

Анализ погрешности измерения температуры образцов высокотемпературной керамики при различных способах заделки термопар

© В.Д. Никонова, З.Н. Юлдашев, О.В. Денисов, Л.В. Денисова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведена оценка методических погрешностей измерения температуры нитридной керамики при одностороннем нагреве высокоинтенсивным тепловым потоком. Математическое моделирование тепловых процессов в системе датчик температуры — образец выполнено с помощью программы Siemens PLM NX. Исследованы различные способы заделки платиновых термопар диаметром 0,1 мм на поверхности и внутри образцов. Рассмотрены закономерности влияния размера горячего спая, наличия термоцемента, формы пазов для закрепления термопар на методическую погрешность измерения температуры. Выявлены значительные погрешности при установке термопар на поверхность образца без нарушения его целостности. Даны рекомендации по установке термопар. Результаты работы могут быть полезны при подготовке экспериментальных образцов для тепловых испытаний на стендах радиационного нагрева.

Ключевые слова: нитридная керамика, измерение температуры, методические погрешности, термопары, тепловые испытания

Введение. В ракетно-космической технике широко применяются теплонагруженные конструкции, защищающие аппараты от воздействия высокотемпературного воздушного потока. Поэтому возникает потребность в новых материалах, которые способны работать при экстремальных тепловых и силовых нагрузках [1–3]. В последние десятилетия находят применение керамические материалы — ситаллы, высокоглиноземистая и кварцевая керамика.

В настоящее время в мире интенсивно ведутся работы по созданию конструкционной высокотемпературной бескислородной керамики на основе боридов циркония и гафния, нитрида кремния [4–6]. Эти материалы способны длительно работать в окислительной среде при температурах до 2000 °С, имеют небольшую плотность и высокие прочностные свойства при повышенных температурах. Благодаря высоким радиотехническим характеристикам нитрид кремния перспективен для изготовления обтекателей ракет различных классов, работающих на скоростях более 12 М и при нагрузках до 10 т.

При создании теплонагруженных конструкций невозможно переоценить роль тепловых испытаний. Они служат для определения теплофизических характеристик материала и проверки работоспособности конструкции. В процессе испытаний температура контролируется

термоэлектрическими преобразователями (термопарами), закрепленными внутри и на поверхности экспериментальных образцов [7, 8].

При измерении температуры неизбежно возникает методическая погрешность, вызванная искажением температурного поля в месте установки датчика из-за неидеального теплового контакта с образцом, различия теплофизических свойств материала и термопары, наличия термоклея. Погрешность измерения температуры может существенно снизить точность определения теплофизических характеристик материала образца или исказить результаты контрольных испытаний целого изделия [9].

К настоящему времени апробирована методика тепловых испытаний кварцевой керамики при интенсивном радиационном нагреве до 1500 К с помощью вольфрамовых галогенных ламп. Методика предусматривает измерение температуры образцов с помощью термопар типа ХА диаметром 0,2 мм, сваренных встык (без королька) [10, 11]. запатентован способ крепления термопары к керамической поверхности путем нанесения тонкого слоя термостойкого клея в область горячего спая термопары.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан стенд радиационного нагрева, который позволяет увеличить рабочую температуру до 2000 К за счет активного охлаждения галогенных ламп потоком сжатого воздуха [12].

Однако методика измерений температуры образцов нитридной керамики с нарушением и без нарушения их целостности еще недостаточно отработана. Это связано с тем, что из-за сравнительно высокого коэффициента теплопроводности Si_3N_4 (на порядок выше, чем у кварцевой керамики) еще не выявлены закономерности тепловых процессов в системе датчик температуры — образец при одностороннем высокоинтенсивном нагреве. Не совсем понятно, при каком способе установки термопар на поверхности образцов и изделий будут наименьшие методические погрешности измерения температуры. Задача усложняется тем, что при измерении температуры до 2000 К необходимо использовать дорогостоящие платинородиевые термопары диаметром 0,1 мм. По этой причине схемы заделки термопар типа ХА, которые были ранее отработаны для кварцевой керамики, нуждаются в корректировке.

