

Д. т. н. **И. Н. Кравченко**<sup>1,2</sup> (✉), д. т. н. **Ю. А. Кузнецов**<sup>3</sup>, д. т. н. **А. Л. Галиновский**<sup>4</sup>,  
д. т. н. **С. А. Величко**<sup>5</sup>, к. т. н. **П. А. Ионов**<sup>5</sup>, к. т. н. **С. В. Карцев**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН «Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет —  
МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет  
имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия

<sup>4</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

<sup>5</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский  
государственный университет имени Н. П. Огарёва»,  
Республика Мордовия, Саранск, Россия

УДК 620.22-419.8-492.2.017:536.495]:621.791.927.55

## ОЦЕНКА ТЕРМОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ

Представлены результаты исследований термостойкости материалов, работающих в плазменной струе в условиях высоких температур и резкого изменения тепловых нагрузок. Доказано, что применение плазменных генераторов с введением разных порошковых материалов позволяет имитировать условия работы деталей в высокотемпературных газовых потоках с нагретыми частицами. Исследовано влияние вводимых порошковых материалов на термостойкость образцов, изготовленных методом плазменного напыления из молибдена, а также вольфрама и композиций на его основе. Предложена установка для оценки термостойкости композиционных материалов и защитных упрочняющих покрытий, работающих в условиях высокотемпературных газовых потоков, позволяющая определять эрозионную стойкость.

**Ключевые слова:** термостойкость, газовый поток, плазменная струя, теплофизические свойства, термическое нагружение, эрозионная стойкость.

**П**ри эксплуатации покрытий в условиях высоких температур и повышенных нагрузок важнейшими характеристиками являются прочность и термостойкость. Поэтому выбор или создание покрытий с требуемой термостойкостью для конкретных условий эксплуатации изделий представляет довольно сложную задачу [1–5]. На термостойкость существенно влияют такие факторы, как размер и форма детали, параметры упругости, теплопроводность и термическое расширение материала, из которого она (деталь) изготовлена [6–10].

Причинами возникновения термических напряжений в изделии являются [11–13]:

– стационарный нагрев осуществляется в неравномерном температурном поле;

– возникновение термоудара при нестационарном нагреве;

– разные значения ТКЛР каждой из фаз в многофазной структуре нагреваемого изделия.

На термостойкость материала, помимо его свойств, сильно влияют условия поверхностного теплообмена, условия температурного нагружения и скорость изменения температуры изделия. Таким образом, при исследовании термостойкости материалов принята критериальная форма их оценки [14, 15].

Термостойкость конструктивных элементов определяется механическими и теплофизическими свойствами материала. Исследования влияния каждой из характеристик в отдельности и обобщение всех результатов представляют большие трудности из-за необходимости проведения значительного количества экспериментов. В этой связи в последнее время наметилась тенденция — исследовать термостойкость в условиях, которые по возможности имитируют реальные условия работы деталей [16–21].

При исследовании материалов на термостойкость при циклических тепловых нагрузках рас-



И. Н. Кравченко

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

смагиваются в основном два случая: I — при циклических изменениях тепловых и механических нагрузений; II — при циклических изменениях только тепловых нагрузок.

На основании вышеизложенного цель настоящего исследования — изучение и оценка термостойкости порошковых композиционных материалов, работающих в плазменной струе в условиях высоких температур и резкой смены тепловых нагрузок без механического нагружения.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

