

Гурін І.В.¹ к.техн.н., Невлюдов І.Ш.² д.техн.н., професор,
Овчаренко В.Є.² д.техн.н., професор, Токарева О.В.² к.техн.н., професор

СТРУМОПІДВІД ДЛЯ РЕЗИСТИВНИХ ВВКМ НАГРІВАЧІВ

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: струмопідвід, нагрівач, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, перехідний опір, титановий дріт.

Вуглець-вуглецевий композиційний матеріал (ВВКМ) має унікальний комплекс технічних характеристик, які відрізняють його від сучасних конструкційних матеріалів [1]. Електричні властивості ВВКМ дають можливість використовувати його як конструкційний матеріал для виготовлення резистивних нагрівачів, що працюють у діапазоні температур від 400°C до 2500 °C у вакуумі або захисній атмосфері [2].

В конструкції електротермічного двигуна [3] перетворення електричної енергії в теплову відбувається за допомогою резистивного нагрівача з ВВКМ. Робота нагрівача протікає у складних умовах на гранично допустимих температурах для матеріалів, з яких виготовлена теплова камера двигуна. Термін служби нагрівача визначає час роботи всього електротермічного двигуна, тому збільшення цього терміну є важливим завданням забезпечення надійності всієї рухової установки [4]. Необхідність створення нагрівального елемента, що має високі термічні характеристики, тривалий термін експлуатації, малу масу, хімічну стійкість до агресивних середовищ і швидкий час розігріву є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Для вимірювання температури всередині теплової камери двигуна зазвичай застосовують контактні методи вимірювання за допомогою резистивних або термоелектричних датчиків [5]. Робочий діапазон таких датчиків повинен бути гарантовано вище вимірюваної температури об'єкта. Окрім цього, датчики, встановлені в об'єкті в певному місці, неминуче мають якусь теплову інерційність, та їх розміщення створює певні технологічні труднощі, ускладнює конструкцію двигуна і знижує надійність усієї системи [6].

У зв'язку з цим, для визначення температури всередині теплової камери двигуна, було запропоновано використовувати резистивні властивості нагрівача з ВВКМ, а саме зміну опору нагрівача з ВВКМ із зростанням температури. Використання інтегральної оцінки температури нагрівача з ВВКМ, яка ґрунтується на зміні опору нагрівача із зростанням температури і фактично полягає у вимірюванні сили електричного струму, що протікає через нагрівач, вимагає забезпечення точних значень електричного опору самого нагрівача та електричного опору в місті контакту струмопідводу з нагрівачем.

Електричні контактні з'єднання застосовуються в усіх електричних ланцюгах і апаратах та є їх важливими елементами [7]. Від стану електричних контактів залежить безаварійна робота електрообладнання, а також ще і точність вимірювання температури нагрівача [8,9].

Особливістю конструкції нагрівача є необхідність підводу електричного струму до двох ламелей резистивного елемента нагрівача з ВВКМ, які знаходяться з однієї

сторони нагрівача (рис. 1). Крім того слід враховувати, що температура в зоні з'єднання струмопроводів з резистивним елементом нагрівача під час роботи двигуна може змінюватися від -100°C у виключеному стані до $+400^{\circ}\text{C}$ у включеному.



Рисунок 1 – Експериментальні зразки нагрівачів

Проведені лабораторні випробування виявили, що роз'ємні з'єднання титанового дроту з резистивним елементом нагрівача з ВВКМ та розбірні з'єднання (болтові, вінтові, клинові) по різних причинах не можуть забезпечити вимоги по стабільності контактної опору. З нерозбірних з'єднань тільки зварювальні з'єднання показали стабільні показники електричного контактної опору. Для підтвердження цього були проведені дослідження, які обумовлені низкою причин:

- необхідністю врахування фактичного значення величини опору нагрівача з урахуванням перехідного електричного опору контакту у місці зварювального з'єднання титанового дроту з резистивним елементом нагрівача з ВВКМ, яке пов'язано з виділенням великої кількості тепла;
- необхідністю дослідження впливу технології електродугового зварювання в середовищі аргону на величину перехідного опору;
- необхідністю визначення значення статичної нестабільності перехідного електричного опору у місці з'єднання.

