

ВЛИЯНИЕ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2022 г. А.А. Абоуеллаиль^{1,*}, Ц. Чан^{2,**}, А.И. Солдатов^{3,4,***}, А.А. Солдатов^{3,4,****},
М.А. Костина^{3,4,*****}, С.И. Борталевич^{4,*****}, Д.А. Солдатов^{3,*****}

¹Сфинкс университет, Региональная зона обслуживания, Новый Асьют 71515, Египет

²Институт перспективных исследований Шеньженского университета,
Китай 3688 пр. Нанхай, Шеньжень

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

⁴Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 40,

⁵Институт проблем рынка РАН, Россия 117418 Москва, Нахимовский пр-т, 47

E-mail: *ahmed.abouellail@sphinx.edu.eg; **jiangleichang@foxmail.com; **asoldatof@tpu.ru;
****soldatov.88@bk.ru; *****mariyakostina91@mail.ru; *****680097@inbox.ru;
*****dimasoldatov@sibmail.com

Приведены результаты исследования влияния переходного сопротивления контактов на результат контроля при дифференциальном термоэлектрическом методе. Показан принцип дифференциального метода контроля с двумя горячими электродами с одной системой нагрева, а также конструкция такого датчика. Приведено обоснование образования многоточечного контакта и эквивалентная схема датчика, соответствующая многоточечному контакту. Исследовано влияние контактного сопротивления на результат контроля как на модели, так и экспериментально.

Ключевые слова: термоэлектрический метод, переходное сопротивление контактов, контроль контактного сопротивления, многоточечный контакт, дифференциальный метод, термopара, эквивалентная схема датчика.

DOI: 10.31857/S0130308222070053, EDN: BOICYK

ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектрический метод относится к области неразрушающего контроля металлов и сплавов [1, 2]. Он позволяет наиболее просто решить некоторые специфические производственные задачи: входной контроль на соответствие сертификату поставляемой продукции, определение наличия обезуглероженного слоя и его глубины, определение толщины слоя цементации стали, сортировка готовой продукции по маркам сталей и сплавов, контроль качества термической обработки, контроль качества электронно-лучевой сварки, контроль пластической деформации и измерения температуры [3—21].

Одним из несомненных преимуществ термоэлектрического метода является возможность проведения экспресс-контроля [22, 23]. Другим достоинством следует указать простоту технической реализации этого метода и, отсюда, компактность и автономность приборов термоэлектрического контроля, простота подготовки образцов и интуитивная понятность методики контроля, которая не требует специальной подготовки персонала [24—32]. Именно поэтому в последнее время наблюдается увеличивающийся интерес к таким приборам контроля.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостатки термоэлектрического метода связаны с низкой повторяемостью результатов контроля, что обусловлено изменением температуры горячего электрода и контролируемого изделия в процессе контроля за счет теплообмена, неоднородностью контролируемого образца по химическому и фазовому составу, разной шероховатостью поверхности и т.д. Факторы, влияющие на результаты измерений, упоминаются в работах [33, 34]. Для того, чтобы учесть эти факторы, необходимо исследовать степень их влияния на результат контроля и выработать меры, уменьшающие их влияние.

Для уменьшения влияния изменения температуры горячего электрода и контролируемого изделия в процессе контроля за счет теплообмена применяют дифференциальный метод, чувствительность и повторяемость результатов которого выше прямого метода за счет сохранения температурного режима в контактных точках одинаковым как для эталона, так и для образца.

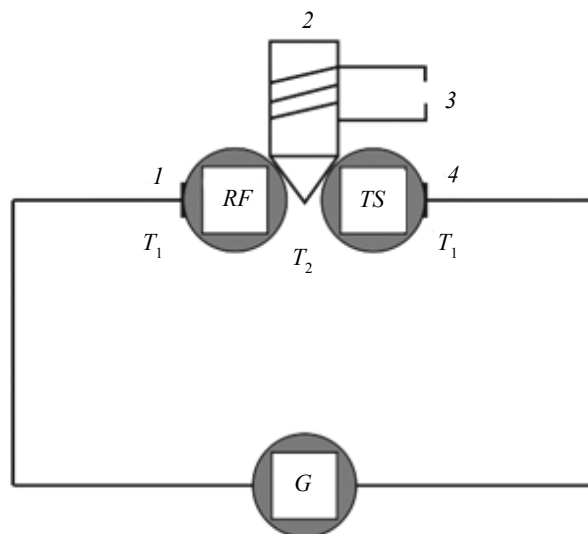


Рис. 1. Принцип измерения дифференциальной термоэлектродвижущей силы.

Принцип измерения дифференциальной термоЭДС показан на рис. 1 [35]. Цепь, состоящая из эталона RF , испытуемого образца TS , гальванометра G , горячего электрода 2, холодных электродов 1 и 4, замыкается горячим электродом 2, нагретым до температуры T_2 нагревателем 3. В случае одинаковых химических составов и состояний эталона и испытуемого образца, ЭДС контактов эталон RF — горячий электрод и горячий электрод — испытуемый образец TS будет равна по величине, но противоположна по направлению, следовательно, гальванометр не регистрирует наличие в цепи термоЭДС.

