

На правах рукописи

Солдатов Андрей Алексеевич

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Специальность:

**05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена на кафедре промышленной и медицинской электроники института неразрушающего контроля ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Евтушенко Геннадий Сергеевич

Официальные оппоненты: Попов Анатолий Петрович, д.т.н., профессор кафедры теоретической и общей электротехники Омского государственного технического университета,

Семенов Валерий Дмитриевич, к.т.н., профессор, кафедры промышленной электроники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Ведущая организация: Томский государственный архитектурно-строительный университет

Защита состоится «25» ноября 2014г. в 17:00 в ауд. 215 на заседании диссертационного совета Д212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, пер. Савиных, 3.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « ... »

2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.

Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Наличие структурных неоднородностей в металлах и сплавах, таких, как дефекты и градиенты упругих напряжений, вызывающие упругую и пластическую деформации, оказывают сильное влияние на их физические свойства. Именно с дефектами и упругими напряжениями связаны вопросы коррозионной стойкости, твердости, пластичности и долговечности металлоконструкций. Поэтому своевременный контроль и обнаружение пластической деформации позволяют избежать не только производственных аварий, но и техногенных катастроф, а также спасти жизни обслуживающего персонала.

В настоящее время контроль пластической деформации является одним из самых трудоемких процессов и для контроля возможно применение очень ограниченного числа методов неразрушающего контроля. И только один - термоэлектрический метод позволяет проводить неразрушающий экспресс-контроль пластической деформации непосредственно на действующем производстве. Исследования термоэлектрических свойств металлов и сплавов активно проводятся различными авторами и коллективами. Наиболее полно исследованы термоэлектрические свойства благородных и переходных металлов коллективом авторов Лухвич А.А., Каролик А.С. и Шаранд В.И. На основе анализа электронной структуры металлов получены аналитические выражения для расчета термоЭДС и проводимости. Сделана попытка на основе энергетического спектра электронов, являющихся носителями тока, с использованием поверхности Ферми для его описания объяснить влияние примесей на термоЭДС и проводимость металлов и сплавов. Нестерович Ю.И. исследовал влияние термообработки металла на термоЭДС и предложен термоэлектрический метод контроля твердости. Однако использование точечного контакта электродов с испытуемым образцом не позволяет получить высокой повторяемости результатов контроля из-за локального разброса химического состава образца. Влияние усилия прижима электродов к испытуемому образцу отмечается в работах Лухвич А.А., Нестерович Ю.И., Jiangtao Hu and Peter V. Nagy.

Однако существующие приборы термоэлектрического контроля обладают высокой погрешностью измерения и поэтому имеют низкую достоверность и повторяемость результатов контроля. Это обусловлено наличием сопротивления в контактах электродов с образцом, изменением температуры горячего электрода в процессе контроля, зависимостью термоЭДС от разности температур горячего и холодного электрода, площади контакта горячего электрода с образцами и т.д. Кроме того литературный обзор показал, что до настоящего времени не проводились исследования характеристик источника термоЭДС. Учет этих характеристик и степени влияния выше перечисленных

факторов позволит существенно повысить технические характеристики приборов термоэлектрического контроля. В процессе исследований были выбраны три марки стали широко применяемы в машиностроении. Первая марка из группы конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества – Ст 3, применяется для изготовления несущих и ненесущих элементов сварных и несварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в диапазоне от -40 до $+425$ °С при переменных нагрузках. Вторая марка стали из группы конструкционных углеродистых качественных сталей – 08КП, используется для прокладок, вилок, шайб, труб, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке — проушин, втулок, тяг. Третья марка стали из группы хромоникелевых сталей аустенитного класса - 12Х18Н10Т, применяется в сварных конструкциях, работающих в контакте с азотной кислотой и другими средами окислительного характера; в некоторых органических кислотах средней концентрации, органических растворителях, атмосферных условиях и т.д. Изготавливают емкостное, теплообменное и другое оборудование.

Объектом исследования в работе являются термоэлектрические свойства конструкционных углеродистых и хромоникелевых сталей аустенитного класса при пластической деформации.

Цель диссертационной работы: исследовать возможность использования термоэлектрических свойств для неразрушающего экспресс-контроля пластической деформации конструкционных и хромоникелевых сталей аустенитного класса.

Достижение поставленных целей потребовало решения следующих **основных задач:**

1. Исследовать термоэлектрические свойства деформированных металлов сталь Ст3, 08КП и 12Х18Н10Т.
2. Провести исследования электрических свойств источников термоЭДС.
3. Разработать методику контроля переходного сопротивления контактов электродов с образцами.
4. Разработать макетный образец прибора и провести его испытания.

Методы исследования. Для решения поставленных задач диссертации были использованы методы компьютерного моделирования при расчете теплового поля на поверхности контролируемого образца, при обработке экспериментальных данных использовались методы математической статистики, при анализе эквивалентной схемы источника термоЭДС использовался метод Кирхгофа. При составлении уравнений, описывающих термоЭДС и проводимость деформированного металла использовался метод аппроксимации. Использование перечисленных выше методов позволило обеспечить всестороннее исследование объекта контроля. Проверка теоретиче-

ских исследований производилась путем проведения натурного эксперимента.

Научная новизна работы.

