

УДК 621.787:621.91:621.7.011

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ НАЧАЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЦЕПИ ЭЛЕКТРОД-ЭЛЕКТРОД ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

М.С. Слободян

Томский политехнический университет

E-mail: s.m.s@ngs.ru

Проведен расчет первоначальных сопротивлений участка электрод-электрод и деталь-деталь при контактной точечной сварке различными методами на примере деталей из циркониевого сплава Э110. Полученные результаты характеризуются широким диапазоном значений, который обусловлен преимущественно различием методов расчета, расхождением опубликованных значений физико-механических свойств материалов, а также изменением площади контактирования деталей при износе электродов. Все расчетные значения, полученные различными методами, значительно отличаются от экспериментальных, что подтверждает необходимость проведения измерений при разработке режимов сварки.

### Ключевые слова:

Точечная контактная сварка, методы расчета сопротивлений, начальные сопротивления цепи электрод-электрод.

### Key words:

Resistance spot welding, methods of resistance design, initial resistances of electrode-electrode circuit.

Контактная точечная сварка нашла широкое применение в различных отраслях промышленности. С целью оптимизации параметров ее режимов и прогнозирования образования дефектов сварных соединений применяют различные методы инженерного анализа, аналитические и численные решения дифференциальных уравнений, описывающих физические явления и процессы, а также моделирование процесса формирования литого ядра. Адекватное решение этих задач должно базироваться на достоверной оценке количества тепла  $Q$ , образующегося при протекании тока в области контакта электрод-электрод, определяемого в соответствии с фундаментальным законом Джоуля-Ленца [1]:

$$Q = \int_0^t I^2(t) r_{\text{э}}(t) dt,$$

где  $t$  – время протекания тока,  $I(t)$  – мгновенное значение сварочного тока,  $r_{\text{э}}$  – сопротивление участка электрод-электрод.

Учитывая, что современные источники питания с программным управлением, применяемые для контактной точечной сварки [2], обеспечивают стабильные заданные значения тока, то для расчета тепловыделения основной проблемой является определение значений сопротивления участка электрод-электрод. Особую роль в нём играют контактные сопротивления электрод-деталь и деталь-деталь [3–5], которые характеризуются значительным разбросом первоначальных значений, что обусловлено физическими свойствами металла соединяемых деталей и электродов, а также состоянием их поверхности, конструкцией соединяемых деталей, степенью износа электродов и скорости их сжатия. Эти факторы приводят к нестабильности выделения тепла при протекании сварочного тока и, соответственно, качества выполняемых соединений.

Существуют различные методики расчета значений сопротивления участка электрод-электрод, а также его составляющих – собственных и контак-

ных сопротивлений. По мнению авторов работы [1] основная роль тепловыделения отводится собственному сопротивлению двух деталей:

$$R_{\text{э}} = \rho \frac{2\delta}{S}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление металла деталей,  $\delta$  – толщина детали,  $S$  – площадь сечения детали, по которому протекает сварочный ток.

В работах [3, 6, 7] авторы предлагают определять  $R_{\text{э}}$  с учетом растекания сварочного тока в деталях:

$$R_{\text{э}} = k_{p,m} \rho \frac{2\delta}{S}, \quad (2)$$

где  $k_{p,m}$  – коэффициент, учитывающий растекание тока за пределы центрального столбика металла, ограниченного поверхностью цилиндра диаметром, равным диаметру контакта электрод-деталь.

В работе [8] сопротивление участка электрод-электрод представлено зависимостью:

$$R_{\text{э}} = \rho_0 (1 - \alpha \theta_{cp}) \frac{4\delta}{S}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление металла детали при температуре 20 °С;  $\alpha$  – коэффициент, принимающий значения в диапазоне 0,5...1,0;  $\theta_{cp}$  – средняя температура металла детали в области зоны протекания сварочного тока;  $S$  – площадь сечения области контакта деталь-деталь.

Авторы работы [9] сопротивление участка электрод-электрод вычисляли по выражению:

$$R_{\text{э}} = \rho \sqrt{\frac{\sigma_{\theta}^*}{F_s}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\theta}^*$  – сопротивление пластической деформации металла;  $F_s$  – усилие сжатия электродов.

