

# Новые материалы и технологии

УДК 621.793.74

## Влияние материала подложки и угла напыления на макроструктуру капиллярно-пористого покрытия из титана

С.В. Бабин, Е.Н. Егоров, А.А. Фурсов

Ступинский филиал МАТИ, 142800, Ступино, Российская Федерация, Пристанционная ул., д. 4

## The influence of the substrate material and the angle of deposition on the macrostructure of a capillary porous titanium coating

S.V. Babin, E.N. Egorov, A.A. Fursov

Stupino Branch of Russian State University of Aviation Technology, Pristantsionnaya str., 4, 142800, Stupino, Russian Federation



e-mail: babinsv@mati.ru, egoroven@mati.ru, sfmati@mail.ru

**i** Пористые поверхности применяют для эндопротезирования, каталитических аппаратов, различных адгезионных соединений, теплообменных аппаратов. Выявление зависимостей параметров макроструктуры капиллярно-пористых покрытий от угла напыления и материала подложки позволяет формировать характеристики поверхности и является актуальным, важным и необходимым для получения требуемых свойств покрытий. Однако в научной литературе не достаточно представлены исследования влияния технологических параметров плазменного напыления на строение и макроструктуру плазменно-напыленных титановых покрытий. Исследовано влияние материала подложки на структуру капиллярно-пористого покрытия, выполненного из титана ВТ1-0, а также влияние угла напыления на параметры макроструктуры и пористость плазменного титанового покрытия, нанесенного на подложку из титанового сплава ВТ6. Проведен регрессионный анализ зависимости параметров покрытия от угла напыления. Показано, что материал подложки имеет существенное влияние на структуру покрытия. Полученные зависимости размеров пор, выступов и пористости плазменного покрытия от угла напыления позволяют обоснованно выбирать параметры процесса плазменного напыления с целью формирования покрытий с требуемыми свойствами.

**Ключевые слова:** капиллярно-пористое покрытие, титан, угол напыления.

**i** Porous surfaces are used in endoprosthetics, catalytic devices, various adhesive joints, and heat exchangers. In this paper, the dependencies of the macrostructure parameters of capillary porous coatings on the angle of deposition and the substrate material are established. These dependencies make it possible to adjust surface characteristics, which is necessary to achieve desired properties of coatings. However, the scientific literature does not adequately describe the effect of technological parameters on the structure and macrostructure of plasma-sprayed titanium coatings. The influence of the substrate material on the structure of a capillary porous

coating made of titanium VT1-0 is investigated along with the influence of the angle of deposition on the macrostructure and porosity of a plasma titanium coating deposited on a substrate made of titanium alloy VT6. A regression analysis of the dependence of the coating characteristics on the angle of deposition is carried out. It is shown that the substrate material significantly affects the coating structure. The established dependences of the pore sizes and porosity of the plasma coating on the angle of deposition make it possible to choose proper plasma spraying process parameters so as to obtain coatings with desired properties.

**Keywords:** capillary porous coating, titanium, angle of deposition.

Изделия для эндопротезирования, поверхности каталитических аппаратов, различных адгезионных соединений, а также теплообменных аппаратов требуют высокую развитость поверхности, что может быть достигнуто применением плазменного напыления. Важное значение для таких устройств имеет макроструктура плазменного покрытия и возможность управление ею. На структуру покрытия оказывает влияние множество факторов, в частности, материал подложки и угол напыления покрытия. В данной статье представлены результаты исследования влияния материала подложки и угла напыления покрытия на макроструктуру титанового покрытия из VT1-0.

В настоящее время известно много работ [1–5], посвященных изучению взаимодействия расплавленной капли металла с поверхностью подложки, исследованию динамики растекания капли по поверхности [6, 7], формированию капиллярно-пористых покрытий [8–11]. Однако в литературе недостаточно рассмотрено влияние на строение и макроструктуру покрытия таких параметров плазменного напыления, как материал подложки и угол напыления.