В случае различного химического состава либо структурного состояния поверхности эталона и испытуемого образца величина термоЭДС контактов эталон RF — горячий электрод и горячий электрод — испытуемый образец TS будет различна по абсолютной величине и определяться температурой T_2 горячего и T_1 холодных электродов. В этом случае гальванометр G регистрирует наличие в цепи ЭДС, величина которой равна алгебраической сумме термоЭДС контактов эталон RF — горячий электрод и горячий электрод — испытуемый образец TS (т.е. дифференциальная термоЭДС), что свидетельствует о различном химическом составе либо структурном состоянии поверхности эталона и испытуемого образца. Размеры эталона и испытуемого образца не оказывают влияния на величину дифференциальной термоЭДС. При контроле изделий необходимо обеспечить тепловой контакт горячего электрода с испытуемым изделием, при этом происходит уменьшение температуры горячего электрода за счет передачи части теплоты контролируемому изделию. Изменение температуры приводит к изменению показаний прибора при длительном контроле изделий, так как постоянная времени процесса нагрева и охлаждения горячего электрода является неизменной величиной, в результате температура горячего электрода флуктуирует в небольшом диапазоне. Для повышения стабильности показаний прибора авторы предлагают использовать дифференциальный датчик для измерения термоЭДС с общей системой нагрева обоих горячих электродов, оригинальная конструкция которого разработана авторами и приведена на рис. 2.

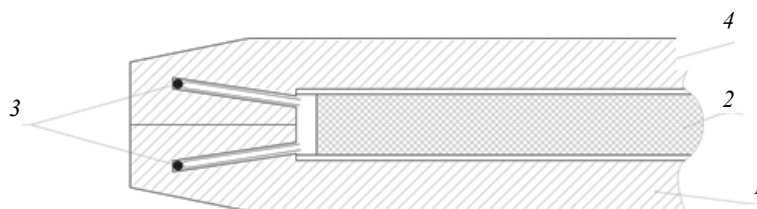


Рис. 2. Конструкция датчика:

1 — первый горячий электрод; 2 — нагревательный элемент; 3 — термопары; 4 — второй горячий электрод.

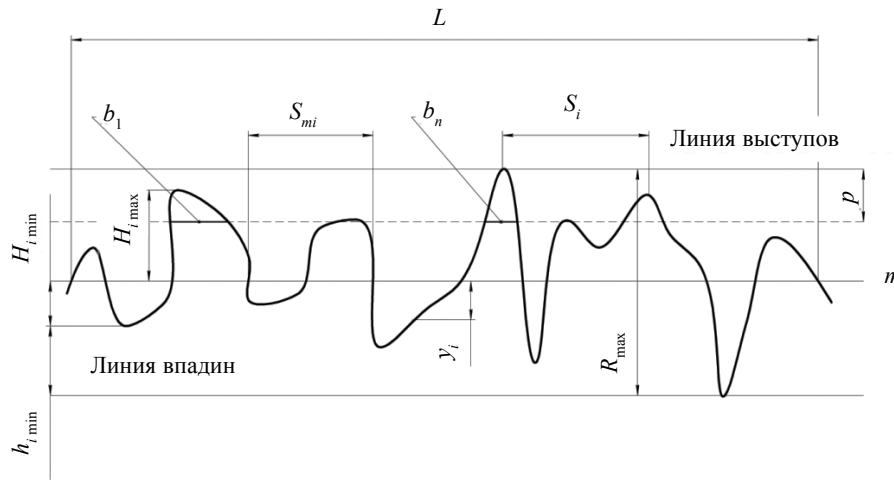


Рис. 3. График зависимости шероховатости поверхности от длины профиля и параметры шероховатости поверхности.

Для уменьшения влияния неоднородности по химическому и фазовому составу на результат контроля используют электроды не с точечным контактом, а с линейным или плоскостным. При этом получится многоточечный контакт из-за наличия шероховатости поверхности, как электрода, так и контролируемого изделия (рис. 3). Исходная шероховатость является следствием технологической обработки поверхности материала. На рис. 3 показан профиль поверхности и параметры шероховатости [36].

На рис. 3 приняты следующие обозначения: L — длина профиля неровностей; m — средняя линия неровностей профиля; p — уровень сечения профиля; S_{mi} — средний шаг неровностей профиля; S_i — средний шаг местных выступов профиля; $H_{i\max}$ — отклонение пяти наибольших неровностей профиля; $H_{i\min}$ — отклонение пяти наибольших неровностей профиля; $h_{i\max}$ — расстояние от высших точек наибольших неровностей до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i\min}$ — расстояние от низших точек наибольших неровностей до линии параллельной средней и не пересекающей профиль; b_1, b_n — длины отрезков, отсекаемых на уровне p ; $R_{\max}$ — наибольшая высота неровностей профиля; y_i — отклонения профиля от средней линии.