Електричний опір нагрівача зі струмопідводом має складати $3,8 \pm 0,2$ Ом [3]. Значення допуску на опір визначено рядом факторів, в тому числі фізичними властивостями ВВКМ, технологією механічної обробки, способом нанесення захисного покриття, опором зварювального з'єднання та інше.

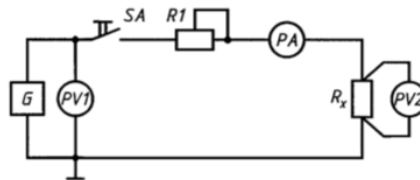
Для вимірювання опору контакту та дослідження статичної нестабільності перехідного опору контакту були виготовлені зразки нагрівачів у вигляді двозаходової спіральної конструкції з різним фланцем, в якому виконані два різьбові отвори для встановлення та зварювання до нього титанового дроту діаметром 2,5 мм зі сплаву ВТ1-00. Для збільшення механічної міцності з'єднання на одному кінці струмопідводу також сформовано різьбу. Застосування різьбового з'єднання з наступним зварюванням дозволяє збільшити здатність витримувати осьове механічне навантаження. Вирішальну роль відіграє площа контакту титану в нагрівачі, яка збільшується майже вдвічі за рахунок поверхні різьби, що зменшує перехідний електричний опір. Кількість виготовлених зразків – вісім одиниць. Для дослідження задіяно п'ять нагрівачів.

Для зварки стиків між титановим дротом та резистивним елементом нагрівача з ВВКМ застосувалась зварка TIG (Tungsten Inert Gas) поверхневою дугою в середовищі аргону, який подавався між місцем зварювання та не витратним вольфрамовим елект-

родом [10, 11]. В якості присадочного матеріалу був використаний дріт з матеріалу ВТ1-00 діаметром 0,5 мм. Перед зваркою присадочний матеріал та зразки нагрівачів були просушені в піщці на протязі 60 хвилин при температурі 120°C. Застосування інертного газу виключає необхідність використання флюсу в якості захисту, тому даний метод ефективний для зварювання титанових струмопідводів з резистивним елементом нагрівача з ВВКМ, як матеріалів активних до кисню.

При механічних випробуваннях зварювального з'єднання титанового дроту з нагрівачем було встановлено, що відрив дроту від нагрівача відбувається з залишками ВВКМ і перехідного шару карбиду титану, що утворюється при зварюванні і може впливати на додатковий електричний опір нагрівача. Теплового деформування нагрівача з ВВКМ у зоні зварювання не відбувається [12].

Вимір перехідного опору проводився за допомогою непрямого методу вольтметра-амперметра, який полягає у визначенні значення падіння напруги на контактному переході при заданому значенні струму [8,9]. Схему вимірювального стенду наведено на рис. 2.



G – джерело струму; SA – вимикач; R1 – змінний резистор; PA – амперметр; PV1, PV2 – вольтметри; Rx – опір вимірюваного контакту.

Рисунок 2 – Схема вимірювального стенду

Вимір опору перехідного контакту проводився при постійному струмі. Напруга електричного ланцюга було встановлено $10 \pm 0,01$ В, значення сили струму – не більше $2,7 \pm 0,01$ А згідно з вимогами технічних умов на цей тип нагрівача.

Похибка амперметра та похибка вольтметра PV1 у межах $\pm 0,01$ %. Повний вхідний опір вольтметра має бути більшим за внутрішній опір джерела струму не менше ніж на один порядок. Похибка вольтметра PV2 не більше $\pm 0,01$ %. Повний вхідний опір вольтметра має бути більшим за значення вимірюваного опору контакту не менше ніж на два порядки. Опір контакту можна також вимірювати чотирьохпровідним підключенням (струмового та потенційного) до виводів досліджуваного виробу за допомогою цифрового мультиметру.

