

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 539.3

ПРОВОДИМОСТЬ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ: ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф., 2024

Исследовано влияние параметров дискретного контакта технических поверхностей на одну из составляющих контактного сопротивления – сопротивление стягивания. Основными факторами, определяющими электрическую и тепловую проводимость контакта шероховатых поверхностей, являются число площадок (пятен) фактического контакта пиков шероховатости и их средний размер. На основании аналитической и числовой (компьютерной) моделей контактного соединения проанализировано влияние номинального контактного давления на указанные факторы. Адекватность аналитической и числовой моделей реальным характеристикам контактного соединения проверена экспериментально. Показано, что реальный диапазон возможных изменений среднего размера площадок контакта весьма невелик, поэтому основным фактором, целенаправленным изменением которого можно снизить контактное сопротивление, остается число площадок контакта пиков шероховатости. Приведен пример такого целенаправленного изменения данного параметра контакта.

Ключевые слова: контакт шероховатых поверхностей, площадь контакта, число и размер площадок контакта, контактное сопротивление, сопротивление стягивания, шероховатость.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-5-15

ВВЕДЕНИЕ

Снижение потерь при передаче и распределении электроэнергии всегда было и в перспективе останется важнейшей технико-экономической задачей. Наряду с потерями энергии вследствие омического сопротивления проводников, вызванного рассеянием электронов на дефектах кристаллической решетки материала проводника, не менее существенный вклад в общий баланс потерь вносят многочисленные контактные соединения, составляющие неотъемлемую часть любой электрической цепи. Природа контактного сопротивления принципиально отличается от омического сопротивления сплошной проводящей среды и связана с двумя основными причинами [1–4]. Во-первых, это дискретность контакта технических поверхностей, вызванная их волнистостью, шероховатостью и субшероховатостью. Наличие естественного и технологического рельефа на любой технической поверхности приводит к тому, что движение носителей электрического заряда через границу двух деталей происходит только на малых участках номинальной поверхности, образованных деформацией контактирующих волн и неровностей микро- и наношероховатости. Линии тока стягиваются к этим малым пятнам фактического контакта, что проявляется в виде дополнительного

электрического сопротивления – так называемого сопротивления стягивания. Вторая причина контактного сопротивления заключается в присутствии на поверхности контакта плохо проводящих диэлектрических или полупроводниковых пленок – так называемых пленок потускнения (оксидных, сульфидных, полимерных и т.п.). Эти две причины контактного электросопротивления имеют принципиально разную физическую природу и, соответственно, требуют принципиально разных подходов для их минимизации.

В случае тепловых контактов основным требованием к контактным соединениям является малое термическое сопротивление для обеспечения эффективного теплоотвода. Одной из составляющих контактного термического сопротивления является сопротивление стягивания линий теплового тока к пятнам фактического контакта, зависящее от тех же факторов, что и контактное электросопротивление.

Цель данной статьи состоит в анализе ключевых факторов, влияющих на сопротивление стягивания, для выявления наиболее эффективных путей его снижения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Для анализа факторов, влияющих на сопротивление стягивания контакта технических поверхностей, возможно использование следующих трех инструментов.

Математическая модель позволяет получить аналитические выражения, устанавливающие зависимость сопротивления стягивания от тех или иных параметров и дающие представление о степени их влияния на величину сопротивления. На основании известных работ Дж. Максвелла и Р. Хольма для сопротивления стягивания линий тока к круговому пятну контакта двух пиков шероховатости можно записать

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a}, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления материалов контактирующих деталей; a – радиус площадки контакта [3–5].

Контакт двух шероховатых поверхностей можно рассматривать как ансамбль n_r площадок контакта (n_r – число контактирующих пиков шероховатости). Если пренебречь взаимным влиянием отдельных площадок, то контактное соединение можно представить состоящим из n_r параллельных соединений, каждое из которых имеет сопротивление, определяемое формулой (1), а общее сопротивление находится из уравнения

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4\bar{a}n_r},$$

где \bar{a} – средний радиус круговых пятен контакта (a -пятен по Р. Хольму).

