

**Ключевые слова:**

аддитивные технологии, 2D- и 3D-технологии, композиты на основе металлических и керамических систем, холодное аэрозольное осаждение, высокоскоростная струя

# АДДИТИВНЫЕ 2D- И 3D-ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ

**Владимир ПУХА, Николай ОВСЯННИКОВ**

Рассмотрены основные преимущества и недостатки аддитивных технологий при формировании композитов на основе металлических и керамических систем, а также новые направления аддитивных технологий, связанные с ударной консолидацией высокоскоростных твердых частиц.

## ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии или трехмерная печать (АТ или 2D-, 3D-технологии) – это быстро развивающееся направление, которое обещает революционизировать производственный сектор за счет меньшего времени производства, меньших затрат сырья и возможности печати уникальных конфигураций с использованием разнородных материалов. АТ позволяют автоматически изготавливать компоненты из различных материалов, таких как пластмассы, металлы и сплавы, биоматериалы и керамика. В последние три десятилетия эти технологии находят применение в автомобильной, аэрокосмической и других отраслях обрабатывающей промышленности, а также медицине. От печати деталей из пластика и металлов до биопереноса трансплантируемых органов – такова широта спектра направлений развития аддитивных технологий [1].

АТ имеют несколько очевидных преимуществ по сравнению с субтрактивными технологиями. Во-первых, количество требуемого материала меньше, чем для традиционного метода вычитания, когда материал удаляется из заготовки, пока не будет достигнута нужная геометрия детали. Во-вторых,

при помощи АТ можно производить детали или предметы, которые сложно выполнить традиционными методами, такими как создание деталей из разнородных материалов и создание биомедицинских объектов, включая органы. В-третьих, АТ может сократить время и стоимость изготовления уникальных изделий в малых объемах (крупномасштабное производство деталей, как правило, экономически выгодно при использовании традиционных технологий).

Кроме того, АТ трансформируют способ проектирования и производства компонентов на макроуровне и позволяют производить инновационные продукты, такие как персонализированные имплантаты, более эффективные и конформные системы охлаждения, легкие и экономичные компоненты для авиационной и автомобильной промышленности [1, 2].

Одной из причин успеха АТ является их способность реализовать практически любую желаемую геометрию. Это резко контрастирует с ограничениями дизайна, налагаемыми, например, при изготовлении систем охлаждения двигателей субтрактивными технологиями производства, обеспечивая проектирование архитектурных форм, необходи-

мых для повышения функциональности, а не в угоду более простому способу изготовления.

### ОГРАНИЧЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исторически первые разработки 3D-технологий связаны с полимерными материалами и созданием моделей для литья на их основе (прототипирование) [3]. Следующий крупный шаг был связан с формированием АТ готовых изделий и расширением сферы применения 3D-технологий на металлы. Были проведены обширные исследования по разработке АТ для металлов, в результате чего был разработан ряд методов для макро- и мезомасштабных приложений. Наиболее известными являются селективное лазерное плавление (SLM), селективное лазерное спекание (SLS) и электронно-лучевое плавление (EBM). Эти методы основаны на локальном сплавлении металлических частиц с образованием твердого материала [4]. Однако для них существует ряд ограничений, которые предполагают дальнейшую обработку будущего изделия, чтобы его свойства были сравнимы с изделиями, полученными традиционными технологиями. Так, например, отклонение линейных размеров полученного АТ-изделия от номинала обычно составляет несколько десятков микрометров, кроме того, шероховатость поверхности имеет такую же величину. Эти ограничения лежат в основе рассматриваемой технологии и связаны с конечным размером частиц металлического порошка и высокой теплоотдачей в металлах, что приводит к необходимости высокой мощности нагревательного импульса для локального плавления [5].

Кроме указанных выше, существуют также ограничения, связанные с микроструктурой и высоким уровнем остаточных механических напряжений в металлических изделиях, полученных с применением SLM и EBM методов [6]. В исследованиях последних лет был обнаружен еще один существенный недостаток материалов и изделий, получаемых АТ, а именно наличие значительной пористости при использовании как SLM-, так и EBM-методов [6–9]. Как известно, пористость является одной из главных причин снижения пластичности и прочности, особенно при циклических нагрузках под воздействием высоких температур [9], усиления анизотропии механических свойств, снижения ударной вязкости и охрупчивания.

Известным способом устранения избыточной пористости является применение горячего изостатического прессования [10]. Эта дополнительная

операция повышает пластичность и сопротивление усталости АТ-изделий, но существенно повышает и их стоимость. Другие возможные решения подобных проблем, связанные с модификацией структуры и свойств приповерхностных слоев исходных металлических порошков (гранул) под воздействием зернограничных диффузионных потоков атомов из внешней среды и ударно-волнового воздействия в ходе АТ-процесса (например с использованием воздействия фемтосекундным лазерным излучением), пока не вышли из стен исследовательских лабораторий [11].

Неметаллические неорганические материалы оксидного, карбидного, нитридного класса, бориды и силициды, обладающие рядом привлекательных свойств (жаростойкость, твердость и сверхтвердость), при изготовлении готовых изделий 3D-технологиями требуют промежуточных процессов с высокими температурами, таких как спекание, удаление связки, испарение растворителя и т. д. [12, 13]. Эта обработка во многих случаях приводит к формоизменению изделий и ухудшению их свойств (по сравнению с изделиями, полученными традиционными технологиями) по причине усадки во время спекания, испарения, либо выгорания основы. В результате, готовое изделие имеет высокую пористость и низкие механические свойства. Попытки использования SLM/SLS-методов для прямого получения готовых керамических изделий пока не привели к успеху. Основные проблемы, возникающие при лазерном спекании (либо сплавлении) керамических порошков связаны с появлением микротрещин (растрескиванием) при высоких температурных градиентах, которые свойственны SLS/SLM-методам [14].

