

УДК: 66.017:66.018

## Высокогидрофобные керамические покрытия, получаемые методом плазменного напыления порошковых материалов\*

И.П. Гуляев, В.И. Кузьмин, О.Б. Ковалев

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: kovalev@itam.nsc.ru

Методом воздушно-плазменного напыления порошковых и суспензионных материалов получены гидрофобные и высокогидрофобные покрытия из оксида циркония. Предлагаемый метод и разработанное оборудование позволяют получать наноструктурированные поверхности, обладающие водоотталкивающими свойствами. Высокая гидрофобность покрытия достигается путем создания иерархической текстуры его поверхности, получаемой комбинированным методом плазменного напыления порошковых и жидкофазных материалов. Развитая поверхность покрытия на основе оксида циркония  $ZrO_2$ , полученная методом последовательного плазменного напыления микропорошков (с размерами микрочастиц 20–40 мкм) и жидких материалов в виде суспензий (с размером наночастиц 50–100 нм), позволяет повысить угол смачивания водой до 145 градусов.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, суспензионное плазменное напыление, диагностика двухфазного потока,  $ZrO_2$ , бимодальная структура поверхности, угол смачивания, супергидрофобность, высокогидрофобное покрытие.

### Введение

Гидрофобные покрытия востребованы во многих отраслях промышленности. Среди наиболее важных задач, решаемых с помощью гидрофобных покрытий, можно выделить защиту элементов летательных аппаратов от обледенения при полетах в условиях облачности, повышение коэффициентов теплоотдачи и испарения на теплообменниках тепловых машин, повышение коррозионной стойкости элементов машин, работающих в условиях высокой влажности, изготовление самоочищающиеся поверхности автомобильных кузовов и многое другое.

Гидрофобные характеристики поверхностей определяются контактным углом смачивания  $\theta$  между поверхностью материала и касательной к границе капли воды в точке контакта (рис. 1). Если угол  $\theta$  меньше  $90^\circ$  — материал гидрофильный, то есть смачивается водой; если  $\theta$  изменяется в пределах от  $90^\circ$  до  $150^\circ$  — материал гидрофобный;

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 18-08-01152, 19-42-540008) и частично в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610120-2).

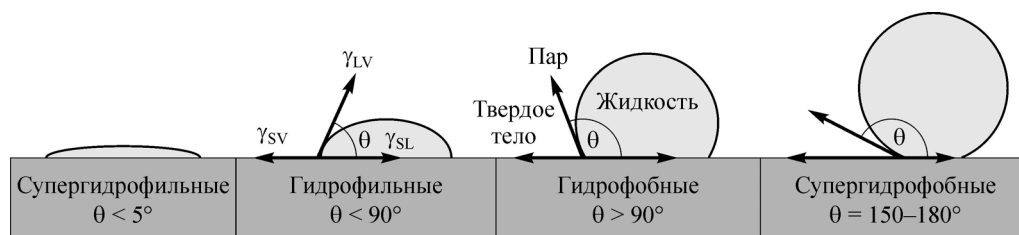


Рис. 1. Схема гидрофильных, гидрофобных и супергидрофобных поверхностей.

$\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LV}$ ,  $\gamma_{SV}$  — силы межфазного и поверхностного натяжения в точке контакта трех фаз: твердое тело–жидкость (SL), жидкость–газ (LV) и твердое тело–газ (SV) соответственно.

и, наконец, если угол  $\theta$  больше  $150^\circ$  (форма капли близка к сфере) — материал супергидрофобный, то есть капли не закрепляются на материале, а легко удаляются при слабом воздействии (наклоном поверхности или потоком воздуха). В настоящее время с развитием нано- и микротехнологий стало возможным получение покрытий, обладающих супергидрофобными свойствами.

Для придания гидрофобных свойств материалам обычно используются специальные покрытия на жидкофазной или полимерной основе, получаемые в основном химическими методами, например, путем электролитического оксидирования [1], электрохимической обработкой [2], полимеризацией [3] и др. Такие покрытия имеют, как правило, низкие прочностные свойства, недостаточную стойкость к механическим и абразивным воздействиям и не годятся для длительного использования, так как по истечении определенного времени их действие заканчивается.

В последнее время внимание исследователей привлекает проблема получения прочных покрытий на металлической основе, имеющих устойчивые водоотталкивающие свойства. Появились методы, суть которых заключается в формировании такого рельефа поверхности, который минимизирует площадь контакта с жидкостью и тем самым повышает водоотталкивающие свойства поверхности. В исследовании [4] образцы металлов из латуни, титана и платины облучались фемтосекундными импульсами титан-сапфирового лазера, и были получены поверхности с иерархической нано- и микроструктурой, аналогичной цветку лотоса, которая обладала супергидрофобными свойствами. В работе [5] путем лазерного наносекундного текстурирования поверхности были получены супергидрофобные покрытия на нержавеющей стали с высокими функциональными свойствами для использования в сильно нагруженных гидравлических системах.