Цель работы — экспериментальное изучение зависимости макроструктуры плазменного титанового покрытия из VT1-0 от угла напыления и материала подложки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) исследовать параметры макроструктуры покрытий, нанесенных на подложки из различных материалов при одинаковых режимах плазменного напыления;

2) исследовать влияние угла напыления на параметры макроструктуры и пористость плазменного титанового покрытия, нанесенного на подложку из титанового сплава VT6.

**Методика проведения экспериментов.** В работе было проведено две серии экспериментов:

1) напыление и исследование влияние материала подложки на структуру покрытия. В качестве образцов применяли цилиндрические

образцы диаметром 22 мм, изготовленные из различных материалов: технической меди марки М1, технического алюминия марки АД, жаропрочного титанового сплава VT3-1, углеродистой стали Ст3, коррозионно-стойкой жаропрочной стали X18H9T. Угол напыления титанового покрытия составлял 90°. Образцы напыляли одновременно при одних и тех же режимах плазменного напыления;

2) напыление и исследование влияния угла напыления на структуру и пористость плазменного титанового покрытия, нанесенного на поверхность образцов из титанового сплава VT6. В качестве образцов применяли детали в виде фигур вращения, внешняя поверхность которых была изготовлена под различными углами (15...90°) к оси струи плазмотрона.

Шероховатость поверхности всех образцов была одинакова и составляла  $R_a = 0,32$  мкм. Покрытие на образцах получали методом плазменного напыления путем распыления проволоки из технического титана марки VT1-0. В качестве плазмообразующих газов использовали смесь аргона с гелием. Мощность распыления составляла 15 кВт, дистанция напыления — 170 мм, температура подложки соответствовала 300 °С. Толщина покрытия на всех образцах составляла 0,5...0,6 мм.

Измерение открытой, закрытой и общей пористости покрытия проводили методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 18893–73.

Исследование макроструктуры полученных покрытий выполняли фотографическим методом. Для удаления блеска и приведения поверхности к единому тону покрытие после напыления матировали пескоструйной обработкой стеклянными микрошарами. Освещение образцов осуществляли направленным источником рассеянного света под углом 45°. Все образцы фотографировали в одинаковых условиях. Затем проводили обработку фотографий с помощью программы [Image], в результате чего получали профили покрытий (рис. 1).