Каждая точка контакта будет представлять отдельный источник термоЭДС (рис. 4).

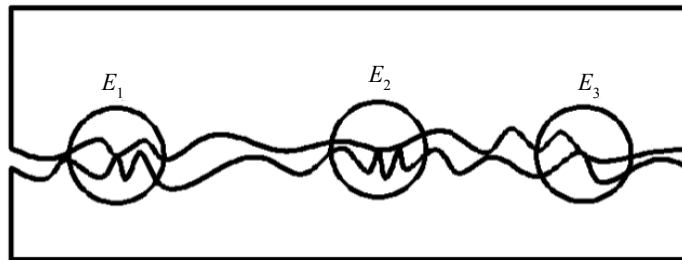


Рис. 4. Схема многоточечного контакта.

При этом измеряется эквивалентная термоЭДС (рис. 5), механизм расчета которой довольно сложен. Это связано с тем, что различные типы источников термоЭДС могут иметь разные термоэлектрические характеристики: величину ЭДС, внутреннее сопротивление, мощность и, кроме того, переходное сопротивление контакта. Одним из подходов к изучению этого механизма является представление зоны контакта горячего электрода с тестируемым образцом и эталонным набором термопар (из-за шероховатости поверхностей зона контакта будет представлять множество точечных контактов, в каждом из которых образуется термопара) с различными характеристиками,

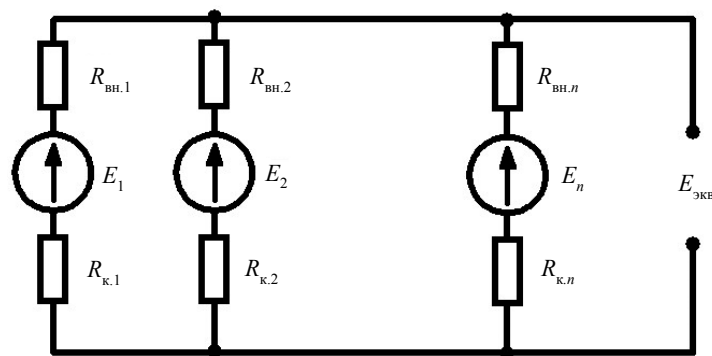


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема при контроле с многоточечным контактом, где $R_{вн,1}, R_{вн,2}, \dots, R_{вн,n}$ — внутренние сопротивления; $E_1, E_2, \dots, E_n$ — источники ЭДС; $R_{к,1}, R_{к,2}, \dots, R_{к,n}$ — контактные сопротивления; $E_{экв}$ — эквивалентный источник ЭДС.

которые соединены параллельно [37, 38]. Этот подход увеличивает повторяемость результатов контроля, но не позволяет полностью избавиться от нестабильности показаний, что, по мнению авторов, является следствием влияния переходного сопротивления контактов.

Влияние контактного сопротивления на результат контроля

Для практического использования схема измерения дифференциальной термоЭДС, приведенная на рис. 1, неудобна, т.к. необходимо обеспечить по два контакта с каждым образцом: эталоном и контролируемым изделием. Поэтому авторы используют модернизированную схему, которая показана на рис. 6а. В ней используется конструкция датчика с двумя горячими электродами, приведенная на рис. 2. Эта схема более удобна. Оператор работает только с датчиком. Эквивалентная схема может быть представлена суммой контактных ЭДС E_1, E_2 и E_3 (рис. 6б); E_1 — контактная ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; E_2 — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; E_3 — контактная ЭДС горячего электрода с контрольным образцом; R_1 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; R_2 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; R_3 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с контрольным образцом.

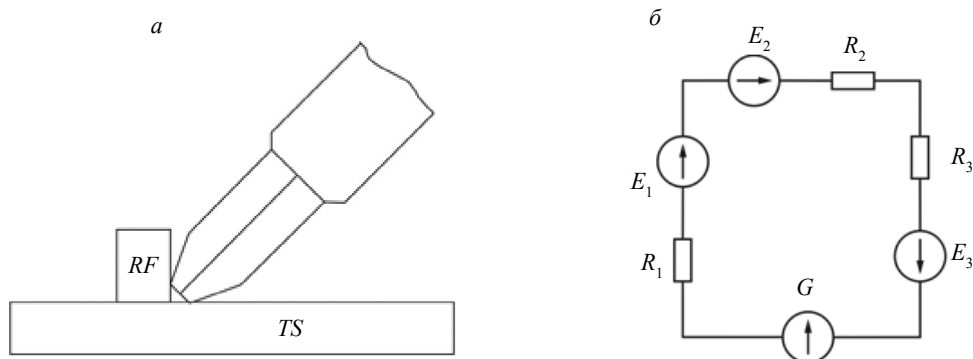


Рис. 6. Практическая схема измерения дифференциальной термоЭДС (а); идеальная эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля (б), где E_1 — контактная ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; E_2 — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; E_3 — контактная ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом; R_1 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; R_2 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; R_3 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом.

