

К. ф.-м. н. В. В. БРАЙЛОВСКИЙ, к. т. н. О. Е. ИЛАРИОНОВ,
П. М. ШПАТАР

Украина, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
E-mail: rt-dpt@chnu.edu.ua

Дата поступления в редакцию
24.07.2003 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

СТАБИЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК МЕДНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Полученные результаты свидетельствуют о линейной температурной зависимости сопротивления датчика в диапазоне температур от -50 до $+200^{\circ}\text{C}$.

При разработке современных устройств измерения, контроля и регулирования температуры актуален вопрос обеспечения быстродействия, стабильности и надежности датчиков температуры. Объемные термопреобразователи сопротивления характеризуются высокой стабильностью параметров, тем не менее имеют значительную инерционность. Снижение ее возможно при использовании тонкопленочных однородных датчиков и датчиков на основе структур «металл—металл» и «металл—полупроводник». Однако во всех случаях в большей или меньшей мере наблюдается деградация параметров датчиков под воздействием внешних факторов, таких как повышенная температура, агрессивность окружающей среды, высокоэнергетические излучения и т. п.

Проблема надежности термопреобразователей рассматривается, главным образом, относительно вторичных устройств, которые эксплуатируются в нормальных или сложных условиях (повышенная температура, влажность, вибрация). Что же касается первичных устройств, в частности, датчиков температуры, которые работают в условиях высоких температур и агрессивных сред, переменных во времени силовых и тепловых влияний, то исследования их надежности и стабильности параметров недостаточны. Такого рода исследования приведены для платиновых термопреобразователей в [1].

Кроме стабильности и воспроизводимости, необходимо также обеспечение надлежащей прочности конструкции, т. е. способности продолжительное время противодействовать внешним влияниям. Датчики характеризуются различным ресурсом работы, к тому же отсутствуют данные о том, на каком этапе эксплуатации теряется точность, а на каком — механическая прочность, которая, в свою очередь, влияет на возможность вести технологические процессы в оптимальных режимах.

В данной работе проводятся исследования влияния температурных факторов на стабильность параметров медных пленочных термопреобразователей сопротивления, изготовленных по технологии, предложенной в [2]. Важной характеристикой медных пле-

нок является удельное сопротивление, величина которого зависит от микроструктурных параметров пленок: размеров зерен, микропримесей, ориентации роста кристаллов и т. п. Значения названных параметров зависят от толщины пленок и особенностей метода их нанесения и всегда несколько хуже, чем у объемных образцов меди [3].

Одним из условий обеспечения стабильности величины сопротивления пленочных датчиков R_0 (сопротивление при температуре таяния льда) является герметизация термочувствительного слоя датчика при сохранении надежного теплового контакта с окружающей средой.

Стабильность R_0 значительно возрастает при нанесении дополнительного слоя сплава «титан—вольфрам» между термочувствительным слоем и изолирующим слоем двуокиси кремния. Шунтирующее влияние сплава «титан—вольфрам» на параметры основного медного терморезистивного слоя незначительно, поскольку удельное сопротивление сплава «титан—вольфрам» ($\rho_{\text{TiW}} \approx 98,4 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) намного выше, чем удельное сопротивление меди ($\rho_{\text{Cu}} = 1,75 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) [4, с. 75].

Нарушение целостности защитного слоя (трещины, проколы) может приводить к образованию поверхностных каналов проводимости между отдельными точками термочувствительного слоя. Наиболее высокой надежностью защитного слоя (отсутствие проколов) характеризовались термопреобразователи, защищенные дополнительно слоем эмали.

Исследования проводились на двенадцати датчиках, произвольно выбранных из партии 200 шт., полученных при разном времени напыления, а значит, с различной толщиной термочувствительного слоя меди. Остальные параметры технологического процесса, в частности, подводимая мощность, вакуум, выдерживались идентичными. При исследовании температурной зависимости сопротивления термопреобразователей использовался четырехзондовый метод [5, с. 86]. Измерения проводились с помощью прибора УПИП-60М. Температура исследуемого датчика задавалась температурой термостата [6]. Действительное значение температуры определялось с помощью контрольного термометра, размещенного рядом с исследуемым датчиком.