Таким образом, для большинства методов формирования качественных изделий из неорганических веществ с помощью 3D-технологий необходим многостадийный процесс, который может включать высокотемпературную обработку при высоком давлении и финишную подгонку размеров изделия, совмещенную со шлифованием либо полировкой поверхности.

### УДАРНАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ АТ

Одним из перспективных методов для АТ является холодное аэрозольное осаждение из высокоскоростных (сверхзвуковых) струй, которое открыто и исследовано в нашей стране в конце 80-х годов прошлого века [15–16]. Метод нашел широкое применение при осаждении толстых покрытий из металлических порошков и композитов на их основе [17–18]. Были сделаны попытки использо-

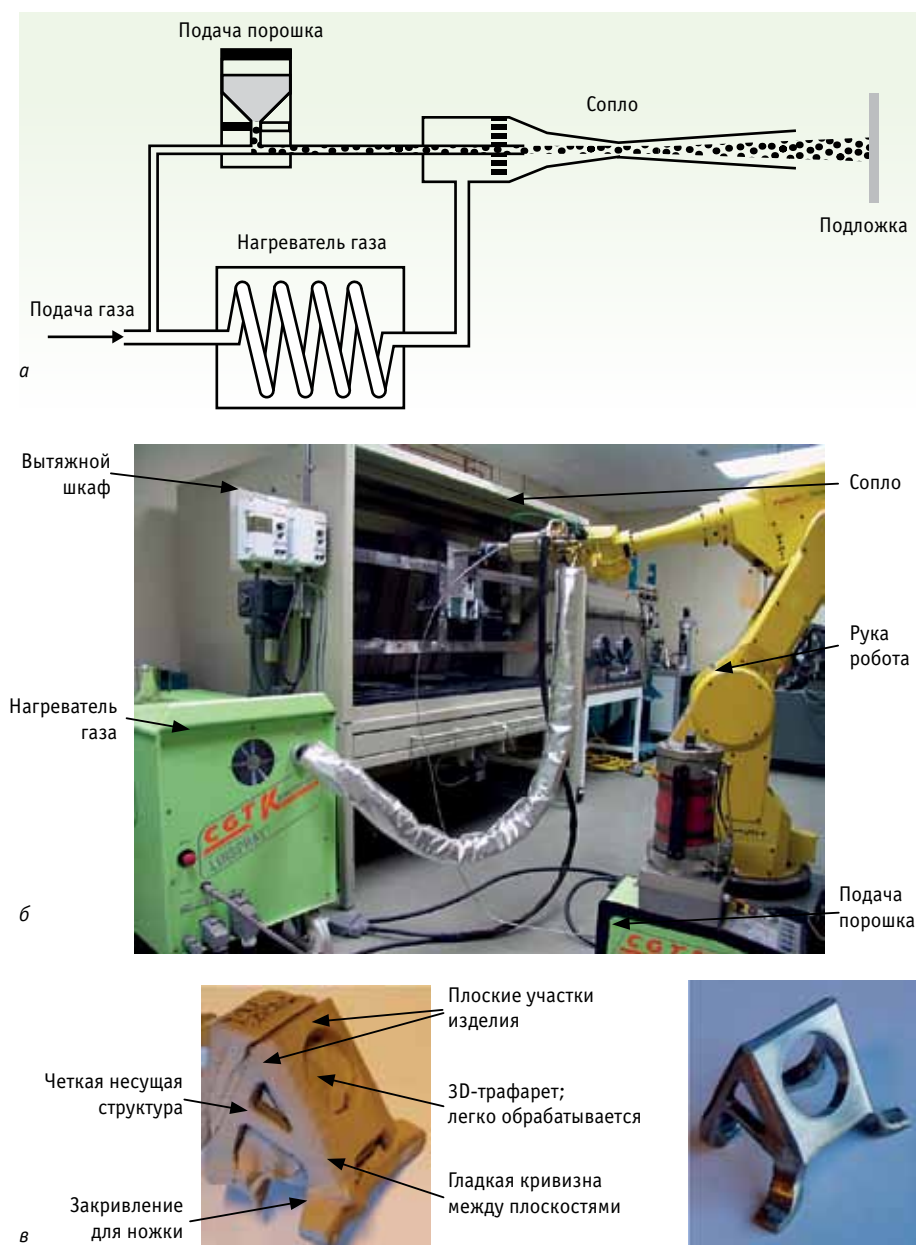


Рис. 1. Схема метода холодного осаждения (а) и установка для реализации АТ на его основе (б), а также полученное на ней изделие (в). Подогрев газа используется для увеличения скорости струи

вать его в АТ для производства объемных изделий сложной формы (рис. 1) [18]. Ударная консолидация высокоскоростных твердых частиц позволяет получать холодное напыление (температура порошка и подложки гораздо ниже температуры спекания порошка) с высокой прочностью, низкой пористостью и минимальным или сжимающим остаточным напряжением. Использование газодинамической фокусировки позволяет поднять пространственное разрешение для металлов выше получаемого методами SLM и EBM [19–21].