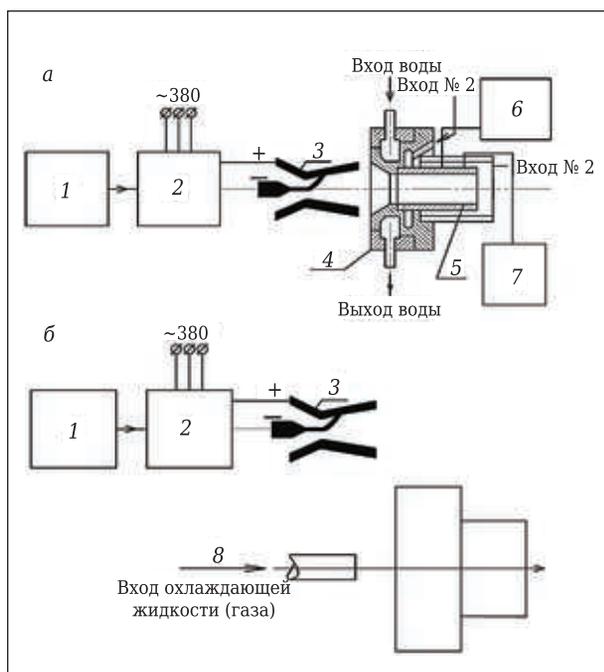
На рис. 1 показана блок-схема установки для исследований термостойкости материалов. Установка состоит из источника постоянного тока ИПН 160/600 с пультом управления работой плазменного генератора. Назначение ИПН 160/600 заключается в питании распылителей плазменного напыления плазмообразующими газами азота, аргона и азотно-водородной смесью [22].

Испытуемый цилиндрический образец устанавливается на плотной посадке в специальном водоохлаждаемом приспособлении и нагревается высокотемпературным газовым потоком, выходящим из плазменного генератора [23, 24]. На рис. 2 показано приспособление для испытания образцов в плазменной струе. Корпус 1 приспособления и крышки 2 выполнены из латуни. Чтобы во время нагрева и охлаждения образец не окислялся, в зазор между кварцевым стеклом 4 и образцом 5 подается инертный газ (азот). Кроме того, присутствие кварцевого стекла позволяет наблюдать за поведением образца в процессе испытаний [25].

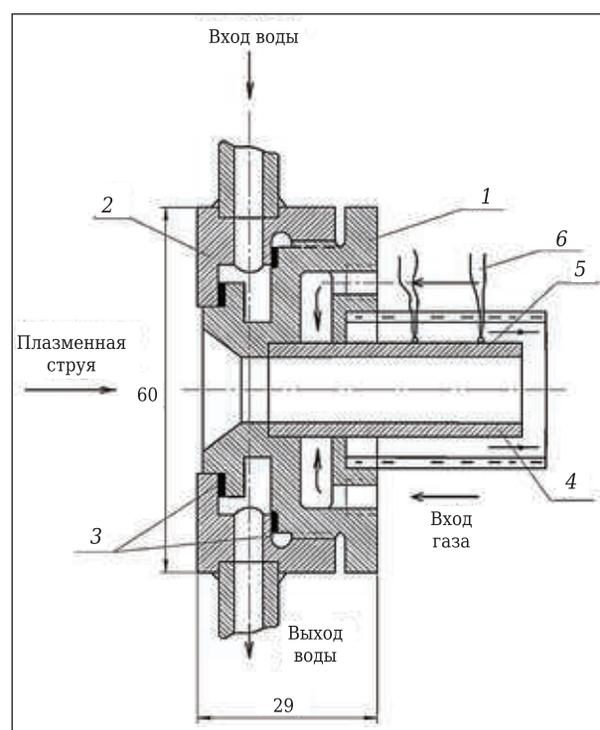
Для измерения градиента температуры вдоль образца установлены две термопары с базой 10 мм, выбранной из конструктивных соображений. При этом вывод термодпар осуществляется через отверстия в кварцевом стекле (см. рис. 2).

Температуру измеряли вольфрам-молибденовыми термопарами [26, 27] в соответствии с ГОСТ Р 50342-92 и ГОСТ Р 8.585-2001. При этом ЭДС с термодпар (термоэлектрических преобразователей) подавали на автоматический регистрирующий прибор КСП-4 (потенциометр) с пределами измерений 0–10 мВ. Скорость продвижения диаграммы была выбрана максимальной и составляла 5400 мм/ч.

