

## К ВОПРОСУ О КОНТАКТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ РАЗНОВЕЛИКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Д. М. КАЛЕКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В теории электрических контактов принята экспериментально проверенная обратная пропорциональность электрического переходного сопротивления от приложенной нагрузки. В статье показано, что это условие не выполняется при небольших усилиях сжатия разноразмерных контактов, которые имеют место, в частности, при возбуждении электрической дуги касанием или разрушением тонкого проводника. Измерения электрического сопротивления приконтактной области между тонким (диаметром 0,75 мм) проводником и листом из сталей St37 (сталь 10) и 1.4301 (08X18N10), латуни CuZn37 (Л63) и алюминиевого сплава AlMg3 (AMg3) показали, что вследствие упругой деформации контактной поверхности под действием локальной нагрузки при возрастании усилия до определенных пределов имеет место повышение электрического сопротивления. В условиях эксперимента граничное усилие составляло 2-3 даН, в зависимости от механических характеристик материала. При выходе за эти пределы приобретает силу общепринятая функциональная зависимость. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* переходное электрическое сопротивление, электрические контакты, упругая деформация, приварка шпилек

Роль контактного сопротивления как нелинейного элемента электрических цепей очень велика и ей посвящена обширная литература. Основополагающей является книга Р. Хольма [1], в которой область контакта рассматривается как область стягивания электрического тока, определяемая реальной площадью поверхностей, вступающей в электрический контакт. При этом, учитывая, что микровыступы шероховатости на контактирующих поверхностях имеют случайное распределение высоты, предполагается, что под действием приложенной нагрузки они пластически деформируются и, таким образом, реальная площадь контактирующих поверхностей определяется усилием сжатия и механическими характеристиками материалов контакта.

Все работы, связанные с изучением переходного сопротивления в электрических контактах [1], электрического сопротивления при контактной сварке [2], развитием физического контакта при холодной [3] и диффузионной сварке [4], а также в машиноведении [5], рассматривают контакт между плоскими (или сферическими и цилиндрическими [1]) поверхностями при условиях пластической деформации поверхности абсолютно жесткого тела.

Рассматривая деформацию микровыступов различной формы, принимают одну из поверхностей гладкой и недеформируемой. Иначе пришлось бы учитывать вероятностный характер условий на поверхности контактов. По данным работы [5] шаг микронеровностей, в совокупности составляющих шероховатость, меняется в пределах от 2 до 800, а высота от 0,03 до 400 мкм.

При попытках моделирования реальная картина аппроксимируется сферическими, коническими, пирамидальными, призматическими и сферическими выступами, а их действительное распределение по поверхности заменяется схемой, в которой вводятся понятия «контурная» и «кажущаяся» площади. Как показано в работе [6] контурная площадь составляет 5...10 %, а фактическая — 0,01...0,1 % номинальной.

В то же время неопределенность геометрии микровыступов и их топографии, случайности встречи неровностей на сопрягаемых поверхностях и, соответственно, условий их деформирования, делают любую строгую схему нереальной. Единственное проверенное практикой заключение из многочисленных моделей сводится к пропорциональности площади контакта и электрического переходного сопротивления от приложенной нагрузки  $1/P^{\alpha}$ , где  $P$  — усилие сжатия контактирующих поверхностей, а  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, изменяющийся в пределах 0,3...0,8. Отсюда следует, что контактное электрическое сопротивление не зависит от кажущейся площади контакта, т.е. от давления, приложенного к контактирующим поверхностям. Как будет показано ниже, это справедливо только при относительно высоких нагрузках, когда упругая деформация в области контакта исчерпана.

Обзор попыток вывести формулу для расчета контактного сопротивления [7] показал неприменимость известных формул без дополнительного эксперимента.

В отличие от изученных условий контактирования твердых тел, при возбуждении дуги плавя-

щимся тонким проводником, которое имеет место при дуговой сварке [8] и дугоконтактной приварке шпилек, а также при точечной сварке сопротивлением в контакте электрод-деталь, форма контактирующих поверхностей отличается большим различием площадей взаимодействующих поверхностей и их текстурой.

Это пробудило интерес к изучению функциональной зависимости переходного электрического сопротивления от приложенного усилия в условиях, отличных от исследованных ранее, а именно, в контакте разновеликих поверхностей.