Експериментальні дослідження та вимірювання проводилося в наступній послідовності:

- виміряно електричний опір резистивного нагрівача, виготовленого з ВВКМ без встановлення струмопідводів, методом опосередкованого відліку цифровим вимірювачем Е7-8, який забезпечує вимірювання електричного опору в діапазоні $10^{-3} \dots 10^6$;

- у різьбові отвори нагрівача встановлено два титанові струмопідводи, які по торцях були зварені з фланцем нагрівача електродуговим зварюванням у середовищі аргону;

- виміряно електричний опір резистивного нагрівача з привареними струмопідводами, підключивши чотирьохпровідні затискачі вимірювача Е7-8 до двох струмопід-

водів, якомога ближче до корпусу нагрівача та виставивши в Е7-8 необхідне значення струму та напруги.

Величина перехідного опору визначалася для кожного зразка як різниця між вимірюваннями до і після приварювання струмопідведення. Результати вимірювань і розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення опорів нагрівачів

№ зразка	1	2	3	4	5
R без виводів	3,784	3,731	3,738	3,692	3,614
R з виводами	3,870	3,815	3,824	3,777	3,698
R* перехідне двох контактів	0,086	0,084	0,086	0,085	0,084

*Середнє арифметичне за результатами 10 вимірювань кожного зразка протягом місяця.

Результати проведених досліджень доводять, що встановлення титанових струмопідводів методом зварювання збільшує значення опору резистивного елемента нагрівача з ВВКМ за рахунок хімічної реакції між сплавом титана та резистивним елементом і появи додаткового слою карбиду титану. Таким чином, електричний опір резистивного елемента нагрівача з ВВКМ при його виготовленні, до приварки двох титанових дротів струмопідведення, має бути зменшений з врахуванням перехідного електричного опору двох зварювальних контактів.

Література

1. О некоторых возможностях газофазных методов для изготовления углерод-углеродных тепловых узлов для выращивания монокристаллов / В.А. Гурин, И.В. Гурин, Ю.Е. Мурин, С.Г. Фурсов, В.В. Колосенко, А.А. Корнеев, А.В. Григорьев, А.Н. Буколов // Вопросы атомной науки и техники. – 1998, № 4 (76), С. 46–55.
- 2 Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Gribanov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // Problems of atomic science and technology. – 2020, № 1 (125), P. 154–160.
3. Малогабаритний нагрівач з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу / Гурін І.В., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // XXII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research, innovation and results», June 07–10, 2022, Prague, Czech Republic, 2022. P. 726–728
4. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p. 133–137.
5. Теплометрия: теорія, метрологія, практика. Монографія у трьох книгах. / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.І. Воробйов [та ін.]; за ред. д-р техн. наук Т.Г. Грищенко. Кн. 1: Методи та засоби вимірювання теплового потоку – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017. – 438 с.
6. Дослідження стабільності електричного опору високотемпературного резистивного нагрівача під час роботи з газоподібним аміаком / Овчаренко В.Є., Токарева О.В., Гурін І.В. // XII International scientific and practical conference «Actual issues of the

development of science and ensuring the quality of education», March 28–31, 2023, Florence, Italy. International Science Group. 2023. P. 407–408.

7. Семенец В.В. Технология межсоединений электронной аппаратуры: учеб. для вузов / В.В. Семенец, Джон Кратц, И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин. – Х.: «СМИТ», 2005. – 432 с.

8. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 206 с.

9. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М. Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 256 с.

10. ДСТУ ГОСТ 10157:2019. Аргон газоподібний та рідкий. Технічні умови. – К.: УкрНДНЦ, 2019. – 22 с.

11. Сварка плавлением титана и его сплавов (Обзор) / Блащук В.Е., Шеленков Г.М. // Автоматическая сварка. – 2005, № 2 (622), С. 38–46.

12. Тепловое деформирование углерод-углеродных композиционных материалов с различными схемами армирования при термоциклировании / Л.И. Грачева // Проблемы прочности. – 2007, № 3. – С. 118–133.

Bibliography (transliterated)

1. O nekotorykh vozmozhnostyakh gazofaznykh metodov dlya izgotovleniya uglerod-uglerodnykh teplovykh uzlov dlya vyrashchivaniya monokristallov / V.A. Gurin, I.V. Gurin, Yu.E. Murin, S.G. Fursov, V.V. Kolosenko, A.A. Korneev, A.V. Grigorev, A.N. Bukolov // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. – 1998, № 4 (76), P. 46–55.