После выхода на режим плазменного генератора приспособление с испытуемым образцом быстро вводилось в плазменную струю (см. рис. 1, а). Расстояние от образца до плазменного генератора во всех экспериментах составляло 15 мм. Образец нагревали плазменной струей в положении I (см. рис. 1, а) до температуры на наружной поверхности, составляющей 2200 °С. Под воздействием этой температуры образец находился



**Рис. 1.** Блок-схема установки для испытания материалов на термостойкость: а — положение I; б — положение II; 1 — пульт управления; 2 — источник питания ИПН 160/600; 3 — плазменный генератор; 4 — приспособление; 5 — испытуемый образец; 6, 7 — автоматические регистрирующие приборы КСП-4 (потенциометры); 8 — вход охлаждающей жидкости (газа)



**Рис. 2.** Приспособление для испытания образцов на термостойкость: 1 — корпус; 2 — крышка; 3 — резиновые прокладки; 4 — кварцевое стекло; 5 — испытуемый образец; 6 — термопары

в течение 10–20 с, затем быстро перемещался в положение II (см. рис. 1, б) и охлаждался до 20 °С струей холодной воды (или газа). Испытания проводили до появления на образце трещин.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ МОЛИБДЕНА**

В соответствии с методикой исследования проведены испытания образцов из молибдена [28, 29], изготовленных методом плазменного напыления. Результаты исследований показали, что молибденовое покрытие из порошка с размером частиц 5 мкм имеет достаточно низкую прочность сцепления и отслаивается в первом цикле испытаний на термостойкость (табл. 1). Попытка использовать разного рода подслоя для повышения прочности и термостойкости покрытий из молибдена не привели к существенному улучшению их свойств. При этом наиболее высокая прочность сцепления порошкового молибдена была достигнута применением подслоя системы Ni–W с последующей вакуумной термообработкой при 900–1100 °С. Следует отметить, что из-за образования хрупких интерметаллидных слоев термостойкость таких покрытий оказалась очень низкой.

Наиболее высокую термостойкость на стали показало порошковое покрытие с подслоем молибдена из проволоки. При термоциклировании это покрытие не имело видимых разрушений, однако при механической обработке резанием отслаивалось по границе с подслоем. Термообработка порошкового покрытия в вакууме не устранила этот недостаток. В отличие от этого покрытие из проволоки разрушалось постепенным выкрашиванием отдельных частиц и позволяло проводить черновую обработку резанием без отслоений, хотя при этом наблюдался значительный износ инструмента.

Для повышения прочности и термостойкости, а также улучшения технологических свойств по-

крытий проведены испытания образцов из вольфрама и композиций на его основе с молибденом, оксидом циркония и карбидом циркония [30–32].

**ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВОЛЬФРАМА И КОМПОЗИЦИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ С МОЛИБДЕНОМ, ОКСИДОМ ЦИРКОНИЯ И КАРБИДОМ ЦИРКОНИЯ**

На рис. 3 показана зависимость температурного нагружения образца от времени, из которой видно, что при испытании материалов на термостойкость с использованием плазменной струи можно получать достаточно высокие скорости температурного нагружения. Это особенно важно для материалов, работающих при высоких температурах и с большими скоростями нагрева и охлаждения.

Результаты испытаний образцов на термостойкость показывают (табл. 2), что добавка ZrO<sub>2</sub> значительно увеличивает термостойкость вольфрама. Молибден при этом не влияет на термостойкость, а карбид циркония ZrC снижает ее. Как показали результаты исследования микроструктуры образцов, добавка ZrO<sub>2</sub> при температурном воздействии обеспечивает уменьшение размера зерен вольфрама и вследствие этого улучшает его механические свойства. В свою очередь, ZrC способствует росту зерна и ухудшает свойства напыленного вольфрама. При этом молибден не влияет на структуру вольфрама, однако улучшает другие механические характеристики материала.

