

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-77-89

## ТЕРМОИНДИКАТОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

М.А. Фомина<sup>1</sup>, С.В. Сибилева<sup>1</sup>, С.А. Демин,<sup>1</sup> А.С. Васильев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** К термоиндикаторам относятся вещества, способные резко изменять цвет при определенной температуре, называемой температурой перехода. Данные материалы представляют значительный интерес для исследователей и производителей, поскольку обладают потенциалом для многих технологических применений, таких как аэрокосмическая промышленность, функциональные покрытия, военное дело, технологии печати, «умные» окна, датчики температуры и т. д. Номенклатура и разнообразие термоиндикаторных веществ постоянно расширяются, о чем свидетельствует ежегодное увеличение количества публикаций в научно-технической литературе по данной теме.

**Ключевые слова:** термоиндикаторные покрытия, термохромизм, термопигменты, термоиндикаторные краски, неорганические термохромные материалы

**Для цитирования:** Фомина М.А., Сибилева С.В., Демин С.А., Васильев А.С. Термоиндикаторные материалы и их применение // Труды ВИАМ. 2024. № 8 (138). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-77-89.

Scientific article

## THERMAL INDICATOR MATERIALS AND THEIR APPLICATION

M.A. Fomina<sup>1</sup>, S.V. Sibileva<sup>1</sup>, S.A. Demin<sup>1</sup>, A.S. Vasiliev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Thermal indicators include substances that have the ability to sharply change their color at a certain temperature, called the transition temperature. These materials are of significant interest to researchers and manufacturers as they have potential for many technological applications such as aerospace, functional coatings, military applications, printing technologies, «smart» windows, temperature sensors, etc. The nomenclature and variety of thermal indicator substances are constantly evolving, as evidenced by the annual increase in scientific and technical literature publications on this topic.

**Keywords:** thermal indicator coatings, thermochromism, thermal pigments, thermal indicator paints, inorganic thermochromic materials

**For citation:** Fomina M.A., Sibileva S.V., Demin S.A., Vasiliev A.S. Thermal indicator materials and their application. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-77-89.

### Введение

В процессе эксплуатации деталей и узлов машин необходимо контролировать температуру поверхности, чтобы избежать перегревов. Превышение эксплуатационной температуры приводит к снижению прочности конструкционных материалов, в частности высокопрочных алюминиевых сплавов, сталей. В процессе длительного воздействия высоких температур наблюдается диффузия легирующих элементов к поверхности деталей из нержавеющей сталей, что приводит к изменению химического состава и снижению коррозионной стойкости.

Термоэлектрические термометры и термометры сопротивления непригодны для измерения температуры поверхности деталей внутри сложных агрегатов, что объясняется технологическими трудностями [1–3].

Одним из методов измерения температуры деталей является нанесение на поверхность термоиндикаторных веществ [4–7], которые нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и повседневной жизни. В повседневной жизни термоиндикаторы применяются для различных дизайнерских решений – реклама, украшения, ювелирные изделия, ткани, одежда [8–10]. Термоиндикаторная бумага на основе этих соединений широко используется для лазерных принтеров. В медицине их применяют в качестве предупреждающих индикаторов, фармакологических тестов для выявления наркотических веществ, подкожных раковых образований и диагностики сосудистых заболеваний [11]. В машиностроении термоиндикаторные покрытия применяют на предприятиях авиационной и смежных отраслей, при конструировании различного оборудования, такого как микроволновые печи, двигатели внутреннего сгорания, турбины, а также в аэрокосмических и других инженерных исследованиях [12, 13]. В авиационной промышленности такие покрытия можно использовать для определения неисправностей бортовой техники, а также перегрева узлов и деталей самолета, в частности турбин и тормозной системы шасси, подвергающихся значительным нагрузкам при эксплуатации.

Термоиндикаторы – это сложные вещества, которые при достижении определенной температуры изменяют цвет за счет химического взаимодействия компонентов [14–16]. Такие изменения могут происходить быстро или медленно, обратимо или необратимо. Цвет и температура перехода зависят от природы химических превращений термоиндикаторов [17]. Подбор термоиндикаторов проводится в соответствии с материалом подложки, целью и условиями эксплуатации. Термоиндикаторы классифицируют по химическому составу (неорганические, органические, органо-неорганические гибридные и полимерные), количеству цветовых переходов (одно- и многопозиционные), обратимости (необратимые и обратимые) и принципу действия [18, 19]. К обратимым относятся термоиндикаторы, которые, изменяя цвет при нагревании до температуры перехода или выше, восстанавливают первоначальную окраску при охлаждении до исходной температуры [20–22]. В необратимых термоиндикаторах при нагревании происходят необратимые процессы (химические или физические), в результате первоначальный цвет после охлаждения не восстанавливается [23–26].

По принципу действия наиболее обширную группу составляют химические термоиндикаторы, цвет которых изменяется за счет того или иного химического воздействия компонентов [27–29]. Температура перехода, скорость и обратимость изменения цвета зависят от химического состава термоиндикаторов и могут значительно изменяться при диспергировании с другими веществами [30, 31]. Для неорганических веществ термохромный переход чаще всего обусловлен изменением кристаллической структуры [32–34].