Ток в цепи (см. рис. 6б) будет определяться внутренним сопротивлением гальванометра G и внутренними сопротивлениями источников термоЭДС E_1, E_2 и E_3 :

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

В этой схеме не учтено сопротивление контактов электродов с контрольным и эталонным образцами и сопротивление контакта эталонного образца и испытуемого. В частности, при наличии масляной пленки на поверхности электродов, контрольного образца или испытуемого изделия сопротивление контактов может возрасти до 100 Ом [39]. В этом случае эквивалентная схема примет вид, показанный на рис. 7.

В этом случае ток в цепи будет зависеть и от сопротивления контактов:

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4},$$

где R_4 — переходное сопротивление контактов.

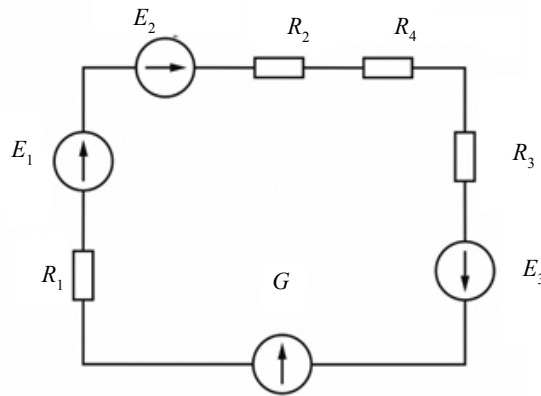


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля с учетом контактного сопротивления: E_1 — контактная ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; E_2 — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; E_3 — контактная ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом; R_1 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС первого горячего электрода с эталонным образцом; R_2 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; R_3 — внутреннее сопротивление контактной ЭДС второго горячего электрода с контрольным образцом; R_4 — переходное сопротивление контактов.

На рис. 8 показана зависимость изменения тока в цепи датчика при изменении суммарного сопротивления контакта от 0,1 до 10 Ом. Представленная модель справедлива для электродов с точечным контактом. Если используются электроды с плоскостным контактом, то за счет шероховатости поверхности электродов и испытуемого образца с эталоном контакт будет многоточечным

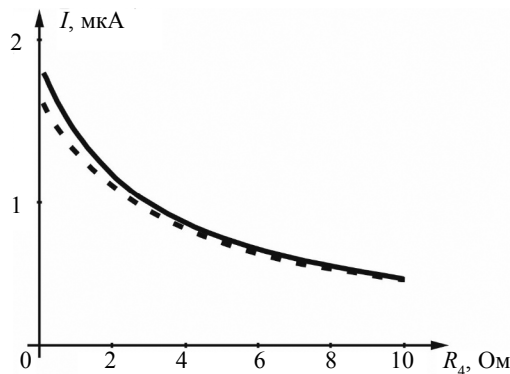


Рис. 8. Зависимость тока в цепи датчика от изменения суммарного сопротивления контакта при разных внутренних сопротивлениях гальванометра, сплошная линия — 0,1 Ом, штриховая линия — 0,5 Ом.

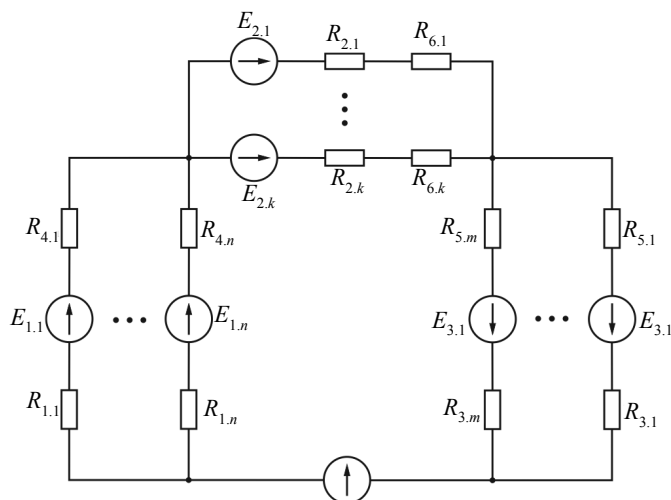


Рис. 9. Эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля с многоточечным контактом.

и эквивалентная схема будет содержать несколько источников термоЭДС со своим внутренним сопротивлением и своим сопротивлением контактов (рис. 9).