Оксидные керамики, в отличие от широко распространенных полимерных материалов, распыляемых на поверхность, обладают высокой механической прочностью, твердостью, стойкостью к абразивным нагрузкам и высоким температурам. Однако большинство керамических (и металлических) материалов обладают гидрофильными характеристиками: контактный угол смачивания мал и составляет  $0 \div 10$  градусов. Среди этих материалов выделяются оксиды редкоземельных металлов (рис. 2), которые обладают гидрофобными характеристиками за счет специфической структуры электронных оболочек атомов (незаполненная  $4f$  орбиталь, экранированная полной оболочкой  $5s^2p^6$ ). Угол смачивания воды для них составляет  $100 \div 110$  градусов [6].

Для быстрого изготовления супергидрофобных покрытий из керамики авторами [6] было предложено использовать метод плазменного напыления жидкофазных оксидов редкоземельных элементов, которые сами по себе уже обладают природными гидрофобными свойствами. В работе [7] путем вакуумного плазменного напыления жидкофазного нитрата иттербия  $Yb(NO_3)_3$  были получены супергидрофобные покрытия оксида иттербия  $Yb_2O_3$ . Авторами [8] с помощью суспензионного газотермического напыления (SHVOF — Suspension High Velocity Oxy-Fuel) был разработан высокопроизводительный

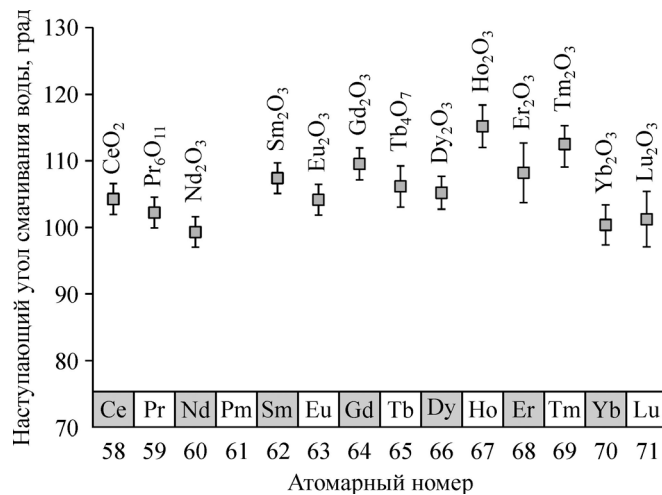


Рис. 2. Контактные углы смачивания оксидов редкоземельных металлов — лантаноидов [6].

метод получения супергидрофобных керамических (из оксида церия — CeO<sub>2</sub>) поверхностей с уникальной микро- и наноразмерной иерархической структурой. В работах [6–9] супергидрофобность поверхностей достигалась не только за счет формирования иерархической структуры, но в основном благодаря природным водоотталкивающим свойствам используемых оксидов редкоземельных металлов, стоимость которых очень высока.

В настоящей работе отдается предпочтение более дешевым и доступным материалам, не обладающим природной гидрофобностью. Особенность предлагаемого способа заключается в том, что водоотталкивающие свойства придаются поверхности не дополнительными средствами или за счет природных свойств материала, а исключительно самой текстурой его поверхности, получаемой комбинированным методом плазменного напыления порошковых и жидкофазных материалов.

## 1. Напылительное оборудование и материалы

### 1.1. Установка «Термоплазма 50» и плазмотрон «ПНК-50»

Экспериментальные работы по нанесению покрытий проводились на установке «Термоплазма 50-03», оснащенной электродуговым плазмотроном «ПНК-50». Плазмотрон «ПНК-50» выполнен по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой [10, 11]. Его электрическая мощность может варьироваться в диапазоне 30–90 кВт (ток 50–300 А, напряжение дуги до 300 В), выходной диаметр сопла составляет от 6 до 12 мм. Особенностью данного плазмотрона является узел кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой, обеспечивающей высокую эффективность инъекции материала в плазменную струю [12]. Плазмотрон рассчитан на работу как в дозвуковом (ламинарном, турбулентном), так и сверхзвуковом режиме истечения плазменной струи (рис. 3). В зависимости от расхода плазмообразующего воздуха, тока дуги плазмотрона и диаметра сопла температура потока может составлять 2,5 – 6 тысяч градусов, скорость — 400 – 2400 м/с.

В представленной работе для напыления порошковых материалов использовались дозвуковые режимы напыления (диаметр сопла  $d_{\text{nozzle}} = 10,8$  мм, скорость потока 500 – 1000 м/с), которые обеспечивали полное плавление керамических частиц размером 20–40

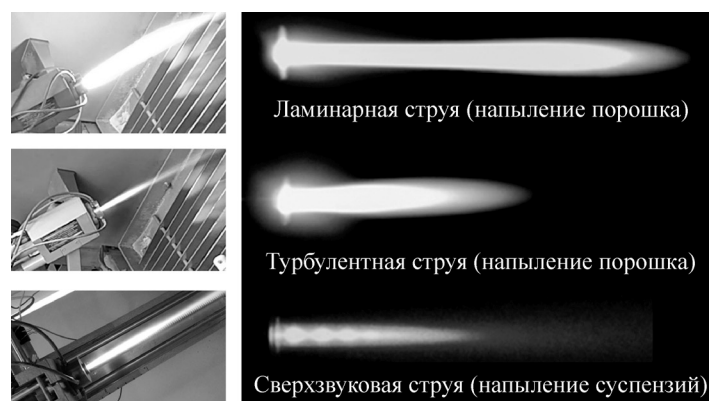


Рис. 3. Демонстрация работы воздушного плазмотрона ПНК-50 в различных режимах: дозвуковом (ламинарном, турбулентном) и сверхзвуковом.