Если контактируют детали из материалов с одинаковым удельным сопротивлением $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, уравнение для сопротивления стягивания приобретает вид

$$R_c = \frac{\rho}{2\bar{a}n_r}. \quad (2)$$

Взаимным влиянием отдельных площадок контакта можно пренебречь при достаточно большом среднем расстоянии \bar{l} между ними по сравнению с размерами самих площадок. Так, при $\frac{\bar{l}}{2\bar{a}} > 10$ погрешность расчета сопротивления стягивания по

формуле (2) без учета взаимного влияния пятен контакта не превышает 15 %, а при $\frac{\bar{l}}{2\bar{a}} > 20$ она составляет не более 10 %.

Величины \bar{a} и n_r могут быть рассчитаны на основании теоретической модели контакта шероховатых поверхностей Н.Б. Демкина [5]:

$$n_r = n_m \varepsilon^{v-1}, \quad (3)$$

$$\bar{a} = \sqrt{\frac{A_r}{\pi n_r}}, \quad (4)$$

где n_m – число выступов на уровне средней плоскости шероховатого слоя; v – показатель степени в уравнении степенной аппроксимации начального участка опорной кривой $\eta = \frac{A_r}{A_n} = \alpha_y t_m \varepsilon^v$; A_r и A_n – фактическая и номинальная площади контакта соответственно; α_y – коэффициент упругой осадки выступов шероховатости; t_m – относительная опорная длина на уровне средней линии шероховатости; $\varepsilon = \delta / R_p$ – относительная деформация шероховатого слоя; δ – абсолютная деформация шероховатого слоя (сближение контактирующих поверхностей); R_p – максимальная высота пика профиля шероховатости.

Относительная деформация контакта ε рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \left(\frac{p_n}{\alpha_y t_m p_r} \right)^{\frac{1}{v+\omega}}, \quad (5)$$

где p_r – фактическое давление; $\omega = 0$ и $\omega = 1/2$ при пластическом и упругом характере деформации шероховатого слоя соответственно. Фактическое давление при пластической деформации шероховатости равно микротвердости материала контактирующих деталей, при упругой деформации шероховатости можно воспользоваться понятием упругой твердости [5] и принять $p_r \approx 0,25 E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}}$, где r – средний радиус кривизны вершин пиков шероховатости; E^* – эквивалентный модуль упругости материала контактирующих деталей.

Компьютерная (числовая) модель позволяет полнее отразить основные свойства моделируемой системы, хотя, как и любая модель, остается беднее оригинала. Используемая нами компьютерная модель учитывает распределение радиусов кривизны вершин пиков шероховатости, в отличие от описанной выше модели, в которой считается, что вершины всех пиков имеют одинаковый радиус кривизны, равный среднему значению этого параметра. В компьютерной модели распределение высот пиков шероховатости и радиусов кривизны их вершин описывается гибким двухпараметрическим бета-распределением с функцией плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1},$$

где x – случайная величина (в нашем случае высота пика или радиус кривизны его вершины); α и β – параметры распределения; $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция Эйлера.

Кроме того, компьютерная модель учитывает различный характер деформирования отдельных пиков шероховатости – упругий или пластический, чего не позволяет аналитическая модель.

Входными параметрами компьютерной модели являются параметры шероховатости, физико-механические свойства материалов контактирующих деталей и номинальное давление, выходными параметрами – число контактирующих выступов n_r , средний диаметр пятен фактического контакта \bar{a} и сопротивление стягивания R_c .