На рис. 9 приняты следующие условные обозначения: $E_{1,1} \dots E_{1,n}$ — контактная ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; $E_{2,1} \dots E_{2,k}$ — контактная ЭДС эталонного образца с контрольным; $E_{3,1} \dots E_{3,m}$ — контактная ЭДС горячего электрода с контрольным образцом; $R_{1,1} \dots R_{1,n}$ — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с эталонным образцом; $R_{2,1} \dots R_{2,k}$ — внутреннее сопротивление контактной ЭДС эталонного образца с контрольным; $R_{3,1} \dots R_{3,m}$ — внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с контрольным образцом; $R_{4,1} \dots R_{4,n}$ — контактное сопротивление горячего электрода с эталонным образцом; $R_{5,1} \dots R_{5,m}$ — контактное сопротивление горячего электрода с испытуемым образцом; $R_{6,1} \dots R_{6,k}$ — контактное сопротивление испытуемого образца с эталонным.

В зависимости от усилия прижатия и равномерности распределения нагрузки по площади электродов будет иметь место и соответствующее контактное сопротивление в цепи каждого источника термоЭДС. В начальный момент контроля, когда контактное сопротивление изменяется, наблюдается переходной процесс. Ток в цепи гальванометра будет сложной функцией, зависящей от изменения контактного сопротивления во времени, изменения количества контактных термоЭДС ($n(t)$, $k(t)$ и $m(t)$) от времени (без учета неоднородности химического состава поверхности электродов, контрольного и испытуемого образцов):

$$I(t) = \frac{\sum_1^{n(t)} E_1}{\sum_1^{n(t)} [R_1 + R_4(t)]} + \frac{\sum_1^{k(t)} E_2}{\sum_1^{k(t)} [R_1 + R_6(t)]} + \frac{\sum_1^{m(t)} E_3}{\sum_1^{m(t)} [R_1 + R_5(t)]}.$$

Поэтому при ручном контроле в начальный момент времени наблюдается переходный процесс, длительность которого будет определяться квалификацией персонала. Для оценки длительности переходного процесса были проведены расчеты изменения тока в цепи датчика от времени. При моделировании были использованы следующие данные: $R_1 = R_2 = R_3 = 0,1$ Ом; $E_1 = 10$ мкВ; $E_2 = 0$ мкВ; $E_3 = 4$ мкВ; $R_{4i}(t) = R_{5i}(t) = R_{6i}(t)$ и изменяются от 1 до 0,01 Ом по экспоненциальному закону (как показано на рис. 10), на котором представлены два варианта изменения переходного сопротивления контактов. Штриховой линией показан вариант изменения переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,2 с. Сплошной линией показан вариант изменения переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,6 с. Количество источников термоЭДС при расчетах было одинаково в точках соприкосновения первого горячего электрода с эталоном, эталона с контролируемым образцом и контролируемого образца со вторым горячим электродом: $n(t) = k(t) = m(t)$ и изменялось от 90 до 100 шт. Результаты расчета зависимости тока в цепи датчика от времени показаны на рис. 11. Штриховой линией показан термоток в цепи датчика при изменении переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,2 с и изменении количества

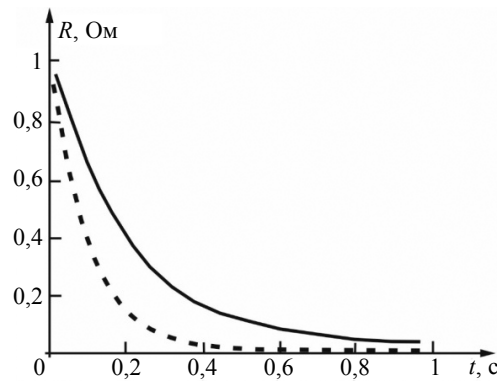


Рис. 10. Динамика изменения переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ома: штриховая линия — за 0,2 с, сплошная линия — за 0,6 с.

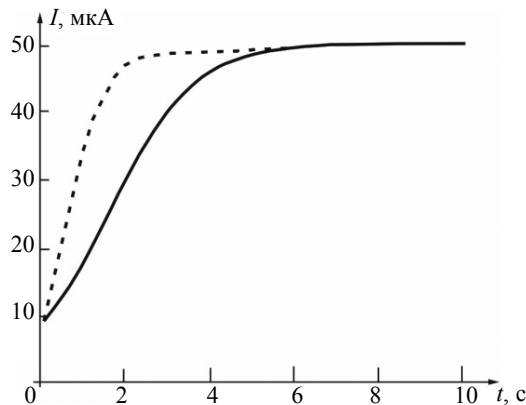


Рис. 11. Результаты расчета относительного изменения термотока в начальный момент времени при изменении количества источников термоЭДС от 90 до 100 шт.: штриховая линия — за 2 с, сплошная линия — за 5 с.

источников термоЭДС от 90 до 100 шт. в течении 2 с. Сплошной линией показан термоток в цепи датчика при изменении переходного сопротивления контактов от 1 до 0,1 Ом за 0,6 с и изменении количества источников термоЭДС от 90 до 100 шт. в течении 5 с.