### Неорганические термоиндикаторные материалы

Неорганические термоиндикаторные материалы зачастую изготавливают на основе координационных соединений переходных металлов [14].

Принцип действия неорганических термохромных материалов основан на температурных характеристиках кристаллической решетки, распределении электронов или заряда. При нагревании структура материала преобразуется, вызывая изменение характеристик поглощения или рассеяния света, что приводит к появлению другого цвета.

Термохромизм координационных соединений, например двойных солей ртути, серебра, кобальта, никеля, ванадия, вольфрама и меди, возникает в результате термически индуцированных изменений кристаллической решетки, расположения лигандов, количества лигандов или молекул растворителя из координационной сферы (добавление, разложение или удаление низкокипящих компонентов) [16]. Например, при нагревании в присутствии хлоридов аквакомплекс меди (II) с плоскостной квадратной структурой преобразуется в анион тетрахлорида меди (II) с тетраэдрической структурой. В результате обеспечивается термохромный переход, т. е. изменение цвета с синего на зеленый (рис. 1).



Рис. 1. Изменение цвета аквакомплекса меди (II) вследствие преобразования структуры и расположения лигандов

Наиболее известным примером термохромизма среди неорганических материалов является фазовый переход красного йодида ртути  $\text{HgI}_2$ . Он становится желтым при температуре  $12\text{ }^\circ\text{C}$ , переходя в ромбическую модификацию. Эти цвета обусловлены сильной полосой поглощения в ультрафиолетовой области. Подобные изменения наблюдаются также в некоторых двойных солях йодида ртути  $\text{HgI}_2$  и при более высоких температурах, например термочувствительный пигмент  $\text{Ag}_2[\text{HgI}_4]$  изменяет окраску с желтой на темно-красную при температуре  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , а  $\text{Cu}_2[\text{HgI}_4]$  – с карминово-красной на коричневую при температуре  $65\text{ }^\circ\text{C}$ . Изменение окраски координационных соединений связано с перестройкой кристаллической структуры. Недостатком данных термохромных материалов является наличие токсичных соединений ртути [17].

В патенте РФ 2561737 описан неорганический обратимый термоиндикатор на основе комплексного соединения – гидрата гекса(изотиоцианато)хромата (III) калия  $\text{K}_3[\text{Cr}(\text{NCS})_6]$ , который характеризуется обратимым изменением окраски с сиреневой на темно-зеленую при нагревании до температуры  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Авторы патента отмечают доступность компонентов и простоту синтеза термохромного вещества [35].

Термохромным переходом обладают соединения кобальта. В частности, растворы хлорида кобальта  $\text{CoCl}_2$  в воде или в некоторых спиртах (н-пропанол, бутанол и др.) являются термохромными. Октаэдрически скоординированные слабыми связями комплексы розового цвета при нагревании до температуры  $100\text{ }^\circ\text{C}$  и более превращаются в тетраэдрически координированные комплексы синего цвета с возможностью обратимости термохромного эффекта. Установлено, что в водном растворе помимо октаэдрических

комплексов  $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  присутствуют тетраэдрические комплексы  $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$ . Показано, что изменение цвета становится более выраженным при дальнейшем нагревании до температуры 200 °С [18].

Описано применение соединений ванадия для создания материалов, обладающих высокой отражательной способностью и регулирующих поток солнечного тепла, автоматически реагируя на температуру, которые можно использовать, например, в производстве «умных» окон [13]. Для достижения данного эффекта тонкую пленку оксида ванадия ( $\text{VO}_2$ ) наносили на подложку из диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ). Коэффициент пропускания оксида ванадия относительно высок и постоянен в видимом диапазоне излучения до тех пор, пока не нагреется до температуры, превышающей температуру перехода. При температуре 68 °С оксид ванадия с наклонной восьмигранной кристаллической решеткой с атомами ванадия в центре претерпевает фазовый переход в тетрагональную рутиловую структуру, при которой пропускание в инфракрасной области значительно снижается, что позволяет получить энергоэффективное покрытие с высокой отражательной способностью [13, 19].

Аналогичного эффекта можно добиться, применяя в качестве пигментов титанат бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) или лития ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ). В результате нагрева солнечными лучами изменяется светопропускание пленки и тем самым регулируется температура и освещенность [20].

Термоиндикаторный пигмент с более высокой температурой перехода (>400 °С) описан в источнике [21]. Смесь диоксида марганца, дигидрофосфата аммония и фосфорной кислоты наносится на белый цементный материал для предотвращения повреждения при высокой температуре в печи. Цвет пигмента меняется с темно-фиолетового на серовато-желтый/зеленый из-за испарения воды и выделения аммиака.

Неорганические термохромные материалы обладают функциональным диапазоном температур от 70 до 800 °С, что наряду с высокой термостойкостью, а также способностью сохранять цвет, стабильную кристаллическую структуру и механическую прочность в течение длительного времени обуславливает их потенциальное применение в различных областях: от машиностроения до повышения энергоэффективности производственных процессов.

### *Органические термоиндикаторные материалы*

Цвет термоиндикаторных материалов на органической основе может изменяться по разным причинам: преобразование кристаллической решетки, переход электронов, увеличение силы поля лигандов, изменение конформации, химическое превращение неокрашенной формы вещества в окрашенную и др.