Экспериментальная проверка теоретических результатов служит доказательством адекватности любой модели оригиналу. Методика экспериментального определения сопротивления стягивания контактного соединения кратко описана ниже.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЯГИВАНИЯ

Эксперименты по измерению сопротивления стягивания в контакте шероховатых поверхностей проводились на приборе для измерения контактных деформаций [5]. Использовались цилиндрические кольцевые в плане образцы наружным диаметром 28 мм и внутренним 20 мм, контактирующие торцевыми поверхностями. Номинальная площадь контакта $A_n = 300 \text{ мм}^2$. Для повышения точности определения сопротивления стягивания образцы были изготовлены из хромоникелевого сплава с высоким удельным сопротивлением $\rho = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, а для минимизации влияния поверхностных пленок потускнения имели золотое покрытие (золото считается наиболее стойким к потускнению материалом). Параметры шероховатости торцевых контактирующих поверхностей образцов были определены профилометрированием: $R_p = 6 \text{ мкм}$, $r = 30 \text{ мкм}$. Малые размеры номинальной площади контакта в виде кольца шириной 4 мм позволяют пренебречь наличием волнистости на контактирующих поверхностях.

Измерения сопротивления стягивания проводили по известной четырехпроводной схеме методом вольтметра – амперметра. Сила тока через контакт до 10 А.

Номинальное контактное давление изменялось в диапазоне 0,1–3 МПа. Нормальная нагрузка на контакт обеспечивалась винтовым устройством прибора и контролировалась образцовым динамометром системы Н.Г. Токаря.

Результаты экспериментов в сравнении с теоретической и компьютерной моделями контакта приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Адекватность числовой модели контакта реальному контактному соединению подтверждается рис. 1. Величины сопротивления стягивания, рассчитанные с помощью компьютерной модели контакта и определенные экспериментально по описанной выше методике, хорошо согласуются. Как экспериментальные, так и теоретические значения R_c в зависимости от номинального контактного давления подчиняются степенному закону вида

$$R_c = K p_n^{-m}. \quad (6)$$

Если величина R_c выражена в миллиомах (мОм), а величина p_n – в мегапаскалях (МПа), то параметры в уравнении (6) имеют значения $K = 0,10$ и $m = 0,87$ для экспериментальных зависимостей и $K = 0,12$ и $m = 0,84$ для расчетных. Данные результаты дают основания для использования компьютерной модели в качестве инструмента анализа влияния различных факторов на величину сопротивления стягивания.

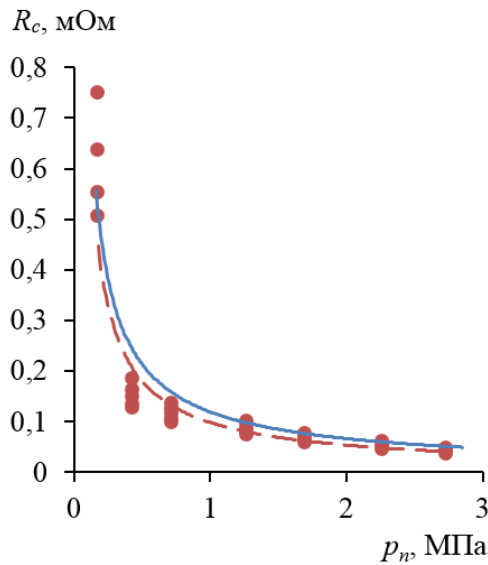


Рис. 1. Зависимость сопротивления стягивания от номинального давления:
сплошная линия – результат компьютерного моделирования;
точки – экспериментальные значения; пунктир – аппроксимирующая зависимость

Для модельного контактного соединения выбраны параметры реальных контакт-деталей. Материал контакт-деталей – бронза БрБ2 с удельным сопротивлением $\rho = 0,07$ мкОм · м, твердостью $H = 1\,500$ МПа и модулем упругости $E = 130$ ГПа. Параметры шероховатости соответствуют обработке фрезерованием: $R_p = 6$ мкм; $r = 0,6$ мм; $tm = 0,5$.

Высоты пиков шероховатости и радиусы кривизны их вершин подчиняются бета-распределению с различными значениями параметров. Для плотности вероятности радиусов кривизны вершин выступов на основании экспериментальных данных приняты значения $\alpha = 1,2$ и $\beta = 3$ во всех расчетах; что же касается плотности вероятности высот пиков шероховатости, то использованы два варианта: $\alpha = \beta = 2$ и $\alpha = \beta = 3$.