Методы холодного аэрозольного осаждения при атмосферном давлении применимы для металлов и композитов на их основе, то есть для пластичных материалов [18]. Применить этот метод в «чистом» виде для керамических и хрупких материалов, несмотря на значительные усилия исследователей, не удалось до сих пор. В конце 90-х годов прошлого века в Японии были разработаны принципы метода вакуумного аэрозольного осаждения или «ударной консолидации при комнатной температуре» (room temperature impact consolidation) для керамических материалов, который является дальнейшим развитием метода холодного осаждения при атмосферном давлении [22]. После того как была показана универсальная применимость аэрозольного осаждения в вакууме и получены толстые покрытия из ряда тугоплавких соединений ( $ZrO_2$  стабилизированный иттрием,  $Al_2O_3$ ,  $BaTiO_3$ ,  $TiO_2$ ) [23] в зарубежных странах начался экспоненциальный рост количества публикаций по данной тематике. Получены тонкие и толстые (доли миллиметра) пленки и покрытия для электроники, твердые электролиты для высокотемпературных топливных элементов, электроды для литиевых аккумуляторов, материалы медицинского применения (гидроксид апатит и композиты на его основе, керамические покрытия для искусственных суставов), тугоплавкие и жаростойкие соединения, включая МАХ-фазы и сложные оксиды на основе переходных металлов и кремния [23–26].

Особенностью методов холодного аэрозольного осаждения (как атмосферного, так и вакуумного) является то, что локальный разогрев и давление в несколько ГПа возникают в момент удара ускоренной до сверхзвуковой скорости частицы. Моделирование условий формирования слоев аэрозольным напылением [27]

Организатор



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ARMY**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ «АРМИЯ-2018»**

**21–26 АВГУСТА  
ПАТРИОТ ЭКСПО**

[WWW.RUSARMYEXPO.RU](http://WWW.RUSARMYEXPO.RU)

Выставочный оператор



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
ПАРТНЕР



Официальный  
банк форума



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
СПОНСОР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
ПАРТНЕР



СТРАТЕГИЧЕСКИЙ  
ПАРТНЕР



указывает на возникновение ударной волны, что является причиной высокой плотности слоев, близкой к теоретической. Применение осаждения из высокоскоростных (сверхзвуковых) струй для АТ, а также применение гибридных методов совместно с лазерной обработкой поверхности возможно уменьшит остроту проблем, связанных с пористостью и сопровождающим ее снижением ударной вязкости и усталостной прочности для металлов.

Еще большие перспективы открываются при применении 2D- и 3D-технологий на основе сверхзвуковых струй в вакууме для высокотемпературных керамик. Отличием данного метода является отсутствие необходимости как разогрева детали, на которой формируется изделие, так и последующих отжигов готового изделия для получения плотной керамики. Таким образом, появляется возможность именно прямой печати керамических изделий. Этот метод обладает производительностью, достаточной для создания объемных керамических изделий. Скорости осаждения для многих порошков достигают  $10 \text{ мм}^3/\text{мин}$  [25]. Так как формируемый слой остается интегрально холодным, появляется возможность консолидировать порошковые тугоплавкие материалы с легкоплавкими и растворимыми (соли, органика, и т. д.), либо резорбируемыми веществами для живого организма при медицинских применениях [28], создавая временные композиты. Такие композиты могут быть основой для создания АТ-изделий сложной формы и градиентных структур [29–30]. Можно надеяться, что использование газодинамической фокусировки струй позволит достичь точности и разрешения для керамических изделий не меньших, чем в металлических изделиях, полученных SLM- и EBМ-методами.

В следующем разделе приводятся результаты оригинальных исследований основ 2D- и 3D-технологий создания керамических объектов, сформированных с использованием холодного аэрозольного осаждения из сверхзвуковой струи аксиальной симметрии в вакууме. Эксперименты проводились с оксидом циркония стабилизированного оксидом иттрия. Керамические композиты на такой основе находят широкое применение в качестве теплозащитных покрытий для камер сгорания и лопаток турбин газотурбинных двигателей, электролита для высокотемпературных топливных ячеек и для покрытия поверхности титановых имплантатов в медицине [31–33].

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ В ВАКУУМЕ

Установка для напыления покрытий методом аэрозольного осаждения, была предоставлена ком-

панией «ИнЭнерджи» (Россия). Установка оснащена высокопроизводительной откачной группой на базе вакуумного двухроторного агрегата АВД 150/25 со скоростью откачки  $150 \text{ л/с}$  в рабочем диапазоне давлений ( $50\text{--}300 \text{ Па}$ ).

Покрытия осаждались в вакуумной камере объемом  $0,3 \text{ м}^3$ , в которой с помощью сопла Лавалья формировалась сверхзвуковая струя аэрозоля твердых частиц. Во время осаждения покрытия в камере поддерживалось давление  $100 \text{ Па}$ . При взаимодействии ускоренных частиц с поверхностью подложки, на ней формировалось твердое компактное покрытие. В качестве газа-носителя использовался аргон. Генерация газопорошковой смеси производилась в аэрозольной камере с вихревыми потоками газа носителя при избыточном давлении  $0,2 \text{ МПа}$ . Аэрозольная камера устанавливалась на виброплатформу с круговыми вибрациями (шейкер Vibratax 100, Heidolph, Германия). Во всех экспериментах устанавливалась скорость круговой вибрации  $\sim 600 \text{ об/мин}$ , которая была оптимальной для встряхивания порошка и образования аэрозоля.

Для повышения разрешения формирования 2D- и 3D-объектов использовалась аэродинамическая фокусировка струи на принципах, описанных в работах [34, 35] и разработанных для нанесения металлических 2D-объектов методом холодного аэрозольного осаждения при атмосферном давлении. Для вакуумного аэрозольного осаждения было сконструировано и изготовлено фокусирующее сопло, направляющее основную часть сверхзвукового потока в область меньше  $500 \text{ мкм}$ . За пределами этой области покрытие не формировалось и можно рассматривать ее в качестве одиночного «пикселя» для формирования 2D- и 3D-объектов.

Подложки из жаростойкого сплава ВЖ-98 и титана ВТ1-0 при нанесении покрытия имели температуру вблизи комнатной. Для перемещения подложки и построения 2D-объектов в установке использовалась моторизованная X-Y-платформа с компьютерным управлением (Jiangxi Liansheng Technology Co., Ltd). Общая схема установки и ее внешний вид представлены на рис. 2.