К органическим термоиндикаторным материалам относятся лейкокрасители, которые обычно выпускают в виде трехкомпонентной системы, состоящей из красителя, проявителя и соразтворителя. Эти системы изменяют цвет, когда соразтворитель плавится, что приводит к разрушению связи между красителем и проявителем. При охлаждении системы происходит разделение фаз, поскольку растворитель затвердевает, в результате снова образуется комплекс «краситель–проявитель» [36].

В химических лабораториях используется такой индикатор, как фенолфталеин, который, помимо прочего, является термохромным. Бесцветный раствор фенолфталеина при нагревании приобретает розовую окраску. Лактонное кольцо разрывается, и депротонированная форма приобретает малиновый цвет.

В научно-технической литературе имеются сообщения о термохромных гелях, полученных при набухании конъюгированных полимеров в гелеобразующих органических растворителях. Источником термохромного эффекта таких гелей является изменение полимерной молекулярной структуры основной цепи, происходящее при переходе геля в золь [37].

В качестве обратимого термохромного вещества применяется бисспиропиран, который при комнатной температуре является бесцветным соединением. В н-пропанол при температуре 60 °С он окрашивается в красный цвет, а при температуре 70 °С – в синий. Это связано со структурным образованием мономерицианина и бисмерицианина соответственно (рис. 2).

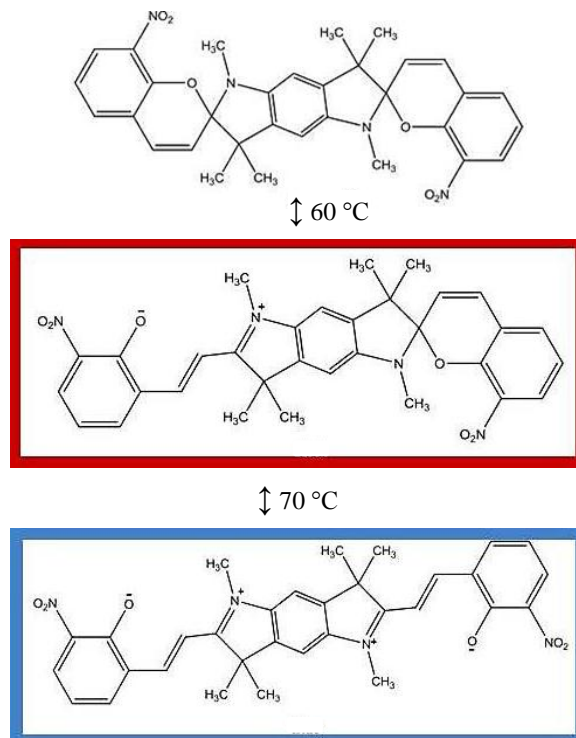


Рис. 2. Структурные изменения бисспиропирана при изменении температуры

Одним из примеров органических термоиндикаторных покрытий являются соединения полиэлектролита на основе бипиридиния, обладающего температурой термохромного перехода в диапазоне 45–105 °С. Изначально краситель и проявитель в полимерном материале разделены. При нагревании полимерный материал диссоциирует, краситель и проявитель однородно смешиваются в растворителе, что приводит к потере или появлению цвета. Полиэлектролит взаимодействует с различными донорами электронов (проявителями цвета) в присутствии воды (растворителя). Термохромная обратимость (синий цвет меняется на красный) возникает, когда полиэлектролит взаимодействует с различными донорами электронов и водой [38].

Благодаря невысоким температурам обратимости цветового перехода, низкой стоимости и небольшой токсичности органические термоиндикаторные материалы широко используются в различных областях, таких как «умная» упаковка, защитная печать, окрашивание текстиля и игрушек, маркетинг и др.

### ***Органо-неорганические гибридные термоиндикаторные материалы***

Гибридные термоиндикаторные материалы сочетают термостабильность неорганических соединений и структурную универсальность органических. Механизм термохромизма обусловлен изменением кристаллической решетки, ионной перегруппировкой функциональных групп или структурным фазовым переходом при воздействии температур. Многие термочувствительные вещества содержат органические компоненты.

В ряде работ описано применение соединений меди в качестве термоиндикаторных веществ. В частности, тетрахлоркупрат (II) бисдиэтиламония  $[(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{NH}_2]_2\text{CuCl}_4$  обладает термохромными свойствами и при температуре  $45\text{ }^\circ\text{C}$  изменяет окраску с ярко-зеленой на желтую. Изменение окраски обусловлено изомеризацией комплекса, в результате которой плоскостная квадратная структура становится тетраэдрической.

Эффект термохромного перехода отмечен в сегнетоэлектрическом соединении N, N'-диметил-1, 4-дiazониабцикло[2.2.2]октоний и  $\text{CuCl}_4$  (II), которое окрашивается в красный цвет с повышением температуры. При комнатной температуре низкоразмерная гибкая и изменяемая октаэдрическая структура твердого кристалла приобретает желтый цвет и поглощает свет с длиной волны  $<576\text{ нм}$ . Однако, как только температура достигает  $159,8\text{ }^\circ\text{C}$ , твердое вещество приобретает красный цвет, поскольку граница поглощения перемещается к длине волны  $618\text{ нм}$  [38].