По результатам работы были получены следующие новые научные знания:

1. Исследовано влияние дефектов пластической деформации материала сталь Ст3, сталь 08КП и сталь 12Х18Н10Т на термоЭДС и проводимость, получены аналитические выражения для определения термоЭДС, позволяющие учесть концентрацию дефектов.

2. Проведены исследования температурной зависимости термоЭДС деформированных материалов сталь Ст3, сталь 08КП и сталь 12Х18Н10Т. Предложен термоэлектрический способ неразрушающего контроля качества поверхностного слоя металла, учитывающий температурную зависимость термоЭДС, защищенный патентом РФ №2498281.

3. Определено влияние переходного сопротивления контактов электродов с образцами на величину термоЭДС и предложен способ его контроля.

4. Выявлено влияние сопротивления нагрузки на электрические характеристики источника термоЭДС. Получена нелинейная зависимость ЭДС и внутреннего сопротивления источника термоЭДС от сопротивления нагрузки. Показана необходимость контроля переходного сопротивления контактов электродов с образцом.

5. Исследовано влияние эффекта Пельтье на величину термоЭДС при контроле контактного сопротивления электродов с образцами. Показано, что при использовании переменного тока любой величины или постоянного тока не более 1 А, влиянием нагрева контактов электродов за счет эффекта Пельтье можно пренебречь.

6. Создано термоэлектрическое устройство контроля пластической деформации.

Практическая значимость.

1. Полученные аналитические выражения для определения термоЭДС, могут быть использованы для определения степени деформации металлов сталь Ст3, сталь 08КП и сталь 12Х18Н10Т.

2. Предложенный способ термоэлектрического контроля качества поверхностного слоя металла позволяет повысить достоверность и повторяемость результатов контроля.

3. Создан макетный образец термоэлектрического дефектоскопа, нашедший практическое применение в НП ТЦТД «Химотест», г.Томск, защищенный патентом РФ: №2495410

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель, описывающая термоэлектрические свойства металла, подвергнутого пластической деформации, позволяющая учесть величину деформации.
2. Методика термоэлектрического контроля поверхностного слоя металла и его техническая реализация с учетом температурной зависимости термоЭДС деформированного материала, позволяющие определять величину термоЭДС с точностью не хуже 1% для стали 08КП; 1,5% для стали 12Х18Н10Т и 5,5% для стали Ст3 в температурном диапазоне от -9°С до +100°С.
3. Методика контроля переходного сопротивления контактов электродов с образцами и его техническая реализация, позволяющие повысить достоверность контроля.

Использование результатов работы

Результаты исследований и разработанные приборы используются в НП ТЦТД «Химотест», ООО «Ильма», ООО «Сибмост», г.Томск, ООО «Горный инструмент», г.Новокузнецк, ООО «Томскнефть-Сервис», г.Стрежевой, ООО «МЕТПРОМ», г.Подольск, Московской области.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 12 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 2 патента на изобретения и 7 докладов и тезисов в материалах Международных и Всероссийских научных конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных литературных источников, содержащего 105 наименований. Общий объем работы составляет 155 страниц машинописного текста, включая 69 рисунков и 3 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, обозначено современное состояние исследований термоэлектрических свойств металлов и сплавов, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны механизмы пластической деформации: скольжение, двойникование и межзеренное перемещение. Первые два механизма характерны для деформации монокристалла, в то время как межзеренное перемещение происходит при деформации поликристаллического мате-

риала. В результате пластической деформации металла происходит изменение механических свойств: сопротивление деформации (прочность σ , твердость HRC) - повышается, а способность к пластической деформации (пластичность δ , ударная вязкость KCV) – уменьшается. В процессе пластической деформации возникают дефекты четырех видов (если за основу классификации взять их протяженность в трех измерениях): точечные, линейные, поверхностные и объемные. В зависимости от температуры, степени и скорости деформации можно получить металлы, сильно различающиеся по кристаллической структуре, имеющие различные как физические, так и эксплуатационные свойства. Именно поэтому важен неразрушающий контроль пластической деформации. В настоящее время для контроля пластической деформации металлов применяют рентгеновский метод, ультразвуковой, тепловой, метод магнитоупругого эффекта и термоэлектрической. Применение рентгеновского метода ограничено необходимостью радиационной защиты персонала, необходимостью двустороннего доступа и невозможностью проводить экспресс-контроль.

Ультразвуковые методы основаны на возбуждении в объекте контроля упругих колебаний и измерении их амплитуды и фазы. Основным недостатком метода является необходимость хорошего акустического контакта датчика с поверхностью контролируемого изделия, что особенно трудно обеспечить на искривленных поверхностях и поверхностях, покрытых окалиной. Более распространен акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля, основанный на анализе упругих колебаний волн, возникающих в самом контролируемом объекте под действием внешних сил. Особенностью метода АЭ, ограничивающей его применение, является в ряде случаев трудность выделения сигналов акустической эмиссии из помех. Метод АЭ обладает свойством интегральности, заключающимся в том, что, используя один или несколько преобразователей АЭ, установленных неподвижно на поверхности объекта, можно контролировать весь объект. Координаты дефектов определяются без сканирования поверхности объекта преобразователями (как это необходимо, например, в эхо-методе).