Для исследования влияния нагрузки на электрическое сопротивление области контактирования оказалось целесообразным базироваться на способе дугоконтактной приварки шпилек. Это обусловлено массовым изготовлением шпилек оригинальной формы, имеющих тонкий выступ на привариваемом конце. Шпильки изготавливаются холодной высадкой и потому разброс диаметров выступа и их длины в одной партии, практически, отсутствует.

При дугоконтактной конденсаторной приварке шпилек по методу «с предварительным контактом», как говорит само название, процесс начинается с контактирования шпильки с листом (рис. 1) без включения тока разряда конденсаторов. Затем включается разрядный ток, начинается нагрев тонкого выступа вплоть до его разрушения с последующим переходом процесса в дуговую стадию. Для реализации этого способа применяется сварочный пистолет с регулируемым усилием прижатия шпильки в пределах 1...10 даН.

Эксперименты проводились на приспособлении, состоящем из стойки, с закрепленным на ней сварочным пистолетом РМК-2 (рис. 2, а). Поскольку шпилька к листу прижимается пружиной сварочного пистолета, вылет торца выступа по отношению к плоскости опор пистолета выдерживался постоянным на уровне 2 мм. Сопротивление измерялось микроомметром типа GOM-802 с точ-

ностью 10 мкОм. При этом щупы прибора располагались так, как показано на рис. 2, б. Сопротивление участка листа между контактом шпильки и измерительным щупом составляло от 61 мкОм (латунь Л63) до 130 (сплав АМг3).

Эксперименты (рис. 3) проводились со шпильками М6 и листами из сталей St35 (сталь10) и 1.4301 (сталь 08X18H10), латуни CuZn37 (Л63), алюминиевого сплава АМг3 (АМг3), изготовленными фирмой Heinz Soyer Bolzenschweisstechnik GmbH. При этом брали по 3 образца из одной партии соответствующего материала.

Характерной особенностью изменения контактного сопротивления, замеченной нами при увеличении нагрузки, является отличие от приведенной выше обратнопропорциональной зависимости, а именно, увеличение сопротивления при повышении усилия прижима от 1 до 2...3 даН. При этом, как показывает сравнение графиков, относительный прирост сопротивления тем больше, чем выше твердость материала шпильки\* и чувствительность к наклепу при изготовлении шпильки холодной высадкой. Последнее относится к стали 1.4301 и двухфазной латуни CuZn37 [9]. Для нержавеющей стали максимум сопротивления сместился на отметку в 3 даН, в то время, как для остальных металлов он находится на уровне

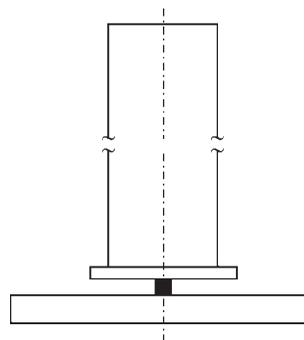


Рис. 1. Схема начальной стадии процесса приварки шпилек с предварительным контактом

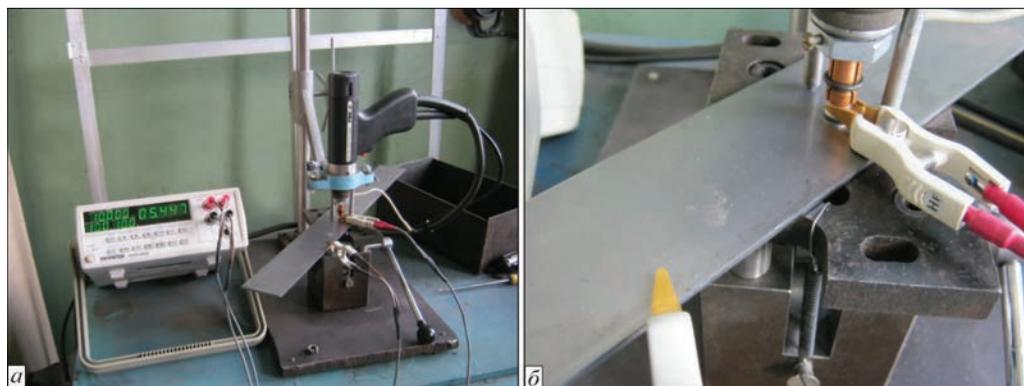


Рис. 2. Общий вид устройства (а) и расположение щупов прибора GOM-802 (б) при измерении электрического сопротивления области контакта выступа диаметром 0,75 мм на шпильке и листа

\*Нормированные показатели твердости стали 10–1170 МПа (ГОСТ 4041), стали 08X18H10 — 1700 МПа (ГОСТ 25054), латуни Л64 — 700 МПа (ГОСТ 13726), сплава АМг3 — 450 МПа (ГОСТ 2208).