Группа ученых синтезировала органо-неорганический гибрид 2-метилимидазола и  $\text{BiI}_4$ . Композиционный материал, содержащий данное соединение, обратимо меняет цвет с темно-красного на светло-оранжевый при изменении температуры с  $56,8$  до  $76,8\text{ }^\circ\text{C}$  соответственно. Такое поведение в первую очередь связано с изменением расстояния между атомами висмута и йода, которое влияет на поглощение и координацию иона  $\text{Bi}^{3+}$ . Более асимметричное взаимное расположение атомов создает более широкую полосу поглощения и, как следствие, более темную окраску данного соединения [39].

Сочетание неорганических пигментов и связующих органических соединений может применяться не только в качестве термоиндикаторных веществ, но и для нанесения антикоррозионных покрытий. Разработано термоиндикаторное антикоррозионное покрытие, содержащее слой свинцового сурика в сочетании с кремнийорганическим лаком КО-815 и визуализирующее температурный переход в интервале  $540\text{--}590\text{ }^\circ\text{C}$ . При этом цвет изменяется с красно-оранжевого на желто-лимонный. Предложенный термоиндикаторный состав обладает химической стойкостью, механической прочностью, антикоррозионными свойствами и ярким цветовым переходом [24].

Группа ученых из Китая опубликовала результаты исследования соединения 1D-гибрида йодида свинца и пиридин-4-ил-метанамина, который проявляет обратимый термохромизм: при нагревании до температуры  $150\text{ }^\circ\text{C}$  цвет изменяется с лимонно-желтого на карминово-красный [40].

Органо-неорганические гибридные термохромные материалы могут применяться для контроля технологических процессов, осуществляемых при высоких температурах, например сварочных работ. Описано применение термоиндикатора, представляющего собой таблетку диаметром  $8\text{ мм}$  и толщиной  $3\text{ мм}$ , содержащую измельченный перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ ). При нагреве до требуемой температуры начинается химическая реакция, сопровождаемая яркой вспышкой [25]:



### ***Перспективы применения термоиндикаторных материалов***

Термоиндикаторные материалы используются в качестве сигнальных средств предупреждения пожаров в электроустановках. Введение термохромных красителей в изоляцию электропроводок позволяет визуализировать развитие аварийных режимов работы. С помощью термоиндикаторных стикеров, наклеенных на корпуса трансформаторов и электродвигателей, наглядно продемонстрированы возможности данного сигнального материала (рис. 3) [26, 27].

Термохромные краски используются для контроля наличия пор в изделии. Фиксация временного интервала изменения цвета термоиндикаторной краски дает дополнительную информацию о наличии или отсутствии пор и повышает точность контроля, особенно при контроле изделий сложной формы и малых размеров. В зависимости от вида, размеров и глубины залегания, поры приводят к различному изменению теплопроводности контролируемого изделия, как следствие, временной интервал изменения цвета на дефектном изделии меньше, чем на бездефектном. Для конкретизации характера поры дополнительно применяют калибровку по эталону. При этом определяют временной интервал изменения цвета термохромной краски на эталоне. Затем с применением независимого разрушающего метода получают график для определения размера и характера пор, по соответствию с которым судят о величине и наличии пор в контролируемом изделии. Способ применен для контроля образцов сварных соединений, выполненных с помощью контактной сварки, и сварных соединений термпар, полученных методом стыковой сварки. Образцы различались размерами и конфигурацией. Предлагаемый метод повышает достоверность контроля и позволяет обнаружить поры с линейным размером 0,1 мм и глубиной залегания, превышающей линейный размер пор не менее чем в 2 раза [28, 29].

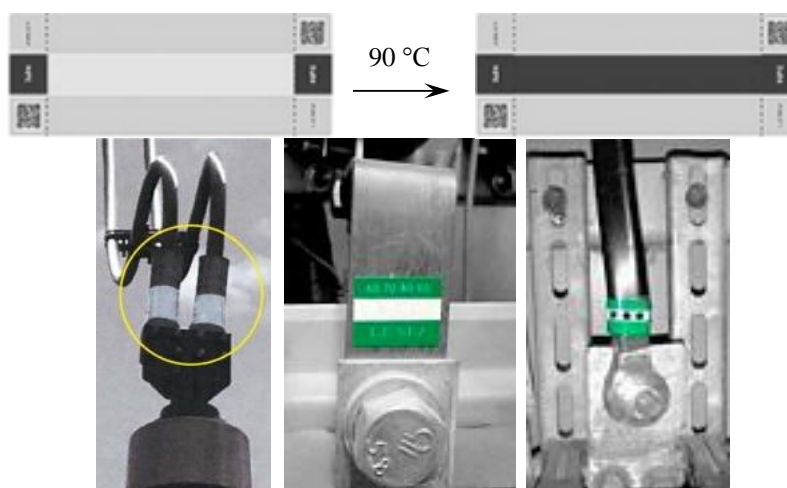


Рис. 3. Применение наклеек с термоиндикаторным покрытием для диагностики электрооборудования

Термоиндикаторные покрытия нашли широкое применение на разных предприятиях авиационной и смежных отраслей для контроля температуры деталей (рис. 4).