Для напыления покрытий был использован коммерческий порошок диоксида циркония с  $8 \%$  мол.  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8YSZ).

Исходный порошок и полученные объекты исследовались методами оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии с рентгеновским микроанализом (микроскоп FEI Asprex Express). Микротвердость покрытия сразу после осаждения определялась на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке  $50, 100$  и  $200 \text{ г}$  по методу восстановления отпечатка с использованием четырехгранной пирамиды с квадратным основанием. Испытания производились в централь-

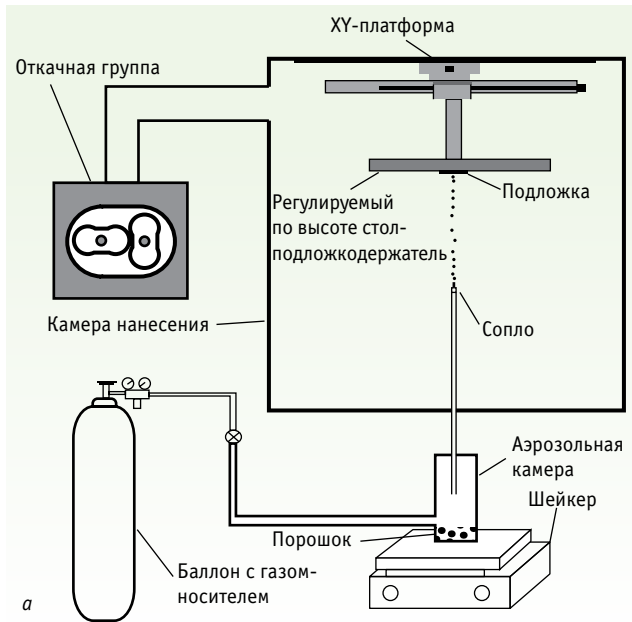


Рис. 2. Схема эксперимента (а) и фотография установки вакуумного аэрозольного осаждения (б)

ной части «пикселя», из которых потом строился 2D-объект. «Пиксель» напылялся при неподвижной платформе из порошка 8YSZ в течение 1 мин. За это время в центре области напыления формировалось покрытие толщиной ~ 20 мкм. Кроме того, определялась микротвердость обратной стороны подложки, на которую не воздействовала сверхзвуковая струя и не наносилось покрытие. Для испытаний на термический удар использовались образцы покрытия, нанесенные на сплав ВЖ98 (тот же «пиксель» толщиной 20 мкм).

Муфельная печь МП-2УМ предварительно разогревалась до температуры 950 °С. К образцу приваривалась точечной сваркой хромель-алюмелевая термопара, он помещался в длинную открытую

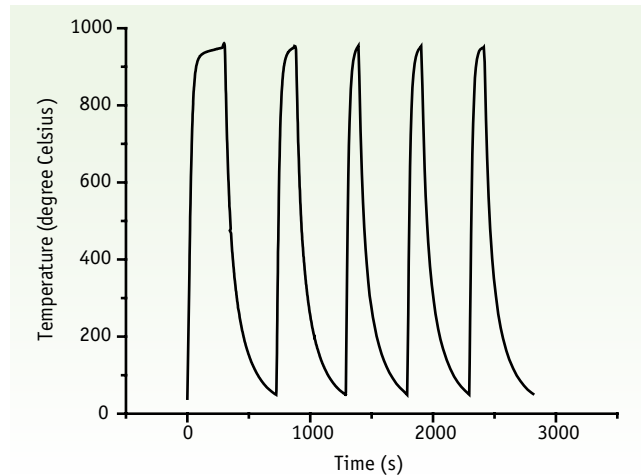
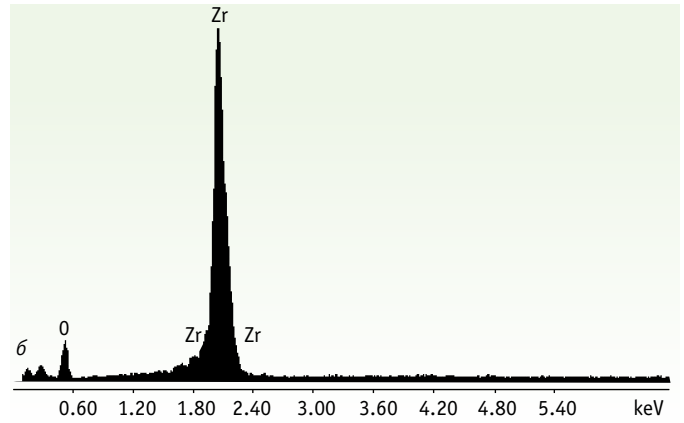
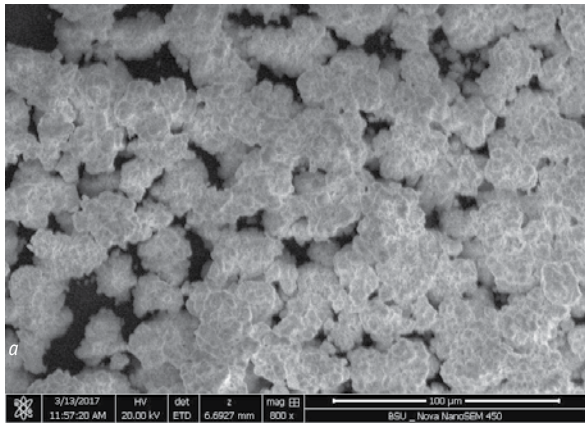


Рис. 3. Температура образца во время термических испытаний

кварцевую пробирку. Кварцевая пробирка с образцом последовательно помещалась в разогретую муфельную печь и охлаждалась в протоке воздуха. Зависимость температуры образца от времени в процессе термических испытаний представлена на рис. 3. Адгезия «пикселя» оценивалась по методике измерения прочности на отрыв с применением в качестве связки эпоксидной смолы (прочностью 20 МПа на разрыв).