Цель работы — повышение точности измерения температуры на поверхности внутри образцов высокотемпературной керамики за счет обоснования рационального способа установки термопар на основе математического моделирования.

Постановка задачи. Образец высокотемпературной керамики Si_3N_4 состоит из шести брусков размером $7 \times 7 \times 70$ мм (рис. 1). Фронтальная поверхность образца подвергается нестационарному одно-

стороннему нагреву равномерным потоком теплового излучения плотностью $q_w(\tau)$. Тыльная поверхность образца теплоизолирована материалом ТЗМК-10, который контактирует с охлаждаемой до 20 °С медной пластиной. Материал образца однороден, изотропен, теплофизические свойства зависят от температуры. Для увеличения эффективности радиационного нагрева фронтальная поверхность образца покрыта тонким слоем оксида хрома с известными оптическими свойствами [7]. Термопары размещены на фронтальной поверхности образца и в глубине на расстоянии 2,2 мм, 4,4 мм и 6,4 мм. Термопары зафиксированы с помощью термоцемента, все контакты идеальные.

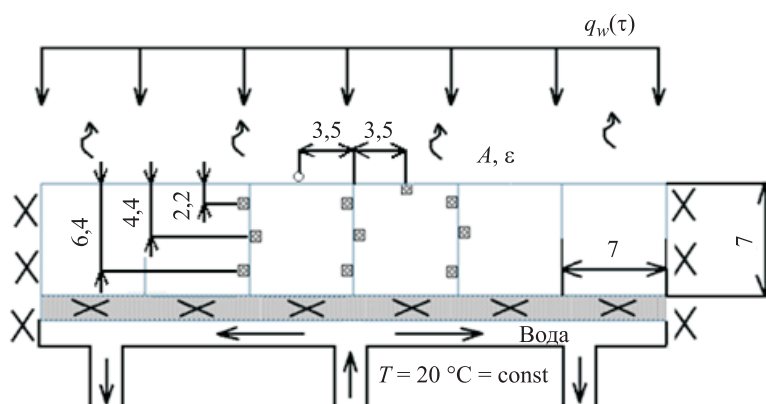


Рис. 1. Схема рабочей зоны образца для тепловых испытаний

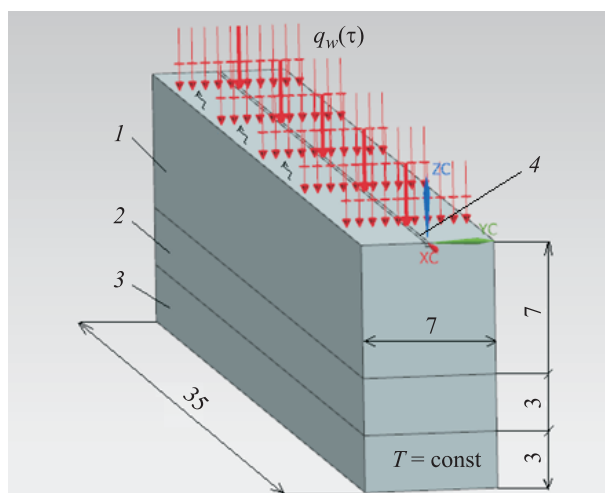


Рис. 2. 3D-модель с термопарой на фронтальной поверхности образца высокотемпературной керамики:

1 — образец Si_3N_4 ; 2 — теплоизоляция ТЗМК-10;
3 — медная пластина; 4 — термопара