Тепловой метод контроля основан на использовании термоупругого эффекта. При механическом нагружении какого-либо объекта часть подводимой энергии рассеивается в виде тепла. При нагружении металла в упругой области, количество тепла линейно зависит от величины приложенных напряжений, а начало пластической деформации резко увеличивает выделение тепла. Современные тепловизионные устройства позволяют эффективно контролировать момент появления пластической деформации. Однако метод не позволяет обнаруживать пластическую деформацию полученную ранее. Поэтому основная область применения метода - измерение величины пластической деформации при статическом или циклическом нагружении.

Метод магнитоупругого эффекта основан на изменении параметров кривой намагничивания и петли гистерезиса под действием внешних сил. При этом изменяются магнитная проницаемость (начальная и максимальная), величины остаточной намагниченности, коэрцитивной силы и магнитострикции, а также потери энергии на перемагничивание и структура шумов Баркгаузена.

Основные недостатки метода: чувствителен к изменению температуры, также оказывают влияние фазовый состав, обезуглероженные слои, слабая чувствительность к напряжению сдвига, незначительный гистерезис.

Очень чувствительным как к структуре кристалла, так и к малейшим изменениям в электронном энергетическом спектре, является термоЭДС. Это создает большие возможности для использования термоЭДС в качестве чувствительного метода контроля количества примесей, упругих напряжений, фазовых превращений и пластической деформации. Поэтому термоэлектрические приборы находят все более широкое применение в решении задач разрушающего контроля, в частности, используются при контроле химического состава, разбраковке по маркам и др. В настоящее время существует целый ряд приборов термоэлектрического контроля, выпускающиеся как в России, так и за рубежом. Однако существующие приборы термоэлектрического контроля имеют недостатки, не позволяющие достоверно осуществлять входной контроль металлов и сплавов. В частности наличие переходного процесса, «дребезг контактов», нестабильное электрическое сопротивление контактов измерительных электродов с образцом и т.д. Поэтому возникает актуальная необходимость провести дополнительные исследования и определить влияние перечисленных выше факторов на достоверность контроля. А также предложить методы по уменьшению их влияния на достоверность контроля.

Во второй главе проведено исследование термоэлектрических свойств металлов при пластической деформации. На основе анализа деформации при одноосном растяжении получено аналитическое выражения для определения относительного количества дефектов на единицу объема:

$$\mu = \frac{\Delta l}{l + \Delta l} \quad (1)$$

где l – размер зоны, которая, подвергается пластической деформации, Δl – удлинение образца.

Для исследования термоэлектрических свойств металлов при пластической деформации предложена модель, которая основывается на том, что появление микротрещин в образцах, особенно трещин отрывов естественным образом удлиняет токопроводящие пути, что приводит к уменьшению проводимости материала на данном участке в зависимости от концентрации дефектов:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_0}{(1 + \mu)^S}$$

где σ_0 - проводимость единицы исходного материала, σ_R - проводимость этого же материала после его деформации, S – коэффициент, зависящий от марки материала, который определяется экспериментально.

С учетом концентрации дефектов, возникающих при пластической деформации, относительное изменение термоЭДС может быть определено из выражения:

$$E_{\Delta} = \frac{E_0}{(1 + \mu)^S} - E_0,$$

где E_0 - термоЭДС недеформированного материала.

На основе полученного выражения была построена зависимость изменения термоЭДС металла подвергнутого пластической деформации от концентрации дефектов для различных значений S .

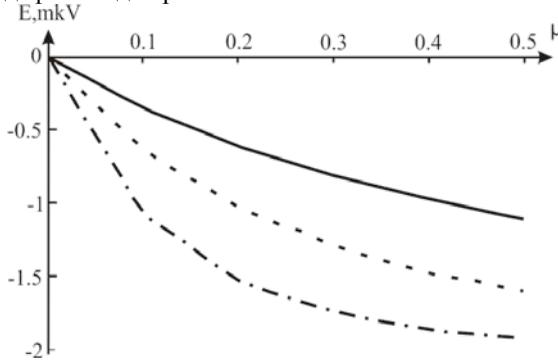


Рис.1 Зависимость термоЭДС от концентрации дефектов, сплошная линия $S=5$, пунктирная линия $S=7$, штрих-пунктирная линия $S=8$

Из рис.1 видно, что с увеличением концентрации дефектов термоЭДС деформированного металла уменьшается, однако для разных металлов это изменение будет разным. При контроле конкретных типов металлов и сплавов необходимо экспериментально определить коэффициент S . Тогда, зная характеристики материала E_0 и измеряя E_{Δ} , можно определить величину пластической деформации на исследуемом участке.

Контроль термоэлектрическим методом может осуществляться в различных температурных условиях. Для получения достоверных результатов контроля необходимо поддерживать разность температур между горячим и холодным электродами постоянной. Однако это условие не является достаточным при контроле пластической деформации. Исследования, проведенные Лухвич А.А. на «благородных» металлах, выявили отличия в температурной зависимости деформированного и недеформированного металлов. Информа-

ция в литературных источниках для «черных металлов» отсутствует. Поэтому были проведены исследования температурной зависимости термоЭДС для металлов сталь Ст3, сталь 08КП и сталь 12Х18Н10Т. Результаты исследований приведены на рис.2.

