

**HYSTERESIS LOSSES IN LOCAL CONTACT DEFORMATION OF  
ELECTROTECHNICAL ALUMINUM**  
**Savenko V.S.<sup>1</sup>, Zernitsa D.A.<sup>2</sup>, Galenko E.N.<sup>3</sup>, Ravutskaya Zh.I.<sup>4</sup>, Gunenko A.V.<sup>5</sup>**  
**(Republic of Belarus) Email: Savenko338@scientifictext.ru**

<sup>1</sup>Savenko Vladimir Semenovich - Doctor of Technical Sciences, Professor;

<sup>2</sup>Zernitsa Denis Alexandrovich - Master of Science;

<sup>3</sup>Galenko Evgeniy Nikolayevich - Master of Science;

<sup>4</sup>Ravutskaya Zhanna Ivanovna - Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor;

<sup>5</sup>Gunenko Alexey Valentinovich - Postgraduate Student,

DEPARTMENT OF PHYSICS AND MATHEMATICS, FACULTY OF PHYSICS AND ENGINEERING,  
MOZYR STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY I.P. SHAMYAKIN,  
MOZYR, REPUBLIC OF BELARUS

**Abstract:** contact loading is the most common case of power interaction of machine parts, components, and structures. This interaction occurs in conjugate elements when they work together. Resistance of the material of elastoplastic contact deformation is one of the most important factors determining the friction and wear conditions of machine parts. One of the parameters determining the magnitude of the deformation component of external friction is the value of the hysteresis losses arising in the deformed metal.

**Keywords:** hysteresis, contact loading, elastic and inelastic deformation, imprint.

**ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПОТЕРИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ КОНТАКТНОМ  
ДЕФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ**  
**Савенко В.С.<sup>1</sup>, Зерница Д.А.<sup>2</sup>, Галенко Е.Н.<sup>3</sup>, Равуцкая Ж.И.<sup>4</sup>, Гуненко А.В.<sup>5</sup>**  
**(Республика Беларусь)**

<sup>1</sup>Савенко Владимир Семёнович – доктор технических наук, профессор;

<sup>2</sup>Зерница Денис Александрович – магистрант;

<sup>3</sup>Галенко Евгений Николаевич – магистрант;

<sup>4</sup>Равуцкая Жанна Ивановна – кандидат педагогических наук, доцент;

<sup>5</sup>Гуненко Алексей Валентинович – аспирант,

кафедра физики и математики, факультет физико-инженерный,

Учреждение образования Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамыкина,  
г. Мозырь, Республика Беларусь

**Аннотация:** контактное нагружение является наиболее распространенным случаем силового взаимодействия деталей машин, узлов, конструкций. Это взаимодействие возникает в сопряжённых элементах при их совместной работе. Сопротивление материала упругоэластической контактной деформации является одним из важнейших факторов, определяющих условия трения и износа деталей машин. Одним из параметров, определяющих величину деформационной составляющей внешнего трения, является величина гистерезисных потерь, возникающих в деформированном металле.

**Ключевые слова:** гистерезис, контактное нагружение, упругая и неупругая деформация, отпечаток.

В работе представлены результаты исследования структурных характеристик гистерезисных потерь при локально-контактном деформировании образцов диаметром от 2,48 – 5 мм из электротехнической алюминиевой проволоки АКЛП-5ПТ. Один из образцов подвергнулся волочению при реализации электропластической деформации с импульсным током плотностью  $10^3$ – $10^4$  А/мм<sup>2</sup> и длительностью  $10^{-5}$  с в условиях многопереходной прокатки, а второй – обычным волочением без тока.

Величиной, характеризующей гистерезисные потери в материале при локальном контактном нагружении, является обратимая неупругая (релаксационная) деформация при повторных нагружениях в отпечатке  $\varepsilon_\delta$ , которая наряду с упругой деформацией является одной из параметров материала, характеризующая его структуру и стойкость к усталостному разрушению.