В качестве параметров, характеризующих

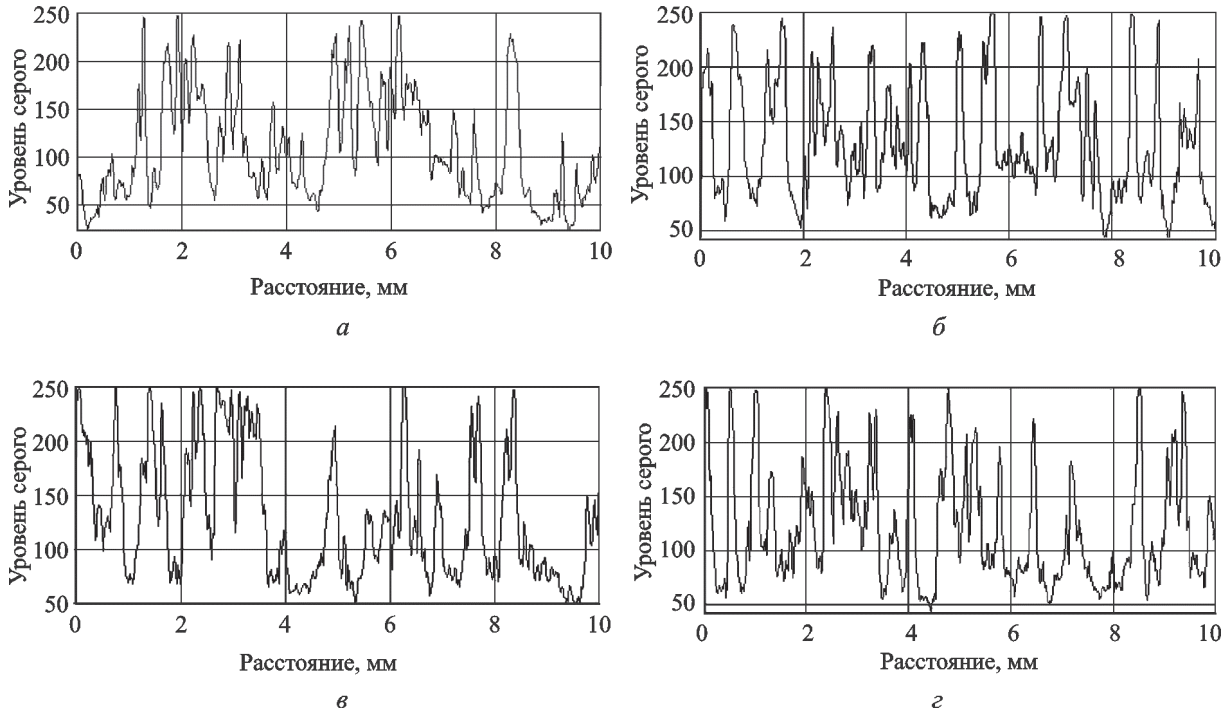


Рис. 1. Профили покрытий, полученные с помощью анализа изображения в программе ImageJ, (угол напыления 90°). Материал подложки:  
 а — алюминий марки АД; б — титановый сплав ВТ3-1; в — медь марки М1; г — сталь Х18Н9Т

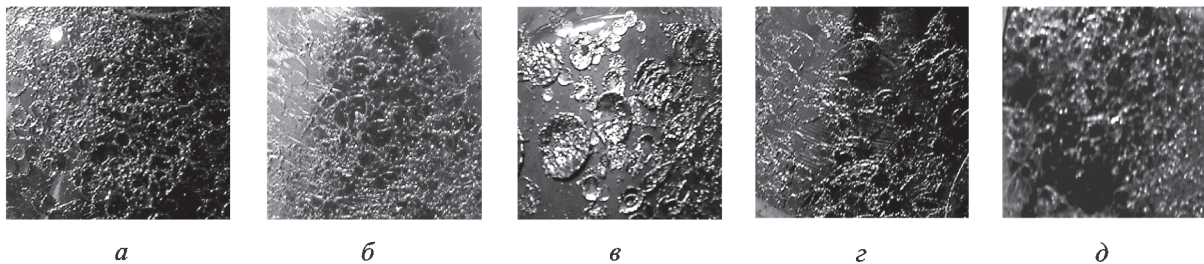


Рис. 2. Фотографии сплэтов на покрытиях из технического титана марки ВТ1-0, нанесенных на различные материалы (угол напыления 90°):  
 а — алюминий марки АД; б — титановый сплав ВТ3-1; в — медь марки М1; г — сталь Х18Н9Т; д — сталь Ст3 (увеличение ×10)

макроструктуру покрытий, исследовали высоту неровностей (высоту пиков), размер неровностей (ширину пиков в основании), размер пор (расстояние между пиками), диаметр сплэтов. Тарировка фотографий по известным размерам элементов покрытия позволила провести сравнительный анализ и оценить влияние угла напыления и материала подложки на параметры макроструктуры плазменно-напыленного покрытия.

**Результаты экспериментов и их анализ.** На рис. 1 и 2 приведены профили ImageJ и фотографии покрытий, полученные путем напыления на различные материалы. Результаты измерения параметров макроструктуры покрытий обобщены на рис. 3.

