

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПРОЦЕСС ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ИСПЫТАНИЙ КИНЕТИЧЕСКИМ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ

**С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов, М. О. Щетинина**  
*Запорожский национальный технический университет,  
Запорожье, Украина*

Поступила в редакцию 27.03.2017

Исследовано влияние электрического потенциала, который возникает при электрическом контакте двух металлических тел с разной работой выхода электрона, на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием. Показано, что приложение внешнего электрического потенциала к образцам из алюминия во время индентирования приводит к снижению деформирующего усилия до 19 %.

**Ключевые слова:** индентирование, контактное электрическое сопротивление, электрический потенциал.

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НА ПРОЦЕС ДЕФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЮ В УМОВАХ ВИПРОБУВАНЬ КІНЕТИЧНИМ ІНДЕНТУВАННЯМ

**С. В. Сейдаметов, С. В. Лоскутов, М. О. Щетинина**

Досліджено вплив електричного потенціалу, який виникає при електричному контакті двох металевих тіл з різною роботою виходу електрона, на процес деформування алюмінію в умовах випробувань кінетичним індентуванням. Показано, що подача зовнішнього електричного потенціалу до зразків з алюмінію призводить до зниження деформуючого зусилля до 19 %.

**Ключові слова:** індентування, контактний електричний опір, електричний потенціал.

## THE INFLUENCE OF ELECTRICAL POTENTIAL ON DEFORMATION PROCESS OF ALUMINIUM AT TESTS BY KINETIC INDENTATION

**S. V. Seidametov, S. V. Loskutov, M. O. Schetinina**

The influence of an electrical potential which occurs at electrical contact between two metal bodies with different work function, on deformation of aluminum at tests by kinetic indentation was studied. It was shown that the application of an external electric potential to the samples of aluminum decreases the deforming force up to 19 %.

**Keywords:** indentation, contact electrical resistance, electrical potential.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из первых работ, в которой было обнаружено влияние электрического потенциала на пластическую деформацию металлов, является работа Кишкина С. Т. и Клыпина А. А. [1]. Авторами была установлена зависимость скорости ползучести металлов от изменения электрического потенциала. В работе [2] исследовали влияние на скорость ползучести алюминия электрического потенциала, подаваемого на образец, и потенциала, возникающего вследствие контактной разности потенциалов при подсоединении различных металлов с разной работой выхода электрона.

Было обнаружено влияние обоих типов электрического воздействия на изменение относительной скорости ползучести алюминия. Исследование влияния электрического потенциала на микротвердость образцов из алюминия, циркония и кремнистого железа представлено в работе [3]. Авторы работы отмечают возможность существенного изменения микротвердости (до 15 %) за счет так называемого электрокапиллярного эффекта. Поскольку механические свойства металлов во многом определяются состоянием поверхности, можно ожидать, что изменение плотности поверхностной энергии,

которая вызвана электрическим потенциалом, может привести к изменению макропластических характеристик металлов. Представляется интересным провести исследования влияния электрического потенциала, который возникает при электрическом контакте двух металлических тел с различной работой выхода электрона, на процесс деформирования металлов в условиях испытаний кинетическим индентированием.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала для испытаний кинетическим индентированием был выбран технический алюминий. Использовали образцы с размерами  $75 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ . Диаметр сферического индентора из стали марки ШХ15 составлял 12,7 мм. В качестве металла, который электрически соединялся с образцами из алюминия, была выбрана медь (табл. 1).

Исследование влияния электрического потенциала на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием проводилось методом измерения контактного электрического сопротивления на специально разработанной и изготовленной экспериментальной установке, функциональная схема которой приведена в работе [4]. Изменялись следующие параметры: контактное электрическое сопротивление  $R_k$ , нагрузка  $P$  на сферический индентор.

Схема подачи электрического потенциала на образец из алюминия при испытаниях кинетическим индентированием представлена на рис. 1. Электрический контакт между образцами во всех экспериментах осуществлялся медным проводом диаметром 0,5 мм и длиной 700 мм.

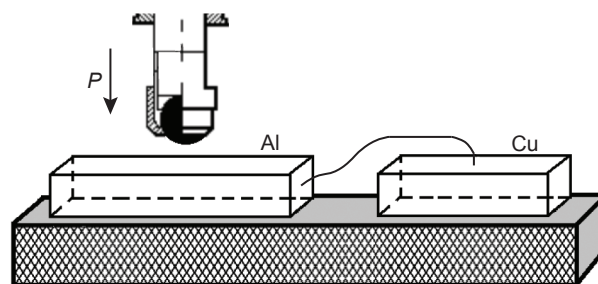


Рис. 1. Блок-схема узла экспериментальной установки

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование влияния электрического потенциала на процесс деформирования проводилось на основе анализа графиков зависимостей контактной проводимости  $1/R_k$  от величины нагрузки  $P$  в процессе упруго-пластического деформирования контактного сопряжения «образец — сферический индентор». На рис. 2 представлена типичная кривая нагружения образцов из алюминия с периодической подачей внешнего электрического потенциала. Максимальная абсолютная погрешность, допущенная при измерениях контактной проводимости  $1/R_k$ , составляла  $2 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}$ . Как видно из графика, подача внешнего электрического потенциала к образцу во время индентирования