Те же авторы в работе [10] контактное сопротивление деталь-деталь  $R_{\text{д}}$  определяли по зависимости:

$$R_{\partial\partial} = \rho_k \frac{\sigma_e}{F_3}, \quad (5)$$

где  $\rho_k$  – электрическое сопротивление контакта при единичном давлении;  $\sigma_e$  – предел прочности металла.

В работе [11] сопротивление  $R_{\partial\partial}$  вычисляли по выражению:

$$R_{\partial\partial} = \frac{\rho}{d_k}. \quad (6)$$

Здесь  $d_k$  – диаметр контакта электрод-деталь.

В работах [7, 12, 13] приведена степенная зависимость  $R_{\partial\partial}$

$$R_{\partial\partial} = \frac{\rho_k}{F_3^{\alpha_1}}, \quad (7)$$

где  $\alpha_1$  – показатель степени ( $\alpha_1 = 0,5...1,0$ ).

Там же собственное сопротивление деталей  $R_\partial$  представлено выражением

$$R_\partial = A\rho \frac{4\delta}{\pi d_3^2}, \quad (8)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от параметра  $d_3/\delta$ , значения которого лежат в пределах  $0...0,5$ ;  $d_3$  – диаметр электродов.

Наиболее подробно, из рассмотренных публикаций, закономерности изменения контактного сопротивления деталь-деталь в процессе формирования литого ядра исследовано в работе [4]. Сопротивление холодного контакта деталь-деталь  $R_{\partial\partial_x}$  предложено определять по формуле, учитывающей параметры шероховатости и свойства окисной пленки поверхности свариваемых деталей:

$$R_{\partial\partial_x} = \frac{(1...2)\Delta\rho_\Delta}{3A_c\sqrt{1-e^{-X}}}, \quad (9)$$

где  $\Delta$  – высота пирамиды микронеровностей, зависящая от способа обработки поверхности;  $A_c$  – контурная площадь контакта;  $X$  – критерий деформационного подобия (для грубой обработки поверхностей  $X = \theta_{\Delta p}/(2\theta_{\text{хол}}\sigma_m b)$ , для тонкой (чистой) обработки  $X = \theta_{\Delta p}/(\theta_{\text{хол}}\sigma_m b)$ ;  $p$  – давление, усредненное по контурной площади контакта;  $\theta_\Delta$  – температура выступа;  $b$  – коэффициент, зависящий от способа обработки поверхности металла;  $\sigma_m$  – предел текучести металла в наклепанном состоянии (при деформации 80...90 %).

Применительно к электродам со сферической поверхностью контактное сопротивление холодных деталей  $R_{\partial\partial_x}$  авторы работы [3] определяли по выражению:

$$R_{\partial\partial_x} = 0,89\rho\sqrt{\frac{HB}{F_3}}, \quad (10)$$

где  $HB$  – микротвердость металла свариваемых деталей.

В работе [14] расчет исходного контактного сопротивления  $R_{\partial\partial_x}$  определяли по выражению:

$$R_{\partial\partial_x} = 0,15 \frac{K_{R(C)}\rho}{d_3^2} \frac{S_{m_1}}{Ra} Ra \left( \frac{4F_3\theta}{\pi d_3^2 K_{q(C)}} \frac{S_{m_1}}{Ra} \right)^{-1,85}, \quad (11)$$

где  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение высот неровностей;  $K_{R(C)}$ ,  $K_{q(C)}$  – коэффициенты, характеризующие анизотропию поверхности детали;  $S_{m_1}$  – шаг неровности по средней линии микропирамид;

$\theta = \frac{1-\mu^2}{\pi E}$  – постоянная упругости контак-

та;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала;  $E$  – модуль упругости материала.