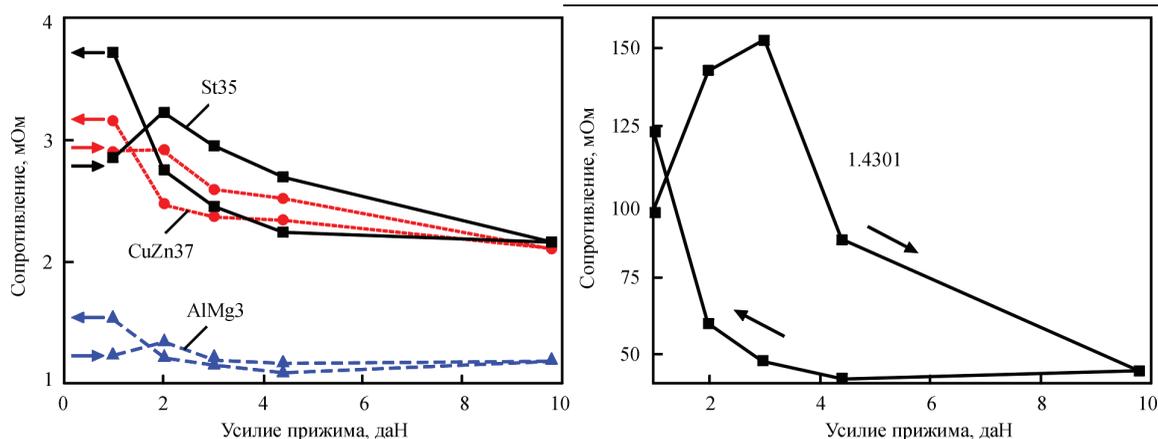


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления зоны контакта между выступом диаметром 0,75 мм и листом от приложенного усилия прижатия при различных масштабах

не 2 даН (с учетом дискретности усилия сжатия образцов).

Из известных нам работ только в статье [10] показано (рис. 4), что в контакте электрод-деталь при точечной сварке при повышении усилия сжатия электрическое сопротивление сначала растет, и начинает уменьшаться лишь при достижении определенной нагрузки. При этом зависимость получена на алюминиевом сплаве. Следовательно, на материалах, характеризующихся большим упругим сопротивлением, чем алюминиевые сплавы, следовало ожидать, что этот эффект проявится еще заметнее.

Качественно возрастание контактного сопротивления можно объяснить, принимая во внимание отличие в текстурах контактирующих образцов (рис. 5). Поскольку модуль сдвига  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ , где  $E$  — модуль Юнга, а  $\nu$  — коэффициент Пуассона, имеющий у металлов положительное значение, ясно, что при упругом сжатии деталей, имеющих взаимноперпендикулярную текстуру, первой деформируется деталь, имеющая текстуру, нормальную по отношению к направлению нагрузки. При этом появляется зазор и уменьша-

ется площадь контакта между нагруженными деталями и, соответственно, растет электрическое сопротивление.

Решение задачи упругой деформации полубесконечного тела под действием давления  $P$ , равномерно распределенного по торцевой плоскости цилиндра радиусом  $r$ , приведено в работе [11]. Принимая контактирующие поверхности гладкими на микро- и макроуровне, т. е. отсутствие их начального неплотного прилегания и действие только сил нормальных к поверхности раздела, а также, в соответствии с приведенным выше замечанием, абсолютную жесткость цилиндра, уравнение упругого перемещения поверхности полубесконечного тела под нагрузкой в пределах нагруженной поверхности

$$u_z = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E} \text{Pr} E \left( \frac{R}{r} \right),$$

где  $E(R/r)$  — полный эллиптический интеграл 2-го рода по модулю  $(R/r)$ , табулированный в работе [12].