Результаты моделирования представлены на рис. 2–4. Из рис. 2 следует, что зависимость числа пятен фактического контакта n_r от номинального давления хорошо описывается степенными зависимостями:

при $\alpha = \beta = 2$

$$n_r = 385p_n^{0,56};$$

при $\alpha = \beta = 3$

$$n_r = 330p_n^{0,61},$$

где величина давления p_n выражена в мегапаскалях (МПа).

Средний радиус пятен фактического контакта \bar{a} от номинального давления зависит весьма слабо (рис. 3) – в степени $0,11\dots 0,15$. При изменении номинального давления на три порядка в диапазоне от десятых долей до десятков мегапаскалей средний диаметр пятен контакта вырос всего примерно в два раза – от 4 до 8 мкм, причем практически независимо от параметров бета-распределения высот пиков шероховатости.

Результаты моделирования ожидаемо свидетельствуют, что сопротивление стягивания исследуемого модельного контактного соединения убывает с ростом номинального контактного давления по степенному закону, аналогичному уравнению (6) и зависимости, представленной на рис. 1. Зависимость $R_c(p_n)$, полученная с помощью числовой модели контакта, иллюстрируется рис. 4 для двух различных функций плотности вероятности высот пиков шероховатости (параметры соответствующих бета-распределений указаны в подрисуночной подписи). Как видно из рис. 4, вид функции плотности вероятности высот пиков шероховатости практически не влияет на зависимость $R_c(p_n)$. Соответствующие аппроксимирующие зависимости, полученные методом наименьших квадратов, имеют вид, показанный на рис. 2.

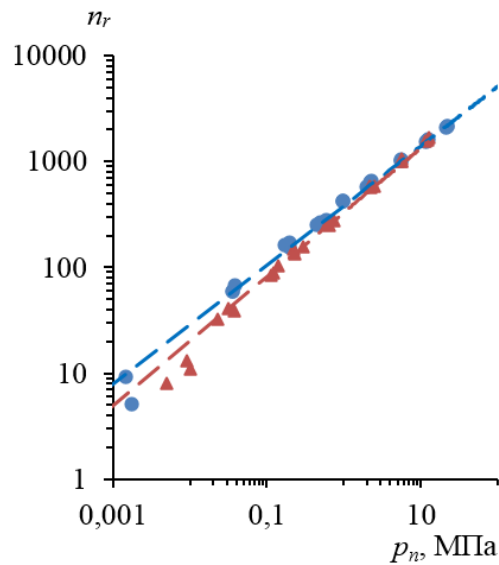


Рис. 2. Зависимость числа пятен фактического контакта от номинального давления:
 ● – $\alpha = \beta = 2$; ▲ – $\alpha = \beta = 3$; пунктир – аппроксимирующие зависимости

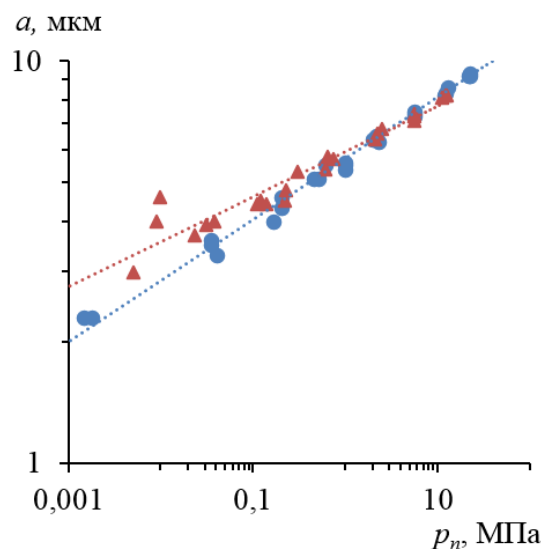


Рис. 3. Зависимость среднего радиуса пятен фактического контакта от номинального давления:
 ● – $\alpha = \beta = 2$; ▲ – $\alpha = \beta = 3$;
 пунктир – аппроксимирующие зависимости