Анализ полученных данных свидетельствует, что при испытаниях на предлагаемой установке можно получать достаточно высокие градиенты температуры по длине образца. Так,

Таблица 1. Термостойкость молибденовых покрытий на образцах из стали 12Х18Н9Т

Молибденовое покрытие	Толщина, мм		Число циклов до разрушения
	подслоя	покрытия	
Из порошка с размером частиц 5 мкм	–	0,3	0
Из порошка с подслоем из Ni с вакуумной термообработкой при 900 °С (выдержка 1 ч)	0,25	0,3	0
	0,05	0,3	0
Из порошка с подслоем из ПТ-10Н-01 с термообработкой при 900 °С (выдержка 1,5 ч)	0,10	0,5	0
	0,20	0,5	0
Из порошка с подслоем молибдена из проволоки	0,10	0,15	10
Из проволоки диаметром 1 мм	–	0,4	без разрушения 10–15

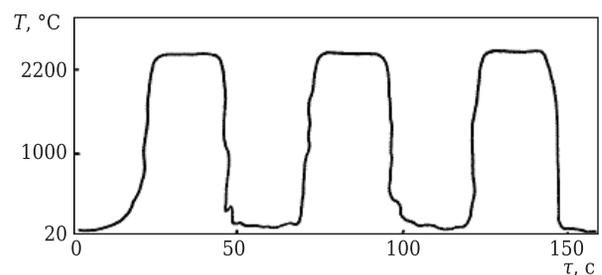


Рис. 3. Зависимость температурного нагружения образцов при испытании на термостойкость

Таблица 2. Результаты испытаний образцов на термостойкость

Материал	Скорость нагрева, °С/с	Скорость охлаждения, °С/с	Температурный градиент по длине образца, °С/мм	Число циклов до разрушения
Вольфрам	227	550	470	18
W + Mo	465	400	430	18
W + ZrO <sub>2</sub>	300	290	310	29
W + ZrC	450	245	–	12

на образцах после испытания виден характер их разрушения при воздействии циклических тепловых нагрузок. При этом образцы имеют в основном радиальные трещины. Это объясняется тем, что температурные градиенты в осевом направлении выше, чем в радиальном. Кроме того, в процессе испытания в плазменной струе материалы подвергаются значительной эрозии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условия испытания образцов на термостойкость с применением плазменной струи позволяют имитировать условия работы деталей в высокотемпературных газовых потоках.

## Библиографический список

1. **Prokhorov, I. Yu.** Thermal Stability of Oxide-Based Ceramic Materials / I. Yu. Prokhorov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2002. — Vol. 43, № 5/6. — P. 195–205.
2. **Прохоров, И. Ю.** Термостойкость оксидных керамических материалов / И. Ю. Прохоров // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2002. — № 5. — С. 37–48.
3. **Kolomeitsev, V. V.** Thermal stability of high-temperature materials. Part 2 / V. V. Kolomeitsev, S. A. Suvorov, E. F. Kolomeitseva [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2004. — Vol. 45, № 5. — P. 364–372.
4. **Коломейцев, В. В.** Термостойкость высокотемпературных материалов / В. В. Коломейцев, С. А. Суворов, Е. Ф. Коломейцева [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2004. — № 8. — С. 38–48.
5. **Суворов, С. А.** Термостойкие композиции системы титанат алюминия – титанат циркония / С. А. Суворов, А. В. Русинов, В. Н. Фищев // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2011. — № 10. — С. 10–14.
6. **Апалькова, Г. Д.** К вопросу о термостойкости материалов, используемых в технологическом оборудовании современных процессов / Г. Д. Апалькова. — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2016. — С. 465–471.
7. **Геодакян, Д. А.** Многокомпонентные термостойкие композиции / Д. А. Геодакян, О. К. Геокчян, А. К. Костанян [и др.] // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2010. — № 7/8. — С. 30–33.
8. **Смирнов, Ю. В.** Исследование термостойкости материалов в плазменной струе / Ю. В. Смирнов, В. С. Лоскутов, А. Ф. Пузряков // *Теория и практика газотермического нанесения покрытий.* — М. : МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976. — С. 53–58.
9. **Грушевский, Я. Л.** Исследование термической стойкости конструкционных огнеупорных материалов с учетом их неупругости / Я. Л. Грушевский. — Киев : Институт проблем прочности, 1977. — 165 с.
10. **Лосев, А. С.** Исследование термической стойкости наплавленного мартенситно-старяющегося металла с композиционной структурой / А. С. Лосев, Е. Н. Еремин, Г. П. Румянцев // *Омский научный вестник.* — 2011. — № 2 (100). — С. 94–96.
11. **Бабинец, А. А.** Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков / А. А. Бабинец, И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев [и др.] // *Автоматическая сварка.* — 2014. — № 5. — С. 17–21.

