

УДК 621.3.082:373

**В. В. Малеронок, А. В. Алифанов, И. А. Богданович,**

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования  
Республики Беларусь, ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь,  
+375 (29) 352 71 81, alifanov\_aav@mail.ru

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Разработаны способ и схема измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из токопроводящих материалов как показателя качества (однородности, мелкодисперсности, бездефектности) после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетических обработок, заключающийся в измерении потенциала (падение напряжения) на упрочненном слое с последующим расчетом полного электрического сопротивления (прямопропорциональной величины) по заданной величине силы электрического тока, отличающийся от аналогов тем, что в процессе измерения применяется зондирующий сигнал переменного тока высокой частоты, а для процесса измерения используется параллельная схема подключения исследуемого изделия в измерительную цепь.

**Ключевые слова:** металлическое изделие; полное электрическое сопротивление; переменный ток высокой частоты; упрочненный слой; скин-эффект; измерительная электрическая цепь.

Рис. 1. Библиогр.: 7 назв.

**V. V. Maleronok, A. V. Alifanov, I. A. Bogdanovich**

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 21 Voykova Str.,  
225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375(29) 352 71 81, alifanov\_aav@mail.ru

## RESEARCH METHOD OF THE METAL SAMPLES STRENGTHENED LAYER USING HIGH-FREQUENCY CURRENTS

The author has developed a method and scheme for measuring the total electrical resistance of a hardened layer of products made of conductive materials as an indicator of quality (homogeneity, fine dispersion, defect-free) after conducting magnetic-pulse, ion-plasma and other types of high-energy treatments. The method consists in measuring the potential (voltage drop) on the hardened layer with the subsequent calculation of the total electrical resistance (a directly proportional magnitude) from a given value of the electric current strength. The method differs from analogues in the fact that a probing signal of an alternating current of high frequency is used in the process of measurement, and, as for the process of measurement, a parallel circuit is used to connect the testing product to the measuring circuit.

**Keywords:** metal product; electrical impedance; high frequency alternating current; hardened layer; skin effect; measuring electrical circuit.

Fig. 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** Известен мостовой способ измерения электрического сопротивления [1], основанный на включении измеряемого сопротивления в мостовую схему с последующей балансировкой этой схемы и определении неизвестного сопротивления по условию баланса мостовой схемы.

С помощью этого способа можно достаточно точно определять величину сопротивления в широком диапазоне, кроме того, он может быть использован как на постоянном токе, так и на переменном. Недостатками этого способа является то, что при измерении очень малых сопротивлений ( $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Ом), для обеспечения необходимой чувствительности моста, требуется через измеряемое сопротивление пропускать очень большие токи ( $10 \dots 10^2$  А), а при измерении больших сопротивлений (более 1 МОм) — повышать напряжение на исследуемом изделии до величины  $10^2 \dots 10^3$  В, что ограничивает область его применения.

Существует способ измерения электрического сопротивления [2], заключающийся в том, что через измеряемое сопротивление пропускают электрический ток, после чего выполняют первое измерение величины тока и падения напряжения на измеряемом сопротивлении, далее по их значениям определяют первое значение сопротивления; после первого измерения изменяют величину проходящего тока через измеряемое сопротивление путем включения последовательно с измеряемым сопротивлением дополнительного сопротивления; затем выполняют второе измерение величины тока и падения напряжения на измеряемом сопротивлении и по их значениям определяют второе значение сопротивления, а измеряемое сопротивление определяют по приведенной формуле с учетом значений внутреннего сопротивления устройства измерения сопротивления без дополнительного сопротивления. Технический результат заключается в расширении функциональных возможностей известного способа.

Достоинствами данного способа являются: простота, хорошая точность измерения и малые затраты на реализацию. Недостаток — невозможность определения электрического сопротивления упрочненного поверхностного слоя материала, который является показателем качества высокоэнергетической обработки изделий из металлов.

Известен способ определения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя материала [3], включающий измерение электрического сопротивления контакта поверхностного слоя материала с металлической плитой методом амперметра-вольтметра, отличающийся тем, что дополнительно измеряют силу прижима поверхностного слоя материала к металлической плите в контакте, параметр шероховатости и твердость поверхностного слоя материала и определяют удельное сопротивление поверхностного слоя материала по выведенной формуле.

Достоинство данного способа — возможность определения качества поверхности после механической обработки с высокой точностью. Основным его недостатком является то, что электрическое сопротивление зависит от состояния поверхности (шероховатости), что не позволяет говорить о качестве упрочненного слоя и величине полного электрического сопротивления по всей длине изделия.