Количество источников термоЭДС при моделировании было выбрано из следующих условий: для широкого класса изделий, получаемых после первичной обработки точением, сверлением, зенкованием, фрезерованием, строганием, литьем в кокиль или под давлением, получается шероховатость R_z 100 (высота неровностей профиля по 10 точкам), а горизонтальный шаг неровностей составляет порядка 100 мкм [30], соответственно количество выступов на длине 10 мм составит около 100 шт. в двумерной модели. Эти точки будут являться источниками термоЭДС при контроле.

Для проведения экспериментальных исследований прибор термоэлектрического контроля (рис. 12) подключили к персональному компьютеру и разработали программу для визуализации поступающих данных. Прибор оснастили системой мониторинга переходного сопротивления контактов.

Поступающие данные отображаются на экране монитора в виде графиков, каждый в своем окне. Пример программного интерфейса приведен на рис. 13.

В графическом окне отображаются две зависимости: красной линией показано контактное сопротивление, зеленой линией — значение термоЭДС. На оси абсцисс (ось x) отображается количество отсчетов во времени, а каждый отсчет производился через 10 мс. По оси ординат (ось y) отображается термоЭДС (мкВ) и сопротивление (Ом).

В интервале времени 0—2200 мс (отсчеты 0—220) измерения нет, термоЭДС равна нулю, контактное сопротивление около 45 (это означает, что величина переходного сопротивления контактов превышает верхний предел измерения).

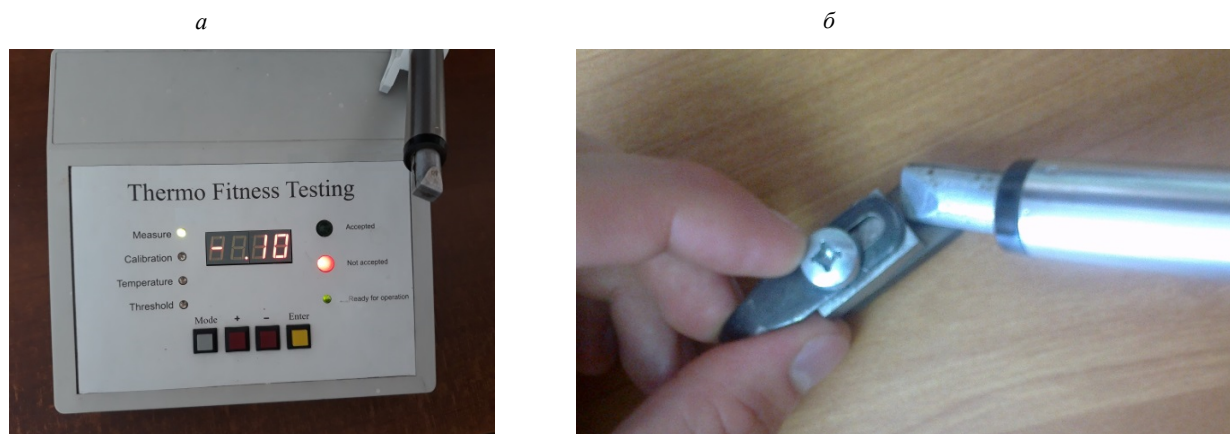


Рис. 12. Прибор TEMF:
a — блок электроники; *б* — дифференциальный датчик с эталоном и тестируемым образцом.

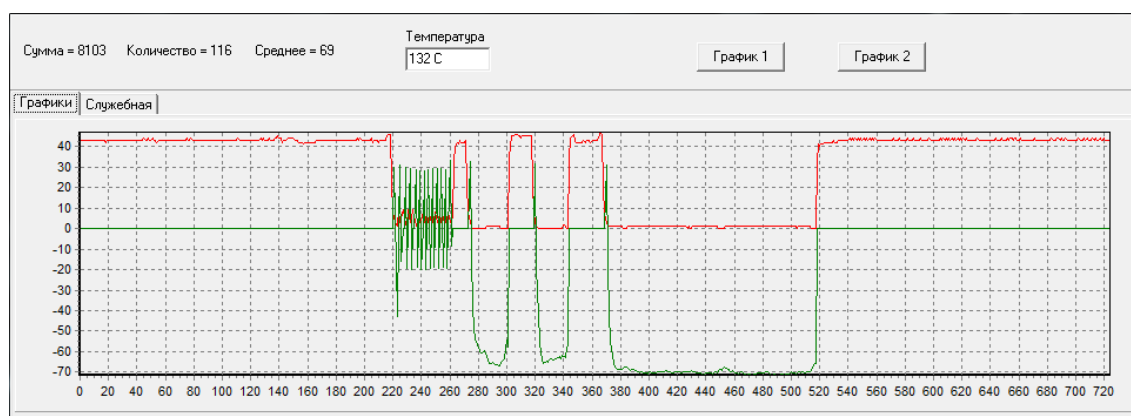


Рис. 13. Программный интерфейс.