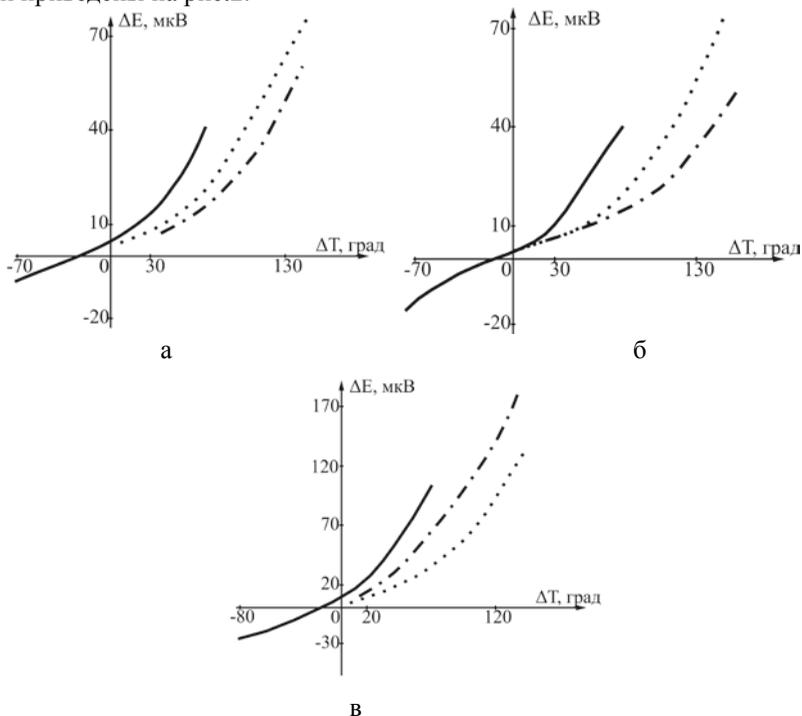


Рис. 2 Зависимость изменения термоЭДС металлов, подвергнутых пластической деформации от разности температур горячего и холодного электродов (сплошная линия – температура образца +100°С, штрихпунктирная линия - температура образца 24 °С, пунктирная линия - температура образца -9°С), а – сталь 08КП, б – сталь 12Х18Н10Т, в – сталь Ст3

Полученные зависимости для стали Ст3 хорошо аппроксимируются выражением:

$$E(t, T) = k \left[\frac{1}{4} t + (0,11T - 3,7m) \right],$$

где t – разность температур между горячим и холодным электродами, T – температура образца, k и m – коэффициенты пропорциональности.

Для определения степени влияния переходного сопротивления контактов горячего и холодного электродов с испытуемым и эталонным образцами был проведен анализ эквивалентной схемы, представленной на рис.3,

которая содержит несколько источников термоЭДС каждый со своим внутренним сопротивлением и своим сопротивлением контактов. На рис.3 приняты следующие условные обозначения: $E_{1.1} \dots E_{1.n}$ – контактная ЭДС горячего электрода с контрольным образцом, $E_{2.1} \dots E_{2.k}$ – контактная ЭДС контрольного образца с испытуемым, $E_{3.1} \dots E_{3.m}$ – контактная ЭДС горячего электрода с испытуемым образцом, $R_{1.1} \dots R_{1.n}$ – внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с контрольным образцом, $R_{2.1} \dots R_{2.k}$ – внутреннее сопротивление контактной ЭДС контрольного образца с испытуемым, $R_{3.1} \dots R_{3.m}$ – внутреннее сопротивление контактной ЭДС горячего электрода с испытуемым образцом, $R_{4.1} \dots R_{4.n}$ – контактное сопротивление горячего электрода с контрольным 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 контрольным.

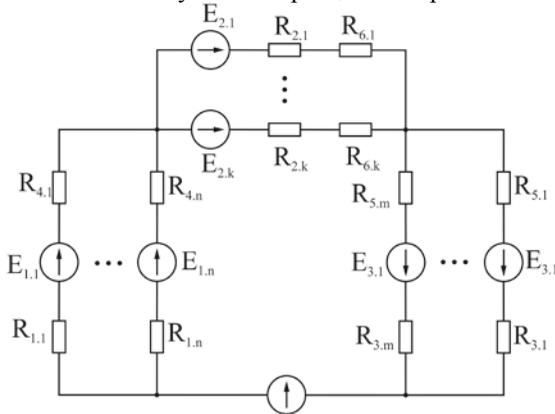


Рис.3 Эквивалентная электрическая схема при дифференциальном методе контроля с плоскостным контактом

В зависимости от усилия прижатия и равномерности распределения нагрузки по площади контактов 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 от времени (без учета неоднородности химического состава поверхности электродов, контрольного и испытуемого образцов):

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

Исследования нагрузочной характеристики источника термоЭДС показали сложную зависимость термоЭДС (сплошная линия) и внутреннего сопротивления источника термоЭДС (штрихпунктирная линия) от сопротивления нагрузки (рис.4).