Ламинарный — диаметр сопла 10 мм, расход плазмообразующего газа 1,25 г/с,  
 турбулентный — диаметр сопла 8 мм, расход плазмообразующего газа 2 г/с,  
 сверхзвуковой — диаметр сопла 6 мм, расход плазмообразующего газа 5 г/с.

и 40 – 63 мкм. При напылении с использованием жидкофазных материалов (суспензий и растворов прекурсоров) покрытие формируется из частиц размером 0,1 – 3 мкм, обладающих малой инерцией и быстро теряющих скорость в пограничном слое при натекании струи на подложку. Поэтому для их напыления используют режимы, обеспечивающие высокую скорость частиц и число Стокса  $St > 1$  [13]. В данной работе использован сверхзвуковой режим работы плазмотрона с  $d_{nozzle} = 6$  мм и скоростью потока 1800–2100 м/с.

В таблице представлены основные характеристики режимов напыления, использованных для нанесения покрытий  $ZrO_2$ . Среднемассовые значения скорости  $V_f$  и температуры  $T_f$  плазменного потока на срезе сопла плазмотрона получены на основе оценки мощностных характеристик работы плазмотрона с помощью методики, описанной в работах [13, 14]. Средние значения скорости  $V_p$  и температуры  $T_p$  частиц материала на выбранной дистанции напыления измерялись с использованием диагностической системы

Таблица

Характеристики напылительных потоков и покрытий, полученных при различных режимах работы плазмотрона

Режим	$d_{nozzle}$ , мм	$G$ , г/с	$T_f$ , К	$V_f$ , м/с	$T_p$ , К	$V_p$ , м/с	$Ra$ , мкм	$\theta$ , град <sup>1</sup>
Мелкий порошок: 20 – 40 мкм								
F1	10	1,25	$6,5 \cdot 10^3$	480	3330	175	10,9	$52 \pm 8,2$
F2	10	1,5	$6,4 \cdot 10^3$	560	3280	177	13,4	$35 \pm 12,1$
F3	8	2,0	$5,7 \cdot 10^3$	940	2880	208	12,3	$18 \pm 8,4$
F4	8	2,5	$5,3 \cdot 10^3$	1040	2790	215	22,4	$142 \pm 2,7$
Крупный порошок: 40 – 63 мкм								
C1	10	1,25	$6,5 \cdot 10^3$	480	3120	117	13,0	$12 \pm 4,2$
C2	10	1,5	$6,4 \cdot 10^3$	560	3050	135	16,2, 18,1	$85 \pm 4,7,$ $95 \pm 6,9$
Суспензия								
S1, S2, S3	6	2,0	$5,8 \cdot 10^3$	1800	–	790	14,8, 16,1, 17,9	$141 \pm 3,1,$ $145 \pm 3,6,$ $135 \pm 3,9$
S*	6	3,0	$3,6 \cdot 10^3$	2100	–	1050	–	–

<sup>1</sup> Значение краевого угла смачивания представлено в виде  $\bar{\theta} \pm SD$ , где  $\bar{\theta}$  — среднее значение, SD — стандартное отклонение по серии из четырех измерений.

Юна [15, 16]. Дистанция напыления составляла 150 – 200 мм при напылении порошков, и 50 – 60 мм — при напылении суспензий. Сверхзвуковой режим плазмотрона S\* использовался только для измерения скорости частиц; покрытие в данном режиме не наносилось.

На первой стадии были получены порошковые покрытия из мелкого (F1 – F4) и крупного порошков (C1, C2). На второй стадии на образцы покрытий F1, F2 и C1 был нанесен дополнительный слой суспензионного напыления толщиной 10–15 мкм (покрытия S1, S2, S3) для изучения влияния субмикронного рельефа на гидрофобные характеристики покрытий.

## 1.2. Материалы для напыления

В качестве материала для нанесения оксидных порошковых покрытий использовался коммерческий порошок  $ZrO_2$ , стабилизированный 7 % масс  $Y_2O_3$  (производство ООО «Т:СП», г. Екатеринбург), двух гранулометрических фракций: 20 – 40 мкм (покрытия F1 – F4) и 40 – 63 мкм (покрытия C1, C2). Изображения частиц порошка, выполненные сканирующим электронным микроскопом, представлены на рис. 4а, 4б.

Суспензия для напыления была приготовлена на основе этилового спирта из порошка  $ZrO_2/7\%Y_2O_3$  с номинальным размером частиц 30 – 60 нм, при этом дисперсant не использовался, а для подавления агломерирования частиц применялась ультразвуковая обработка. Массовая концентрация оксида в суспензии составляла 20 %. На рис. 4с показано распределение по размерам частиц приготовленной суспензии, полученное с использованием анализатора LS 13 320 (Beckman Coulter). Видно, что максимальный размер частиц в суспензии достигает 300 – 400 нм, что свидетельствует о недостаточности мер, принятых для предотвращения агломерирования твердой фазы.