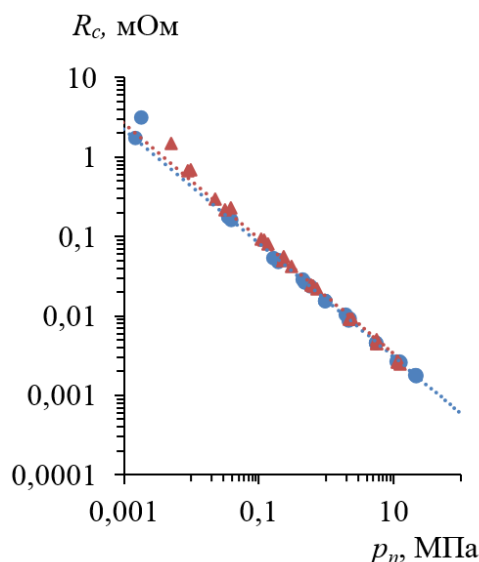


Рис. 4. Зависимость сопротивления стягивания от номинального давления:
 ● – $\alpha = \beta = 2$; ▲ – $\alpha = \beta = 3$; пунктир – аппроксимирующие зависимости

При $\alpha = \beta = 2$

$$R_c = 0,016p_n^{-0,72};$$

при $\alpha = \beta = 3$

$$R_c = 0,018p_n^{-0,72},$$

где величина сопротивления R_c выражена в миллиомах (мОм), а величина давления p_n – в мегапаскалях (МПа).

Сопоставимые результаты дают аналитические модели контактного соединения (уравнения (3)–(5)). Сопротивление стягивания как функция номинального давления выражается аналитическими уравнениями:

при $\nu = 3$ (примерно соответствует $\alpha = \beta = 2$):

$$R_c = 0,018p_n^{-0,70},$$

при $\nu = 3,5$ (примерно соответствует $\alpha = \beta = 3$):

$$R_c = 0,025p_n^{-0,72}.$$

Из приведенных результатов численного и аналитического моделирования контактного соединения следует, что, в отличие от среднего радиуса пятен контакта, число этих пятен достаточно сильно зависит от номинального давления. Например, при увеличении номинального давления в два раза число пятен фактического контакта возрастает почти в полтора раза.

Таким образом, из двух параметров в уравнении (2) эффективно снизить сопротивление стягивания может только увеличение числа контактирующих пиков шероховатости n_r .

Один из очевидных способов увеличения числа контактирующих выступов – увеличение номинального контактного давления. Однако этот способ ограничен величиной n_m – числом пиков шероховатости на уровне средней плоскости.

Увеличение числа выступов n_m возможно за счет уменьшения среднего шага неровностей шероховатости (средняя ширина элементов профиля RSm по ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Как известно, шаговый параметр RSm сильно коррелирован с амплитудными параметрами (Ra или Rp), т.е. с чистотой обработки поверхности. Так, по данным Я.А. Рудзита [6] для таких методов обработки, как плоское и круглое шлифование и доводка в диапазоне $Ra = 0,1...2,5$ мкм, корреляционная зависимость имеет вид

$$R_{Sm} \approx 0,057R_a^{0,8}$$

с коэффициентом 0,88, что считается высокой степенью корреляции. Таким образом, малый шаг неровностей достижим за счет более высокой чистоты поверхности. Однако это требует изменения технологических режимов обработки или даже изменения самой технологии.

Для данного конкретного способа и конкретных режимов обработки поверхности увеличение числа n_m возможно только за счет увеличения номинальной площади контакта. Тогда пропорционально возрастет число пиков n_m . Однако при этом также пропорционально возрастет сила нажатия (нормальная нагрузка) в контакте, что не всегда возможно. Кроме того, с ростом номинальной площади контакта возрастает негативное влияние волнистости и макроотклонений формы поверхности. Оптимальным решением является разделение одного контактного соединения на два независимых параллельных соединения. Это решение иллюстрируется рис. 5 на примере болтового соединения двух шинопроводов. На рис. 5а схематически показано одноболтовое соединение двух плоских шинопроводов. Увеличение номинальной площади контакта (рис. 5в) требует увеличения усилия нажатия, что достигается применением двухболтового соединения. Однако неравномерность распределения нагрузки вследствие отклонений формы поверхности и влияния волнистости не позволяет снизить сопротивление пропорционально увеличению номинальной площади контакта. В работах Н.Н. Дзекцера предложено выполнять продольный разрез шин в области их контактирования, как показано на рис. 5б. По сути, этим и достигается создание двух независимых параллельных контактных соединений. Аналогичный способ снижения контактного сопротивления предложил М. Браунович для высоковольтных контактных соединений. Как показали эксперименты, применение контактных соединений, выполненных по аналогичной рис. 5б схеме, позволяет снизить сопротивление контакта в 1,3...1,5 раза по сравнению со схемой, аналогичной рис. 5в [3].