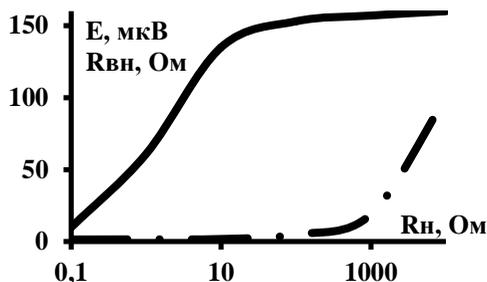


Рис.4. Зависимость термоЭДС и внутреннего сопротивления источника термоЭДС от сопротивления нагрузки (штрихпунктирная линия–термоЭДС, сплошная линия – внутреннее сопротивление)

При сопротивлении нагрузки от 0,1 Ома до 10 Ом внутреннее сопротивление источника термоЭДС практически не изменяется и составляет 1,57 Ома, а термоЭДС линейно увеличивается. При увеличении сопротивления нагрузки от 20 Ом до 10 кОм внутреннее сопротивление увеличивается от 2 Ом до 100 Ом, а термоЭДС практически не изменяется. Следовательно при изменении переходного сопротивления контактов электродов с контрольным и испытуемым образцами в интервале от 0,1 Ома до 100 Ом будет происходить изменение величины термоЭДС при контроле и соответственно приведет к неправильной интерпретации результатов.

Измерение переходного сопротивления контактов проводим косвенным методом, измеряя падение напряжения на нем при пропускании стабильного тока. Ток, протекающий через электроды измерительной цепи, контрольный и испытуемый образцы в соответствии с эффектом Пельтье будет выделять или поглощать тепло:

$$Q = P_{AB}It = (P_B - P_A)It,$$

где Q — количество выделенного или поглощённого тепла, I — сила тока, протекающего через электроды при измерении контактного сопротивления, t — время протекания тока, P_1 — коэффициент Пельтье I-го металла.

Поглощаемое тепло будет увеличивать температуру металла:

$$\Delta T = \frac{Q}{mw},$$

где ΔT изменение температуры электрода, m — масса электрода, w — удельная теплоемкость материала электрода.

На рис.5 приведены расчетные зависимости изменения температуры электрода от силы тока, протекающего через электроды при измерении кон-

тактного сопротивления, для трех значений времени контроля (сплошная линия – время контроля 30 сек, штрихпунктирная линия – 60 сек, пунктирная линия – 120 сек).

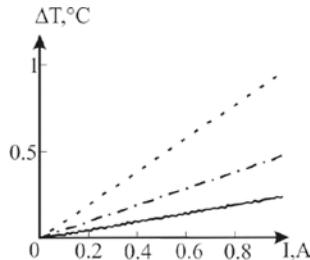


Рис.5. Зависимость изменения температуры электрода от силы тока, (сплошная линия – время контроля 30 сек, штрихпунктирная линия – 60 сек, пунктирная линия – 120 сек)

Из рисунка видно, что при использовании тока в 1 А и времени контроля 120 сек изменение температуры электрода, выполненного из меди и объекта контроля изготовленного из стали, составит 1,0 градуса. При рабочей температуре горячих электродов 130°C , изменение составит 0,77%. Для электродов выполненных из другого металла с большим отличием коэффициента Пельтье от стали, изменение температуры будет больше. Например, для электродов, выполненных из свинца, изменение температуры увеличится в четыре раза, что приведет к появлению дополнительной погрешности.

При контроле пластической деформации, образец, подвергшийся пластической деформации можно представить как образец с повышенной шероховатостью, у которого горизонтальный шаг неровностей по сравнению с обычным увеличен и соответственно количество выступов на длине электродов уменьшено. При термоэлектрическом контроле площадь контакта горячего электрода таким образом уменьшается. Это приводит к изменению теплового потока от горячего электрода к образцу в соответствии с основным уравнением теплопередачи.

$$Q = k \cdot S \cdot t \cdot \tau$$

где Q – тепловой поток (количество теплоты), переданное в процессе теплопередачи, S – поверхность теплообмена, t – движущая сила процесса теплопередачи, τ – время, k – коэффициент теплопередачи.

Изменение теплового потока Q приводит к изменению температуры горячего электрода:

$$\Delta t = Q / m \alpha$$

где m – масса горячего электрода, α – коэффициент теплопроводности. Изменение теплового потока приводит к изменению температуры горячего электрода и соответственно к изменению величины термоЭДС:

$$\Delta E = \lambda[(T_1 - \Delta t) - T_2],$$

где λ – коэффициент Зеебека, T_1 – температура горячего электрода, T_2 – температура холодного электрода, Δt – изменение температуры горячего электрода.

На рис. 6. приведены зависимости относительного изменения термоЭДС от площади контакта горячего электрода с контролируемым изделием. В расчетах в качестве горячего электрода использовалась медь, в качестве контролируемого изделия сталь Ст3.