2 Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Gribanov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // Problems of atomic science and technology. – 2020, № 1 (125), P. 154–160.

3. Malohabarytnyy nahriyach z vuhlets-vuhletsevoho kompozytsiynoho materialu / Hurin I.V., Ovcharenko V.Ye., Tokarieva O.V. // XXII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic research, innovation and results», June 07–10, 2022, Prague, Czech Republic, 2022. P. 726–728.

4. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), P. 133–137.

5. Теплотрија: теорија, метрологија, практика. Монографија у тријох књигах. Т.Н. Хришченко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробыов [та ин.]; за ред. др. техн. наук Т.Н. Хришченко. Кн. 1: Методы та засобы вимірювання теплового потоку – К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017. – 438 с.

6. Doslidzhennya stabilnosti elektrychnoho oporu vysokotemperaturnoho rezystyvnoho nahriyacha pid chas robiti z hazopodibnym amiyakom / Ovcharenko V.Ye, Tokarieva O.V., Hurin I.V. // XII International scientific and practical conference «Actual issues of the development of science and ensuring the quality of education», March 28–31, 2023, Florence, Italy. International Science Group. 2023. P. 407–408.

7. Semenets V.V. Tekhnologiya mezhsoedineniy elektronnoy apparatury: ucheb. dlya vuzov / V.V. Semenets, John Kratz, I.Sh. Nevlyudov, V.A. Palagin. – Kh.: "SMIT", 2005. – 432 p.

8. Metody i zasoby vymirjuvan' elektrychnykh ta neelektrychnykh velychyn: navchal'nyy posibnyk / D.M.Nesterchuk, S.O.Kvitka, S.V.Halko. – Melitopol: Vydavnychy-polihrafichnyy tsentr "Liukh", 2017. – 206 p.

9. Osnovy metrolohiyi ta zasoby vymirjuvan': navchal'nyy posibnyk / D.M.Nesterchuk, S.O.Kvitka, S.V.Halko. – Melitopol: Vydavnychy-polihrafichnyy tsentr "Liukh", 2017. – 256 p.

10. DSTU GOST 10157:2019. Argon hazopodibnyy ta ridkyy. Tekhnichni umovy. – K.: UkrNDNTs, 2019. – 22 p.

11. Svarka plavleniyem titana i ego splavov (Obzor) / Blashchuk V.E., Shelenkov G.M. // Avtomaticheskaya svarka. – 2005, № 2 (622), P. 38–46.

12. Teplovoye deformatsionnoye uglek-ugleknykh kompozitsionnykh materialov s razlichnymi skhemami armirovaniya pri termotsiklirovanii / L.I. Gracheva // Problemy prochnosti. – 2007, № 3. – P. 118–133.

УДК 621.365.4

Гурін І.В. к.техн.н., Невлюдов І.Ш. д.техн.н., професор,
Овчаренко В.Є. д.техн.н., професор, Токарева О.В. к.техн.н., професор

СТРУМОПІДВІД ДЛЯ РЕЗИСТИВНИХ ВВКМ НАГРІВАЧІВ

В статті обґрунтовано необхідність врахування перехідного електричного опору зварювального контакту між титановим струмопідводом та резистивним елементом нагрівача з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ) при його виготовленні.

Вуглець-вуглецевий композиційний матеріал має унікальний комплекс технічних характеристик, які дають можливість використовувати його як конструкційний матеріал для виготовлення резистивних нагрівачів, що працюють у діапазоні температур від 400 °С до 2500 °С у вакуумі або захисній атмосфері. Застосування нагрівачів з ВВКМ в теплових камерах електротермічних двигунів для перетворення електричної енергії в теплову дає змогу використовувати їх для визначення температури всередині теплової камери двигуна. Використання інтегральної оцінки температури нагрівача з ВВКМ, яка ґрунтується на зміні опору нагрівача із зростанням температури і фактично полягає у вимірюванні сили електричного струму, що протікає через нагрівач, вимагає забезпечення точних значень електричного опору самого нагрівача та електричного опору в місті контакту струмопідводу з нагрівачем.