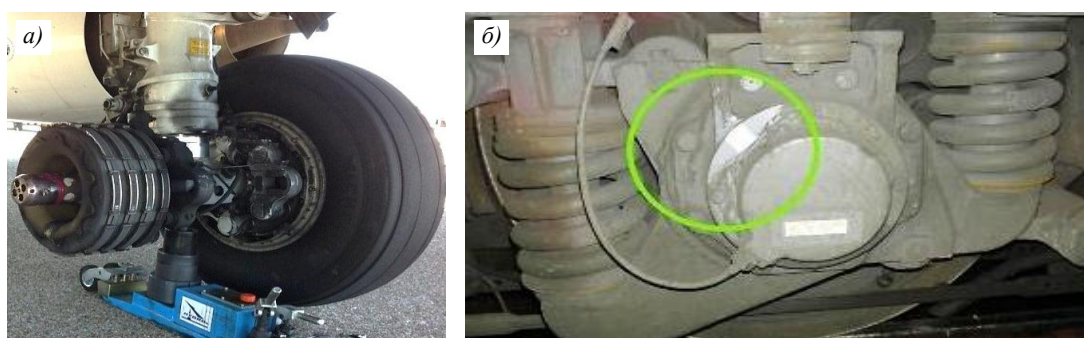


Рис. 4. Использование термоиндикаторных покрытий в машиностроении для контроля температуры поверхности стоек шасси (а) и перегрева тормозной системы колесных пар электропоездов (б)

Перспективно использование термоиндикаторных покрытий при проведении сварочных работ. Эффективным и точным способом контроля температуры нагрева металлов является использование калиброванных термоиндикаторных меток, наносимых с помощью термоиндикаторных маркеров. Когда температура поверхности металла в одной или нескольких контрольных точках на поверхности изделия достигает предельных значений, метка будет плавиться, давая четкую визуальную индикацию. Метка начинает плавиться практически мгновенно (рис. 5). Кроме того, отмечена перспективность применения термоиндикаторных покрытий для контроля температуры при сварке – при превышении допустимого значения происходит искрообразование на поверхности покрытия, что позволяет осуществить визуальный контроль при непосредственном проведении сварочных работ (рис. 6) [31].

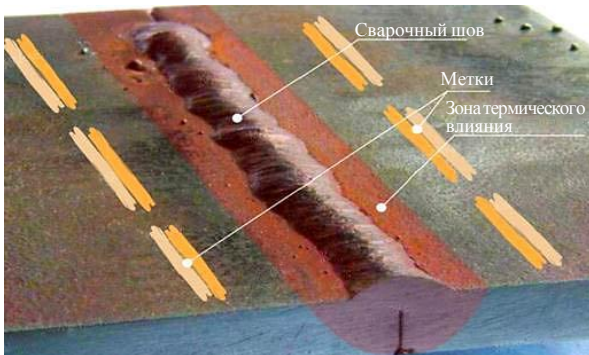


Рис. 5. Применение термоиндикаторных покрытий при проведении сварочных работ для определения зоны термического влияния



Рис. 6. Воспламенение термоиндикатора в результате превышения критической температуры при проведении сварочных работ

Термоиндикаторные покрытия применяют для диагностирования подшипниковых узлов карданных шарниров транспортных и технологических машин в процессе эксплуатации (рис. 7). Термоиндикаторные наклейки позволяют вести непрерывное наблюдение за температурным режимом их поверхностей.

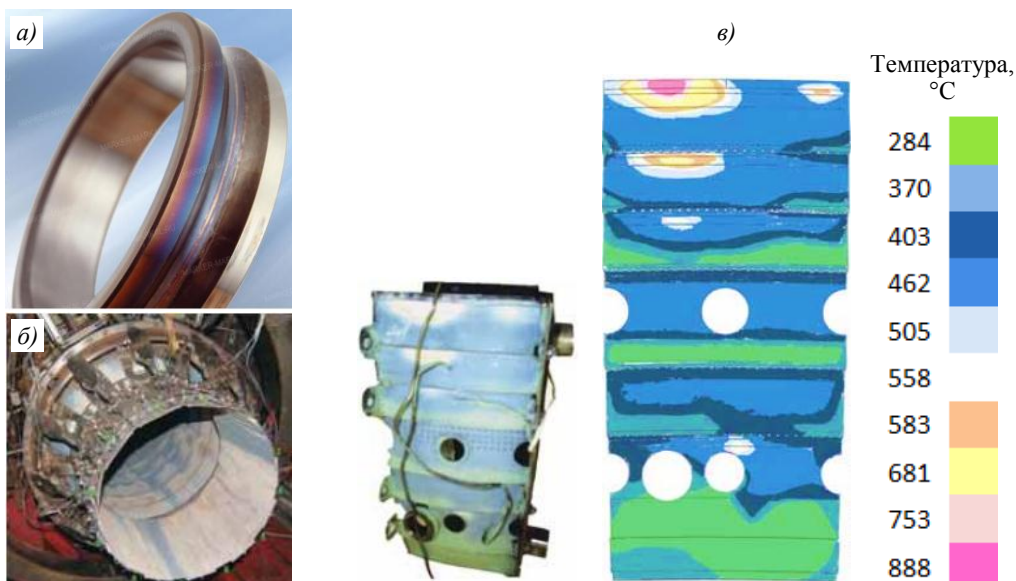


Рис. 7. Применение термоиндикаторных покрытий в машиностроении для контроля температуры поверхности подшипников (а) и визуализация распределения температурного поля в камере сгорания (б, в)

