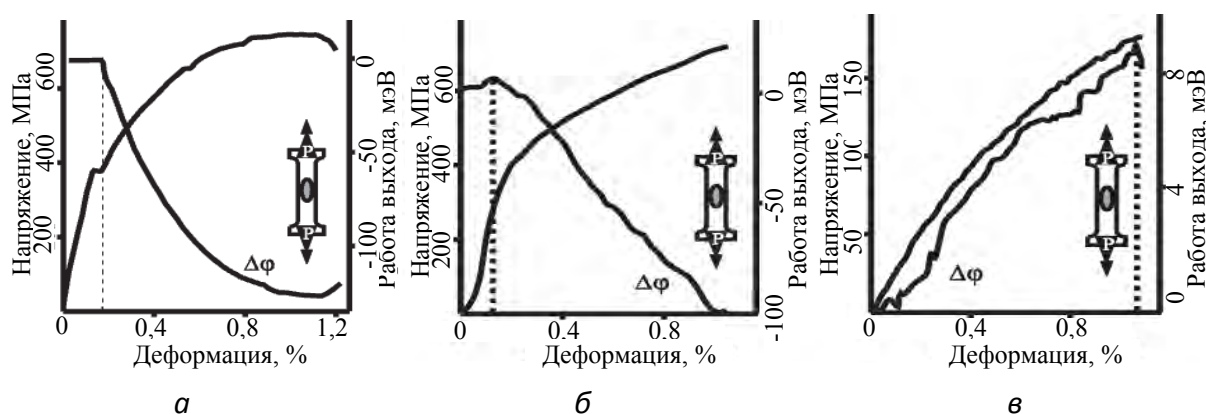
**Целью** работы является исследование локализации деформации в металлах при помощи методов, основанных на измерениях пространственного распределения работы выхода электрона (РВЭ).

**Материалы и методы исследований.** В качестве материалов опытных образцов использовались стали марок Ст45 (ГОСТ 1050-88), алюминий марки А5М (ГОСТ 21631-76), чугун марки СЧ 18-31 (ГОСТ 1412-70). Изготовление образцов и определение их прочностных характеристик осуществлялись по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение».

Испытания на растяжение проводились на испытательной машине "Instron". Образцы соответствующей формы и размеров устанавливались в испытательную машину. Испытания проводились на образцах с надрезом и без. Одна из сторон образца шлифовалась, затем полировалась. У боковой поверхности образца с обратной стороны надреза устанавливался датчик измерения РВЭ. В процессе рабочего цикла испытательной машины одновременно записывались удлинение образца и РВЭ в зависимости от приложенной удельной нагрузки. Кроме того, в характерных точках на кривой деформации испытания прекращались, образцы снимались с машины и производилась регистрация распределения РВЭ по поверхности образца.

Исследование топологии (распределения) РВЭ деформированных образцов проводили на установке для оценки гомогенности прецизионных поверхностей, разработанной в лаборатории полупроводниковой техники БНТУ. Принцип действия установки заключается в регистрации отклонения РВЭ по исследуемой поверхности при ее сканировании вибрирующим зондом Кельвина (зонд Кельвина-Зисмана) [1].

**Результаты и их обсуждение.** Результаты по изменению РВЭ при простом одноосном растяжении для различных материалов представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что до предела пропорциональности, т.е. в области упругих деформаций, РВЭ изменяется незначительно. Наблюдается некоторое увеличение РВЭ с увеличением нагрузки (1–1,5 мЭВ). Это согласуется с тем, что в области упругих деформаций происходит сдвиг положения уровня Ферми металла за счет дилатации кристаллической решетки, что в свою очередь, вызывает повышение РВЭ. Подобные эффекты сравнительно малы и, на практике, обычно находятся в пределах ошибки эксперимента. Дальнейшая деформация, выше предела пропорциональности, приводит к резкому понижению РВЭ с последующей тенденцией к насыщению. Такое понижение связано с образованием и перераспределением дислокаций в поверхностных слоях. С дальнейшим повышением нагрузки скорость изменения РВЭ уменьшается и не зависит от дальнейшего повышения нагрузки.