Использование плазменных генераторов с введением разных порошковых материалов позволяет имитировать условия работы деталей в высокотемпературных газовых потоках с нагретыми частицами.

Предлагаемая установка для испытаний позволяет оценить термостойкость композиционных порошковых материалов в плазменной струе, работающей в условиях высокотемпературных газовых потоков. Кроме того, на этой установке можно проводить комплексные исследования эрозионной стойкости конструкционных материалов и защитных упрочняющих покрытий.

10. **Алякрецкий, Р. В.** Исследование влияния режимов плазменного напыления на термостойкость покрытия / Р. В. Алякрецкий, М. Ю. Карчевный, С. А. Зоммер [и др.] // *Решетневские чтения.* — 2015. — Т. 1. — С. 6, 7.
11. **Барвинок, В. А.** Математическое моделирование нагрева порошкового композиционного материала в плазменной струе / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, И. А. Докукина [и др.] // *Изв. Самар. науч. центра РАН.* — 2001. — Т. 3, № 2. — С. 197–203.
12. **Дюмин, М. И.** Численное моделирование динамики нагрева порошковых материалов в технологическом микроплазматроне / М. И. Дюмин, Н. П. Козлов, В. И. Суслев // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* — 2003. — № 3. — С. 3–11.
13. **Корсунов, К. А.** Моделирование нагрева частиц порошкового материала в плазменной струе / К. А. Корсунов, А. В. Чаленко, Р. Н. Брожко // *Вестник СевГТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт.* — 2011. — Вып. 118. — С. 53–56.
14. **Белов, А. В.** Об использовании обобщенного критерия прочности Писаренко – Лебедева в расчетах на прочность при неизотермических процессах нагружения / А. В. Белов, Н. Г. Неумоина // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* — 2014. — № 9-2. — С. 8–10.
15. **Гаджиев, М. Х.** Диагностический комплекс для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами / М. Х. Гаджиев, А. С. Тюфтяев, М. А. Саргсян [и др.] // *Вестник Дагестанского гос. ун-та. Сер. Естественные науки.* — 2016. — Т. 31, вып. 1. — С. 22–27.
16. **Лебедев, А. А.** Вопросы высокотемпературной прочности в машиностроении / А. А. Лебедев, Г. С. Писаренко. — Киев : Изд-во АН УССР, 1963. — 336 с.
17. *Вопросы прочности в машиностроении ; под ред. Д. А. Гохфельда.* — Челябинск : ЧПИ, 1974. — 205 с.
18. **Жуков, С. Л.** Выносливость и термостойкость жаропрочных сплавов и сталей / С. Л. Жуков, Б. Н. Васильев, И. А. Шадский [и др.]. — М. : ОНТИ, 1963. — 76 с.
19. **Бунтушкин, В. П.** Защитные композиционные покрытия для жаропрочных никелевых сплавов / В. П. Бунтушкин, Ю. Ю. Черкис, В. В. Терехова [и др.] // *Теория и практика газотермического нанесения покрытий.* — М. : МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976. — С. 16–19.
20. **Масленников, С. Б.** Жаропрочные стали и сплавы : справочник / С. Б. Масленников. — М. : Металлургия, 1983. — 192 с.