Термоиндикаторные наклейки устанавливают не только непосредственно на подшипниковых узлах карданных шарниров, но и на узлах, сопряженных с карданными шарнирами в кинематической цепи трансмиссии транспортных и технологических машин с целью учета влияния посторонних температурных полей. Технический эффект от их применения заключается в повышении точности и снижении трудоемкости диагностирования подшипниковых узлов карданных шарниров при техническом обслуживании, что позволяет оперативно выявить изделия, нуждающиеся в ремонте и обслуживании.

Термоиндикаторные покрытия помогают выявить неравномерное распределение теплового потока в форсажной камере и визуализировать перегрев после проведения испытаний. На рис. 7, в представлена карта температурного поля после проведения испытаний, позволяющая оценить степень воздействия газового потока на различные участки детали [34].

### Заключения

На фоне быстрого развития науки и техники традиционные термометры перестали отвечать требованиям к процессу измерения температуры в некоторых высокотехнологичных областях, таких как наноматериалы, биомедицина и машиностроение. Среди бесконтактных методов измерения температуры в последнее время все больший интерес представляет использование термоиндикаторов благодаря таким свойствам, как простота использования, быстрый отклик и высокая чувствительность. Способность термохромных материалов изменять цвет под воздействием температуры представляет значительный интерес для применения в важнейших сферах мировой экономики, таких как оборона, энергетика, здравоохранение, фармацевтика, полупроводники, транспорт и т. д.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 60–70.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
4. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
5. Скупов А.А., Свиридов А.В., Голев Е.В., Стекольников Е.Ю. Лазерная сварка жаропрочного сплава на никелевой основе для элементов газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 01. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-3-13.
6. Каблов Е.Н., Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на характеристики алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 07. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.

7. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 11. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
8. Hassabo A.G., Bakr M., Zayed M., Othman H.A. Chromic Dyes for SMART Textile: A Review // *Letters in Applied NanoBioScience*. 2023. Vol. 12. Is. 4. P. 161–173.
9. Durasevic V. Smart dyes for medical textiles // *Advances in Smart Medical Textiles* / Ed. L. van Langenhove. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. P. 19–55.
10. Karlessi T., Santamouris M., Apostolakis K. et al. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures // *Solar Energy*. 2009. Vol. 83. Is. 4. P. 538–551.
11. Dawson T.L. Changing colours: now you see them, now you don't // *Coloration Technology*. 2010. Vol. 126 (4). P. 177–188.
12. Day J.H. Thermochromism // *Chemical Review*. 1963. Vol. 63. Is. 1. P. 65–80.
13. Kiri P., Hyett G., Binions R. Solid state thermochromic materials // *Advanced Materials Letters*. 2010. Vol. 1. Is. 2. P. 86–105.
14. Кукушкин Ю.Н. Химия координационных соединений. М.: Высшая школа, 1985. 455 с.
15. Абрамович В.Г., Картавец В.Ф. Цветовые индикаторы температуры. М.: Энергия, 1978. 216 с.
16. Negussie A.H., Morhard R., Rivera J. et al. Thermochromic phantoms and paint to characterize and model image-guided thermal ablation and ablation devices: a review // *Functional Composite Materials*. 2024. Vol. 5. Art. 1.
17. Беленький Е.Ф., Рискин И.В. Химия и технология пигментов. М.: Химия, 1974. 625 с.
18. Никифоров А.Л., Карасев Е.В., Булгаков В.В., Животягина С.Н. Использование термохромных материалов в качестве сигнальных средств предупреждения пожаров в электроустановках // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 9. С. 41–47.
19. Granqvist C.G., Lansaker P.C., Mlyuka N.R. et al. Progress in chromogenics: New results for electrochromic and thermochromic materials and devices // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009. Vol. 93. No. 12. P. 2032–2039.
20. Alamri S.N. The temperature behavior of smart windows under direct solar radiation // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009. Vol. 93. No. 9. P. 1657–1662.
21. Cui H.N., Costa M.F., Teixeira V. et al. Electrochromic coatings for smart windows // *Surface Science*. 2003. Vol. 532–535. P. 1127–1131.
22. Wu S., Sun H., Duan M. et al. Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings // *Cell Reports Physical Science*. 2023. Vol. 4. P. 1–33.
23. Choi S., Larrabee J.A. Thermochromic Tetrachlorocuprate (II): An Advanced Integrated Laboratory Experiment // *Journal of Chemical Education*. 1989. Vol. 66. No. 9. P. 774–776.
24. Термоиндикаторное антикоррозийное покрытие: пат. 2586701 Рос. Федерация; заявл. 26.06.14; опубл. 27.12.15.
25. Способ изготовления термоиндикатора: пат. 2579834 Рос. Федерация; заявл. 11.02.15; опубл. 10.04.16.
26. Ульява С.Н., Никифоров А.Л., Наконечный С.Н., Циркина О.Г. Проблемы осуществления визуального контроля тепловых режимов работы технологического оборудования для предотвращения возникновения аварийных ситуаций // *Пожарная и аварийная безопасность*. 2021. № 1 (20). С. 32–38.
27. Леонов А.П., Болгова В.А. Визуализация мест локального перегрева изоляции кабелей // *Науковедение*. 2014. № 2 (21). С. 1–8. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/118TVN214.pdf> (дата обращения: 06.05.2024).
28. Лагутин А., Сорокин Е. Оценка состояния контактных соединений ОРУ с использованием термоиндикаторов // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023. № 1 (28). С. 40–43.
29. Власов С.Н., Терешков А.С., Климов А.С. Контроль наличия пор с помощью термохромных материалов // *Результаты современных научных исследований и разработок: сб. ст. XIII Всерос. науч.-практ. конф. Пенза, 2021. С. 62–64.*