Температурная зависимость сопротивления исследуемых пленочных термопреобразователей сопро-

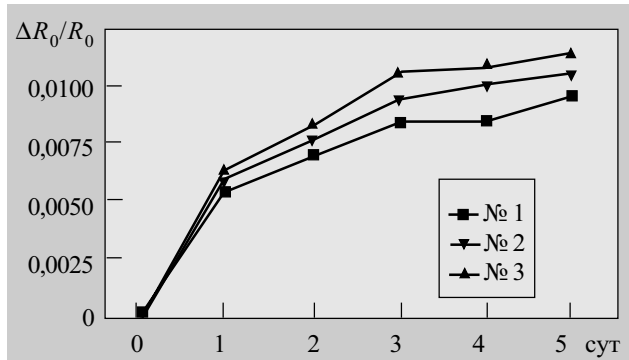


Рис. 1. Относительное изменение сопротивления термопреобразователя при температуре таяния льда

тивления в температурном диапазоне от -50 до $+200^{\circ}\text{C}$ описывается линейной функцией $R(T)=166,8+0,537096 \cdot T$ [7]. Величина температурного коэффициента сопротивления (ТКС) составила $\alpha_{\text{пл}}=0,00322^{\circ}\text{C}^{-1}$, а отношение сопротивлений термопреобразователя соответственно при температурах 100 и 0°C — $W_{100}=R_{100}/R_0=1,322$. ТКС пленочного медного термопреобразователя сопротивления, в сравнении с объемным термопреобразователем ($\alpha_{\text{об}}=0,00428^{\circ}\text{C}^{-1}$ [8, с. 79]), уменьшился, что объясняется влиянием адгезионного и дополнительного защитного слоя сплава «титан—вольфрам». (Следует считать, что наибольшее влияние на ТКС термопреобразователей оказывает титан, который характеризуется наиболее низким ТКС [2, 7].)

Исследование стабильности характеристик пленочных медных термопреобразователей сопротивления проводили по методике, предложенной в [1].

Кратковременная стабильность W_{100} медных термопреобразователей сопротивления проверена при температурах 0 и 100°C . Величины R_0 и R_{100} измерялись на протяжении нескольких дней. Во время исследований термопреобразователи сопротивления выдерживали при разных температурах в такой последовательности: азотная температура, нулевая, комнатная, 150°C , 200°C . Временной интервал выдержки при этом выбирался произвольно в пределах 20 — 60 минут.

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследований R_0 и W_{100} трех термопреобразователей сопротивле-

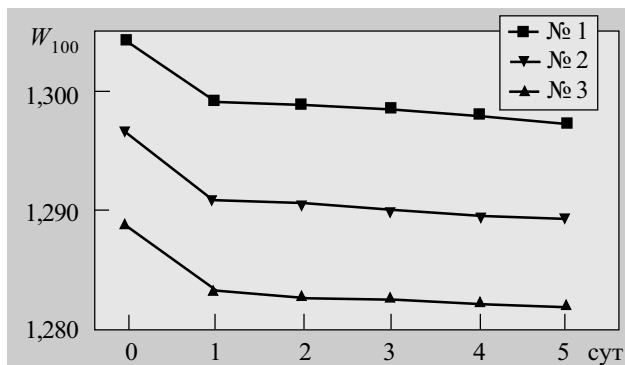


Рис. 2. Кратковременная стабильность W_{100}

ния (№№ 1—3). Анализ результатов свидетельствует, что изменение величин R_0 и W_{100} не превышает, соответственно, $1,6$ Ом и $0,009$.

Термоциклирование осуществлялось по такому алгоритму:

1. Десятиминутное погружение в жидкий азот.
2. Нагрев до комнатной температуры.
3. Десятиминутная выдержка в термостате при температуре $+200^{\circ}\text{C}$.
4. Охлаждение до комнатной температуры.

До и после пяти термоциклов проводилось измерение сопротивлений термопреобразователей при температурах 0 и 100°C . Величины R_0 и W_{100} термоциклированных датчиков изменились по сравнению с исходными соответственно на $1,1$ Ом и $0,009$.