Особливістю конструкції нагрівача є необхідність підводу електричного струму до двох ламелей резистивного елемента нагрівача з ВВКМ, які знаходяться з однієї сторони нагрівача. Для зварки стиків між титановим дротом та резистивним елементом нагрівача застосувалась зварка TIG поверхневою дугою в середовищі аргону, який подавався між місцем зварювання та не витратним вольфрамовим електродом.

Проведені лабораторні випробування виявили, що роз'ємні з'єднання титанового дроту з резистивним елементом нагрівача з ВВКМ та розбірні з'єднання (болтові,

вінтові, клинові) по різних причинах не можуть забезпечити вимоги по стабільності контактної опору. З нерозбірних з'єднань тільки зварювальні з'єднання показали стабільні показники електричного контактної опору.

Електричний опір нагрівача зі струмопідводом має складати $3,8 \pm 0,2$ Ом. Значення допуску на опір визначено рядом факторів, в тому числі фізичними властивостями ВВКМ, технологією механічної обробки, способом нанесення захисного покриття, опором зварювального з'єднання та інше.

При механічних випробуваннях зварювального з'єднання титанового дроту з нагрівачем було встановлено, що відрив дроту від нагрівача відбувається з залишками ВВКМ і перехідного шару карбіду титану, що утворюється при зварюванні і може впливати на додатковий електричний опір нагрівача. Теплового деформування нагрівача з ВВКМ у зоні зварювання не відбувається.

Результати проведених досліджень доводять, що встановлення титанових струмопідводів методом зварювання збільшує значення опору резистивного елемента нагрівача з ВВКМ за рахунок хімічної реакції між сплавом титана та резистивним елементом і появи додаткового шару карбіду титану. Таким чином, електричний опір резистивного елемента нагрівача з ВВКМ при його виготовленні, до приварки двох титанових дротів струмопідведення, має бути зменшений з врахуванням перехідного електричного опору двох зварювальних контактів.

Ключові слова: струмопідвід, нагрівач, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, перехідний опір, титановий дріт.

Гурин І.В. к.техн.н., Невлюдов І.Ш. д.техн.н., професор,
Овчаренко В.Е. д.техн.н., професор, Токарева Е.В. к.техн.н., професор

ТОКОПОДВОД ДЛЯ РЕЗИСТИВНИХ УУКМ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

В данній статті обосновується необхідність урахування перехідного електричного опору контактної опору між титановим токопідводом і резистивним елементом нагрівача з УУКМ при його виготовленні.

Углерод-углеродний композиційний матеріал має унікальний набір технічних характеристик, які дозволяють використовувати його як конструктивний матеріал для створення резистивних нагрівачів, що працюють в діапазоні температур від 400°C до 2500°C в вакуумі або захисній атмосфері. Використання УУКМ в теплових камерах електротермічних двигачів для перетворення електричної енергії в теплову дозволяє використовувати їх для вимірювання температури всередині теплової камери двигача. Використання інтегральної оцінки температури нагрівача з УУКМ, заснованої на зміні опору нагрівача з підвищенням температури і фактично заключається в вимірюванні сили електричного струму, що протікає через нагрівач, вимагає забезпечення точних значень електричного опору самого нагрівача і електричного опору в місці контакту токопідвода з нагрівачем.

Особливістю конструкції нагрівача є необхідність підведення електричного струму до двох ламелей резистивного елемента нагрівача з УУКМ, які розташовані з однієї сторони нагрівача. Для зварки з'єднань між титановим

проводом и резистивным элементом нагревателя использовалась сварка TIG (Tungsten Inert Gas) с поверхностной дугой в среде аргона, который подавался между местом сварки и нерасходным вольфрамовым электродом.

Результаты лабораторных испытаний показали, что разъемные соединения титанового провода с резистивным элементом нагревателя из УУКМ и разборные соединения (болтовые, винтовые, клиновые) по разным причинам не могут обеспечить требования к стабильности контактного сопротивления. Из неразборных соединений только сварные соединения продемонстрировали стабильные показатели электрического контактного сопротивления.