30. Pierce J.W., Goodenough J.B. Structure of Orthorhombic  $V_{0,95}Cr_{0,05}O_2$  // *Physical Review B*. 1972. Vol. 5. Is. 10. P. 4104–4112.
31. Иванайский В.В. О возможностях термоиндикаторного метода в исследованиях технологии индукционной наплавки // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2018. № 11 (169). С. 108–112.
32. Guzman G. Thermochromic transition-metal oxides // *Sol-gel technologies for glass producers and users* / Eds M.A. Aegerter, M. Mennig. New York: Springer, 2004. P. 271–276.
33. Johan O.D., Hassin M.M. Investigation on Dielectric Constant of Zinc Oxide // *Modern Applied Science*. 2009. Vol. 3. No. 2. P. 110–116.
34. Мирная М.П., Иванов К.А. Разработка и практическое применение термоиндикаторных красок в реальном эксперименте // *Мир измерений*. 2011. № 12. С. 26–30.
35. Неорганический обратимый термоиндикатор: пат. 2561737 Рос. Федерация; заявл. 12.09.14; опубл. 10.09.15.
36. Hossain S., Sadoh A., Ravindra N.M. Principles, properties and preparation of thermochromic materials // *Material Science & Engineering International Journal*. 2023. Vol. 7. Is. 3. P. 146–156.
37. Jeong J., Min K.S., Kumar R.S. et al. Synthesis of novel betaine dyes for multi chromic sensors // *Journal of Molecular Structure*. 2019. Vol. 1187. P. 151–163.
38. Abdellaoui H., Raji M., Chakchak H. et al. Thermochromic composite materials: synthesis, properties and applications // *Polymer Nanocomposite-Based Smart Materials. From Synthesis to Application* / Eds. R. Bouhfid, A.K. Qaiss, M. Jawaid. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020. P. 61–78.
39. Talvenmaa P. Introduction to chromic materials // *Intelligent Textiles and Clothing* / Ed. H.R. Mattila. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. P. 193–205.
40. Zhao Y., Li L. Colorimetric properties and application of temperature indicator thermochromic pigment for thermal woven textile // *Textile Research Journal*. 2018. Vol. 89. P. 3098–3111.

#### References

1. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace engineering of the 21st century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
2. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat resisting and heat-protective coverings for turbine blades of high pressure of perspective GTE. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 60–70.
3. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
4. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 12. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: May 06, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
5. Skupov A.A., Sviridov A.V., Golev E.V., Stekolnikova E.Yu. Laser welding of heat-resistant alloy nickel base for gas turbine elements engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 06, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-3-13.
6. Kablov E.N., Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskii S.L. The effect of heat treatment on the characteristics of aluminium-zinc coatings obtained by the cold spray method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 06, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
7. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 06, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
8. Hassabo A.G., Bakr M., Zayed M., Othman H.A. Chromic Dyes for SMART Textile: A Review. *Letters in Applied NanoBioScience*, 2023, vol. 12, is. 4, pp. 161–173.
9. Durasevic V. Smart dyes for medical textiles. *Advances in Smart Medical Textiles*. Ed. L. van Langenhove. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016, pp. 19–55.