Долгосрочная стабильность медных пленочных термопреобразователей сопротивления проверена при температуре таяния льда и 100°C после выдержки (свыше 50 ч) при температуре 200°C . Через каждые $2,5$ ч печь охлаждали со скоростью $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, измеряли R_0 , R_{100} и снова R_0 .

На рис. 3 и 4 приведены временные зависимости изменения R_0 и W_{100} . Изменение величины R_0 не превышает $1,7$ Ом после 50 ч отжига.

Проведенные дополнительные исследования и анализ причин большего относительного изменения сопротивления термопреобразователя № 3 свидетельствуют о наличии микротрещин в герметизирующем защитном слое, что облегчало доступ кислорода ат-

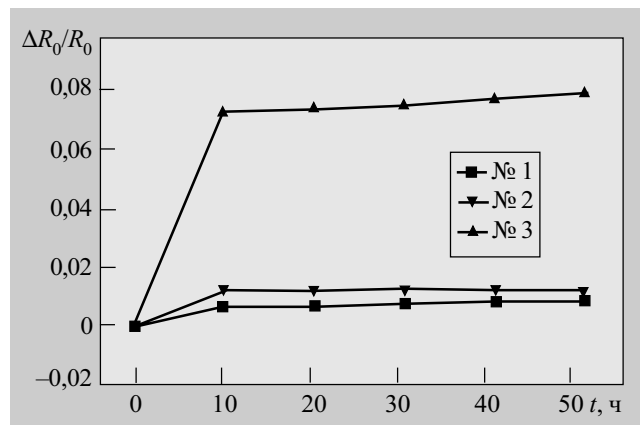


Рис. 3. Долгосрочная стабильность при температуре таяния льда

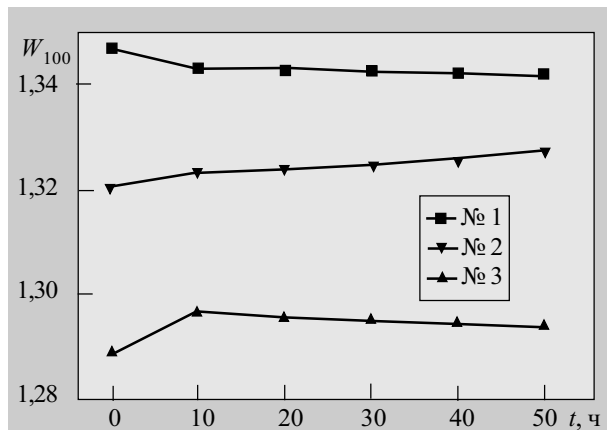


Рис. 4. Долгосрочная стабильность W_{100}

мосферного воздуха к терморезистивному слою. Процессы окисления уменьшали величину токопроводящего канала, с одной стороны, а с другой — формировали окисную пленку, которая играла защитную роль для более глубоких слоев термопреобразователя.

Из рис. 4 видно, что величина W_{100} быстро изменяется в течение первых 10 часов. После десятичасовой выдержки при температуре 200°C величина W_{100} слабо изменяется с постоянным коэффициентом. На протяжении последующих 40 часов общее изменение W_{100} не превышает 0,003. (Резкое изменение величины W_{100} в течение первых 10 часов может быть объяснено упорядочением кристаллической структуры термочувствительного элемента.)

Температурный гистерезис. В работе использовалась методика исследования температурного гистерезиса платиновых термопреобразователей сопротивления, описанная в [9]. Сопротивление исследуемого термопреобразователя сопоставлялось с сопротивлением объемного эталонного медного термометра, который предварительно калибровался в тройной точке воды. Сравнение сопротивлений исследуемого и эталонного датчиков осуществлялось при температурах 20, 30, 50, 30 и 20°C. Относительная величина температурного гистерезиса сопротивления определялась из выражения

$$\gamma = \frac{R_T \uparrow - R_T \downarrow}{R_T \uparrow} \cdot 100\%,$$

где $R_T \uparrow$ — сопротивление при температуре T в процессе нагревания;

$R_T \downarrow$ — сопротивление при температуре T в процессе охлаждения.