В [4] представлен способ, содержащий в своей основе метод амперметра-вольтметра и реализующийся с помощью корпуса, изготовленного из диэлектрического материала, в котором установлены два токопроводящих и два измерительных электрода; крышки из диэлектрического материала, прикрепленной к корпусу винтами; клемм, пружин возврата и трубочин, прикрепленных к корпусу при помощи винтов. Техническим результатом изобретения является повышение точности измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия. Подключение устройства, реализованного по данному способу, осуществляется от источника постоянного тока, например, источника постоянного питания Б5-47, через реостат  $R$ , милливольтметр, в качестве которого может быть использован прибор М 1202, пакет переключателей  $\Pi_1$ , а также эталонный реостат  $R_3$  к токоподводящим электродам. С измерительных электродов через пакетный переключатель  $\Pi_2$  напряжение подается на потенциометр постоянного тока.

Достоинствами рассмотренного способа являются: 1) простота измерения толщины токопроводящего слоя; 2) высокая контактная жесткость соединения измерительных электродов с исследуемой поверхностью. Недостатки способа: 1) невозможность измерения электрического сопротивления упрочненного слоя произвольной толщины, так как измерение производится на постоянном токе; 2) требуется изготовление специальных установок-держателей со строгим диэлектрическим изолированием четырех контактов; 3) ограничения в определении потенциала (падения напряжения) на глубине до десятых долей миллиметра, хотя упрочненный слой изделий после высокоэнергетической обработки начинается с единиц микрометров.

Анализ приведенных способов измерения показал, что они достаточно сложны в использовании и обладают недостатками, которые ограничивают их применение на практике. Целью настоящей работы является упрощение способа измерения и расширение его возможностей с обеспечением необходимой точности.

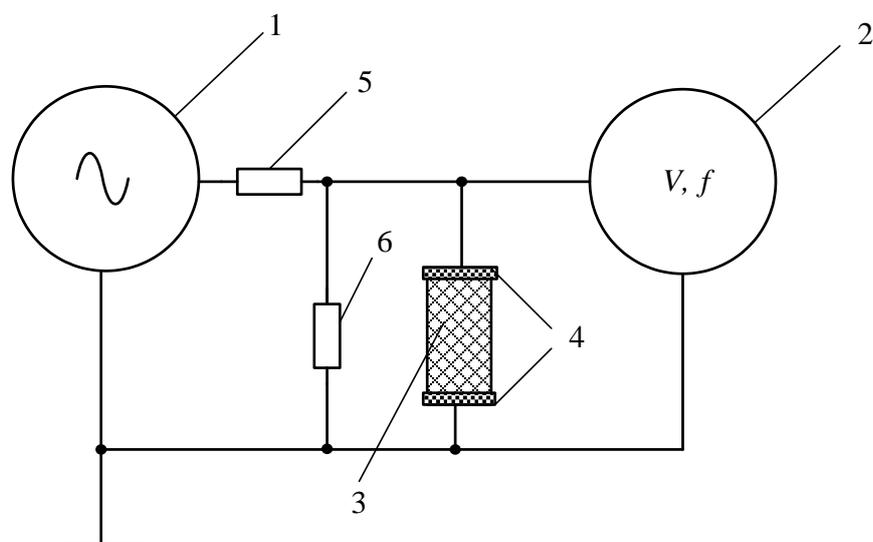
**Основная часть.** В данной работе предлагается оригинальный способ для контроля качества упрочненной поверхности изделий после термической, ионно-плазменной, магнитно-импульсной и других высокоэнергетических обработок. Он предназначен для измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий, который является показателем качества (однородности, мелкодисперсности, отсутствия или уменьшения количества структурных дефектов) после проведения обработки.

Способ также может быть использован в области измерительной техники при создании приборов по измерению электрического сопротивления слоя материала произвольной толщины, что актуально для выполняемого задания.

Для реализации предложенного способа измерения необходимо применение генератора сигналов высокой частоты. В случае приложения к электропроводящему изделию высокочастотного напряжения области, расположенные внутри проводника, будут обладать большим индуктивным сопротивлением. Это явление известно как скин-эффект. В результате этого эффекта переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое [5]. Учитывая тот факт, что при высокоэнергетических методах обработки (магнитно-импульсная, ионно-плазменная и др.) происходит воздействие именно на близкие к поверхности слои изделия, то изменение сопротивления поверхностного слоя изделия будет свидетельствовать об изменении структуры материала вблизи поверхности. Изменение структуры (увеличение однородности, образование мелкодисперсной структуры, устранение дефектов) приводит не только к изменению электрического сопротивления приповерхностных слоев, но и к их упрочнению. Таким образом, можно определить корреляцию между изменением сопротивления и изменением структуры приповерхностных слоев [6].