Обратимую неупругую деформацию можно найти из общей деформации [1, с. 197]:

$$\varepsilon_\delta = \frac{k\delta h_d}{F_0} = \frac{2\delta}{h_d} \varepsilon, \quad (1.2)$$

где  $\delta$  – эффективная деформация ( $\delta = 0,2d/D$ );

$h_d$  – глубина отпечатка, мкм;

$F_0$  – величина проекции отпечатка;

$\varepsilon$  – величина общей деформации, которая определяется по формуле [2, с. 50]:

$$\varepsilon = \frac{k}{2} \times \frac{h_d^2}{F_0}, \quad (1.3)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от типа индентора (для пирамиды  $k = 4$ ).

Глубина отпечатка была найдена из исследования микротвердости образцов алюминиевой проволоки, проведенных на микротвердомере Buehler Micromet 5114 с помощью ПО AtamiStudio 3.4, при применении метода невосстановленного отпечатка с использованием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (пирамиды Виккерса). Для определения глубины отпечатка использовались значения проекции ширины отпечатка и тангенс половины угла при вершине пирамиды:

$$h_d = \frac{b}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – половина угла при вершине пирамиды Виккерса ( $68^\circ$ );

$b$  – половина ширины отпечатка, мкм [1, с. 194].

В свою очередь еще одним важным показателем является упругая деформация, рассчитываемая формуле [2, с. 53]:

$$\varepsilon_\delta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \frac{w_1}{\sqrt{F_0}}, \quad (1.4)$$

где  $w_1$  – величина упругого сближения, которая находится из следующего соотношения:

$$\frac{w_1}{\sqrt{F_0}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \times \frac{HM}{E}, \quad (1.5)$$

где  $\frac{HM}{E}$  – постоянные значения физико-механических свойств материала.

Полагая, что отличие расчётной величины упругого сближения  $w_0$  от величины упругого восстановления пластического отпечатка  $w_1$  вызвано различием распределения давления по площади загрузки, примем, что  $w_1 = w_0/q$ , где  $q = 1 \dots 2$  – показатель распределения по площади загрузки (при упругом вдавливании плоского штампа  $q = 1$ , конического  $q = 2$ , сферического  $q = 1,5$ ).

Принимая площадь упругого контакта равной площади проекции  $F_0$  пластического отпечатка, имеем соотношение  $F_0 = \pi d_u^2/4$ , где  $d_u$  – диаметр площади упругого контакта, из которого получим  $d_u = \sqrt{4F_0/\pi}$ .

Для определения  $w_0$ , примем формулу (1.6):

$$w_0 = 0,25\pi d_u \operatorname{ctg} \varphi, \quad (1.6)$$

где  $\varphi$  – угол заточки индентора.

Для определения НМ (твёрдости по Мейеру), можно использовать следующее выражение:

$$HM = \frac{P_m}{A}, \quad (1.7)$$

где  $P_m$  – максимальная нагрузка;

$A$  – площадь проекции контакта.

Полученные значения обратимой неупругой (релаксационной) и упругой деформации сведём в таблицу 1.

Таблица 1. Величина обратимой неупругой и упругой деформации

Нагрузка, Р	Время, с	Неупругая деформация, $\varepsilon_\delta$		Упругая деформация, $\varepsilon_\delta$	
		Без тока	С током	Без тока	С током
50	5	1,732	1,748	0,202	0,202
	8	1,76	1,763	0,202	0,202
	10	1,752	1,554	0,202	0,202
100	5	1,697	1,777	0,202	0,202
	8	1,73	1,697	0,202	0,202
	10	1,624	1,67	0,202	0,202

Из таблицы 3 видно, что в целом величина обратимой неупругой (релаксационной) деформации в образце с током увеличивается и приводит к увеличению пластичности образца. Упругая деформация остаётся постоянной в образцах с током и без тока, что говорит о незначительном восстановлении отпечатка под действием упругих сил, т.е. происходит небольшое обратимое смещение атомов под действием нагрузки, что соответствует поверхностному деформационному наклёпу при электропластическом деформировании волочением.

#### Список литературы / References

1. Троицкий О.А. Физические и технологические основы электропластической деформации металлов: монография / О.А. Троицкий, В.С. Савенко. Мозырь: МГПУ им. И.П. Шамякина, 2016. 208 с.
2. Кошкин В.И. Оценка структуры и механических свойств материалов по статистическим характеристикам микротвёрдости / В.И. Кошкин. М.: МГИУ, 2001. 62 с.