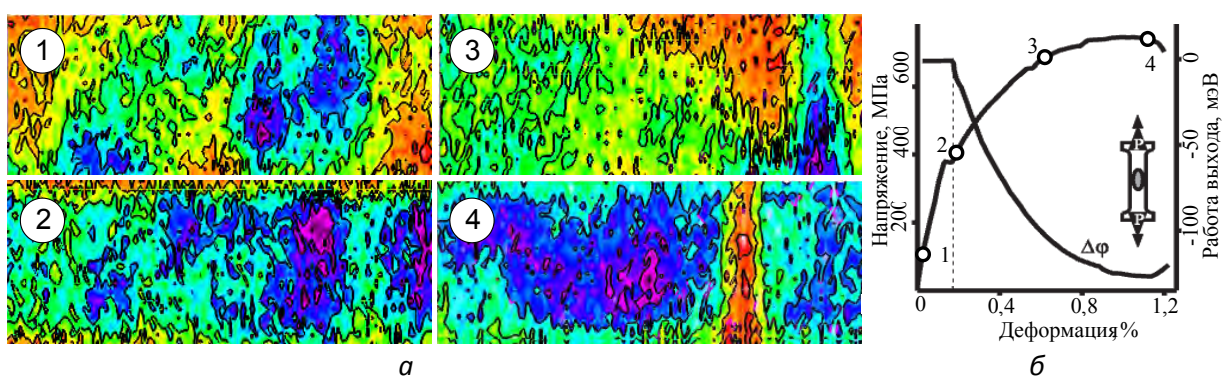


а – Ст. 45, б – А5М, в – СЧ 18-31  
**Рис. 1.** Изменение работы выхода электрона при одноосном растяжении

На рис. 2б представлены характерные точки, в которых проводилось сканирование поверхности образца из Стали 45, после деформирования при растяжении.

Цель эксперимента заключалась в выявлении мест с повышенной и пониженной плотностью дефектов, что позволило установить закономерности локализации деформации. В данном эксперименте, чтобы инициировать образование микротрещин вдоль опре-

деленной линии, а в дальнейшем и разрыв материала, в определенном месте был создан исходный дефект – надрез. На рис. 2а представлено изменение топологии РВЭ от степени деформации на образцах с надрезом. На образце, не подвергнутом деформации, наблюдается регулярно чередующиеся полосы отклонения РВЭ по поверхности, которые вызваны подготовкой образцов. Такие полосы, как правило, наблюдаются после шлифовки. При деформации порядка 0,1 и напряжениях меньших предела текучести, наблюдается незначительное изменение РВЭ по поверхности (рис. 2а-1). С увеличением деформации наблюдается значительный разброс РВЭ по поверхности и формирование области с низкой РВЭ (рис. 2а-1, -2). При дальнейшем увеличении напряжений наблюдается уменьшение размеров области с пониженной РВЭ (рис. 2а-3, -4). Перед разрушением наблюдается резкое повышение РВЭ в узкой области образования трещины и понижение РВЭ вне области разрушения (рис. 2а-4). После разрушения образца, распределение РВЭ по поверхности становится более ровным, что, по-видимому, связано с разрядкой дефектов на трещинах. Аналогичное поведение топологии РВЭ по поверхности образцов, подвергнутых деформации наблюдается и для образцов без надреза.