В качестве основы для напыления использовались цилиндрические подложки диаметром 25 мм и толщиной 8 мм. Перед нанесением оксидного покрытия основу промывали ацетоном, подвергали пескоструйной обработке и наносили интерметаллидный (NiCrAlY) подслоя порошка ПНХ20К20Ю13 (производство ООО «Т:СП», г. Екате-

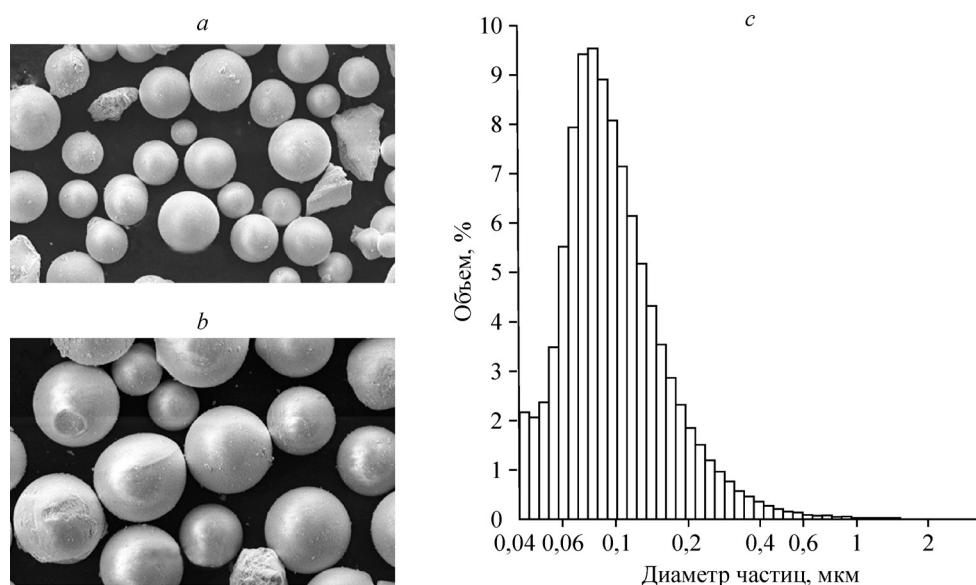


Рис. 4. Внешний вид порошков оксида циркония  $ZrO_2$  фракций 20 – 40 мкм (а) и 40 – 63 мкм (б), а также массовое (объемное) распределение по размерам частиц нанопорошка  $ZrO_2$ , использованного для приготовления суспензии.

ринбург) толщиной 150 мкм. Толщина порошковых покрытий  $ZrO_2$  F1–F4 и C1, C2 составляла 250–300 мкм. Суспензионные покрытия S1, S2, S3 толщиной 10–15 мкм наносились поверх порошковых покрытий F1, F2, C1 для изменения рельефа поверхности. После нанесения покрытия и полного остывания подложек производилась продувка образцов сжатым воздухом, протирка с ацетоном и повторная продувка сжатым воздухом.

Для анализа структуры поверхности полученных покрытий были приготовлены попечечные шлифы образцов с использованием автоматических отрезного и полировально-шлифовальных станков. Полученные шлифы фотографировались на растровом электронном микроскопе EVO50 XVP (Carl Zeiss). Для определения шероховатости поверхности образца использовался собственный программный пакет обработки изображений, который позволяет распознавать на изображениях границы поверхности покрытия.

Измерения равновесного контактного угла смачивания методом капли проводились через 3–6 недель после нанесения покрытий с использованием лабораторной установки, состоящей из платформы с микрометрической регулировкой горизонтального уровня (для размещения образцов покрытий) и цифровой видеокамеры Ximea MC050CG. Платформа и камера размещались на оптической скамье, для регистрации формы капель использовался макрообъектив, обеспечивающий масштаб съемки 8 мкм/пиксель (при ширине кадра 20 мм). Для формирования капель использовался шприц, зафиксированный на штативе таким образом, что кончик иглы располагался на высоте 8 мм от поверхности покрытия. Регистрация изображения проводилась после полной остановки движения жидкости, через 20 секунд после нанесения капли. Контактный угол смачивания  $\theta$  определялся с помощью программы MB-Ruler по цифровым изображениям. Для каждого покрытия проводилась серия из четырех измерений, при этом капли размещались на различных участках покрытия. В таблице представлены средние значения измеренных значений  $\theta$ , а также стандартное отклонение для каждого покрытия. Специальная промывка образцов после напыления покрытий в спирте или воде перед измерениями контактного угла смачивания не осуществлялась. После каждого измерения проводилась продувка поверхности покрытия сжатым воздухом.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Измерения скорости и температуры частиц

Для понимания различий в режимах напыления покрытий важнейшее значение имеет информация о скорости и температуре напыляемых частиц. На рис. 5 показаны результаты измерения средних значений скорости и температуры частиц вдоль оси струи. При использовании мелкого порошка размером 20 – 40 мкм средняя скорость частиц находится на уровне 200 м/с в режиме F2 (сопло диаметром 10 мм) и на уровне 300 м/с в режиме F3 (сопло диаметром 8 мм). Эти значения скорости частиц сохраняются практически до дистанции 200 мм и лишь затем начинают снижаться. Средняя температура частиц в режиме F2 снижается с 3500 до 2800 К на дистанциях 100–200 мм от выхода плазмотрона. В режиме F3 средняя температура частиц составляет лишь около 2900 К на дистанции 50 мм, что связано с более низкой температурой плазмы (см. таблицу), при этом к дистанции 200 мм температура частиц снижается всего на 300 К, что связано с их более высокой скоростью по сравнению с режимом F2.