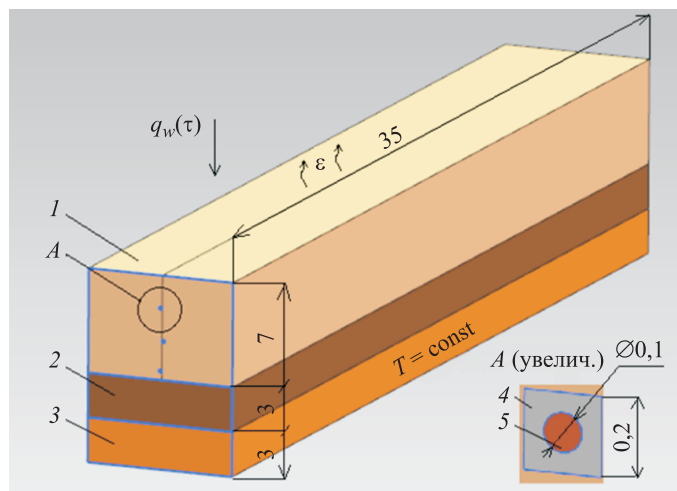


Рис. 3. 3D-модель с термопарами внутри образца высокотемпературной керамики:

1 — образец Si_3N_4 ; 2 — теплоизоляция ТЗМК-10; 3 — медная пластина;
4 — термоцемент; 5 — термопара

Задача решалась с помощью программы Siemens PLM NX. В силу симметрии расчетная модель представляла собой один или два бруска длиной 35 мм (рис. 2, 3).

Для расчета был смоделирован нестационарный нагрев галогенными инфракрасными лампами в течение 200 с. Зависимость плотности теплового потока от времени приведена ниже:

| | | | | |
|--|---|-----|----|-----|
| τ , с | 0 | 15 | 30 | 200 |
| $q_w(\tau)$, Вт/см ² | 0 | 200 | 70 | 100 |

Заделка термопар на поверхности образца. Были рассмотрены следующие варианты закрепления термопары диаметром 0,1 мм на наружной поверхности образца (рис. 4):

1 — термопара сварена встык и закреплена на поверхности с помощью толстого слоя термоцемента, ширина которого составляет 1 мм, высота — 0,5 мм;

2 — термопара закреплена с помощью тонкого слоя термоцемента шириной 0,2 мм на расстоянии 5 мм в обе стороны от спая, далее — толстый слой термоцемента, аналогичный варианту 1;

3 — термопара установлена в паз размером 0,2×0,2 мм и закрыта сверху дополнительным слоем термоцемента высотой 0,2 мм и шириной 0,7 мм;

4 — то же, что в варианте 3, но термопара не покрыта дополнительным слоем термоцемента.

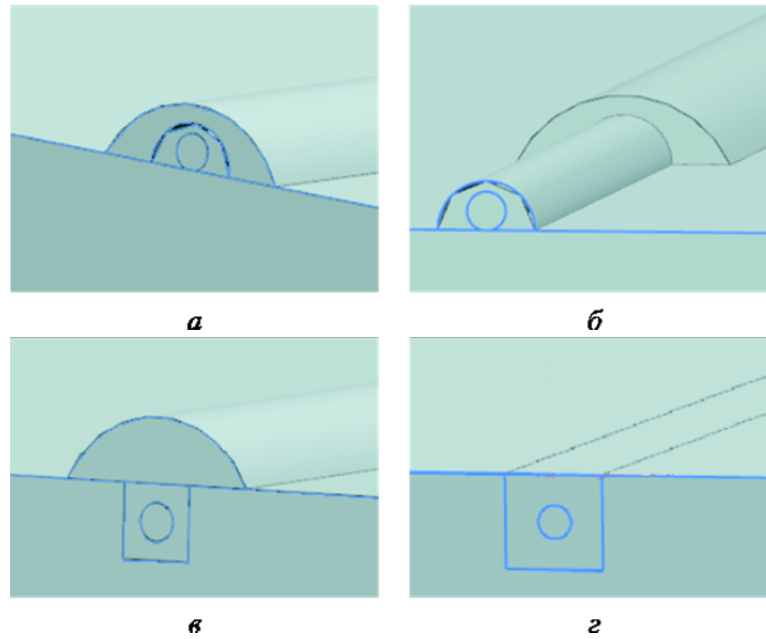


Рис. 4. Расчетные варианты размещения термопар на поверхности образца:
а, б — без нарушения целостности образца, варианты 1, 2;
в, г — в прямоугольном пазе, варианты 3, 4

В результате математического моделирования установлено, что при заделке термопары без нарушения целостности образца существенно снижается точность измерения температуры. Например, в зависимости от толщины нанесенного на горячий спай термопары слоя термоцемента погрешность может составлять 130...150 °С (рис. 5, *а, б*).