На рис. 4 приведено электронно-микроскопическое изображение исходного порошка 8YSZ и данные микроанализа его элементного состава. Частицы порошка имеют размер порядка нескольких микрон и высокую склонность к агломерации, причем наблюдаются агломераты размером до 50 мкм. Из-за агломерации определить точный гранулометрический состав порошка было невозможно. Использование аэрозольной вихревой камеры для порошка с микронным размером частиц и крупными агломератами позволяет частично деагломерировать порошок и отсеять агрегированные частицы. В результате к соплу Лавыла подавался аэрозоль твердых частиц микронного размера, из которых на поверхности подложки формировалось покрытие.

Для определения микротвердости осажденного из аэрозольной струи слоя было сделано несколько уколов пирамидкой Виккерса в центральной части «пикселя» с различной нагрузкой. Точное определение микротвердости затруднено рельефом поверхности осажденного слоя (рис. 5), с другой стороны, при малой нагрузке (менее 100 г) подложка на число микротвердости не влияет. Полученное число микротвердости в центральной части покрытия как на ВЖ98, так и на титане ВТ1-0 составило  $HV_{100} \sim 1100$ , что близко к значениям микротвердости, характерным для спеченных из 8YSZ керамик (11,8 ГПа [36]) в массивном состоянии. Это значительно превышает



EDAX ZAF Quantification (Standardless)  
Element Normalized  
SEC Table: Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F	Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
O K	18,33	56,06	0,0241	1,1703	0,1122	1,0005	O K	112,02	16,49	2,58	6,84
Y K	9,67	5,32	0,0913	0,9430	1,0017	1,0000	Y K	43,43	29,85	5,63	1,46
ZrK	72,00	38,62	0,6780	0,9394	1,0023	1,0000	ZrK	254,91	28,22	1,67	9,03
Total	100,00	100,00									

Рис. 4. РЭМ-изображение порошка  $ZrO_2$  8%  $Y_2O_3$  (а), характеристический рентгеновский спектр (б). Химический состав, полученный из спектра, приведен в таблице внизу рисунка

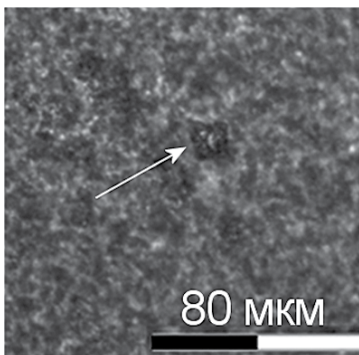


Рис. 5. Оптическое изображение результатов определения микротвердости на  $ZrO_2$  8%  $Y_2O_3$ . Стрелкой указан отпечаток пирамидки (нагрузка 100 г)

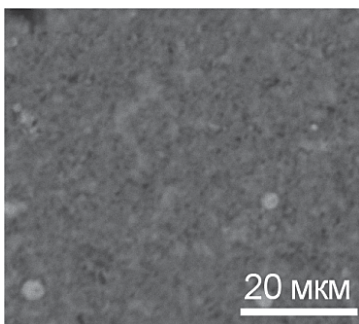


Рис. 6. Поверхность центральной части «пикселя» после пяти циклов быстрого нагрева и охлаждения 50–950 °C (РЭМ)

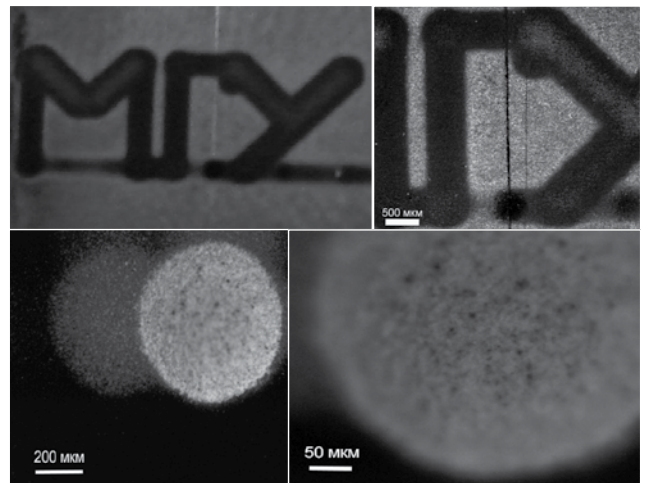


Рис. 7. Оптическое изображение символики МГУ, сформированное с использованием холодного аэрозольного осаждения в вакууме порошка 8YSZ

число микротвердости для обратной стороны подложки из жаропрочного сплава ВЖ98 ( $HV_{100} = 330$ ).

Адгезия 8YSZ к титану и ВЖ98 превышала прочность эпоксидной смолы (20 МПа) и разрыв происходил по эпоксидной связке.

Кроме высокой адгезии для высокотемпературных применений важна оценка стойкости

системы подложка – покрытие к термоударам. Для этого были проведены испытания по методике, описанной выше. На рис. 5 представлено изображение поверхности керамики, нанесенной на подложку из сплава ВЖ98 после пяти циклов ударного термического нагружения. Несмотря на существенное различие коэффициентов термического расширения (от  $12,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  при 100 °C до  $16,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  при 950 °C для ВЖ98 [37] и  $10-11 \cdot 10^{-6} K^{-1}$



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 1090 руб.

## ВНЕДРЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНДУСТРИИ 4.0.

Основы, моделирование  
и примеры из практики

*Под ред. Армина Рота*

Пер. с нем. под общей ред. А.В. Кострова  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 294 с.  
ISBN 978-5-94836-482-7

*Издание осуществлено при финансовой  
поддержке ПАО «Ростелеком»*

В книге представлены концепция, основные парадигмы развития, структура технологии Индустрии 4.0. В отличие от широко распространенного технократического прикладного метода изучения, издание позволяет выделить и целостно описать уровни стратегического, тактического и оперативного управления. Ключевым элементом при этом является процессная модель, описывающая действия на стратегическом и оперативном уровнях, а примеры практического применения Индустрии 4.0 в различных отраслях промышленности наряду с мнениями известных экспертов в области науки и производства вызовут интерес не только у новичков отрасли, но и у научных сотрудников, инженерно-технических работников и руководителей высшего и среднего звена.

Благодаря обширному глоссарию издание станет ценным справочным пособием по использованию основных положений и лучших практик Индустрии 4.0.

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphaera.ru](http://www.technosphaera.ru)

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: +7 (495) 956-33-46  
E-mail: [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru)  
[sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)





в этом интервале температур для керамик на основе диоксида циркония [38]), сохраняется единая структура покрытия после отжига, отслоения и трещины не образуются.

Таким образом, механические свойства керамики, полученной из сфокусированной струи аэрозоля без термической обработки, близки к свойствам массивных керамик, полученных прессованием под давлением в сотни МПа и последующим спеканием при температуре 1500 °С в течение 6 ч [36].

Для демонстрации возможности 2D-технологий керамических объектов с использованием холодного аэрозольного осаждения в вакууме был составлен алгоритм движения подложки, «печатающий» из отдельных «пикселей» символику Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ). Результаты напыления представлены на рис. 6. Как видно из рисунка, при создании керамического объекта достигнуто разрешение ~ 500 мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные преимущества и недостатки аддитивных технологий в материаловедческом плане при формировании композитов на основе металлических и керамических систем.

Предложено новое направление аддитивных технологий, связанное с ударной консолидацией высокоскоростных твердых частиц в вакууме, которое позволяет получать керамические 2D- и 3D-объекты при низких температурах осаждения без последующих отжигов. Использование фокусирующего сопла аксиальной симметрии позволяет избирательно наносить керамическое покрытие с разрешением 500 мкм.

Показана возможность формирования методом аэрозольного осаждения в вакууме из фокусирующего сопла твердых (HV100 ~ 1100) керамических слоев 8YSZ с высокой адгезией на жаропрочный сплав ВЖ98 и титан ВТ1-0. Малый размер частиц порошка (5 мкм) позволяет надеяться, что при совершенствовании газодинамической фокусировки струй возможно получение прямой печати керамических изделий с разрешением на порядок больше, чем получено в данной работе.

## ЛИТЕРАТУРА

- Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies Editors. David Ian Wimpenny, Pulak M. Pandey, L. Jyothish Kumar © Springer Science+Business Media Singapore 2017, ISBN 978-981-10-0811-5.
- Каблов Е. Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России // СПб: ВИАМ СПб, 2013.
- Colley D.P. Instant prototypes // Mechanical Engineering. 1988. Т. 110. № 7. С. 68.
- Herzog D. et al. Additive manufacturing of metals // Acta Materialia. 2016. Т. 117. С. 371–392.
- Hirt L. et al. Additive Manufacturing of Metal Structures at the Micrometer Scale // Advanced Materials. 2017.
- Gorsse S. et al. Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti–6Al–4V and high-entropy alloys // Sci. Technol. Adv. Mater. 2017 Т. 18. С. 584–610.
- Cunningham R. et al. Evaluating the effect of processing parameters on porosity in electron beam melted Ti–6Al–4V via synchrotron X-ray microtomography // JOM. 2016. Т. 68. № 3. С. 765–771.
- Cunningham R. et al. Synchrotron-Based X-ray Microtomography Characterization of the Effect of Processing Variables on Porosity Formation in Laser Power-Bed Additive Manufacturing of Ti–6Al–4V // JOM. 2017. С. 1–6.
- Wu M.W., Lai P.H., Chen J.K. Anisotropy in the impact toughness of selective laser melted Ti–6Al–4V alloy // Materials Science and Engineering: A. 2016. Т. 650. С. 295–299.
- Wu M.W., Lai P.H. The positive effect of hot isostatic pressing on improving the anisotropies of bending and impact properties in selective laser melted Ti–6Al–4V alloy // Materials Science and Engineering: A. 2016. Т. 658. С. 429–438.
- Колобов Ю. П. Механические и физико-химические свойства поверхностно-модифицированных наноструктурированных металлических материалов // Сб. трудов 8-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» – ПРОСТ 2016. 19–21 апреля 2016 г. – М.: НИТУ «МИСиС». 244 с.
- Travitzky N. et al. Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials // Advanced Engineering Materials. 2014. Т. 16. № 6. С. 729–754.
- Vorndran E., Moseke C., Gbureck U. 3D printing of ceramic implants // MRS Bulletin. 2015. Т. 40. № 2. С. 127–136.
- Swee Leong Sing, Wai Yee Yeong, Florencia Edith Wiria, Bee Yen Tay, Ziqiang Zhao, Lin Zhao, Zhiling Tian, Shoufeng Yang. Direct selective laser sintering and melting of ceramics: a review // Rapid Prototyping Journal. 2017. Vol. 23. Is. 3. P. 611–623, <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2015-0178>.
- Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Метод «холодного» газодинамического напыления // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 5. С. 1062–1065.
- Папырин А. Н., Жуков М. Ф., Панин В. Е. Новые материалы и технологии: теория и практика упроч-



## ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2 600 руб.

Ян Гибсон, Давид Розен, Brent Стэкер

### ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

Перевод с англ. книги издательства «Springer»  
под ред. д.ф.-м.н., проф. И.В. Шишковского  
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с. ISBN 978-5-94836-447-6

#### *Предисловие к русскому изданию*

Я был очень рад, когда услышал, что профессор Игорь Шишковский будет научным редактором русского издания нашей монографии. Обладая многолетним и богатым опытом в данной области, этот известный ученый и педагог сможет гарантировать как техническую точность, так и ясность изложения. Поскольку русский язык является одним из самых распространенных языков в мире, этот перевод позволит значительно расширить аудиторию, которая сможет впервые получить доступ к данной информации. Я надеюсь, что исследователи, студенты и преподаватели найдут эту книгу прекрасным дополнением к своей коллекции, и что она расширит их познания в быстро развивающихся областях аддитивных технологий.