**Рис. 2.** Распределение работы выхода электрона боковой поверхности образцов при простом одноосном растяжении в характерных точках по диаграмме напряжения

Экспериментальные исследования показали, что для большинства образцов формирование трещины происходит именно в области пониженной РВЭ. Область с пониженной РВЭ, как правило, является областью с различными структурными дефектами. Для сталей и композиционных материалов областями с пониженной РВЭ могут являться зоны с неравномерным распределением неметаллических включений и частиц вторичной фазы, которые приводят к преждевременному разрушению. Неоднородность расположения первичных фаз и особенности распада твердых растворов сталей и сплавов существенно влияют на локализацию деформации и разрушение образцов. Таким образом, области с пониженным, в сравнении со средним по поверхности, значением РВЭ, потенциально являются областями образования и развития трещин приводящих к разрушению образцов. Формирование шейки и одновременное понижение РВЭ показывает, что в образце формируется локальная область с высокой плотностью дислокаций, которая является областью разрушения образца.

**Заключение.** В работе экспериментально исследованы закономерности образования и развитие области локальных деформации от степени деформации для ряда компактных материалов (сталь, алюминий, чугун) по изменению РВЭ исследуемой поверхности. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- топология РВЭ по поверхности образцов в процессе растяжения с постоянной скоростью имеет сложную зависимость и определяется распределением плотности дефектов. В областях с повышенной плотностью дефектов РВЭ меньше, чем в среднем по поверхности, и наоборот.

- установлено, что общим свойством пластического течения твердых тел является его локализация на всех стадиях деформации, причем тип распределения очагов локализации зависит от степени деформации.

- распределение плотности дислокаций по поверхности образца вдоль оси нагружения, в общем случае, имеет волнообразный характер. Области с повышенной и пониженной плотностью дислокаций чередуются. Волнообразное изменение плотности дислокаций по поверхности деформируемого образца связано с самосогласованным изменением дислокационных структур при деформации.

В качестве критерия выявления потенциальных мест разрушения может служить локальное понижение РВЭ по исследуемой поверхности. Причем площадь области с низкой РВЭ говорит о степени локализации. Чем более узкая область с пониженной РВЭ, тем более высокая локализация деформации и тем выше вероятность разрушения в данной области.

#### **Список литературы**

1. Жарин, А.Л. Метод исследования поверхности металлов методом Кельвина / А.Л. Жарин, Н.А. Шипица, Д.И. Сарока // 4-й Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов. Гомель. 24-25 октября. – 2000. С. 22-26.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ЦИНКА**

**Константинов В.М. Гурченко П.С., Булойчик И.А., Ковшик И.А.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
[v\\_m\\_konst@mail.ru](mailto:v_m_konst@mail.ru), [gurchenkops@yandex.by](mailto:gurchenkops@yandex.by), [ilya.by@gmail.com](mailto:ilya.by@gmail.com)*

Одним из альтернативных направлений в сфере получения защитных цинковых покрытий на стальных изделиях является способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ) [1]. Преимущественной особенностью данного способа является возможность замены процессом ТДЦ ряда операций термической обработки деталей (отпуска), что ведет к снижению затрат на термическую и антикоррозионную обработку изделий [2, 3].

При использовании данного способа в качестве завершающей операции химико-термической обработки закаленных изделий, работающих в условиях циклического нагружения, возможно снижение прочностных свойств, обусловленное формированием в поверхностной зоне детали интерметаллидного диффузионного слоя. Как известно, для конструкционных деталей решающее значение имеют механические свойства. Ранее выполненные исследования позволили установить влияние цинкового диффузионного слоя на прочностные характеристики при статических испытаниях [4]. Было отмечено незначительное изменение временного сопротивления на разрыв. Для ряда конструкционных деталей существенным является знакопеременный характер действующей нагрузки. В этом случае твердые (порядка 3300 МПа) цинковые интерметаллидные диффузионные слои могут выступать в качестве источника формирования усталостных трещин при знакопеременных нагрузках, что может привести к преждевременному разрушению изделия.

С целью определения влияния формирования цинкового диффузионного слоя на усталостные характеристики стальных изделий, провели сравнительное исследование механических свойств при циклических нагрузках термически обработанных образцов из