Учитывая, что при расчете сопротивления в формулах (1)–(11) авторы используют различные теплофизические свойства материалов, была проведена проверка их размерности. Формула (3) будет иметь размерность [Ом] при условии, что коэффициент  $\alpha$  имеет размерность  $^\circ\text{C}^{-1}$ . Однако, следует обратить внимание на то, что при значении средней температуры зоны прохождения тока более  $2^\circ\text{C}$  сопротивление участка электрод-электрод будет отрицательное, в связи с чем физический смысл данной формулы остается неясным. Применение формул (5), (7) и (11) вызывает сомнение в связи с тем, что размерность получаемого результата не совпадает с размерностью электрического сопротивления [Ом]. Следует отметить, что использование формулы (9) не представляется возможным по причине малости параметра  $X$ , вследствие чего величина  $\exp(-X)$  стремится к единице, а значение  $R_{\partial\partial}$  становится очень большим (стремится к бесконечности).

В настоящей работе проведен сравнительный анализ расчетных значений первоначальных сопротивлений участка электрод-электрод и деталь-деталь при контактной точечной сварке деталей из циркониевого сплава Э110 толщиной 0,25 мм. В расчетах учтено применение электродов из бронзы Бр.ХЦр со сферической рабочей поверхностью радиусом 4 мм, усилие их сжатия 300 Н. Используются значения теплофизических свойств материалов, приведенные в работах [15–25], параметры шероховатости поверхностей на основе данных работ [20, 26, 27], окисной пленки – в соответствии с работами [28, 29]. Характер растекания сварочного тока в немагнитном сплаве Э110 принят по аналогии с титаном [4], имеющим аналогичную магнитную проницаемость. В деталях толщиной 0,25 мм растекание тока происходит на 1,04 радиуса контакта электрод-деталь.

Площадь сечения контакта электрод-деталь для новых электродов со сферической рабочей поверхностью (сфера не деформирована) рассчитана по выражению [30]:

$$S_k = \pi r_k^2 = \pi \left( 0,9\sqrt[3]{\left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) DF} \right)^2, \quad (12)$$

где  $r_k$  – радиус контакта электрод-деталь;  $F$  – усилие сжатия электродов;  $D$  – диаметр сферы рабо-

чей поверхности электродов;  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона материала электродов;  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона материала деталей;  $E_1$  – модуль упругости материала электродов;  $E_2$  – модуль упругости материала деталей.

Площадь холодного контакта электрод-деталь для новых электродов составляет  $0,13 \text{ мм}^2$ . Принимая фактическую площадь контакта микрошероховатостей 1 % от площади контакта [28, 31] получаем  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ .

Для проверки достоверности полученных результатов дополнительно были проведены расчеты площади контакта по методике, приведенной в работе [32]:

$$S_{k, \text{факт}}(t) = a\beta^{0,4} \frac{p}{HV} \left(\frac{E}{p}\right)^m \left[1 - \left(\frac{t_0}{t}\right)^n\right], \quad (13)$$

где  $m$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от чистоты обработки поверхности (при высоте неровностей профиля по десяти точкам  $Rz = 40 \dots 80 \text{ мкм}$   $m = 0,8$ ,  $n = 0,2$ ; при  $Rz = 3,2 \dots 6,3 \text{ мкм}$   $m = 0,7$ ,  $n = 0,54$ );  $S_{k, \text{факт}}$  – фактическая площадь касания;  $HV$  – твердость соединяемого металла;  $t$  – текущий момент времени;  $a$  – коэффициент, характеризующий волнистость (для цилиндрической и сферической волнистости, равный 0,2 и 0,5);  $\beta$  – коэффициент, характеризующий отношение высоты к радиусу волнистости, увеличивается с огрублением чистоты обработки ( $\beta = 10^{-3} \dots 10^{-6}$ );  $t_0$  – время, за которое микровыступы вступающие в контакт деформируются в режиме, подобном равномерному нагружению. Подставляя в (13) значения теплофизических свойств материалов и параметров шероховатости поверхностей используемых деталей и электродов получаем:

$$S_{k, \text{факт}} = 0,00218 \dots 1 \text{ мм}^2.$$

Сравнивая результаты, полученные с использованием формул (12) и (13) можно сделать вывод о том, что расчетные значения площади контакта электрод-деталь при использовании новых электродов изменяются в широком диапазоне.