Условия суспензионного напыления представляют серьезные трудности для проведения измерений в связи с малыми размерами (0,1 – 5 мкм) и высокими скоростями (выше 1000 м/с) частиц, а также интенсивным излучением плазмы на типичных дистанциях напыления (50–100 мм от сопла). По этой причине измерений температуры частиц

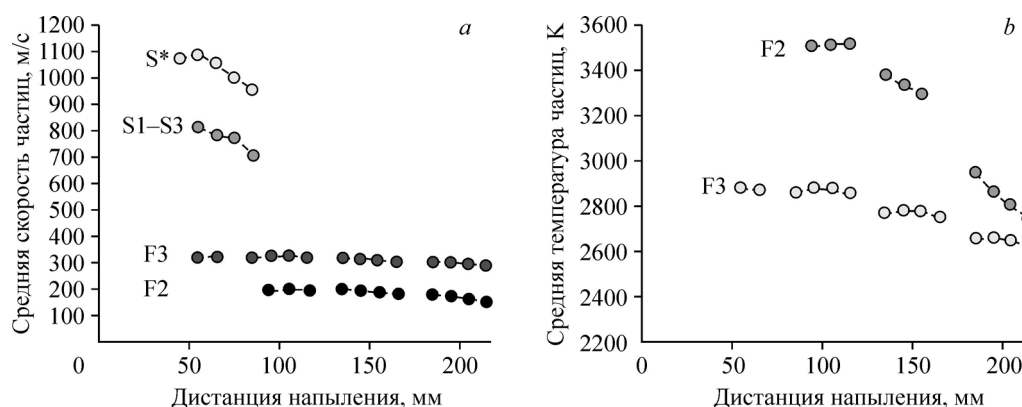


Рис. 5. Результаты измерения скорости и температуры напыляемых частиц  $ZrO_2$  при использовании порошка размером 20 – 40 мкм (F2, F3), а также суспензий (S1 – S3).

не проводилось. На рис. 5а видно, что скорость частиц в режиме S1 (сопло диаметром 6 мм) составляет 700–800 м/с, а при увеличении расхода газа в режиме  $S^*$  возрастает до 1000–1100 м/с. Однако последний режим не использовался для напыления, так как в нём покрытие не формировалось, вероятно, вследствие существенного снижения температуры частиц.

Нужно подчеркнуть, что измеренные значения скорости частиц  $ZrO_2$  при использовании суспензий, вероятно, занижены вследствие того, что диагностическая система регистрировала лишь наиболее крупные частицы размером 1–5 мкм. Мелкие капли, имеющие более высокую скорость, не попали в результаты измерений.

## 2.2. Шероховатость и гидрофобные характеристики поверхности

На рис. 6 показаны микрофотографии шлифов полученных порошковых покрытий, которые использовались для определения шероховатости  $Ra$ . Граница поверхности, полученная с помощью анализа изображений, показана светло-серой линией. Для каждого из полученных покрытий было проведено измерение контактного угла смачивания  $\theta$  при размещении на поверхности материала капле воды диаметром 3 мм (рис. 6, справа). Результаты измерения шероховатости и угла  $\theta$  представлены в таблице.

Шероховатость порошковых покрытий изменяется в интервале  $Ra = 10,9 – 22,4$  мкм. На рис. 7 приведено сопоставление шероховатости полученных покрытий и угла смачивания водой. Видно, что наблюдается тенденция увеличения угла смачивания с ростом параметра  $Ra$ . Граница раздела гидрофобных и гидрофильных покрытий ( $\theta = 90^\circ$ ) примерно соответствует значению  $Ra = 15$  мкм. Гидрофобные покрытия характеризуются малым разбросом угла смачивания в серии из 4 измерений в различных местах поверхности: для образцов F4, S1 – S3 стандартное отклонение  $\theta$  составляет 3–4 градуса. Для гидрофильных покрытий этот показатель выше — 6 – 12 градусов. Максимальный угол смачивания  $\theta = 142^\circ$  получен на покрытии F4 при максимальном значении  $Ra = 22,4$  мкм. Можно отметить, что покрытие F4 с максимальной величиной шероховатости получено с использованием мелкого (20 – 40 мкм), а не крупного (40 – 63 мкм) порошка. Более грубая структура поверхности F4, вероятно, связана с низкой температурой напыляемых частиц, которая приводит к меньшей их деформации при соударении с основой. Вследствие этого формируется более пористое и шероховатое покрытие.

Рельеф покрытий, полученных с использованием порошков, имеет следующий микромасштаб: типичные расстояния между выступами на поверхности составляют десятки микрометров, а высота таких выступов — 10 – 15 мкм (рис. 6). Для формирова-

ния более мелкого масштаба рельефа покрытий использовалось напыление суспензионного материала. Для этого на покрытия F1, F2, C1 был нанесен второй слой материала суспензионным методом, в результате были получены образцы S1, S2, S3. Режим суспензионного напыления во всех случаях был одинаковым.