10. Karlessi T., Santamouris M., Apostolakis K. et al. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy*, 2009, vol. 83, is. 4, pp. 538–551.
11. Dawson T.L. Changing colours: now you see them, now you don't. *Coloration Technology*, 2010, vol. 126 (4), pp. 177–188.
12. Day J.H. Thermochromism. *Chemical Review*, 1963, vol. 63, is. 1, pp. 65–80.
13. Kiri P., Hyett G., Binions R. Solid state thermochromic materials. *Advanced Materials Letters*, 2010, vol. 1, is. 2, pp. 86–105.
14. Kukushkin Yu.N. *Chemistry of coordination compounds*. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 455 p.
15. Abramovich V.G., Kartavtsev V.F. *Color indicators of temperature*. Moscow: Energiya, 1978, 216 p.
16. Negussie A.H., Morhard R., Rivera J. et al. Thermochromic phantoms and paint to characterize and model image-guided thermal ablation and ablation devices: a review. *Functional Composite Materials*, 2024, vol. 5, art. 1.
17. Belenkiy E.F., Riskin I.V. *Chemistry and technology of pigments*. Moscow: Khimiya, 1974, 625 p.
18. Nikiforov A.L., Karasev E.V., Bulgakov V.V., Zhivotyagina S.N. Use of thermochromic materials as signaling means of fire prevention in electrical installations. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2015, vol. 24, no. 9, pp. 41–47.
19. Granqvist C.G., Lansaker P.C., Mlyuka N.R. et al. Progress in chromogenics: New results for electrochromic and thermochromic materials and devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, vol. 93, no. 12, pp. 2032–2039.
20. Alamri S.N. The temperature behavior of smart windows under direct solar radiation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, vol. 93, no. 9, pp. 1657–1662.
21. Cui H.N., Costa M.F., Teixeira V. et al. Electrochromic coatings for smart windows. *Surface Science*, 2003, vol. 532–535, pp. 1127–1131.
22. Wu S., Sun H., Duan M. et al. Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings. *Cell Reports Physical Science*, 2023, vol. 4, pp. 1–33.
23. Choi S., Larrabee J.A. Thermochromic Tetrachlorocuprate (II): An Advanced Integrated Laboratory Experiment. *Journal of Chemical Education*, 1989, vol. 66, no. 9, pp. 774–776.
24. *Temperature indicator anti-corrosion coating*: pat. 2586701 Rus. Federation; appl. 26.06.14; publ. 27.12.15.
25. *Method of manufacturing a temperature indicator*: pat. 2579834 Rus. Federation; appl. 11.02.15; publ. 10.04.16.
26. Uleva S.N., Nikiforov A.L., Nakonechny S.N., Tsirkina O.G. Problems of implementing visual control of thermal operating modes of process equipment to prevent emergency situations. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost*, 2021, no. 1 (20), pp. 32–38.
27. Leonov A.P., Bolgova V.A. Visualization of Local Overheating Spots in Cable Insulation. *Naukovedenie*, 2014, no. 2 (21), pp. 1–8. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/118TVN214.pdf> (accessed: May 06, 2024).
28. Lagutin A., Sorokin E. Assessment of the State of Contact Joints of Outdoor Switchgear Using Thermal Indicators. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 1 (28), pp. 40–43.
29. Vlasov S. N., Tereshkov A. S., Klimov A. S. Monitoring the Presence of Pores Using Thermochromic Materials. Results of Modern Scientific Research and Development: XIII All-Rus. Scientific and Practical Conf. Penza, 2021, pp. 62–64.
30. Pierce J.W., Goodenough J.B. Structure of Orthorhombic  $V_{0.95}Cr_{0.05}O_2$ . *Physical Review B*, 1972, vol. 5, is. 10, pp. 4104–4112.
31. Ivanayskiy V.V. On the Possibilities of the Temperature Indicator Method in Research of Induction Surfacing Technology. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, no. 11 (169), pp. 108–112.
32. Guzman G. Thermochromic transition-metal oxides. *Sol-gel technologies for glass producers and users*. Eds M.A. Aegerter, M. Mennig. New York: Springer, 2004, pp. 271–276.
33. Johan O.D., Hassin M.M. Investigation on Dielectric Constant of Zinc Oxide. *Modern Applied Science*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 110–116.

34. Mirnaya M.R., Ivanov K.A. Development and practical application of temperature indicator paints in a real experiment. *Mir izmereniya*, 2011, no. 12, pp. 26–30.
35. *Inorganic reversible temperature indicator*: pat. 2561737 Rus. Federation; appl. 12.09.14; publ. 10.09.15.
36. Hossain S., Sadoh A., Ravindra N.M. Principles, properties and preparation of thermochromic materials. *Material Science & Engineering International Journal*, 2023, vol. 7, is. 3, pp. 146–156.
37. Jeong J., Min K.S., Kumar R.S. et al. Synthesis of novel betaine dyes for multi chromic sensors. *Journal of Molecular Structure*, 2019, vol. 1187, pp. 151–163.
38. Abdellaoui H., Raji M., Chakchak H. et al. Thermochromic composite materials: synthesis, properties and applications. *Polymer Nanocomposite-Based Smart Materials. From Synthesis to Application*. Eds. R. Bouhfid, A.K. Qaiss, M. Jawaid. Cambridge: Woodhead Publishing, 2020, pp. 61–78.
39. Talvenmaa P. Introduction to chromic materials. *Intelligent Textiles and Clothing*. Ed. H.R. Mattila. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006, pp. 193–205.
40. Zhao Y., Li L. Colorimetric properties and application of temperature indicator thermochromic pigment for thermal woven textile. *Textile Research Journal*, 2018, vol. 89, pp. 3098–3111.

**Информация об авторах**

**Фомина Марина Александровна**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Сибилева Светлана Владимировна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Демин Семен Анатольевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Васильев Алексей Сергеевич**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Marina A. Fomina**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Svetlana V. Sibileva**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Semyon A. Demin**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexey S. Vasiliev**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.06.2024.  
The article was submitted 17.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.06.2024.