Сравнивая полученные расчетные значения площади контакта новых электродов и деталей со значениями, определенными экспериментально для изношенных электродов с деформированной сферой [20, 26], можно сделать вывод, что в процессе износа электродов площадь холодного контакта электрод-деталь возрастает с  $0,13$  до  $2,38 \text{ мм}^2$ . Площадь контакта деталь-деталь принимаем равной площади контакта электрод-деталь. Соответственно, для новых электродов максимальное сечение свариваемой детали, по которому протекает ток, составляет  $0,14 \text{ мм}^2$ , для изношенных электродов –  $2,57 \text{ мм}^2$ .

Расчетные значения сопротивлений, полученные с использованием значений теплофизических свойств материалов, приведенных в работах [15–25], сведены в табл. 1 и 2.

**Таблица 1.** Расчетные значения начального сопротивления участка электрод-электрод

Формула	(1)	(2)	(4)
$R_{\text{эз}}$ , МОм	0,092...1,688	0,096...1,756	0,409

**Таблица 2.** Расчетные значения начального контактного сопротивления деталь-деталь

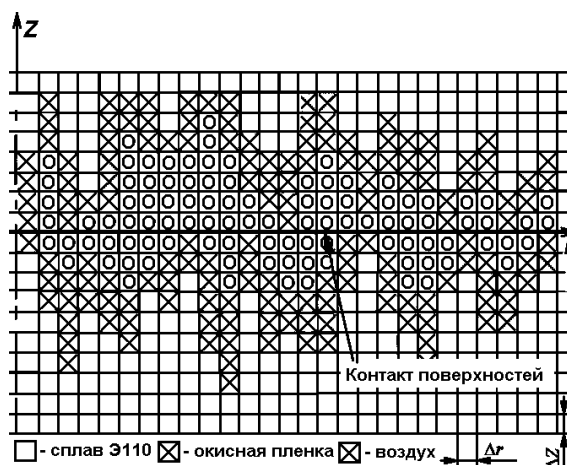
Формула	(6)	(9)	(10)
$R_{\text{дд}}$ , МОм	0,252...1,071	0,007...0,542	0,868...0,95

В связи с тем, что наиболее важную роль в значении контактного сопротивления деталь-деталь играют параметры шероховатости поверхности и толщина окисной пленки, были проведены дополнительные расчеты сопротивления поверхностного слоя толщиной 3 мкм (наибольшая высота профиля шероховатости [20, 27]). Для этого провели разбивку зоны прохождения тока на конечные элементы по аналогии с работами [1, 9, 10, 34], установив следующие параметры:

- шаг сетки ( $\Delta Z = \Delta x$ )  $0,05 \text{ мкм}$  (средний шаг неровностей [20, 27]);
- площадь сечения элемента ( $\Delta S$ ) по оси  $Z$   $0,0025 \text{ мкм}^2$ ;
- площадь контакта  $0,13 \dots 2,38 \text{ мм}^2$  [20].

Для реализации расчетов переходного сопротивления деталь-деталь методом конечных элементов разработана программа для ПЭВМ.

После разбивки на конечные элементы в приконтактной зоне моделировали шероховатость с помощью генератора псевдослучайных чисел (рис. 1). Фактическая площадь контакта микрошероховатостей  $S_{k, \text{факт}}$ , полученных в результате моделирования поверхностей металлов составляет  $1,5 \dots 1,8\%$  от  $S_k$ , что хорошо согласуется с данными работ [28, 31] и, в зависимости от степени износа электродов, лежит в диапазоне  $0,0021 \dots 0,428 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 1.** Схема разбивки приконтактной области на элементы

Сравнивая результаты расчетов фактической площади контакта, выполненные двумя методами (по формуле (13) и результаты моделирования по-

верхностей металлов), можно сделать вывод, что минимальные значения совпадают, максимальные – различаются в 2 раза. Однако в обоих случаях наблюдается существенный разброс значений (в 200...450 раз).

На основании полученных значений площади контакта было рассчитано контактное сопротивление деталь-деталь, представленное в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 2).