Это уравнение не учитывает перемещение жесткого цилиндра вслед за деформацией пластины вне нагруженной области таким образом, что внешняя окружность основания цилиндра непрерывно опирается на пластину.

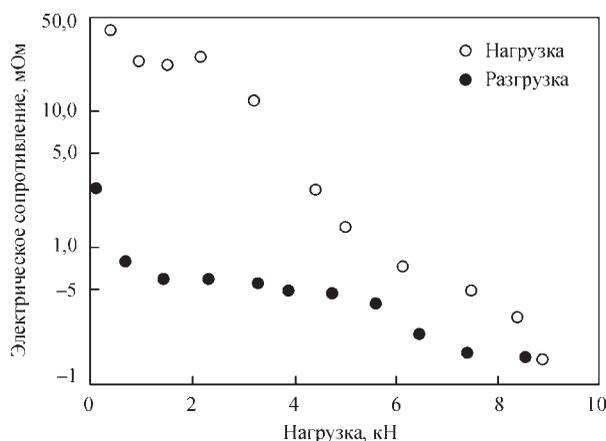


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления от нагрузки в контакте электрод-деталь из алюминиевого сплава 5482 в состоянии поставки. Диаметр электрода 7,5 мм [10]

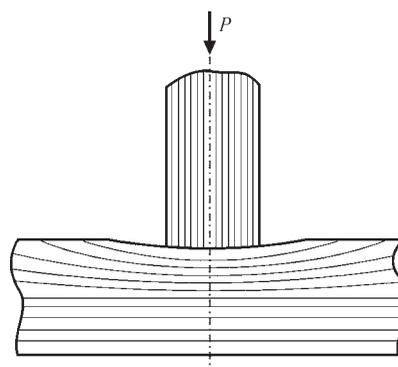


Рис. 5. Схема нагружения контакта выступа шпильки с листом

Показатели упругих свойств исследованных материалов

Металл	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона [6]
Сталь 10 [5]	206	0,24...0,28
08Х18Н10Т [5]	196	0,25...0,30
Латунь Л63 [7]	100	0,33...0,42
Сплав АМг3 [7]	71	0,32...0,36

Расчет деформации в центральной меридиональной плоскости исследованных металлов, характеристики которых приведены в таблице, дает величину отклонения от плоскости листа (зазор между контактирующими поверхностями), показанный на графиках (рис. 6). Этот рисунок носит, понятно, только иллюстративный характер, поскольку при расчете не учитывались структурные изменения в материале листа при прокатке, в частности, упрочнение поверхностного слоя металла, а также принималось чисто упругое и только нормальное взаимодействие сжимаемых поверхностей (касательными напряжениями в этой идеализированной схеме мы пренебрегли). Это оправдывается тем, что при холодной высадке шпильки выступ не имеет острой кромки (см. ниже рис. 7), нет концентрации напряжения на кромке и, соответственно, ее пластического деформирования при малых нагрузках. С учетом того, как сказано, что внешняя граница цилиндрического контакта опирается на края лунки деформации на листе, итоговые показатели зазора между контактирующими поверхностями должны быть уменьшены.

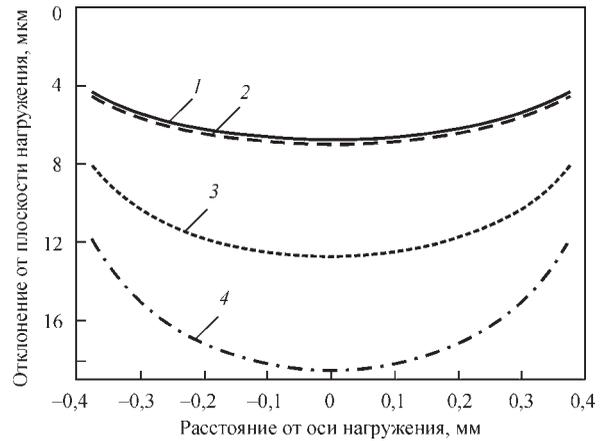


Рис. 6. Деформация плоскости листа под давлением выступа на шпильке М6 усилием 2 даН: 1 — углеродистая сталь 10; 2 — 08Х18Н10; 3 — латунь Л63; 4 — сплав АМг3

С увеличением нагрузки деформирование из чисто упругого переходит в упругопластическую область. Это заметно из сравнения графиков на рис. 3 и 6 и замечания, приведенного выше при анализе графиков на рис. 3.