Брент Стэкер  
профессор, университет Луисвилля (Кентукки, США)

#### Содержание

##### *Предисловие*

**Глава 1.** Введение и описание основных принципов

**Глава 2.** Развитие технологий АП

**Глава 3.** Общая последовательность процесса АП

**Глава 4.** Процесс фотополимеризации в ванне

**Глава 5.** Плавление порошков в сформированном слое

**Глава 6.** Экструзионные системы

**Глава 7.** Распыление материала методом струйной печати

**Глава 8.** Распыление связующего для струйной печати

**Глава 9.** Процессы ламинирования листовых (слоистых) материалов

**Глава 10.** Процессы направленного энерговклада

**Глава 11.** Технологии прямой записи

**Глава 12.** Преимущества бюджетных систем АП

**Глава 13.** Руководство по выбору процесса

**Глава 14.** Постобработка

**Глава 15.** Задачи программного обеспечения в АП

**Глава 16.** Прямое цифровое производство

**Глава 17.** Проектирование для АП

**Глава 18.** Быстрое изготовление инструмента

**Глава 19.** Применения АП

**Глава 20.** Возможности для бизнеса и будущее АП



**ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ:  
[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)**

#### Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91

По факсу: +7 495 956-33-46

E-mail: [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru)

[sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)

- нения материалов в экстремальных процессах. — ВО «Наука», 1992.
17. **Moridi A.** et al. Cold spray coating: review of material systems and future perspectives // *Surface Engineering*. 2014. Т. 30. № 6. С. 369–395.
  18. **Champagne V., Helfritch D.** The unique abilities of cold spray deposition // *International Materials Reviews*. 2016. Т. 61. № 7. С. 437–455.
  19. **Hoey J.M., Robinson M.J., Sailer R.A.** Micro Cold Spray printed top metallization layer for solar cells // *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014 IEEE 40th // IEEE*, 2014. С. 2491-2494.
  20. **Hoey J.M.** et al. A review on aerosol-based direct-write and its applications for microelectronics // *Journal of Nanotechnology*. 2012. Т. 2012.
  21. **Schulz D.L.** et al. Collimated Aerosol Beam Deposition: Sub-5  $\mu\text{m}$  Resolution of Printed Actives and Passives // *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2010. Т. 33. № 2. С. 421–427.
  22. **Akedo J. and Lebedev M.** Microstructure and Electrical Properties of Lead Zirconate Titanate (Pb(Zr52/Ti48)O3) Thick Film deposited with Aerosol Deposition Method // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38, 5397–401 (1999).
  23. **Akedo J.** Room temperature impact consolidation (RTIC) of fine ceramic powder by aerosol deposition method and applications to microdevices // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2008. Т. 17. № 2. С. 181–198.
  24. **Hahn B.D.** et al. Preparation and in vitro characterization of aerosol-deposited hydroxyapatite coatings with different surface roughnesses // *Applied Surface Science*. 2011. Т. 257. № 17. С. 7792–7799.
  25. **Hanft D.** et al. An overview of the aerosol deposition method: Process fundamentals and new trends in materials applications // *J. Ceram. Sci. Technol.* 2015. Т. 6. № 3. С. 147–182.
  26. **Piechowiak M.A.** et al. Growth of dense  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  MAX phase films elaborated at room temperature by aerosol deposition method // *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Т. 34. № 5. С. 1063–1072.
  27. **Akedo J.** Aerosol Deposition of Ceramic Thick Films at Room Temperature-Densification Mechanism of Ceramic Layer, *J. Am. Ceram. Soc.* 2006. 89(6). P. 1834–1839.
  28. **Пуха В.Е., Колобова А.Ю., Колобова Е.Г., Овсянников Н.А., Манохин С.С.** Наноструктурные и нанокомпозитные покрытия на основе гидроксиапатита, сформированные при помощи сверхзвуковой струи в вакууме. 4th International Conference «New Functional Materials and High Technology» 4–9 July 2016 Tivat, Montenegro Abstracts, p. 154.
  29. **Пуха В.Е., Колобов Ю.Р.** «Консолидация порошковых систем в условиях локального разогрева: от градиентных структур к 2D- и 3D-технологиям». Программа научно-технической конференции «Современные электроимпульсные методы и технологии консолидации композиционных материалов: проблемы и перспективы». — М.: ВИАМ (12.10.2016).
  30. **Пуха В.Е., Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Клименко Д.Н.** Основы 2D и 3D технологий высокотемпературных керамик с использованием сверхзвуковых струй // III Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» 23.03.2017. Сб. трудов III Международная конференция «Аддитивные технологии: настоящее и будущее».
  31. **Sankar V.** Thermal Barrier Coatings Material Selection, Method of Preparation and Applications-Review // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2014. Т. 3. № 2. С. 510.
  32. **Choi J.J.** et al. Microstructural evolution of YSZ electrolyte aerosol-deposited on porous NiO-YSZ // *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Т. 32. № 12 С. 3249–3254.
  33. **Khor K.A.** et al. Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed HA/YSZ/Ti–6Al–4V composite coatings // *Biomaterials*. 2004. Т. 25. № 18. С. 4009–4017.
  34. **Akhatov I.S.** et al. Aerosol focusing in micro-capillaries: Theory and experiment // *Journal of aerosol science*. 2008. Т. 39. № 8. С. 691–709.
  35. **Bhattacharya S.** et al. Aerosol flow through a converging-diverging micro-nozzle // *Nonlinear Engineering*. 2013. Т. 2. № 3–4. С. 103–112.
  36. **Сирота В.В., Груздева Е.В., Иванисенко В.В.** Влияние давления прессования на структуру и механические свойства керамики  $\text{ZrO}_2 - 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$  // *Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика*. 2012. № 11(130). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-davleniya-pressovaniya-na-strukturu-i-mehhanicheskie-svoystva-keramiki-zro2-8-y2o3>.
  37. URL: <http://saturn-sv.ru/khn60vt-ei868>
  38. URL: <http://chemind-tec.ru/catalogue/2/30>