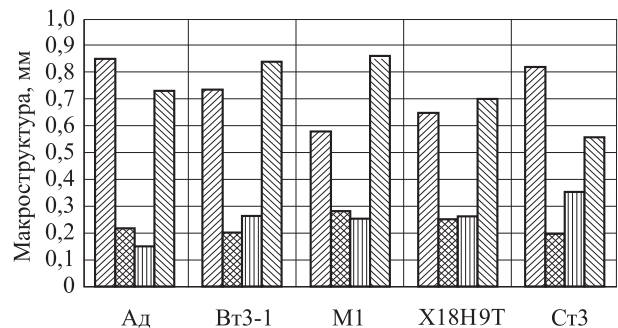


Рис. 3. Параметры макроструктуры титанового покрытия, сформированного на поверхности различных материалов (угол напыления 90°):  
 ▨ — средняя высота неровностей; ▩ — средний размер неровностей; ▭ — средний размер пор; ▮ — средний диаметр сплэта

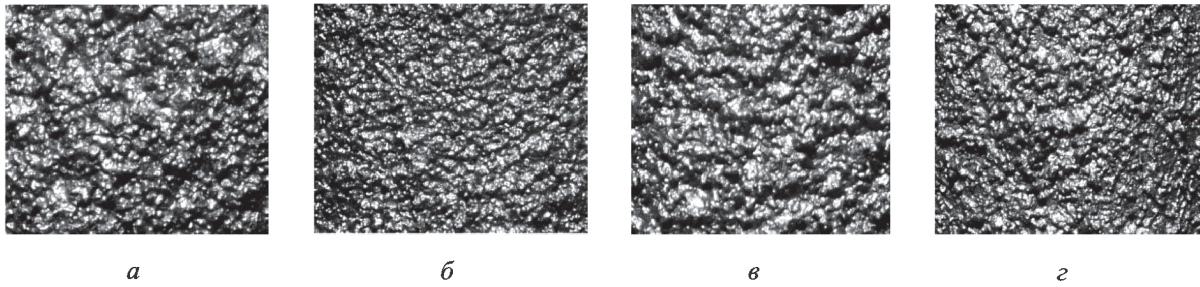


Рис. 4. Поверхности покрытий, напыленные на подложку из титанового сплава ВТ6 при угле напыления: а — 40°; б — 90°; в — 50°; з — 25° (увеличение  $\times 10$ )

Из анализа полученных данных следует, что макроструктура титанового покрытия существенно зависит от материала подложки. Параметры макроструктуры могут изменяться до  $\sim 30\%$  по высоте и среднему размеру неровностей и до  $\sim 60\%$  по среднему размеру пор. Так, максимальная высота неровностей (0,85 мм) наблюдается для покрытия, напыленного на алюминий, минимальная (0,58 мм) — на медь.

Размеры неровностей максимальны для меди (0,3 мм). Для других материалов подложек неровности мало различаются и приблизительно равны 0,2...0,23 мм. Наибольший средний размер пор имеют покрытия, нанесенные на углеродистую сталь (0,36 мм), наименьший — на алюминий (0,15 мм). Для меди и титанового сплава ВТ3-1 средний диаметр сплэтов одинаков и составляет 0,84 и 0,86 мм соответственно; для алюминия и стали Х18Н9Т он равен 0,73 и 0,7 мм. Минимальный размер сплэтов имеют покрытия на поверхности образцов из стали Ст3 (рис. 2, д). Такие отличия в структурах покрытий обусловлены прежде всего физико-химическими свойствами материалов, использованных в качестве подложек, в частности, различной смачиваемостью материалов жидкой каплей в момент формирования покрытия. Плохое смачивание, например, для пары медь-титан, затрудняет растекание капли и формирование сплэта, что приводит к укрупнению его размеров (увеличению диаметра и снижению высоты). Для более обоснованных выводов необходимы комплексные исследования зависимости параметров макроструктуры от физико-химических свойств поверхностного слоя.

Результаты исследований параметров макроструктуры покрытий, полученных при различных углах напыления на подложку из титанового сплава ВТ6, приведены на рис. 4 и 5. При углах напыления  $\sim 45\text{...}50^\circ$  наблюдаются максимальные значения высоты и ширины неровностей, а также размеров пор.