Результаты исследований показывают, что температурный гистерезис для пленочных термопреобразователей сопротивления составляет 0,2 Ом. Величина γ для исследуемых образцов составила 0,043%.

За четыре года хранения пленочные медные термопреобразователи изменили сопротивление R_0 не более чем на 0,05 Ом. Это свидетельствует о достаточно высокой стабильности сопротивления, а соответственно, и о высокой степени защиты термочувствительного элемента датчика.

Таким образом, в результате проведенных исследований медных пленочных термопреобразователей сопротивления установлено:

— кратковременная нестабильность параметров R_0 , W_{100} не превышает, соответственно, 1,6 Ом и 0,009;

— долгосрочная нестабильность параметров R_0 , W_{100} — 1,7 Ом и 0,003;

— изменение величины параметров R_0 , W_{100} в результате проведенных термоциклов соответственно составляет 1,1 Ом и 0,009;

— относительная величина температурного гистерезиса сопротивления составляет 0,043%.

Экспериментально выявленная нестабильность параметров R_0 , W_{100} объясняется процессами понижения термических напряжений, окислением термочувствительного слоя меди и образованием сначала закиси, а потом окиси меди, которые имеют разные температурные характеристики. Кроме этого, процессы окисления уменьшали величину токопроводящего канала основного терморезистивного материала.

Полученные результаты свидетельствуют о линейной температурной зависимости сопротивления датчика в диапазоне температур от –50 до +200°C. Себестоимость медного пленочного термопреобразователя сопротивления составляет 5,16 грн., а себестоимость платинового, в соответствии с данными [10], — 35,3—50,6 грн.

Исследованные датчики нашли применение при разработках дистанционного измерителя температуры [11], адиабатического генератора напряжения [12] и т. д.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Xumo Li, Deming Chen, Mingjian Zhao. An investigation into the stability of industrial platinum resistance thermometers // <ftp://ftp.hartscientific.com/article/aiitsiprt.pdf>.
2. Брайловский В. В., Иларионов О. Е. Малоинерционный линейный термопреобразователь сопротивления // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2001. — № 2. — С. 47—48.
3. Белевський В. П., Боринець І. Д., Прищепа М. М. Дослідження електропровідності та корозійної стійкості мідних плівок, нанесених термоіонним напиленням // НТУУ «КПІ». — Вісник радіотехнічного факультету. Радіотехніка. — 1998. — Вип. 32. — С. 117—119.
4. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. — М.: Металлургиздат, 1962.
5. Атамалян Э. Г., Портной Ю. В., Чепунова Ю. Ю. Методы и средства измерения электрических величин. — М.: Высшая школа, 1974.
6. Жук О. П., Иларионов О. Е., Шпатар П. М. Термостат діапазону 30—200°C // Труды 4-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». — Харьков, 2000. — С. 117—118.
7. Брайловський В. В., Іларіонов О. Е., Шпатар П. М. Мініатюрний мідний термоперетворювач опору // Фізичний збірник НТШ. — 2001. — Т. 4. — С. 307—310.
8. Давачі: Довідник/ З. Ю. Готра, Л. Я. Ільницький, Є. С. Поліщук. — Львів: Каменяр, 1995.
9. Curtis D. J. Thermal hysteresis and stress effects in platinum resistance thermometers // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. — 1982. — Vol. 5, N 1. — P. 803—812.
10. http://www.rtdcompany.com/items/item_detail.cfm?ITEM_ID=6&CAT_ID=13.
11. Брайловський В. В., Іларіонов О. Е., Шпатар П. М. Безконтактний вимірювач температури // Наук. вісник Чернівецького ун-ту. Фізика. Електроніка. — 2002. — Вип. 133. — С. 62—63.
12. Брайловський В. В., Ластівка Г. І., Штефюк І. В., Шпатар П. М. Адиабатичний генератор напруги // Дев'ята міжнар. наук.-техн. конф. «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». — Хмельницький, 2002. — Т. 1. — С. 74—75.