Для реализации предложенного способа измерения электрического сопротивления упрочненного слоя изделий из металлов с применением токов высокой частоты в данной работе предлагается использовать параллельную схему включения исследуемого изделия в измерительную цепь (рисунок 1).

Параллельная схема включения изделия в измерительную цепь содержит один генератор сигналов высокой частоты, два кольцевых контакта, один осциллограф с полосой пропускания, удовлетворяющей отношению 3 : 1 частоты зондирующего сигнала, стабилизирующий резистор (50 Ом), шунтирующий резистор (5...10 Ом).



1 — генератор высокой частоты; 2 — осциллограф; 3 — исследуемое изделие; 4 — кольцевые контакты-хомуты; 5 — стабилизирующий резистор; 6 — шунтирующий резистор

**Рисунок 1. — Параллельная схема**

Сигнальный выход генератора соединен с первым выводом стабилизирующего резистора, который вторым своим выводом соединен с первым выводом шунтирующего резистора, первым кольцевым контактом и сигнальным входом осциллографа; последний, в свою очередь, своим общим проводом соединен со вторым кольцевым контактом, вторым выводом шунтирующего резистора и общим проводом генератора. Изделие своими концами подключается между первым и вторым кольцевыми контактами.

**Алгоритм измерения электрического сопротивления при параллельной схеме включения изделия в измерительную цепь.** Для получения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделия необходимо произвести измерение падения напряжения на изделии при прохождении тока высокой частоты. Выбранная частота должна обеспечивать глубину проникновения сигнала, соответствующую толщине упрочненного слоя[7]:

$$f = \frac{503^2 \cdot \rho}{\Delta^2 \cdot \mu_r}, \quad (1)$$

где  $f$  — частота сигнала;

$\rho$  — удельное сопротивление материала заготовки;

$\Delta$  — толщина токопроводящего слоя (скин-слоя);

$\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость.

При параллельном соединении, перед проведением измерения на упрочненном изделии, необходимо получить контрольную осциллограмму напряжения сигнала высокой частоты без установки изделия в измерительную цепь и зафиксировать амплитудное значение напряжения полного сопротивления шунтирующего резистора ( $U_{ш.полн}$ ). По полученному значению ( $U_{ш.полн}$ ) с помощью заданной величины силы тока ( $I_3$ ) зондирующего сигнала необходимо произвести расчет полного сопротивления шунтирующего резистора:

$$R_{ш.полн} = \frac{U_{ш.полн}}{I_3}, \quad (2)$$

Затем необходимо установить изделие в измерительную цепь и произвести повторное измерение с фиксацией амплитудного значения падения напряжения ( $U_{и}$ ) на параллельно соединенных шунтирующем сопротивлении и исследуемом изделии. Так как соединение параллельное, то  $U_{и}$  выражается формулой:

$$U_{и} = I_3 \left( \frac{1}{R_{ш.полн}} + \frac{1}{R_{полн}} \right), \quad (3)$$

где  $R_{полн}$  — полное электрическое сопротивление упрочненного слоя изделия.

Затем по заданному значению тока ( $I_3$ ) и выражая  $R_{полн}$  из (3) производят расчет полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделия:

$$R_{полн} = \frac{I_3 \cdot R_{ш.полн}}{U_{и} \cdot R_{ш.полн} - I_3^2}. \quad (4)$$

Или с учетом (2):

$$R_{полн} = \frac{I_3 \cdot U_{ш.полн}}{U_{и} \cdot U_{ш.полн} - I_3^2}. \quad (5)$$

Если по данному алгоритму произвести измерение полного электрического сопротивления до проведения обработки изделия и после него, то полученная информация говорит о качестве появившегося упрочненного слоя (однородность, мелкодисперсность, отсутствие искривления кристаллической решетки), которое напрямую влияет на величину полного электрического сопротивления.