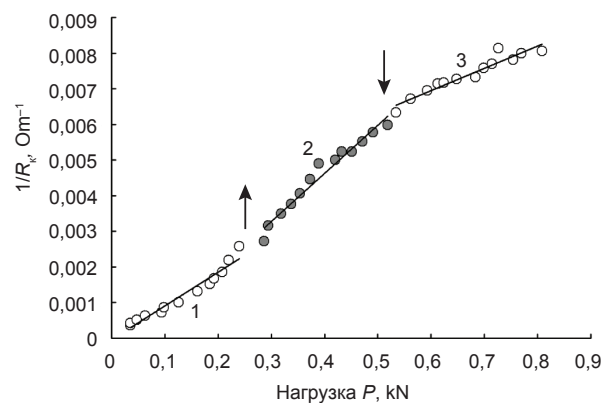


Рис. 2. Кривые нагружения алюминия с периодической подачей внешнего электрического потенциала. Участки 1, 3 — без потенциала; участок 2 — с потенциалом

Таблица 1

#### Линейные размеры и масса медных образцов

Номер медного образца	Форма	Масса $m, g$	Линейные размеры
1	Цилиндр	389	$D = 30 \text{ mm}, h = 88 \text{ mm}$
2	Диск	232	$D = 110 \text{ mm}, h = 3 \text{ mm}$
3	Параллелепипед	15	$a = 35 \text{ mm}, b = 10 \text{ mm}, c = 6 \text{ mm}$

приводит к изломам на кривой нагружения, что свидетельствует об изменении кинетики деформирования.

Для количественной оценки вклада электрического потенциала были рассчитаны значения нагрузки, которые необходимо приложить к образцам на участках индентирования с потенциалом и без потенциала для того, чтобы получить одинаковое значение  $R_k$ , которое обратно пропорционально фактической площади контакта [5], рис. 3.

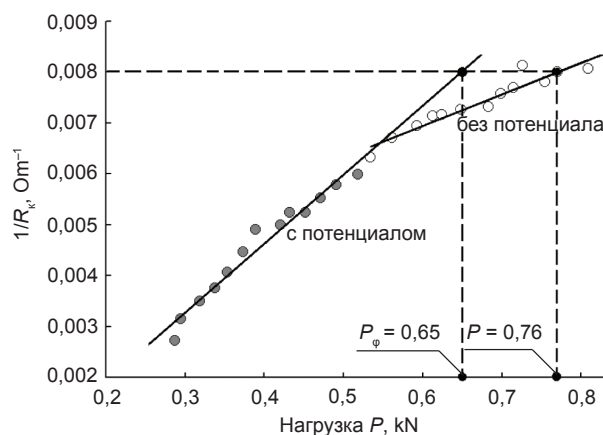


Рис. 3. Два типичных участка нагружения алюминия во внешнем электрическом поле (заштрихованные маркеры) и без поля (незаштрихованные маркеры) для количественной оценки вклада внешнего электрического потенциала

Анализируя графические характеристики кинетического индентирования, был сделан вывод, что электрический потенциал на контактом сопряжении, наведенный медными образцами, приводит к снижению деформирующего усилия на  $\Delta P = 0,11, 0,14$  и  $0,03$  kN соответственно (табл. 2).

Обнаруженные закономерности увеличения пластичности алюминия при подаче электрического потенциала можно объяснить следующим образом. При установлении электрического контакта между алюминием

и медью начнется обмен электронами, направление которого определяется значениями работы выхода электрона  $\phi$  из металла. Значение  $\phi$  для меди больше, чем для алюминия [7]. После выравнивания энергий Ферми в обоих металлах и установления термодинамического равновесия на поверхности алюминия возникнет избыточный положительный заряд, на поверхности меди — избыточный отрицательный. Энергетические уровни алюминия при этом опустятся, а меди поднимутся (рис. 4).

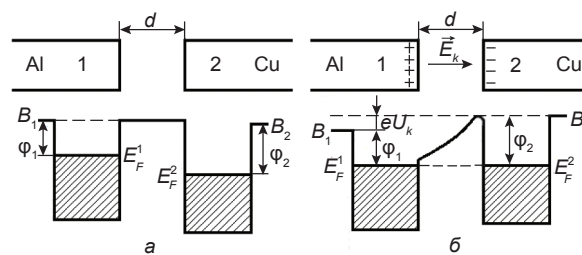


Рис. 4. Схема формирования контактной разности потенциалов; а — отсутствие и б — наличие электрического контакта между образцами

Как известно, работа выхода электрона из металла определяется разностью высоты потенциального барьера и энергии Ферми [8]. Таким образом, понижение уровня Ферми алюминия, вызванное подачей потенциала, приведет к понижению потенциального барьера для выхода на поверхность скользящих дислокаций. Предложенный механизм увеличения пластичности алюминия согласуется с результатами работ [3,6].