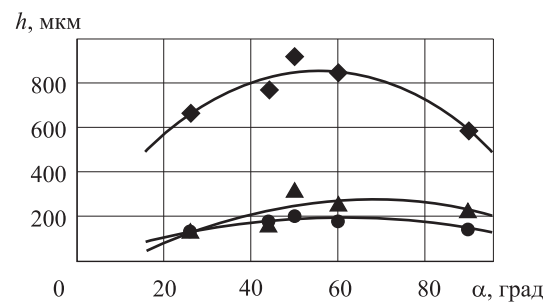


Рис. 5. Зависимости параметров структуры плазменного покрытия из технического титана марки ВТ1-0 (подложка ВТ6) от угла напыления:  $\blacklozenge$  — средняя высота неровностей;  $\blacktriangle$  — средний размер пор;  $\bullet$  — средний размер неровностей

На основе регрессионного анализа были получены математические формулы для описания зависимостей средней высоты неровностей  $R_h$ , мкм, среднего размера пор  $R_p$ , мкм, среднего размера неровностей  $R_n$ , мкм, покрытия от угла напыления  $\alpha$ :

$$R_h = -0,2326\alpha^2 + 25,786\alpha + 143,71; \quad (1)$$

$$R_p = -0,0857\alpha^2 + 11,538\alpha - 116,41; \quad (2)$$

$$R_n = -0,0548\alpha^2 + 6,5947\alpha - 8,4893. \quad (3)$$

Отсюда коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0,79$ ; статистическая ошибка модели  $S = 25$  мкм.

Результаты измерения плотности  $\gamma$ , открытой  $P_{откр}$ , закрытой  $P_{закр}$  и общей  $P_{общ}$  пористости титанового покрытия после напыления при дистанции напыления  $L = 170$  мм и углах напыления  $\alpha = 15\text{...}90^\circ$  приведены в таблице.

Проведенный регрессионный анализ показал, что зависимость открытой пористости покрытия от угла напыления (рис. 6) имеет вид

$$P_{откр} = \frac{\alpha}{1,19 - 0,053\alpha + 1,49 \cdot 10^{-3}\alpha^2}. \quad (4)$$

Отсюда коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0,59$ ; статистическая ошибка модели  $S = 2,48\%$ . Коэффициент корреляции  $R = 0,77$

**Результаты измерения плотности и пористости покрытия ВТ1-0 (подложка ВТ6) после плазменного напыления**

$\alpha$ , град	Поткр, %	Пзакр, %	Побщ, %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>
15	46,4	1,8	47,4	2,37
30	31,0	34,7	54,9	2,03
	37,2	—	27,9	3,25
	41,3	2,8	42,9	2,57
45	6,5	13,2	18,9	3,65
	65,0	—	32,4	3,05
	29,7	1,1	30,5	3,13
50	25,2	23,1	—	—
	27,9	20,2	—	—
52	25,2	3,9	28,2	3,23
60	17,7	2,9	20,1	3,60
	24,0	2,3	25,8	3,34
	28,3	1,4	29,4	3,18
90	6,3	8,45	14,4	3,86
	12,9	2,4	14,9	3,83
	18,8	1,0	18,9	3,65

свидетельствует о сильной зависимости между открытой пористостью и углом напыления, причем максимальные значения пористости (~28...30 %) наблюдаются при угле  $\alpha = 25...35^\circ$ . С увеличением угла напыления с 30 до 90° открытая пористость уменьшается до ~8...10 %.

При анализе влияния угла напыления на пористость покрытия можно отметить сильный разброс экспериментальных данных при углах менее 45°. Это может быть связано с тем, что при углах менее 30° покрытие практически не формируется, так как большинство частиц отскакивают от поверхности детали. При углах

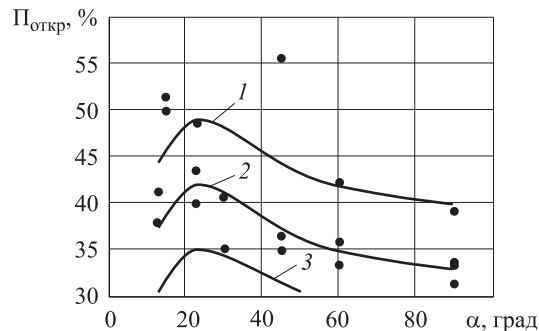


Рис. 6. Зависимость открытой пористости плазменного покрытия из технического титана марки ВТ1-0 от угла напыления подложка из титанового сплава ВТ6:  
1, 3 — линии тренда; 2 — экспериментальная зависимость;  
• — экспериментальные точки

более 30...40° наблюдается образование качественного и равномерного покрытия. Сравнительный статистический анализ показал, что при углах более 50° процесс формирования покрытия более стабилен по сравнению с меньшими углами напыления.