На рис. 8 показана типичная микроструктура суспензионного покрытия (на стальной основе). Толщина напыленного слоя составляет 10 – 15 мкм. Рельеф поверхности такого покрытия повторяет крупномасштабную структуру своей основы. Однако на рис. 8*b*, 8*c* хорошо видно, что суспензионные покрытия сформированы преимущественно частицами материала размером 0,1 – 2 мкм, за счет которых поверхность покрытий приобретает дополнительный субмикронный масштаб рельефа. Такое изменение поверхности привело к значительному повышению угла смачивания покрытий — до  $\theta = 135 - 145^\circ$  (рис. 9*a*). Также на рис. 9*b* показано, что полученные высокие значения контактных углов смачивания сохраняются для капель воды различного размера (от 1 до 12 мм и более). На рис. 9*c* представлена кинограмма процесса соударения с наклонной поверхностью гидрофобного покрытия капли размером 2 мм, падающей с высоты 65 мм. После соударения капля не смачивает поверхность и отскакивает на высоту 7,5 мм.

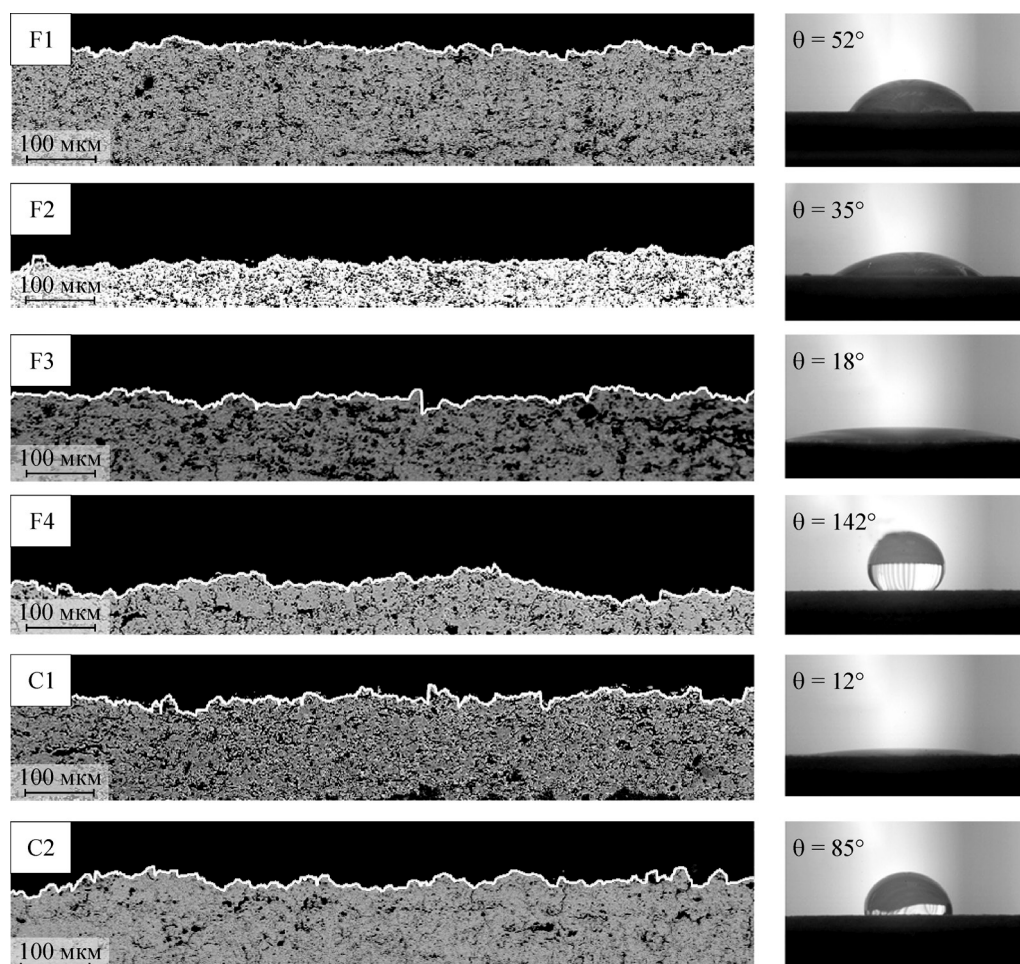


Рис. 6. Изображения поперечного шлифа (слева) и равновесного положения капли воды (справа) на поверхности порошковых покрытий F1–F4 и C1–C2.