Влияние массы подключаемых медных образцов на процесс деформирования можно объяснить тем, что с увеличением массы образцов увеличивается площадь их поверхности. Чем больше площадь поверхности, тем больше ее емкость и тем больше свободных электронов от алюминия может перейти

Таблица 2

**Влияние электрического потенциала на изменение деформирующего усилия**

Номер медного образца	$\Delta P$ , kN	Относительное изменение деформирующего усилия $\epsilon$ , %
1	0,11	15
2	0,14	19
3	0,03	6

к меди. В соответствии с формулой для поверхностной энергии  $\gamma$  [9]:

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot z}{1,885 \cdot 10^{-3} \cdot R^2},$$

(где  $z$  — число свободных электронов,  $R$  — атомный радиус), чем меньше свободных электронов у алюминия, тем меньше поверхностная энергия и, соответственно, потенциальный барьер для выхода дислокаций на поверхность.

## ВЫВОДЫ

Исследовано влияние электрического потенциала, который возникает при электрическом контакте медных и алюминиевых образцов, на процесс деформирования алюминия в условиях испытаний кинетическим индентированием. Показано, что приложение внешнего электрического потенциала к образцам из алюминия во время индентирования приводит к снижению деформирующего усилия до 19 %. Увеличения пластичности алюминия при подаче электрического потенциала объясняется уменьшением плотности поверхностной энергии образцов, что приводит к снижению потенциального барьера для выхода на поверхность скользящих дислокаций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кишкин С. Т., Клыпин А. А. Эффект электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // ДАН СССР. — 1973. — Т. 211, № 2. — С. 325–329.
2. Коновалов С. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Филиппев Р. А., Громов В. Е. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия // Физика твердого тела. — 2007. — Т. 49, № 8. — С. 1389–1391.
3. Зуев Л. В., Данилов В. И., Коновалов С. В., Филиппев Р. А., Громов В. Е. О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов // Физика твердого тела. — 2009. — Т. 51, вып. 6. — С. 1077–1080.
4. Сейдаметов С. В., Лоскутов С. В., Щетинина М. О. Магнитопластический эффект в условиях испытаний на кинетическое индентирование // Металлофизика и новейшие

- технологии. — 2015. — Т. 37, № 5. — С. 615–624.
5. Способ определения фактической площади касания сопряженных токопроводящих деталей: А. с. № 1430820 СССР, G01N3/56 / В. В. Левитин, С. В. Лоскутов. — 1973.
6. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Филиппев Р. А. О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала // Металлы. — 2010. — № 4. — С. 39–45.
7. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов // Киев: Наукова думка, 1981. — 339 с.
8. Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы // М.: Физматлит, 2011. — 400 с.
9. Мусохранов М. В., Антонюк Ф. И., Калмыков В. В. Определение значения поверхностной энергии через работу выхода электрона // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6.

## REFERENCES

1. Kishkin S. T., Klypin A. A. Effekt elektricheskogo i magnitnogo vozdejstviya na polzuchest' metallov i splavov // DAN SSSR. — 1973. — Vol. 211, No. 2. — P. 325–329.
2. Konovalov S. V., Danilov V. I., Zuev L. B., Filip'ev R. A., Gromov V. E. O vliyanii elektricheskogo potenciala na skorost' polzuchesti alyuminiya // Fizika tverdogo tela. — 2007. — Vol. 49, No. 8. — P. 1389–1391.
3. Zuev L. V., Danilov V. I., Konovalov S. V., Filip'ev R. A., Gromov V. E. O vliyanii kontaktnoj raznosti potencialov i elektricheskogo potenciala na mikrotverdost' metallov // Fizika tverdogo tela. — 2009. — Vol. 51, vyp. 6. — P. 1077–1080.
4. Sejdametov S. V., Loskutov S. V., Schetinina M. O. Magnitoplasticheskij effekt v usloviyah ispytanj na kineticheskoe indentirovanie // Metallofizika i novejschie tehnologii. — 2015. — Vol. 37, No. 5. — P. 615–624.
5. Sposob opredeleniya fakticheskoy ploschadi kasaniya sopryazhennyh tokoprovodyaschih detalej: A. s. № 1430820 SSSR, G01N3/56 / V. V. Levitin, S. V. Loskutov. — 1973.
6. Zuev L. B., Danilov V. I., Filip'ev R. A.

- О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала // *Metally*. — 2010. — No. 4. — P. 39–45.
7. Fomenko V. S. Emissionnye svojstva materialov // Kiev: Naukova dumka, 1981. — 339 p.
8. Mamonova M. V., Prudnikov V. V., Prudnikova I. A. Fizika poverhnosti. Teoreticheskie modeli i eksperimental'nye metody // M.: Fizmatlit, 2011. — 400 p.
9. Musohranov M. V., Antonyuk F. I., Kalmukov V. V. Opredelenie znacheniya poverhnostnoj energii cherez rabotu vyhoda elektrona // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. — 2014. — No. 6.