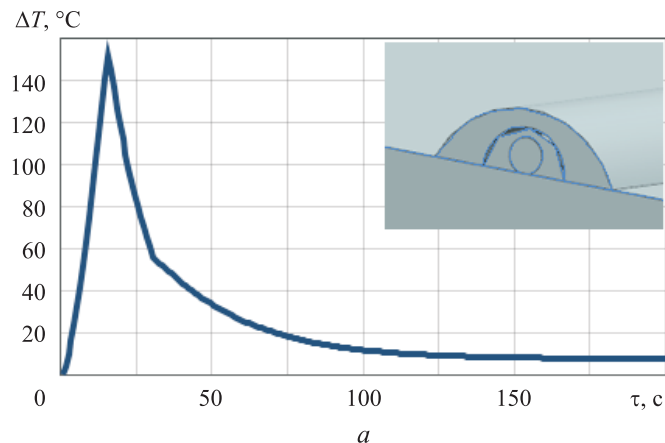


Рис. 5 (начало). Изменение методической погрешности измерения температуры при заделке термопары без нарушения целостности образца:
а — вариант 1

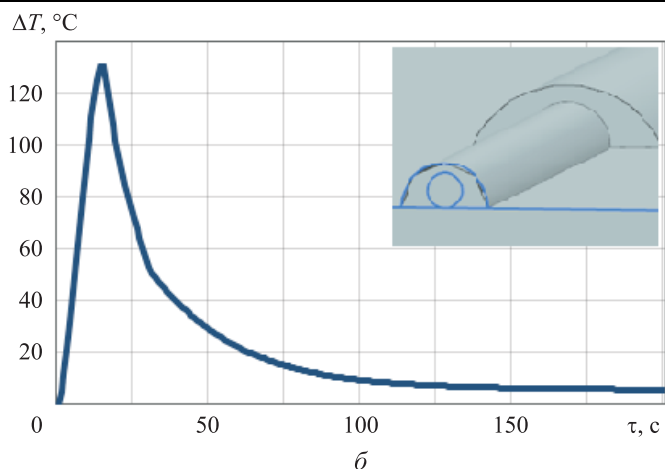


Рис. 5 (окончание). Изменение методической погрешности измерения температуры при заделке термопары без нарушения целостности образца:
 δ — вариант 2

Похожая тенденция наблюдается и при заделке термопары в прямоугольный паз. Дополнительный слой термоцемента приводит к методической погрешности измерения температуры порядка 100 °С (рис. 6, *а*). Во всех случаях погрешность возрастает до своих максимальных значений в течение 20...25 с нагрева, а затем плавно убывает до 3...5 °С.

При нарушении целостности образца и заделке термопары в прямоугольный паз шириной 0,2 мм без дополнительного слоя термоцемента точность измерения температуры существенно повышается. Если термопара находится в центре паза, то погрешность не превышает 2 °С (рис. 6, *б*).

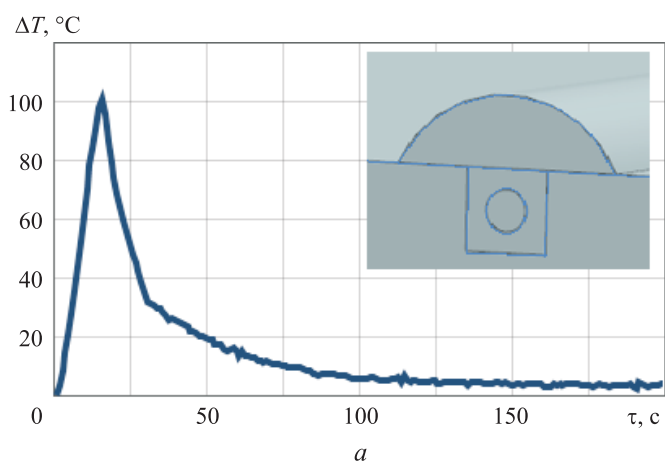


Рис. 6 (начало). Изменение методической погрешности измерения температуры при заделке термопары в прямоугольный паз:
 a — вариант 3