Следует также обратить внимание на то, что при малых давлениях деформируется только поверхностный слой сжимаемого металла и, судя по фотографиям сечения металла после нагрузки, приведенными в цитированной выше работе [10], микровыступы шероховатости при начальном нагружении не изменяют формы и не влияют на изменение сопротивления контактной зоны.

По мере увеличения нагрузки в сдвиговую деформацию вовлекаются все более глубокие слои

Материал	Номер образца					
	1		2		3	
	До нагрузки	После	До нагрузки	После	До нагрузки	После
Сталь St35						
Сталь 1.4301						
Латунь CuZn37					—	—
Сплав АМг3					—	—

Рис. 7. Форма контактной поверхности выступа до и после нагружения усилием 10 даН

металла листа, вызывая повышение реактивного напряжения. Когда это напряжение достигнет определенного уровня, зависящего от упругих характеристик металла и степени его наклепа, начнется сначала упругая, а затем и пластическая деформация шероховатостей на торце выступа. Такое поведение металла в контакте отражается на снижении контактного сопротивления при превышении соответствующего граничного усилия сжатия (рис. 3). В результате пластической деформации происходит сближение контактирующих поверхностей и возрастание площади контакта при совпадении их формы.

Дальнейший анализ графиков на рис. 3 показывает наличие гистерезиса, который тем больше, чем меньше пластичность исследуемого металла. Гистерезис свидетельствует об упругом характере поведения металла приконтактной зоны при разгрузке. При уменьшении нагрузки ниже 4,5 даН электрическое сопротивление растет в результате упругого изменения поверхности с появлением (или сохранением) шероховатостей второго уровня [2]. При конечной разгрузке (в нашем случае до 1 даН) электрическое сопротивление контактной области оказывается для всех образцов выше начального.

С целью объяснения повышения контактного сопротивления сверх начального после цикла нагрузка-разгрузка был проведен анализ конечной формы контактной поверхности выступа на торце шпильки. Для этого шпилька М4 с выступом ( $d \times h = 0,55 \times 0,65$ ) нагружалась усилием 10 даН пружиной пистолета РМК-2. Шпильки отбирались случайным образом из одной партии каждого материала. Торцы фотографировали с окуляра микроскопа МБС-10 при увеличении 56,3 (рис. 7).

Из приведенных фотографий видно, что первоначальный рельеф, полученный при холодной посадке шпилек, изменился после нагружения и последующей разгрузки, став более грубым в результате пластической деформации, сопровождаемой сдвигом материала из-за неконтролируемого отклонения от параллельности контактирующих поверхностей и, вызванного этим, появления касательных напряжений. Судя по кривым на рис. 3 и фотографиям на рис. 7, такое пластическое изменение приконтактного объема происходит на стадии нагружения, а наклепанный металл деформируется упруго, восстанавливая форму при разгрузке. Этим и объясняется то, что во всех экспериментах сопротивление контактной зоны после разгрузки больше, чем до нагружения.

Существенное влияние пластической деформации на сопротивление контактной области демонстрирует рис. 8, на котором показано изменение электрического сопротивления контактной области при нагружении шпилек из стали 1.4301

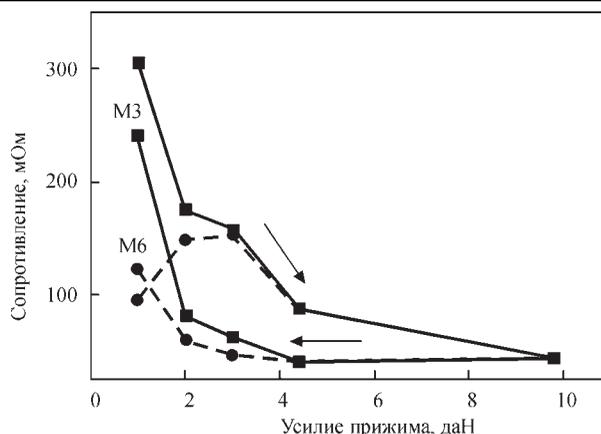


Рис. 8. Зависимость электрического сопротивления зоны контакта между выступами диаметром 0,6 (М3) и 0,75 мм (М6) листом из стали 1.4301 от приложенного усилия прижима