Кардинально снизить сопротивление стягивания в электроконтактном соединении можно, устранив саму причину стягивания линий тока – дискретность контакта. Для этого межконтактный зазор заполняется проводящей средой, например токопроводящей смазкой или жидким металлом [7–9]. В этом случае контактное соединение, оставаясь разборным по конструкции, приобретает все преимущества неразборных сварных и паяных электроконтактных соединений: малое сопротивление, малый нагрев, малое усилие нажатия, стойкость к потускнению контактирующих поверхностей, низкий уровень электроконтактных шумов.

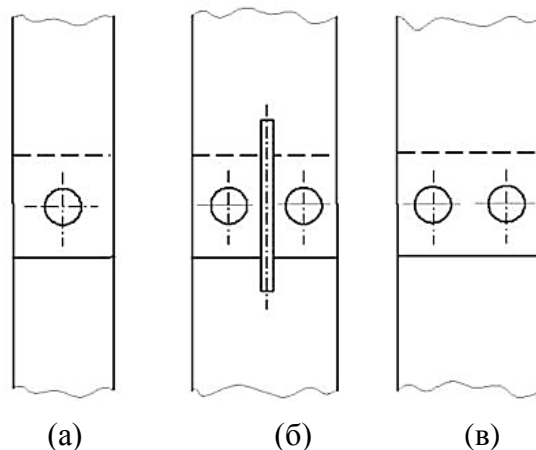


Рис. 5. Схемы болтового соединения двух плоских шинопроводов: одноболтовое соединение (а); двухболтовое соединение шин с продольным разрезом с увеличенной номинальной площадью контакта (б); аналогичное соединение шин без разреза (в)

Приведенный выше анализ факторов, влияющих на электрическое сопротивление контактных соединений, справедлив и для термического сопротивления. Такое заключение основано на электротепловой аналогии, заключающейся в том, что распространение тепла и электрического заряда описывается одинаковыми дифференциальными уравнениями. В результате аналогично закону Ома в процессе теплопереноса наблюдается пропорциональность теплового потока \dot{Q} (аналога электрического тока I) движущей силе процесса – разности температур ΔT (аналогу разности потенциалов U в электричестве): $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T}$, где R_T – термическое сопротивление, аналог электрического сопротивления. Одной из составляющих контактного термического сопротивления является сопротивление стягивания линий теплового тока к пятнам фактического контакта, которое также зависит от числа пятен фактического контакта и их размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ основных факторов, определяющих одну из двух составляющих контактного электрического или термического сопротивления – сопротивление стягивания, показал, что наиболее существенное влияние на этот параметр контактного соединения оказывает число пятен фактического контакта. Пятна фактического контакта – это ансамбль малых площадок, образовавшихся в результате совместной деформации двух контактирующих пиков шероховатости соприкасающихся поверхностей. Поэтому число и размер этих площадок зависят от параметров шероховатости контактирующих поверхностей и нормальной контактной нагрузки (номинального давления в контакте). Поскольку средний размер площадок варьируется в малых пределах, использовать эти вариации для снижения контактного сопротивления неэффективно. Увеличить число пятен фактического контакта и тем самым уменьшить сопротивление стягивания можно увеличением до известных пределов номинального контактного давления, повышением чистоты обработки поверхности (уменьшением шероховатости), уменьшением волнистости и макроотклонений контактирующих поверхностей за счет выбора оптимальной технологии их обработки. Наиболее простым и эффективным способом увеличения числа пятен фактического контакта является разделение номинальной площади контакта на