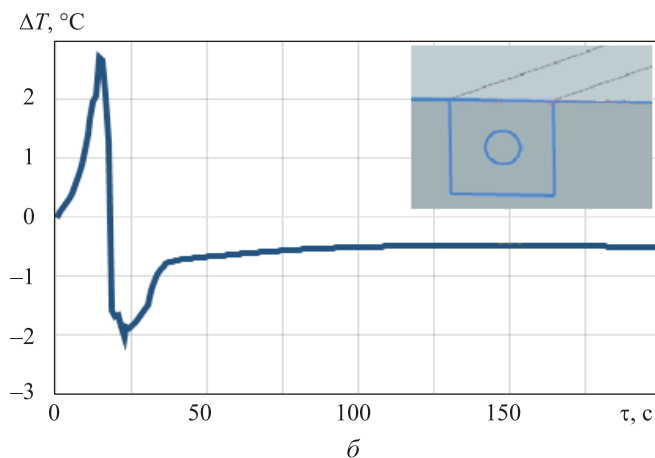


Рис. 6 (окончание). Изменение методической погрешности измерения температуры при заделке термопары в прямоугольный паз:
б — вариант 4

Заделка термопар внутри образца. При измерении температуры внутри образца термопары должны быть размещены в пазах брусков, плотно прижатых друг к другу (см. рис. 1). Возможности режущего инструмента позволяют сделать паз шириной не менее 0,2 мм. Поэтому термопара диаметром 0,1 мм, сваренная встык без королька, в прямоугольном пазе будет либо полностью окружена термоцементом, либо касаться исследуемого образца.

При расположении термопары в центре паза методическая погрешность не превышает 1,8 °С. Погрешность возрастает в течение 20...30 с после начала эксперимента, а затем плавно убывает (рис. 7).

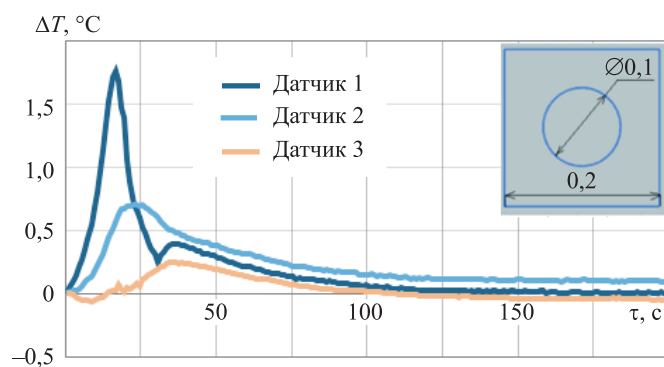


Рис. 7. Изменение методической погрешности измерения температуры при размещении термопары в центре прямоугольного паза

Если термопара располагается в углу прямоугольного паза и касается образца в двух точках, максимальная погрешность возрастает до 9,3 °С (рис. 8).

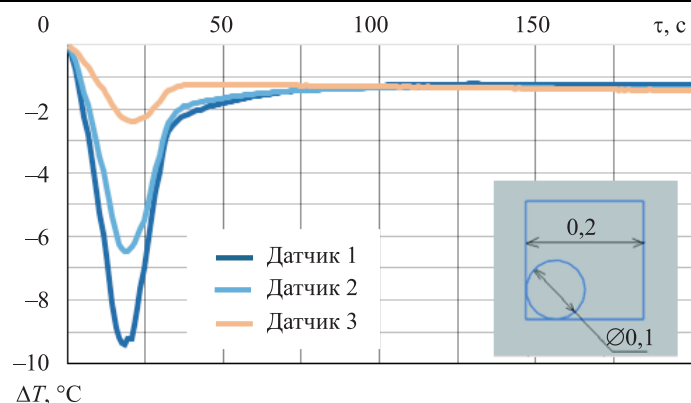


Рис. 8. Изменение методической погрешности измерения температуры при касании термопары и образца в двух точках

Таким образом, наиболее предпочтительна заделка термопары в центре прямоугольного паза. Однако техническая реализация такой схемы затруднена из-за малых размеров датчика и паза. Для того чтобы более определенно знать положение термопары в образце, можно установить ее в углу V-образного паза со стороной 0,3 мм. При таком способе закрепления погрешность не превысит 2 °С (рис. 9).