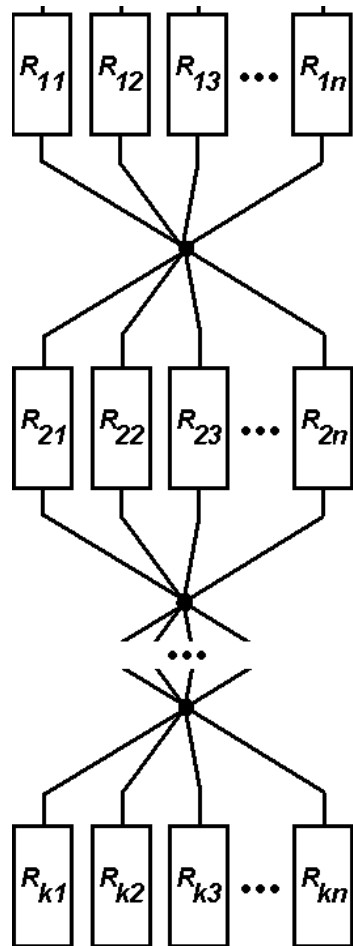


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема приконтактной области

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Технология и оборудование контактной сварки / Под ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1975. – 536 с.
2. А.с. 2236333. МКИ<sup>7</sup> В23К 11/24. Способ контактной сварки и источник питания для его реализации / А.С. Киселев, М.М. Нехода, Б.Ф. Советченко и др. – № 2003103870/02; заявл. 10.02.03; Опубл. 20.09.04, Бюл. № 26 // Открытия. Изобретения. 2004.
3. Моравский В.Э., Ворона Д.С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. – Киев: Наукова думка, 1985. – 272 с.
4. Кочергин К.А. Контактная сварка. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
5. Быковский О.Г., Горбунов А.Д. Математическое моделирование теплового состояния металла при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 1990. – № 6. – С. 36–38.

Сопротивление каждого конечного элемента  $R_{ij}$ , в соответствии с рис. 2, можно определить по выражению

$$R_{ij} = \rho_{ij} \cdot \frac{\Delta Z}{\Delta S},$$

где  $\rho_{ij}$  – удельное сопротивление каждого конечного элемента,  $\Delta Z$  – шаг сетки по оси  $Z$ ,  $\Delta S$  – площадь сечения элемента.

Соответственно, общее сопротивление деталь-деталь  $R_{\text{до}}$  будет

$$R_{\text{до}} = 2 \cdot \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ij}} \right)^{-1} = 2 \cdot \frac{Z_{\text{max}}}{S_k} \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^n \frac{1}{\rho_{ij}} \right)^{-1},$$

где  $k = \frac{Z_{\text{max}}}{\Delta Z}$ ,  $n = \frac{S_k}{\Delta S}$ .

В результате проведенных вычислений были определены значения переходного контактного сопротивления деталь-деталь, которое при использовании новых электродов составляет 0,52 мОм, а по мере их износа уменьшается до 0,014 мОм.

Фактические значения начальных сопротивлений электрод-электрод, определенные экспериментально [20, 27], лежат в диапазоне 4...16 мОм.

**Выводы**

Проведен сравнительный анализ результатов расчетных значений первоначальных сопротивлений участка электрод-электрод и деталь-деталь при контактной точечной сварке деталей из циркониевого сплава Э110. Результаты расчетов, полученные с использованием рекомендуемых методов и опубликованных значений физико-механических свойств материалов, характеризуются значительным разбросом (до 135 раз), что во многом обусловлено изменением токопроводящего сечения деталей по мере износа электродов. Все расчетные значения, полученные различными методами, значительно отличаются от экспериментальных, что подтверждает необходимость проведения измерений при разработке режимов сварки.

6. Гельман А.С. Контактная электросварка. – М.: Машгиз, 1949. – 499 с.
7. Гельман А.С. Технология и оборудование контактной электросварки. – М.: Машиностроение, 1960. – 367 с.
8. Контроль точечной и роликовой электросварки / Б.Д. Орлов, П.Л. Чулошников, В.Б. Берденский и др. – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.
9. Ерофеев В.А., Кудинов Р.А. Компьютерная модель контактной точечной сварки для анализа качества соединений // САПР и экспертные системы в сварке. – Тула: ТулГТУ, 1995. – С. 84–92.
10. Судник В.А., Ерофеев В.А., Кудинов Р.А. и др. Имитация контактной точечной сварки сталей на машинах переменного тока с помощью программного обеспечения SPOTSIM // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 3–8.