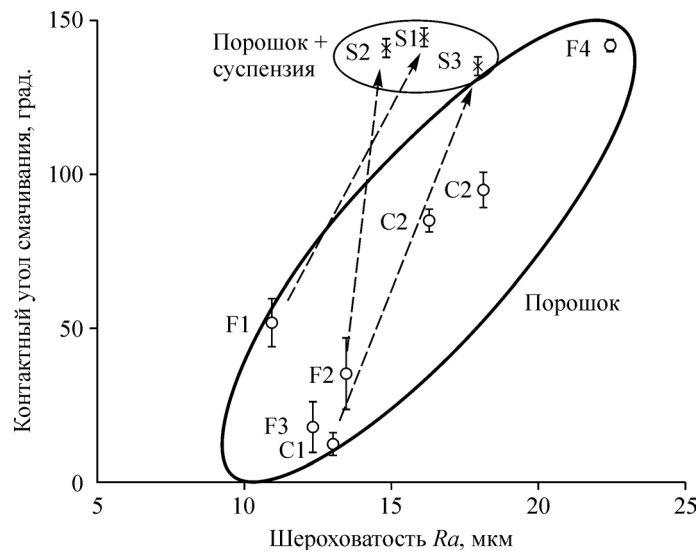


Рис. 7. Зависимость контактного угла смачивания воды от шероховатости покрытий, полученных порошковым напылением (F1–F4) и последовательным напылением порошка и суспензии (S1–S3).

Вертикальные планки обозначают величину стандартного отклонения измеренных углов смачивания.

Таким образом, воздушно-плазменное напыление микрочастиц (размерами до 100 мкм) обеспечивает начальную декамикронную структуру покрытия, а последующее суспензионное напыление создает более мелкий, микро- и субмикромасштаб поверхности, который повышает угол смачивания покрытий. Преимуществом предлагаемого способа получения высокогидрофобных покрытий является его высокая производительность (на уровне 0,3 – 0,5 м<sup>2</sup>/мин) по сравнению с другими методами. Например, при формировании гидрофобной поверхности лазерной гравировкой [4, 5] производительность процесса составляет шесть квадратных сантиметров в час, что на несколько порядков ниже производительности плазменного напыления.

### Заключение

Разработана технология воздушноплазменного напыления оксида циркония с наноструктурированной поверхностью покрытия, обладающей водоотталкивающими свойствами. Высокая гидрофобность покрытия достигается путем создания иерархиче-

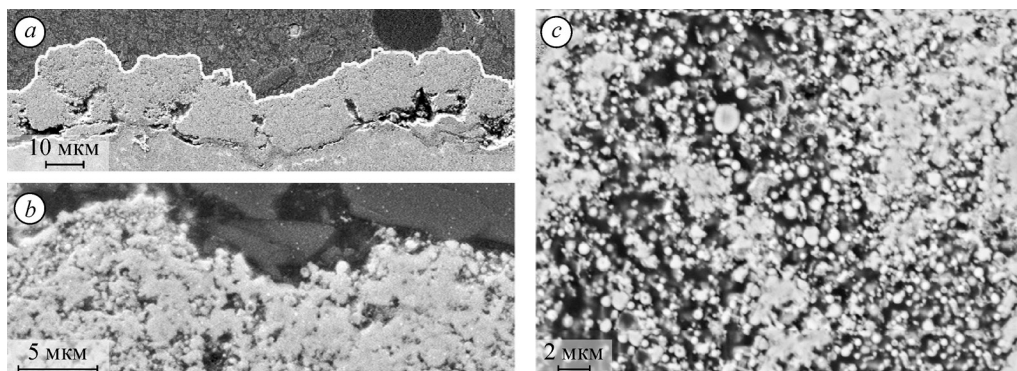


Рис. 8. Микроснимки шлифа суспензионного покрытия  $ZrO_2$  при различных увеличениях.

Основа — сталь.

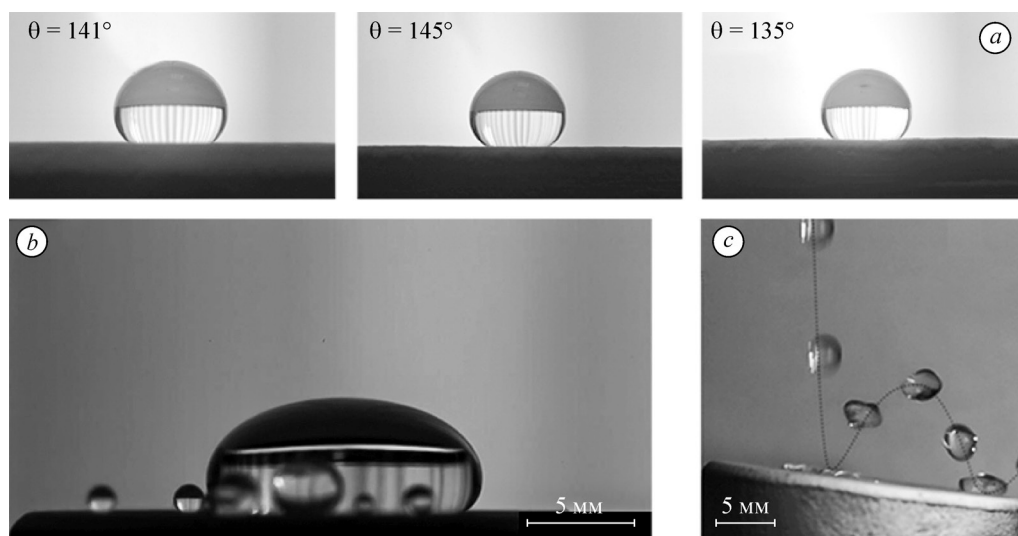


Рис. 9. Высокогидрофобные характеристики покрытий S1–S3, нанесенные двухстадийным плазменным напылением: равновесные углы смачивания водой (а), капли воды размером 1–12 мм на поверхности покрытия (b), кинограмма отскока капли воды при соударении с гидрофобной поверхностью (с).