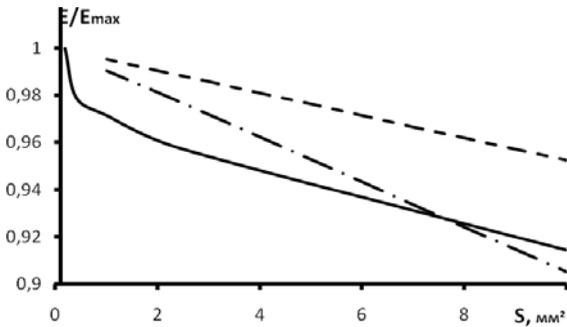


Рис. 6 Зависимость относительного изменения термоЭДС от площади контактов горячего электрода с контролируемым изделием (сплошная линия – экспериментальные данные, штрихпунктирная и пунктирная линии – расчетные данные)

Расчетные зависимости показаны пунктирной и штрихпунктирной линиями для различных значений массы горячего электрода. Отличие массы составило в 2 раза. Большая масса электрода меньше охлаждается при большой площади контакта, поэтому изменение термоЭДС меньше (пунктирная линия). Сплошной линией показана экспериментальная зависимость. Отличие экспериментальной и теоретической зависимостей объясняется локальными колебаниями химического состава электродов и образцов, которое не учитывалось в расчетах. Особенно значительное отличие наблюдается на начальном участке характеристики (в области малых значений $S < 1 \text{ мм}^2$), когда размеры электрода сопоставимы с размерами локальных включений примесей в основной металл и их влияние проявляется особенно сильно. При увеличении размеров электродов происходит интегральное измерение термоЭДС и локальные колебания химического состава влияют меньше на результат контроля. Среднеквадратичное отклонение на начальном участке составило 11,4%, на остальной части характеристики 4,0%.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод, что контроль переходного сопротивления контактов, учет темпе-

ратурной зависимости деформированного материала и шероховатости поверхности позволяют повысить достоверность контроля.

В третьей главе описана экспериментальная установка и представлены результаты экспериментов. В состав экспериментальной установки входят разрывная машина МИРИ-100К, предназначенная для статических испытаний металлических образцов на одноосное растяжение и сжатие при нормальной температуре по ГОСТ 1497, 6996, 10006, 27208, прибор для контроля термоЭДС «Термотест» и персональный компьютер.

Для контроля переходного сопротивления контактов измерительной цепи R_k была предложена структурная схема, приведенная на рис.7.а.

Генератор тока вырабатывает синусоидальный ток постоянной амплитуды I_m , независимой от сопротивления нагрузки. При протекании этого тока через переходное сопротивление контактов R_k , на нем падает напряжение в соответствии с законом Ома:

$$U_k = I_m R_k,$$

где U_k – падение напряжения на переходном сопротивлении контактов, I_m – ток, протекающий через контактное сопротивление.

Кроме напряжения U_k с горячих электродов снимается напряжение термоЭДС U_{EMF} . Для разделения этих напряжений используется полосовой фильтр с резонансной частотой равной частоте генератора тока. С выхода фильтра напряжение поступает на усилитель, затем на выпрямитель. С выхода выпрямителя постоянное напряжение поступает на аналого-цифровой преобразователь, с которого двоичный код напряжения поступает на микроконтроллер, который производит вычисление суммарного сопротивления контактов:

$$R_k = \frac{U_k}{I_m}.$$

Использование переменного напряжения для контроля суммарного сопротивления контактов позволяет устранить нагрев образцов за счет эффекта Пельтье и кроме того контролировать величину суммарного сопротивления контактов в процессе измерения термоЭДС.

Блок измерения термоЭДС представлен на рис.7.б и состоит из двух каналов: канала стабилизации температуры горячих электродов и канала измерения термоЭДС. Канал стабилизации температуры горячих электродов состоит из датчика температуры, усилителя сигналов датчика температуры, аналого-цифрового преобразователя для получения цифрового кода температуры горячих электродов, микроконтроллера, обрабатывающего данные с датчика температуры, нагревателя, подключаемого к блоку питания через ключевой элемент по сигналу с микроконтроллера. Результат измерения термоЭДС отображается на индикаторе. Микроконтроллер имеет связь с персональным компьютером. Данные по интерфейсу *USB* передаются в ПК, отоб-

ражаются на экране монитора и сохраняются в файле данных. Благодаря этому можно наблюдать процесс контроля в динамике.

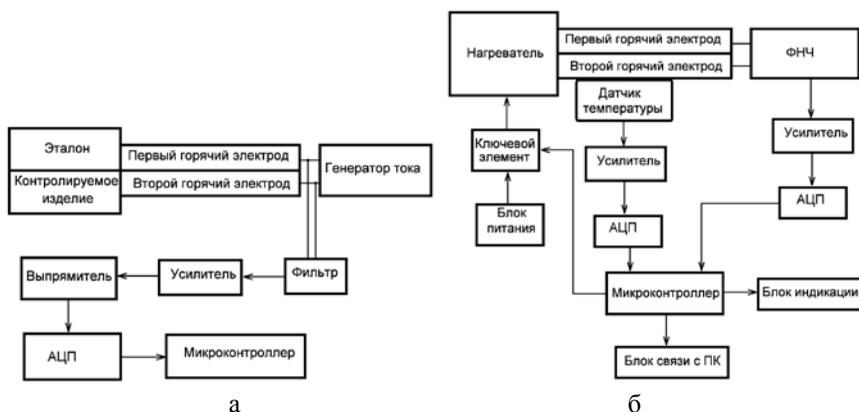


Рис. 7. Структурная схема прибора «Термотест»

Программное обеспечение прибора «Термотест» позволяет вводить данные в персональный компьютер в режиме реального времени и отображать их на экране монитора.

При контроле термоЭДС в местах появления пластической деформации возможно три основных случая: первый, когда датчик установлен поперек направления удлинения образца (рис.8.а), второй – по направлению удлинения с однонаправленным изменением деформации (рис.8.б) и третий – по направлению удлинения с разнонаправленным изменением деформации, когда максимальная деформация находится в центре горячего электрода (рис.8.в).