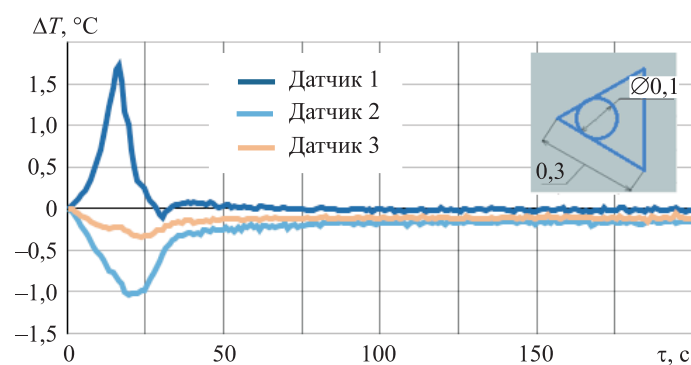


Рис. 9. Изменение методической погрешности измерения температуры при размещении термопары в V-образном пазе стороной 0,3 мм

При изготовлении термопары горячий спай может представлять собой королек, размер которого превышает диаметр термоэлектрода. На рис. 10 представлены результаты расчета для термопары с диаметром королька 0,19 мм, расположенной в центре прямоугольного паза шириной 0,2 мм. В данном случае погрешность достигает 17,1 °С для первого датчика, 16,5 °С — для второго датчика и 15,3 °С — для третьего в первые 30 с эксперимента. Как и следовало ожидать, из-за тепловой инерции термопары показывают заниженную температуру.

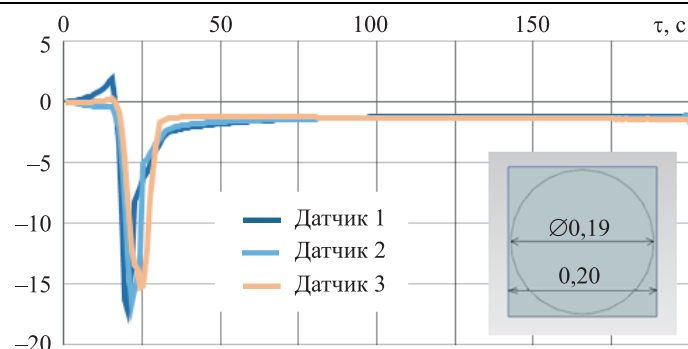


Рис. 10. Изменение методической погрешности измерения температуры для термопары с корольком

Заключение. Для повышения точности измерения температуры образцов высокотемпературной керамики необходимо использовать платинородиевые термопары диаметром 0,1 мм, сваренные встык. Максимальные уровни погрешностей возникают через 20...25 с нагрева и уменьшаются с течением времени. Для всех рассмотренных вариантов крепления термопар коэффициент теплопроводности термоцемента слабо влияет на погрешность измерения температуры.

Результаты математического моделирования показали, что при установке термопары на поверхность образца без нарушения его целостности могут возникать большие погрешности измерения температуры. Например, в зависимости от толщины нанесенного на горячий спай термопары слоя термоцемента погрешность составляет 130...160 °С. При нарушении целостности образца и заделке термопары в центр прямоугольного паза размером 0,2×0,2 мм существенное снижение погрешностей до 2...3 °С наблюдается при отсутствии дополнительного слоя термоцемента.