несколько независимых площадей меньшей величины. Конкретный способ реализации этого принципа зависит от конструкции контактного соединения. Примером такого способа может служить продольный разрез шинопроводов в зоне их контактирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань, 2021. 592 с.
2. Electrical Contacts: Principles and Applications / ed. P.G. Slade. New York: Marcel Dekker, 1999. 1210 p.
3. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 560 с.
4. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ, 2010. 116 с.
6. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
7. Митюрёв А.А. Исследование характеристик галлийсодержащих материалов для скользящих электрических контактов с промежуточной жидкометаллической средой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 17–24.
8. Митюрёв А.А. Исследование электрической проводимости промежуточной жидкометаллической среды скользящих электрических контактов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 5–10.
9. Митюрёв А.А. Некоторые закономерности применения промежуточных жидкометаллических сред в скользящих электрических контактах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 11–18.

Для цитирования: Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Проводимость контактных соединений: определяющие факторы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 5–15.

CONDUCTIVITY OF CONTACT CONNECTIONS: DOMINANT FACTORS

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., A.F. GUSEV, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The influence of the parameters of discrete contact of technical surfaces on one of the contact resistance components – constriction resistance – is studied. The dominant factors determining the electrical and thermal conductivity of the rough surfaces contact are the number of contact areas of roughness peaks and their average size. Based on analytical and numerical (computer) models of contact joints, the influence of nominal contact pressure on these factors is analyzed. The adequacy of the analytical and numerical models to the real characteristics of the contact connection has been verified experimentally. It is shown that the real range of possible changes in the average size of the contact areas is very small, and

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (22), 2024*

the dominant factor, the targeted change of which can be used to reduce the contact resistance, remains the number of contact areas of the roughness peaks. An example of such a targeted change in this contact parameter is given.

Keywords: contact of rough surfaces, contact area, number and size of contact areas, contact resistance, constriction resistance, roughness.

Поступила в редакцию/received: 09.01.2024; после рецензирования/ revised: 24.01.2024;
принята/accepted: 30.01.2024

УДК 621.03

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ac.tstu.tver@mail.ru

© Болотов А.Н., 2024

Работа посвящена изучению влияния стационарного магнитного поля на квазихрупкое разрушение образцов из ферромагнитного материала – чугуна марки СЧ35. Показано, что в намагниченных образцах наблюдается анизотропный характер квазихрупкого разрушения, а величина механических напряжений, при которых происходит разрушение, несколько снижается. Доминируют трещины, которые начинают распространяться вдоль силовых линий магнитного поля. Сделано обоснованное предположение, что магнитные силы, действующие на стенки микротрещины, стимулируют ее рост при более низких механических напряжениях. Магнитные силы пропорциональны намагниченности образцов во второй степени. Максимальный эффект от действия магнитного поля проявляется в образцах, намагниченных до насыщения, и это условие определяет величину напряженности намагничивающего поля.

Ключевые слова: серый чугун, магнитное поле, микротрещины, квазихрупкое разрушение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-15-22

ВВЕДЕНИЕ

Проблема влияния внешних полей на свойства материалов давно привлекает интерес ученых, но до сих пор далека от решения [1–4]. Установлено сильное влияние магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов, но, как отмечается, необходимы дальнейшие исследования для понимания физической сущности процессов. Было показано, что для образцов из полиэтилентерефталата наблюдается хрупкое разрушение в магнитном поле, тогда как без поля образцы растягиваются до 300...350 %; для полимеров зафиксировано снижение модуля упругости в магнитном поле примерно в 2,5 раза; показано замедление релаксационных процессов в магнитном поле. На текущий момент удалось лишь качественно объяснить наблюдаемые эффекты [1, 2].

В последние годы появляется все больше работ, посвященных влиянию стационарного магнитного поля на механические свойства ферромагнитных металлов. Повышенный интерес к этой теме объясняется возможностью управлять процессами,