ской текстуры его поверхности, получаемой комбинированным методом плазменного напыления порошковых и жидкофазных материалов. Отличительной особенностью метода является то, что водоотталкивающие свойства придаются материалу самой текстурой его поверхности. Важно отметить, что плазменное напыление является хорошо отработанной и надежной технологией, которая может быть полностью интегрирована в технологические цепочки производства высокогидрофобных покрытий.

Авторы выражают благодарность Е.Е. Корниенко за подготовку шлифов покрытий и их обработку на электронном микроскопе.

#### Список литературы

1. Пат. РФ 2441945, МПК<sup>51</sup> C25D 11/26.. Способ получения супергидрофобных защитных покрытий на титане и его сплавах / Гнеденков С.В., Бойнович Л.Б., Синявских С.Л., Машталяр Д.В., Емельяненко А.М., Егоркин Л.М.; заявитель и патентообладатель ИХ ДВО РАН и ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина РАН. № 2010153566/02; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.
2. Пат. РФ2483144, МПК<sup>51</sup> C25D 11/02, C25D 15/00. Способ получения композитных полимер-оксидных покрытий на вентильных металлах и их сплавах / Руднев В.С., Ваганов-Вилькинс А.А., Яровая Т.П., Недозоров П.М.; патентообладатель ИХ ДВО РАН. № 2011151561/02; заявл. 16.11.2011; опубл., Бюл. № 15.
3. Пат. РФ № 2572974, МПК<sup>51</sup> C09K 3/18, D82B 3/00. Композиция супергидрофобного покрытия и способ получения супергидрофобного покрытия из нее / Радченко И.Л., Колосов С.В.: патентообладатель ЗАО «Электросети». № 2014138077/05; заявл. 19.09.2014; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.
4. Vorobyev A.Y., Guo C. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses // J. Applied Physics. 2015. Vol. 117, No. 3. P. 033103-1–033103-5.
5. Emelyanenko A.M., Shagieva F.M., Domantovsky A.G., Boinovich L.B. Nanosecond laser micro- and nanotexturing for the design of a superhydrophobic coating robust against long-term contact with water, cavitation, and abrasion // Applied Surface Sci. 2015. Vol. 332. P. 513–517.
6. Azimi G., Dhiman R., Kwon H.-M., Paxson A.T., Varanasi K.K. Hydrophobicity of rare-earth oxide ceramics // Nature Materials. 2013. Vol. 12. P. 315–320.
7. Cai Y., Coyle T.W., Azimi G., Mostaghimi J. Superhydrophobic ceramic coatings by solution precursor plasma spray // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 24670-1–24670-7.
8. Xu P., Coyle T.W., Pershin L., Mostaghimi J. Fabrication of superhydrophobic ceramic coatings via solution precursor plasma spray under atmospheric and low-pressure conditions // J. Therm. Spray Tech. 2019. Vol. 28. P. 242–254.
9. Bai M., Kazi H., Zhang X., Liu J., Hussain T. Robust hydrophobic surfaces from suspension HVOF thermal sprayed rare-earth oxide ceramics coatings // Article in Scientific Reports. 2018. Vol. 8, No. 1. P. 6973-1–6973-8.

10. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А., Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Картаев Е.В. Структура и физико-механические свойства жаростойкого интерметаллического покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного на модернизированном плазменном оборудовании // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 5. С. 671–680.
11. Долматов А.В., Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Лысков Е.А., Ермаков К.А. Анализ и оптимизация газотермического напыления по скорости и температуре конденсированной фазы потока // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1. С. 83–94.
12. Kuzmin V.I., Mikhail'chenko A.A., Kovalev O.V., Kartaev E.V., Rudenskaya N.A. Technique of formation of on axisymmetric heterogeneous flow during thermal spraying of powder materials // J. Thermal Sci. and Technology. 2012. Vol. 21, No. 1. P. 159–168.
13. Jordan E.H., Jiang C., Gell M. The solution precursor plasma spray (SPPS) process: a review with energy considerations // J. Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24, No. 7. P. 1153–1165.
14. Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Голубев М.П., Тырышкин П.А., Долматов А.В. Визуализация газодинамической структуры плазменных потоков напылительного плазмотрона «ПНК-50» теньвым методом // Вестн. Югорского гос-го ун-та. 2018. Т. 51, № 4. С. 61–68.
15. Гуляев И.П., Солоненко О.П. Моделирование поведения полых частиц  $ZrO_2$  в плазменной струе с учетом их термического расширения // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 789–802.
16. Gulyaev I.P., Dolmatov A.V. Diagnostic system «Yuna» for disperse phase properties control in plasma and laser powder deposition processes // J. Physics; Conf. Series. 2018. Vol. 1115, Iss. 3. P. 032072-1–032072-7.

*Статья поступила в редакцию 28 ноября 2019 г.,  
после доработки — 18 марта 2020 г.,  
принята к публикации 28 апреля 2020 г.*