Для имитации большого переходного сопротивления контактов между одним из горячих электродов и тестируемым образцом поместили листок бумаги. При быстром изменении усилия прижатия датчика к тестируемому образцу в интервале времени от 2200—2260 мс (отсчеты от 220 до 260) происходит вариация переходного сопротивления контактов в диапазоне (0—10) Ом при этом происходит вариация термоЭДС в диапазоне от +30 до –20 мкВ. При плавном изменении усилия прижатия в интервале времени 2700—3450 мс (отсчеты (270—345) происходит вариация переходного сопротивления контактов в диапазоне от 0 Ом до величины превышающей 45 Ом, при этом происходит вариация термоЭДС в диапазоне от +30 до –65 мкВ.

В интервале времени 3750—5150 мс (отсчеты 375—515) переходное сопротивление контактов равно нулю, переходный процесс завершился и величина термоЭДС составила –70 мкВ. В интервале времени 5150—7200 мс (отсчеты 515—720) процесс измерения завершен, сопротивление контактов увеличивается и термоЭДС становится равной нулю. Процесс измерения проводился в течении 1,4 с (отсчеты с 370 по 515 и каждый отсчет производится через 10 мс) (см. рис. 13). На графике можно увидеть переходной процесс, занимающий около 50 мс (отсчеты с 370 по 375), после этого значение термоЭДС не изменяется, наблюдаются только небольшие флуктуации, которые объясняются несовершенством ручного контроля, при котором невозможно зафиксировать положение датчика относительно образца в одном положении, поэтому небольшие угловые колебания датчика приводят к флуктуации контактного сопротивления, к изменению числа источников термоЭДС с различными величинами термоЭДС за счет неоднородной структуры материала эталона и испытуемого образца. Результаты экспериментальных исследований имеют коэффициент вариации $w = 6,2\%$, $\Delta x = \pm 3$ с уровнем доверия 95 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили определить влияние переходного сопротивления контактов на результат контроля, разработать модель многоточечного контакта электродов с испытуемым образцом с учетом переходного сопротивления контактов. Проведенные исследования показали, что достоверные показания можно получить только после завершения переходного процесса, который может длиться от нескольких десятков микросекунд до нескольких секунд. Но даже после завершения переходного процесса происходит флуктуация данных, вызванная влиянием человеческого фактора. Проблема решается за счет применения системы автоматического мониторинга контактного сопротивления, при этом выборка данных должна осуществляться только при условии низкого переходного сопротивления контактов (менее 0,1 Ом).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carreon H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing // Journal of Applied Physics. 2000. V. 88. Is. 11. P. 6495. DOI: 10.1063/1.1322591
2. Carreon H. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals // Research in Nondestructive Evaluation. 2002. V. 14. Is. 2. P. 59. DOI: 10.1080/09349840209409705
3. Nagy P.B. Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring // Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2010. V. 52. Is. 2. P. 61. DOI: 10.1784/insi.2010.52.2.61
4. Soldatov A.A., Seleznev A.I., Fiks I.I., Soldatov A.I., Kröning Kh.M. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2012. V. 48. Is. 3. P. 184—186. DOI: 10.1134/S1061830912030060
5. Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M. High-performance nanostructured thermoelectric materials // Npg Asia Mater. 2010. V. 2. Is. 4. P. 152. DOI: 10.1038/asiamat.2010.138
6. Kikuchi M. Dental alloy sorting by the thermoelectric method // European Journal of Dentistry. 2010. V. 4. No. 1. P. 66—70.
7. Cooper R.F. Sorting mixed metals by the thermoelectric effect // Physics Education. 1976. V. 11. Is. 4. P. 290—292. doi.org/10.1088/0031-9120/11/4/004
8. Stuart C.M. The Seebeck effect as used for the nondestructive evaluation of metals // Int. Adv. Nondestruct. Test. 1983. V. 9.
9. Stuart C. Thermoelectric Differences Used for Metal Sorting // Journal of Testing and Evaluation. 1987. V. 15. No. 4. P. 224—230. doi.org/10.1520/JTE11013J. ISSN 0090-3973
10. Dragunov V.K., Goncharov A.L. New approaches to the rational manufacturing of combined constructions by EBW // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 681. 012010. DOI:10.1088/1757-899X/681/1/012010
11. Goncharov A., Sliva A., Kharitonov I., Chulkova A., Terentyev E. Research of thermoelectric effects and their influence on electron beam in the process of welding of dissimilar steels // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. February 2020. V. 759 (1). 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/759/1/012008
12. Kharitonov I.A., Rodyakina R.V., Goncharov A.L. Investigation of magnetic properties of various structural classes steels in weak magnetic fields characteristic for generation of thermoelectric currents in electron beam welding // Solid State Phenomena. 2020. V. 299. P. 1201—1207.
13. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Kozhemyak O.A. Experimental studies of thermoelectric characteristics of plastically deformed steels ST3, 08KP and 12H18N10T // Key Engineering Materials. 2016. V. 685. P. 310—314.
14. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Obach I.I., Bortalevich V.Y., Shinyakov Y.A., Sukhorukov M.P. An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples / SIBCON 2017 — Proceedings, 2017. 79985342017.
15. Fulton J.P., Wincheski B., Namkung M. Automated weld characterization using the thermoelectric method // Materials Science. August 1993. ID: 262902.
16. Carreon H., Medina A. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti-6Al-4V samples // Materials Science, Nondestructive Testing and Evaluation. 2007. Corpus ID: 136854526. DOI: 10.1080/10589750701546960
17. Carreon H. Detection of fretting damage in aerospace materials by thermoelectric means // Smart Structures, Engineering, Physics. 16 April 2013. Corpus ID: 123131770. DOI: 10.1117/12.2009448
18. Lakshminarayan B., Carreon H., Nagy P. Monitoring of the Level of Residual Stress in Surface Treated Specimens by a Noncontacting Thermoelectric Technique // Materials Science. 9 April 2003. Corpus ID: 135856050. DOI: 10.1063/1.1570311
19. Carreon H. Evaluation of Thermoelectric Methods for the Detection of Fretting Damage in 7075-T6 and Ti-6Al-4V Alloys // Materials Science. 2015. V. 2. Corpus ID: 137547354. DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_53