М3 и М6 с диаметрами выступов 0,6 (М3) и 0,75 (М6) мм, соответственно. Давление в контакте между выступом на торце шпильки и листом при нагружении шпильки М3 больше, чем при нагружении шпилек М6 в 1,5 раза. В результате пластической деформации приконтактной области происходит при меньшем усилии при нагрузке шпильки М3, чем шпильки М6, и отмеченное выше повышение электрического сопротивления при начальном нагружении выступа на шпильке М3 на графике не наблюдается. При нагрузке 5...10 даН графики для шпилек М3 и М6 практически совпадают. Следовательно, здесь, в результате большего давления на выступ шпильки М3 в результате пластической деформации фактическая площадь контакта сравнима со шпилькой М6, и зависимость переходного сопротивления от нагрузки не зависит от номинальной площади контакта и подчиняется обратной пропорциональности в соответствии с приведенной выше формулой Хольма. Вместе с тем, вследствие большего давления и вызванного этим упрочнения, упругая составляющая деформации контактирующей поверхности на шпильке М3 больше, чем на шпильке М6. Об этом свидетельствует расхождение графиков при снятии нагрузки от названных выше 4,5 даН

### Выводы

1. Известная обратно пропорциональная зависимость электрического контактного сопротивления от усилия сжатия токопередающих поверхностей нарушается в области малых усилий, приложенных в контакте разновеликих площадок. Выдвинута гипотеза, что в этом случае нужно принимать во внимание не столько пластическую деформацию соприкасающихся поверхностей, сколько упругую деформацию поверхностного слоя одного из элементов под действием нагрузки, распределенной на участке этой поверхности, ограниченном площадью второго элемента контактирующей пары.

2. При малых усилиях прижатия разновеликих контактов, имеющих место, в частности, при возбуждении дуги касанием или взрывающимся тонким проводником, увеличение нагрузки приводит к росту электрического контактного сопротивления, вследствие упругой деформации поверхности и появления локального зазора между контактирующими поверхностями, соизмеримого с высотой микронеровностей на контактирующих поверхностях. Вследствие этого уменьшается площадь электрического контакта и увеличивается его электрическое сопротивление без прерывания тока.

3. Граничная величина нагрузки, при которой функциональная зависимость переходного электрического сопротивления разновеликих контактов от приложенного усилия становится обратнопропорциональной, а номинальная токопроводящая площадь теряет влияние, зависит от механических характеристик материала и тем больше, чем выше его упругие свойства.

4. При изменении нагрузки от максимальной до минимальной сохраняется обратнопропорциональная зависимость электрического переходного сопротивления от усилия прижатия токоведущих поверхностей. Но при этом пластическая деформация контактного интерфейса на этапе нагружения приводит к повышению его электрического сопротивления при минимальном усилии сжатия по сравнению с исходным.

5. Представляют интерес дополнительные исследования, конкретизирующие зависимость электрического сопротивления разновеликих контактов от механических свойств материала и соотношения площадей контактирующих поверхностей.

### Список литературы

1. Хольм Р. (1961) *Электрические контакты*. Москва, ИЛ.
2. Кочергин К. А. (1972) *Сварка давлением*. Ленинград, Машиностроение.
3. Сахацкий Г. В. (1979) *Технология сварки в холодном состоянии*. Киев, Наукова думка.

4. Каракозов Э. С. (1986) *Сварка металлов давлением*. Москва, Машиностроение.
5. Демкин Н. В., Рыжов Э. В. (1981) *Качество поверхности и контакт деталей машин*. Москва, Машиностроение.
6. Крагельский И. В., Добычин Н. М., Комбалов В. С. (1977) *Основы расчета на трение и износ*. Москва, Машиностроение.
7. Слободян М. С. (2013) Анализ методик оценки электросопротивления участков электрод-электрод и деталь-деталь перед точечной контактной микросваркой. *Сварочное производство*, **8**, 20–24.
8. Лесков Г. И. (1970) *Электрическая сварочная дуга*. Москва, Машиностроение.
9. Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J. (2011) *The science and engineering of materials*. Cengage Learning.
10. Thornton P. H., Krause A. R., Davies R. G. (1996) Contact resistance in spot welding. *Welding Journal*, **2**, 402–412.
11. Джонсон Г. Л. (1989) *Механика контактного взаимодействия*. Москва, Мир.
12. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. (1977) *Специальные функции. Формулы, графики, таблицы*. Москва, Наука.