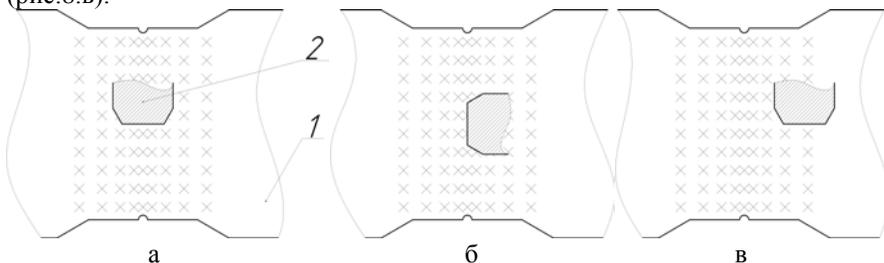


Рис.8. Варианты расположения горячего электрода на контролируемом изделии. 1 – контрольный образец, 2 – горячие электроды; а – перпендикулярно линии отрыва, б – вдоль линии отрыва, в – рядом с линией.

В первом случае величина термоЭДС по всей площади контакта горячего электрода с контролируемым изделием является величиной постоянной и пропорциональна величине деформации. Во втором случае величина термоЭДС по всей площади контакта горячего электрода с контролируемым изделием монотонно изменяется (увеличивается или уменьшается), внутреннее сопротивление источника изменяется в противоположном направлении и результирующая величина тока в цепи датчика будет определяться суммой токов от всех источников. На рис.9.а приведены результаты расчета для линейного изменения термоЭДС и внутреннего сопротивления источника термоЭДС. Результирующая величина тока в цепи будет определяться из выражения:

$$I = \int_0^S \frac{E_s}{R_s} dS = \int_0^S I_s dS,$$

где: s – площадь контактной поверхности горячего электрода с контролируемым изделием, E_s – термоЭДС в точке контакта, R_s – внутреннее сопротивление источника термоЭДС. В третьем случае величина термоЭДС по площади контакта горячего электрода с контролируемым изделием изменяет направление градиента (рис.9.б).

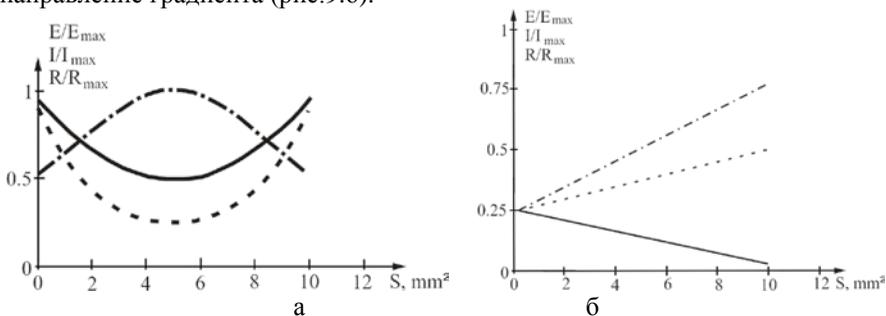


Рис.9. Распределение источников термоЭДС (сплошная линия), внутреннего сопротивления (штрих-пунктирная линия) и тока (штриховая линия) при расположении максимальной деформации в центре (а) и на краю (б) горячего электрода

На разработанном комплексе были проведены исследования термоЭДС образцов из трех марок сталей по 10 образцов каждой марки: Сталь 08КП; сталь 12Х18Н10Т и сталь Ст3.

На рис.10.а показаны усредненные зависимости термоЭДС от концентрации дефектов, рассчитанной по выражению (1). На рис.10.а пунктирной линией показана зависимость для Ст3, штрихпунктирной линией показана зависимость для 08КП, сплошной линией показана зависимость для 12Х18Н10Т. Доверительный интервал составил не более 10% от текущего значения. Из рисунка видно, что в области упругих деформаций изменение

термоЭДС не наблюдается, при появлении пластической деформации происходит уменьшение абсолютного значения термоЭДС с увеличением величины деформации. Минимальное значение термоЭДС достигается при максимальном значении деформации перед разрушением образца.

На рис.10.б приведена зависимость термоЭДС металла сталь Ст3 от расстояния до места пластической деформации. Минимальное значение термоЭДС соответствует месту разрыва образца. С удалением абсолютная величина термоЭДС увеличивается и при расстояниях превышающих 15мм изменение термоЭДС не наблюдается.

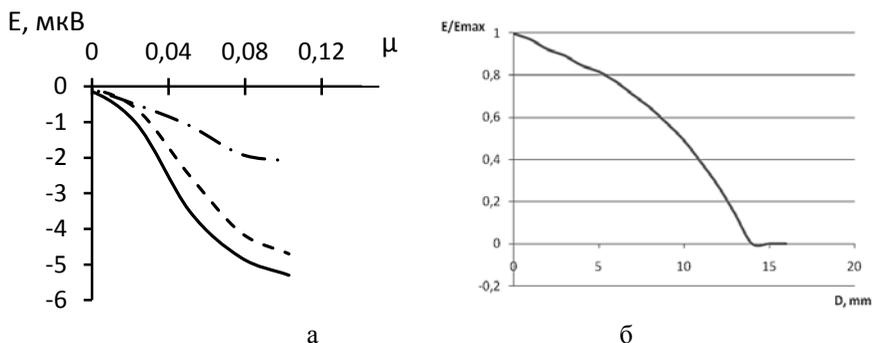


Рис.10. Зависимость термоЭДС от концентрации дефектов (а) и расстояния до места разрыва (б)

Сравнение экспериментальных данных (рис.10.а) и расчетных (рис.1), позволяет говорить о адекватности предложенной модели. Среднеквадратичное отклонение результатов в области пластической деформации не превышает 18%.