20. Carreon H., Barriuso S., Barrera G., González-Carrasco J.L., Caballero F. Assessment of blasting induced effects on medical 316 LVM stainless steel by contacting and non-contacting thermoelectric power techniques // *Materials Science*. 2012. V. 2. Corpus ID: 43997318. DOI: 10.1016/J.SURFCOAT.2011.12.026
21. Hu J., Nagy P.B. On the Thermoelectric Effect of Interface Imperfections // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1999. V. 188. P. 1487—1494. doi.org/10.1007/978-1-4615-4791-4_191
22. Goncharov A.L. Investigation of the thermal electromotive force of steels and alloys of different structural grades in electron beam welding // *Welding International*. 2011. V. 25. Is. 9. P. 703—709.
23. Goncharov A.L., Chulkova A.V., Rodyakina R.V., Dragunov V.K., Chulkov I.S. Investigation of thermo-EMF temperature dependences for construction materials of various structural classes // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 681. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012017
24. Li J.F., Liu W.S., Zhao L.D., Zhou M. High-performance nanostructured thermoelectric materials // *Npg. Asia Materials*. 2010. V. 2. P. 152—158.
25. Ritzer T.M., Lau P.G., Bogard A.D. A critical evaluation of today's thermoelectric modules // *Thermoelectrics*. 1997. P. 619—623. DOI: 10.1109/ICT.1997.667606
26. Buist R.J. A new method for testing thermoelectric materials and devices / 11-th International Conference on Thermoelectrics. 7-9 October 1992.
27. Ciyilan Bünyamin, Yılmaz Sezayi. Design of a thermoelectric module test system using a novel test method // *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. V. 46. Is. 7. P. 717—725. doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.008
28. Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Loginov E.L., Abouellail A.A., Kozhemyak O.A., Bortalevich S.I. Control system for device «thermotest» / 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2016. P. 7491869. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491869
29. Soldatov A.A., Dement'ev A.A., Soldatov A.I., Vasil'ev I.M. Control of Quality of Applying Heat-Conducting Compound // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 3. P. 284—290.
30. Carreon Héctor. Thermoelectric Detection of Fretting Damage in Aerospace Materials // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 50. No. 11. P. 684—692.
31. Абоуеллаиль А.А., Солдатов А.А., Сорокин П.В., Солдатов А.И., Хан В. Исследование характеристик термоэлектрических источников ЭДС // *Дефектоскопия*. 2018. № 7. С. 54—60.
32. Xuan X.C., Ng K.C., Yap C., Chua H.T. A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002. V. 45. Is. 26. P. 5159—5170. doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00217-X
33. Hu J., Nagy P.B. On the role of interface imperfections in thermoelectric nondestructive materials characterization // *Applied Physics Letters*. 1998. V. 7. Is. 4. P. 467. DOI: 10.1063/1.121902
34. Sungtaek Ju Y. Study of interface effects in thermoelectric microrefrigerators // *Journal of Applied Physics*. 2000. V. 88. No. 7. P. 4135—4139. DOI: 10.1063/1.1289776
35. Denisov V.V., Soldatov A.I., Tsekhanovsky S.A. The principle of measuring differential thermo EMF in the device «thermotest» / *Tomsk MTT 2005 — Proceedings*, 2005. Art. No. 4493166. P. 33—34.
36. Whitehouse David. Surfaces and their Measurement. Boston: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0080972015.
37. Abouellail A.A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A.I. Surface inspection problems in thermoelectric testing / *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 102. P. 01001. DOI: 10.1051/mateconf/201710201001
38. Paul E.M. Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide, Second Edition. John Wiley & Sons, 2005.
39. Плотников А.Л. Способ измерения величины термоЭДС естественной термопары инструмент—деталь / Патент РФ 2117557. 20.08.1998.