### References

1. Holm, R. (1961) *Electric contacts*. Moscow, IL [in Russian].
2. Kochergin, K.A. (1972) *Pressure welding*. Leningrad. Mashinostroenie [in Russian].
3. Sakhatsky, G.V. (1979) *Technology of cold welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Karakozov, E.S. (1986) *Pressure welding of metals*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Demkin, N.V., Ryzhov, E.V. (1981) *Quality of surface and contact of machine parts*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Kragelsky, I.V., Dobychin, N.M., Kombalov, V.S. (1977) *Principles of calculation for friction and wear*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Slobodyan, M.S. (2013) Analysis of procedures for evaluation of electric resistance of areas electrode-electrode and part-part before spot resistance microwelding. *Svarochno. Proizvodstvo*, **8**, 20-24 [in Russian].
8. Leskov, G.I. (1970) *Electric welding arc*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Askeland, D.R., Fulay, P.P., Wright, W.J. (2011) *The science and engineering of materials*. Cengage Learning.
10. Thornton, P.H., Krause, A.R., Davies, R.G. (1996) Contact resistance in spot welding. *Welding J.*, **2**, 402-412.
11. Johnson, G.L. (1989) *Mechanics of contact interaction*. Moscow, Mir [in Russian].
12. Yanke, E., Emde, F., Lyosh, F. (1977) *Special functions. Formulas, plots, tables*. Moscow, Nauka [in Russian].

## ДО ПИТАННЯ ПРО КОНТАКТНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР РІЗНОВЕЛИКИХ ПОВЕРХОНЬ

Д. М. КАЛЕКО

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

У теорії електричних контактів прийнята експериментально перевірена зворотна пропорційність електричного перехідного опору від прикладеного навантаження. У статті показано, що ця умова не виконується при невеликих зусиллях стиснення різновеликих контактів, які мають місце, зокрема, при порушенні електричної дуги дотиком або руйнуванням тонкого провідника. Вимірювання електричного опору приконтактної області між тонким (діаметром 0,75 мм) провідником і листом зі сталей St37 (сталь 10) та 1.4301 (08X18H10), латуні CuZn37 (Л63) і алюмінієвого сплаву AlMg3 (AMr3) показали, що внаслідок пружної деформації контактної поверхні під дією локального навантаження при зростанні зусилля до певних меж має місце підвищення електричного опору. В умовах експерименту граничне зусилля становило 2...3 даН, в залежності від механічних характеристик матеріалу. При виході за ці межі набуває чинності загальноприйнята функціональна залежність. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 8.

*Ключові слова*: перехідний електричний опір, електричні контакти, пружна деформація, приварка штильок

ON PROBLEM OF CONTACT RESISTANCE OF DIFFERENT-SIZED SURFACES

D. M. KALEKO

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

A theory of electric contacts assumes an experimentally-verified inverse proportionality of electric transient resistance from applied load. The paper shows that this condition is not fulfilled at small compression forces of different-sized contacts, which take place, in particular, in excitation of electric arc by contact or breakup of thin conductor. Measurements of electric resistance of near-contact area between thin (0.75 mm diameter) conductor and sheet of steels St37 (steel 10) and 1.4301 (08Kh18N10), brass CuZn37 (L63) and aluminum alloy AlMg3 (AMg3) showed that there is an increase of electric resistance due to elastic deformation of contact surface under effect of local loading in rise of forces to specific limits. Under experiment conditions a boundary force made 2-3 daN, depending on mechanical characteristics of metal. Out of these limits a generally accepted functional dependence becomes effective. 12 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

*Keywords: transient electric resistance, electric contacts, elastic deformation, studs welding*

Поступила в редакцию 26.08.2018

**SAVE THE DATE**



**THE 72<sup>ND</sup> IIW ANNUAL  
ASSEMBLY AND  
INTERNATIONAL  
CONFERENCE**

**Bratislava, Slovakia**

**7<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> July 2019**

The annual event of the International  
Institute of Welding IIW 2019

[www.iiw2019.com](http://www.iiw2019.com)



The main topic of the International Conference:

**New Progressive Materials and Welding  
Methods in the Automotive Industry**

Hosted by



Conference Secretariat