Для уменьшения методической погрешности измерения температуры внутри образцов рекомендуется размещать термопары в центре прямоугольного паза или в углу V-образного паза. Методическая погрешность в этом случае не превышает 2 °С.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Суздальцев Е.И. Керамические радиопрозрачные материалы: вчера, сегодня, завтра. *Новые огнеупоры*, 2014, № 10, с. 130–133.
- [2] Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 8, с. 81–88.
- [3] Полежаев Ю.В., Резник С.В., Василевский Э.Б. *Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее. В 3 т. Т. 1: Прогнозирование и анализ экстремальных воздействий*. С.В. Резник, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 224 с.
- [4] Чевыкалова Л.А., Келина И.Ю., Михальчик И.Л., Аракчеев А.В., Плясункова Л.А., Касимовский А.А., Матюшин К.С. Получение ультравысоко-

- температурного керамического материала на основе диборида циркония методом SPS. *Новые огнеупоры*, 2013, № 11, с. 31–38.
- [5] Sorokin O.Y., Solntsev S.S., Evdokimov S.A. Ceramic composite materials with high oxidation resistance for advanced aircraft (review). *Electronic journal "Proceedings of VIAM"*, 2014, no. 6. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8
- [6] Ivakhnenko Y.A., Varrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature radio-transparent ceramic composite materials for antenna fairings and other aircraft products (review). *Electronic journal "Proceedings of VIAM"*, 2016, no. 5. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-5-5
- [7] Резник С.В., Русин М.Ю., Шуляковский А.В. *Средства диагностики обтекателей ракет из неметаллических материалов при стендовых тепловых испытаниях*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 37 с.
- [8] Ярышев Н.А. *Теоретические основы измерения нестационарной температуры*. Ленинград, Энергоатомиздат, 1990, 256 с.
- [9] Alifanov O.M., Jarny Y., Prosuntsov P.V., Ivanov G.A. Complex identification of thermophysical properties of anisotropic composite material. *Proceedings of the 5th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, Cambridge, UK, 11–15th July 2005*. URL: https://www.researchgate.net/publication/228427535_Complex_identification_of_thermophysical_properties_of_anisotropic_composite_material (дата обращения 05.11.2021).
- [10] Анучин С.А., Ланин А.В., Просунцов П.В., Кордо М.Н., Забежайлов М.О., Русин М.Ю. Влияние способа заделки поверхностных термопар на погрешность определения температуры при испытаниях керамических материалов на установках радиационного нагрева. *Инженерно-физический журнал*, 2018, т. 91, № 3, с. 628–636.
- [11] Резник С.В., Забежайлов М.О., Анучин С.А., Сотников М.О., Афонин К.В. Высокоэффективные поглощающие покрытия для теплофизических исследований на установках радиационного нагрева. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2012, № 3, с. 120–131.
- [12] Baldzhiev R., Prosuntsov P. Modeling Combined Heat Transfer in the Operating Area of the High Power Heating Test Facility. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2017, vol. 110, p. 01009. DOI: 10.1051/mateconf/201711001009

Статья поступила в редакцию 25.11.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Никонова В.Д., Юлдашев З.Н., Денисов О.В., Денисова Л.В. Анализ погрешности измерения температуры образцов высокотемпературной керамики при различных способах заделки термопар. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2141>

Никонова Виктория Дмитриевна — студентка 1-го курса магистратуры кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: vichka.nikonova@bk.ru

Юлдашев Забехулло Нуриллович — студент 1-го курса магистратуры кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: student_yuldashev@mail.ru

Денисов Олег Валерьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: тепловое проектирование, производство и испытания объектов ракетно-космической техники из конструкционных материалов.

e-mail: denisov.sm13@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7320-0201>

AuthorID: 176625, eLIBRARY SPIN-код: 6884-6227

Денисова Лилиана Валентиновна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: разработка конструкций из металлокомпозитов.

e-mail: u.pasika@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4748-5351>

eLIBRARY SPIN-код: 3508-7617

Analysis of temperature measuring error in high-temperature ceramic samples with various methods of thermocouple fixing

V.D. Nikonova, Z.N. Yuldashev, O.V. Denisov, L.V. Denisova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The evaluation of methodological errors in measuring the temperature of nitride ceramics under unilateral heating by high-intensity heat flow was carried out. Simulation of thermal processes in the temperature sensor — sample system was performed using the Siemens PLMNX program. Various methods of fixing platinum-rhodium thermocouples with a diameter of 0.1 mm on the surface and inside the samples have been investigated. The regularities of the influence of the size of the hot junction, the presence of thermal cement, the shape of the grooves for fixing thermocouples on the methodological error of temperature measurement were investigated. Significant errors were revealed when installing thermocouples on the surface of the sample without violating its integrity. Recommendations for the installation of thermocouples were given. The results of the paper can be useful in the preparation of experimental samples for thermal tests on radiation heating stands.