---

**ПУХА Владимир Егорович** –  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Института  
проблем химической физики РАН

**ОВСЯНИКОВ Николай Александрович** –  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, студент



17-я международная выставка



# ЛЕС ДРЕВ МАШ

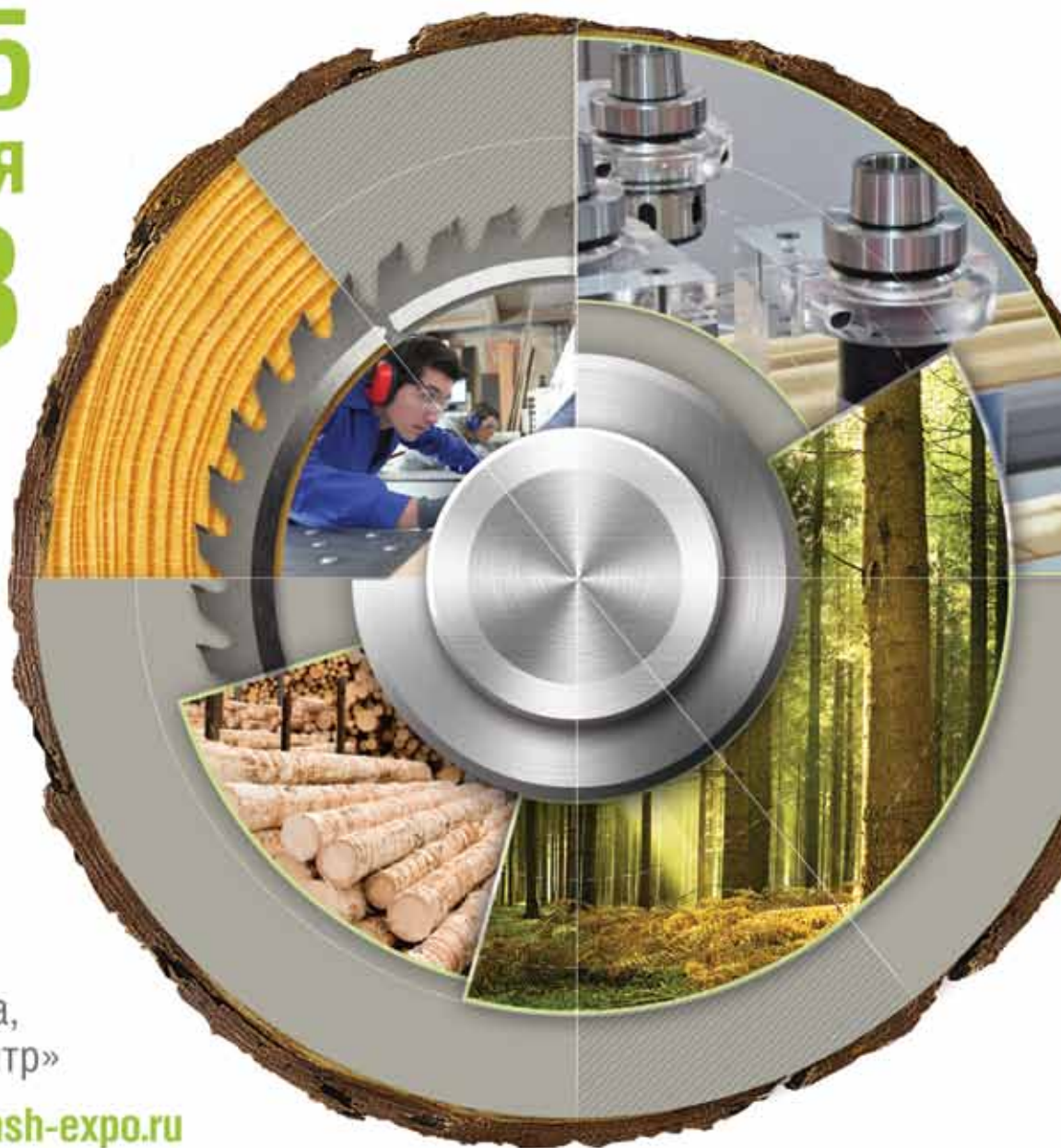
Машины,  
оборудование,  
технологии для

Лесозаготовительной  
промышленности

Деревообрабатывающей  
промышленности

Мебельной  
промышленности

22-25  
октября  
2018



Реклама +12



Россия, Москва,  
ЦВК «Экспоцентр»

[www.lesdrevmash-expo.ru](http://www.lesdrevmash-expo.ru)

Организатор:



Соорганизатор:



Союз лесопромышленников и лесозаготовителей России

При поддержке:

• Министерства промышленности и торговли РФ

• Европейской федерации производителей  
деревообрабатывающего оборудования EUMABOIS

Под патронатом Торгово-промышленной палаты РФ

Официальный партнер российского раздела: ОАО «Центрлесэкспо»