**Принцип работы при параллельной схеме включения изделия в измерительную цепь** (см. рисунок 1). Перед началом измерения сопротивления упрочненного слоя изделия производят контрольное снятие осциллограммы напряжения сигнала высокой частоты (без установки изделия). Зондирующий сигнал выбирают с частотой, обеспечивающей проникновение на глубину, равную толщине упрочненного слоя изделия (1). Сигнальный выход генератора 1 подключают через стабилизирующий резистор 5 (50 Ом), который обеспечивает стабильность частоты генерации (при такой схеме измерительной цепи), к первому выводу шунтирующего резистора 6 (5...10 Ом), к которому подключают параллельно осциллограф 2. Производится измерение амплитудного значения падения напряжения на полном сопротивлении шунтирующего резистора ( $U_{ш. \text{полн}}$ ).

Затем устанавливают обработанное изделие 3 в кольцевые контакты 4. Сигнал с генератора 1 через стабилизирующий резистор 5 подается на параллельное соединение шунтирующего резистора 6 и исследуемого изделия 3, подключенного через кольцевые контакты 4. Сигнал проходит через параллельное соединение элементов 3 и 6 на общий провод. Подключенный параллельно 3 и 6 осциллограф 2 позволяет измерить амплитудное значение падения напряжения на соединенных параллельно шунтирующем резисторе 5 и исследуемом изделии 3 ( $U_{и}$ ). Так как сигнал является высокочастотным и частота рассчитана с учетом толщины упрочненного слоя, то сигнал протекает только по требуемой глубине (проявляется скин-эффект). Располагая заданным значением силы тока сигнала ( $I_3$ ) генератора 1, производят расчет полного сопротивления по формуле (5).

Применение переменного тока высокой частоты в предложенном способе измерения полного электрического сопротивления упрочненного слоя изделий после проведения магнитно-импульсной, ионно-плазменной и других видов высокоэнергетических обработок позволяет производить настройку соответствующих измерительных устройств под любую толщину упрочненного слоя.

**Заключение.** Разработанный метод обладает достаточной простотой при анализе результатов упрочнения металлических изделий посредством высокоэнергетических методов обработки, и в сочетании с другими методами анализа (измерение твердости изделия и проведение микроскопии структуры поверхности) дает наиболее полную картину результатов упрочнения. Методика проведения представляет собой экспресс-оценку качества упрочненной поверхности по анализу падения напряжения (электрического сопротивления) на упрочненном слое.

#### Список цитируемых источников

1. Основы метрологии и электрические измерения : учеб. для вузов / Б. Я. Авдеев [и др.] ; под общ. ред. Е. М. Душина. — 6-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
2. Способ измерения электрического сопротивления : пат. 2137144 РФ, МПК G01R27/00 / В. В. Долгих, Е. В. Кириевский, С. В. Василевская ; заявитель Новочеркас. гос. техн. ун-т. — № 1998123405/22 ; заявл. 28.04.1998 ; опубл. 10.09.1999 // Официальный бюл. / Рос. агентство по патентам и товар. знакам. — 1999.
3. Способ определения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя материала : пат. 2426137 РФ, МПК G01R27/16 / В. В. Фадин, М. И. Алеутдинова ; заявитель Учреждение Российской академии наук «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (ИФПМ СО РАН)». — № 2010114405/28 ; заявл. 12.04.2010 ; опубл. 10.08.2011 // Официальный бюл. / Федер. служба по интеллектуал. собственности, патентам и товар. знакам. — 2011.

4. Устройство для измерения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия : пат. 2167392 РФ, МПК G01R27/16, G01B7/06 / В. И. Бутенко, А. В. Пушкарный ; заявитель Таганрог. гос. радиотехн. ун-т. — № 1999100307/22; заявл. 05.01.1999 ; опубл. 20.05.2001 // Официальный бюл. / Рос. агентство по патентам и товар. знакам. — 2001.

5. Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей / А. А. Алферов [и др.] // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2015. — № 2. — С. 62—69.

6. Алифанов, А. В. Исследование упрочненных магнитно-импульсной обработкой поверхностных слоев металлических изделий с помощью токов высокой частоты / А. В. Алифанов, В. В. Малеронок, Д. А. Ционенко // Актуальные проблемы прочности : монография : в 2 т. / под общ. ред. В. В. Рубаника. — Витебск, 2018. — Т. 2. — Гл. 6. — С. 111—124.

7. Шпиганович, А. Н. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий [Электронный ресурс] / А. Н. Шпиганович, С. В. Довженко // Журн. науч. публ. аспирантов и докторантов. — 2008. — Режим доступа: <http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html>. — Дата доступа: 17.04.2019.

Данная работа выполнялась в рамках задания 4.1.25 Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии».

Поступил в редакцию 11.03.2019