Keywords: nitride ceramics, temperature measuring, methodological errors, thermocouples, thermal tests

REFERENCES

- [1] Suzdaltsev E.I. Ceramic radio-transparent materials: yesterday, today, tomorrow. *Novye Ogneupory — New Refractories*, 2014, no. 10, pp. 130–133.
- [2] Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for aerospace engineering (review). *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2018, no. 8, pp. 81–87.
- [3] Polezhaev Yu.V., Reznik S.V., Vasilevsky E.B. *Materials and coatings in extreme conditions. A look into the future. In 3 vols. Vol. 1: Forecasting and analysis of extreme impacts*. S.V. Reznik, ed. Moscow, BMSTU Press, 2002, 224 p.
- [4] Chevykalova L.A., Kelina I.Yu., Mikhailchik I.L., Arakcheev A.V., Plyasunova L.A., Kasimovsky A.A., Matyushin K.S. Preparation of ultra-high-temperature ceramic material based on zirconium diboride by the SPS method. *Novye Ogneupory — New Refractories*, 2013, no. 11, pp. 31–38.
- [5] Sorokin O.Y., Solntsev S.S., Evdokimov S.A. Ceramic composite materials with high oxidation resistance for advanced aircraft (review). *Electronic journal “Proceedings of VIAM”*, 2014, no. 6. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8
- [6] Ivakhnenko Y.A., Varrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature radio-transparent ceramic composite materials for antenna fairings and other aircraft products (review). *Electronic journal “Proceedings of VIAM”*, 2016, no. 5. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-5-5
- [7] Reznik S.V., Rusin M.Yu., Shulyakovsky A.V. *Diagnostic tools for rocket fairings made of non-metallic materials during bench thermal tests*. Moscow, BMSTU Press, 2016, 37 p.
- [8] Yaryshev N.A. *Theoretical foundations of measurement of non-stationary temperature*. Leningrad, Energoatomizdat, 1990, 256 p.
- [9] Alifanov O.M., Jarny Y., Prosuntsov P.V., Ivanov G.A. Complex identification of thermophysical properties of anisotropic composite material. *Proceedings of the 5th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory*

- and *Practice*, Cambridge, UK, 11–15th July 2005. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228427535_Complex_identification_of_thermophysical_properties_of_anisotropic_composite_material (accessed November 5, 2021).
- [10] Anuchin S.A., Lanin A.V., Prosuntsov P.V., Kordo M.N., Zabezhailov M.O., Rusin M.Yu. Influence of the method of sealing surface thermocouples on the error of temperature determination when testing ceramic materials on radiation heating installations. *Engineering Physics Journal*, 2018, vol. 91, no. 3, pp. 628–636.
- [11] Reznik S.V., Zabezhailov M.O., Anuchin S.A., Sotnikov M.O., Afonin K.V. Highly efficient absorbing coatings for thermophysical studies at radiation heating installations. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 120–131.
- [12] Baldzhiev R., Prosuntsov P. Modeling Combined Heat Transfer in the Operating Area of the High Power Heating Test Facility. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2017, vol. 110, p. 01009.
DOI: 10.1051/mateconf/201711001009

Nikonova V.D., Master Student, Department of Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vichka.nikonova@bk.ru

Yuldashev Z.N., Master Student, Department of Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: student_yuldashev@mail.ru

Denisov O.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: denisov.sm13@mail.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7320-0201>
AuthorID: 176625
eLIBRARY SPIN-code: 6884—6227

Denisova L.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: u.pasika@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4748-5351>
eLIBRARY SPIN-code: 3508-7617