Электрическое сопротивление нагревателя с токоподводом должно составлять $3,8 \pm 0,2$ Ом. Значение допуска на сопротивление определено рядом факторов, в том числе физическими свойствами УУКМ, технологией механической обработки, способом нанесения защитного покрытия, сопротивлением сварного соединения и другими.

При механических испытаниях сварного соединения титанового провода с нагревателем было установлено, что отрыв провода от нагревателя происходит с остатками УУКМ и переходного слоя титанового карбида, который образуется при сварке и может влиять на дополнительное электрическое сопротивление нагревателя. Теплового деформирования нагревателя из УУКМ в зоне сварки не происходит.

Результаты проведенных исследований подтверждают, что установка титановых токоподводов методом сварки увеличивает значение сопротивления резистивного элемента нагревателя из УУКМ за счет химической реакции между титановым сплавом и резистивным элементом и появления дополнительного слоя карбида титана. Таким образом, электрическое сопротивление резистивного элемента нагревателя из УУКМ при его изготовлении, до сварки двух титановых проводов для токоподвода, должно быть уменьшено с учетом переходного электрического сопротивления двух сварных контактов.

Ключевые слова: токоподвод, нагреватель, углерод-углеродный композиционный материал, переходное сопротивление, титановый провод.

Hurin I., Nevlyudov I, Ovcharenko V., Tokarieva O.

CURRENT LEADS FOR RESISTIVE CCCM HEATERS

The article justifies the necessity of taking into account the transient electrical resistance of the welding contact between the titanium current lead and the resistive element of the heater made of carbon-carbon composite material (CCCM) during its manufacturing.

Carbon-carbon composite material possesses a unique set of technical characteristics that make it suitable as a structural material for manufacturing resistive heaters operating in the temperature range from 400°C to 2500°C in a vacuum or protective atmosphere. The use of CCCM heaters in the thermal chambers of electrothermal engines to convert electrical energy into thermal energy allows them to be employed for temperature measurement inside the engine's thermal chamber. The utilization of an integrated temperature assessment of the CCCM heater, which relies on the resistance change of the heater with increasing temperature and essentially involves measuring the electrical current passing through the heater, requires ensuring accurate values of both the electrical resistance of the heater itself and the electrical resistance at the point of contact with the current lead.

The design of the heater has a particular feature, which is the need to supply electrical current to two lamellas of the resistive element of the CCCM heater, located on one side of the heater. For welding the joints between the titanium wire and the resistive element of the heater, TIG welding with a surface arc in an argon environment was applied, with argon being supplied between the welding point and the non-consumable tungsten electrode.

Laboratory tests revealed that detachable connections of the titanium wire to the resistive element of the CCCM heater and separable connections (such as bolts, screws, and wedges) cannot meet the requirements for contact resistance stability for various reasons. Among non-detachable connections, only welded joints demonstrated stable electrical contact resistance characteristics.

The electrical resistance of the heater with current leads should be 3.8 ± 0.2 Ohms. The tolerance value for resistance is determined by several factors, including the physical properties of CCCM, the technology of mechanical processing, the method of applying protective coatings, the resistance of the welding joint, and others.

During mechanical tests of the welding joint between the titanium wire and the heater, it was observed that the wire detachment from the heater occurs with residues of CCCM and a transitional layer of titanium carbide, which forms during welding and can contribute to additional electrical resistance of the heater. Thermal deformation of the CCCM heater in the welding zone does not occur.

The results of the conducted research demonstrate that the installation of titanium current leads by welding increases the resistance value of the resistive element of the CCCM heater due to the chemical reaction between the titanium alloy and the resistive element, leading to the formation of an additional layer of titanium carbide. Therefore, the electrical resistance of the resistive element of the CCCM heater during its manufacturing, before welding two titanium wires for current leads, should be reduced, taking into account the transitional electrical resistance of the two welding contacts.

Keywords: current leads, heater, carbon-carbon composite material, transitional resistance, titanium wire.