Таким образом, разработанный прибор «Термотест» позволяет контролировать термоэлектрические свойства металлов и сплавов при пластической деформации, сохранять полученные результаты в базе данных в текстовом формате, преобразовывать данные в другие форматы для дальнейшей обработки, получать протокол испытаний в печатном виде.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполненной работы исследованы термоэлектрические характеристики конструкционных углеродистых сталей 08КП, Ст3 и хромоникелевых сталей аустенитного класса 12Х18Н10Т, подвергнутых пластической деформации. Получены аналитические выражения для определения термоЭДС, позволяющие учесть концентрацию дефектов.

Исследованы температурные зависимости термоЭДС деформированных материалов сталь Ст3, сталь 08КП и сталь 12Х18Н10Т. Предложен термоэлектрический способ неразрушающего контроля качества поверхностного слоя металла, учитывающий температурную зависимость термоЭДС. Проведены теоретические и экспериментальные исследования электрических свойств источников термоЭДС.

Исследовано влияние переходного сопротивления контактов электродов с образцами на величину термоЭДС и предложен способ его контроля, обеспечивающий высокую достоверность и повторяемость результатов контроля.

Исследовано влияние эффекта Пельтье на величину термоЭДС при контроле контактного сопротивления электродов с образцами. Показано, что при использовании переменного тока любой величины или постоянного тока не более 1 А, изменение температуры стальных образцов и электродов, изготовленных из меди или сплавов с близкими значениями коэффициента Пельтье составляет не более 0,77%.

Разработанный прибор был внедрен на ряде предприятий Российской Федерации и Республики Казахстан, где получил высокую оценку потребителей.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Солдатов А.А. Неразрушающий контроль пластической деформации методом измерения дифференциальной термоЭДС / А.А. Солдатов [и др.]// Дефектоскопия. – 2012. – №. 3. – С. 49-51.
2. Сорокин П.В. Программно-аппаратный комплекс для исследования переходного процесса при экспресс-контроле методом термоЭДС / П.В. Сорокин , А.А. Солдатов, М.А. Солдатова // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 13. – С. 22-25.
3. Солдатов А.А. Экспериментальные исследования термоэлектрических характеристик пластически деформированных сталей Ст3, 08КП и 12Х18Н10Т / А.А. Солдатов, А.И. Солдатов, Е.С. Хаскова // Контроль. Диагностика 2014. – №13.

Патенты

4. Пат.2495410 Российская Федерация. Устройство для неразрушающей разбраковки металлических изделий / А.А. Солдатов [и др.]; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.10.2013.
5. Пат. 2498281 Российская Федерация. Термоэлектрический способ неразрушающего контроля качества поверхностного слоя металла / А.И. Солдатов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – опубл. 10.11.2013.

Публикации в других изданиях

6. Soldatov A.A. Nondestructive Proximate Testing of Plastic Deformations by Differential Thermal EMF Measurements/ A.A. Soldatov, [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing . – 2012 – Vol. 48 – №. 3 – p. 184-186.
7. Солдатов А.А. Неразрушающий экспресс контроль металлов и сплавов методом дифференциальной термо-эдс [Электронный ресурс] / А.А. Солдатов, Е.А. Кривенко // Современная техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск, 18-22 Апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – Т.1 – С. 208-209. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
8. Солдатов А.А. Исследование термоэлектрических свойств металлов при помощи программно-аппаратного комплекса // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. – Томск, 27-31 Мая 2013. – Томск: ТПУ, 2013. – Т.1. – С. 155-159.
9. Солдатов А.А. Неразрушающей контроль качества поверхностного слоя металла [Электронный ресурс] / А.А. Солдатов // Современная техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т. – Томск, 9-13 Апреля 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – Т.1. – С. 257-258. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
10. Солдатов А.А. Исследование переходного процесса при экспресс-контроле металлов и сплавов методом термо-ЭДС / А. А. Солдатов, П. В. Сорокин, Д. А. Солдатов // Неразрушающий контроль: сборник научных трудов всероссийской молодежной школы-конференции, Томск, 2013. - с. 40-46.
11. Солдатов А. А. Экспериментальные исследования термо-ЭДС при пластической деформации металлов и сплавов / А.А. Солдатов // Инновации в неразрушающем контроле SibTest: сборник научных трудов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по Инновациям в неразрушающем контроле. – Горно-Алтайск, 2011. – с. 290-292.
12. Soldatov A.A. Control of the plastic deformation by thermoelectric method / A.A. Soldatov // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Tehnologies, 2011. – Vol. 5. – №. 3. – p. 148-155.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ

Типография ТПУ г. Томск

634050, г. Томск, пр. Ленина, 30