11. Контактная сварка / Ф.А. Аксельрод, М.П. Зайцев, Г.И. Злобин и др. – М.: Профтехиздат, 1962. – 464 с.
12. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
13. Рыськова З.А. Трансформаторы для электрической контактной сварки. – Л.: Энергия, 1975. – 280 с.
14. Полис У.Ю., Рудзит Я.А., Атауш В.Е. Расчет исходного контактного сопротивления при точечной микросварке // Сварочное производство. – 2000. – № 1. – С. 24–28.
15. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
16. Металловедение и термическая обработка стали / Под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургиздат, 1961. – Т. 1. – 747 с.
17. Гнюсов С.Ф., Киселев А.С., Слободян М.С. и др. Формирование соединения при точечной микросварке // Сварочное производство. – 2005. – № 4. – С. 37–41.
18. Брюханов А.А., Бобров В.М., Тарасов А.Ф. Интегральные характеристики текстуры и анизотропия свойств поликристаллического циркония, деформированного холодной прокаткой // Физика металлов и металлургия. – 1996. – Т. 82. – № 6. – С. 71–75.
19. Slobodyan M.S., Kiselev A.S., Gniusov S.F., Sovetchenko B.F. Formation of a joint resistance spot microwelding // Welding International. – 2005. – V. 9. – P. 737–741.
20. Слободян М.С. Управление свойствами соединений сплавов циркония. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 108 с.
21. Полетика Т.М., Нариманова Г.Н., Колосов С.В. Пластическое течение в сплавах циркония с гексагонально плотноупакованной решеткой на макро- и микроуровнях // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 126–128.
22. Клименко С.П., Грицина В.М., Петельгузов И.А. и др. Использование методов измерения термоЭДС и электросопротивления для исследования фазовых превращений в сплаве Zr–Nb // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – № 6. – С. 142–148.
23. Гуляев А.И. Технология точечной и рельефной сварки сталей в массовом производстве. – М.: Машиностроение, 1978. – 246 с.
24. Слиозберг С.К., Чулошников П.Л. Электроды для контактной сварки. – М.: Машиностроение, 1972. – 96 с.
25. Подола Н.В., Руденко П.М., Гавриш В.С. Алгоритмы компенсации износа электродов при контактной точечной сварке // Автоматическая сварка. – 2005. – № 4. – С. 26–30.
26. Гнюсов С.Ф., Киселев А.С., Слободян М.С., Советченко Б.Ф. Влияние состояния рабочей поверхности электродов на стабильность качества соединений при точечной микросварке // Сварка в Сибири. – 2005. – № 1. – С. 60–62.
27. Слободян М.С., Киселев А.С., Гнюсов С.Ф., Советченко Б.Ф. Стабилизация контактных сопротивлений при точечной микросварке // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 312. – № 1. – С. 130–133.
28. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых тел. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 110 с.
29. Бумбиерис Э.В. Начальный контакт деталей и стабильность процесса точечной микросварки // Сварочное производство. – 1993. – № 1. – С. 27–29.
30. Tomlinson G.A. A molecular theory of friction // Philosophy Magazine. – 1929. – V. 7. – P. 905–939.
31. Кабанов Н.С. Сварка на контактных машинах. – М.: Высшая школа, 1973. – 255 с.
32. Абрамов В.В., Шоршоров М.Х., Дрюнин С.С. и др. О характере изменения и расчете площади контакта между разнородными материалами при сварке давлением с нагревом // Сварочное производство. – 1995. – № 1. – С. 11–16.
33. Судник В.А., Ерофеев В.А., Кудинов Р.А. и др. Имитация контактной точечной сварки сталей на машинах переменного тока с помощью программного обеспечения SPOTSIM // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 3–8.
34. Березиенко В.П., Фурманов С.М. Уменьшение глубины вмятин от электродов при контактной точечной сварке // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 20–26.

Поступила 22.05.2009 г.