21. **Банных, О. А.** Жаропрочные и жаростойкие металлические материалы: физико-химические принципы создания / *О. А. Банных, К. Б. Поварова*. — М.: Наука, 1987. — 172 с.
22. **Артеменко, Н. И.** Исследование режимов работы серийного плазмотрона METCO F4 с использованием плазмообразующих газов аргона и азота / *Н. И. Артеменко* // Труды ВИАМ. — 2018. — № 5 (65). — С. 76–89.
23. **Гаджиев, М. Х.** Мощный генератор низкотемпературной плазмы воздуха с расширяющимся каналом выходного электрода / *М. Х. Гаджиев, Э. Х. Исакаев, А. С. Тюфтяев* [и др.] // Письма в ЖТФ. — 2016. — № 2. — С. 44–49.
24. **Гаджиев, М. Х.** Генератор низкотемпературной воздушной плазмы для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами / *М. Х. Гаджиев, А. С. Тюфтяев, Э. Х. Исакаев* [и др.] // Вестник Дагестанского гос. ун-та. Сер. 1. Естественные науки. — 2018. — Т. 33, вып. 1. — С. 50–56.
25. **Бахрунов, К. К.** Испытания покрытий на термостойкость / *К. К. Бахрунов, Б. Д. Лыгденов* // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2015. — Т. 12, № 2. — С. 175–178.
26. **Улановский, А. А.** Универсальные вольфрамрениевые термопреобразователи в высокотемпературной термометрии / *А. А. Улановский, Б. Л. Шмырев, Ю. Н. Алтухов* // Приборы. — 2006. — № 5 (71). — С. 4–13.
27. **Пушкарев, М. М.** Популярные контактные технологии термометрии / *М. М. Пушкарев* // Компоненты и технологии. — 2006. — № 1 (54). — С. 140–146.
28. **Блохин, В. В.** Прочность и термостойкость плазменных покрытий из молибдена. Т. 2. Ч. 1 / *В. В. Блохин, Е. А. Шаронов* // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1989. — С. 147–153.
29. **Панин, В. Е.** Повышение термической стабильности композиционных материалов на основе никеля, упрочненных волокнами вольфрама и молибдена, путем направленного легирования матрицы / *В. Е. Панин, Е. Ф. Дударев, В. Е. Овчаренко* [и др.] // Структура и свойства жаропрочных металлических материалов. — М.: Институт металлургии им. А. А. Байкова, 1973. — С. 103–111.
30. **Шайдуров, В. С.** Об эффективности применения вольфрама газофазного фторидного в некоторых областях техники. Т. 3 / *В. С. Шайдуров, П. Е. Андреев, С. Ф. Лунин* [и др.] // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1989. — С. 112–117.
31. **Смирнов, Ю. В.** Влияние температурной активации порошка окиси циркония на плотность и адгезионную прочность покрытий. Т. 2 / *Ю. В. Смирнов, В. В. Губченко, В. Я. Петров* [и др.] // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. — М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1985. — С. 133, 134.
32. **Девойно, О. Г.** Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью / *О. Г. Девойно, В. В. Оковитый* // Наука и техника. — 2015. — № 1. — С. 35–39. ■

Получено 01.03.21

© И. Н. Кравченко, Ю. А. Кузнецов, А. Л. Галиновский, С. А. Величко, П. А. Ионов, С. В. Карцев, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**NANOTECH 2021 — Всемирный конгресс по нанотехнологиям и материаловедению**

26—27 июля 2021 г.,

Дубай, ОАЭ



**Тематика конгресса:**

- Передовые наноматериалы, наночастицы, материаловедение и нанотехнологии
- Молекулярные нанотехнологии и передовые биоматериалы и биоустройства
- 2D- и 3D-материалы, «умные материалы»
- Полимеры и аналитическая химия
- Применение нанотехнологий в науке и в разных отраслях, в защите окружающей среды
- Наноструктуры, наноустройства и наносенсоры
- материаловедение и химия материалов, нанофизика, наука и инженерия полимеров
- Нанотехнологический риск и безопасность
- Материалы для экологически чистых технологий и передовой керамики, композитные материалы

[www.nanotechnologyexpo.conferenceseries.com](http://www.nanotechnologyexpo.conferenceseries.com)