### Выводы

1. Показано, что материал подложки может оказывать существенное влияние на структуру покрытия. Это необходимо учитывать при разработке конструкций, имеющих покрытия с заданными свойствами.

2. Экспериментально установлено, что зависимость параметров макроструктуры покрытия от угла напыления носит экстремальный характер с максимумом в диапазоне 25...35° для открытой пористости и 40...50° для высоты неровностей, их размеров и величины пор.

### Литература

- [1] Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белашенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. *Нанесение покрытий плазмой*. Москва, Наука, 1990. 408 с.
- [2] Fauchais P., Fukumoto M., Vardelle A., Vardelle M. Knowledge concerning splat formation: An invited review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, vol. 13, no. 3, pp. 337–360.
- [3] Кудинов В.В., Калита В.И., Коптева О.Г. Исследование процесса формирования макро- и микроструктуры частиц газотермических покрытий. *Физика и химия обработки материалов*, 1992, № 3, с. 88–92.
- [4] Бабин С.В., Фурсов А.А. Влияние шероховатости поверхности подложки и дистанции напыления на макроструктуру капиллярно-пористого покрытия из титана. *Науч. тр. (Вестник МАТИ)*, 2014, № 23(95), с. 95–99.
- [5] Калита В.И., Гнедовец А.Г., Комлев Д.М. Формирование пористости при плазменном напылении. *Физика и химия обработки материалов*, 2006, № 6, с. 26–31.
- [6] Солоненко О.П., Шурина Э.П., Головин А.А. Конечно-элементное моделирование соударения капли расплава с подложкой при плазменном напылении. *Физическая мезомеханика*, 2001, т. 4, № 1, с. 29–42.

- [7] Madejski J. Solidification of droplets on cold surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1976, vol. 19, iss. 9, pp. 1009–1013.
- [8] Mostaghimi J., Pasandideh-Fard M., Chandra S. Dynamics of splat formation in plasma spray coating process. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2002, vol. 22, no. 1, pp. 59–84.
- [9] Бабин С.В., Фурсов А.А. Влияние кривизны поверхности подложки на макроструктуру капиллярно-пористого покрытия из титана. *Науч. тр. (Вестник МАТИ)*, 2013, № 20(92), с. 46–50.
- [10] Бабин С.В., Егоров Е.Н., Карпов В.Н., Поляков О.А. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства границы «пористое титановое покрытие — сплав ВТ6». *Технология легких сплавов*, 2007, № 3, с. 119–122.
- [11] Ильин А.А., Мамонов А.М., Карпов В.Н., Балберкин А.В., Загородний Н.В., Бабин С.В., Егоров Е.Н. Пористые слоистые композиционные материалы на основе титана в эндопротезах тазобедренного сустава. *Технология легких сплавов*, 2008, № 3, с. 73–79.

## References

- [1] Kudinov V.V., Pekshev P.Iu., Belashchenko V.E., Solonenko O.P., Safiullin V.A. *Nanesenie pokrytii plazmoi* [Plasma coating]. Moscow, Nauka publ., 1990. 408 p.
- [2] Fauchais P., Fukumoto M., Vardelle A., Vardelle M. Knowledge concerning splat formation: An invited review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, vol. 13, no. 3, pp. 337–360.
- [3] Kudinov V.V., Kalita V.I., Kopteva O.G. Issledovanie protsessa formirovaniia makro- i mikrostruktury chastits gazotermicheskikh pokrytii [Study of the formation of macro- and microstructure of particle thermal coatings]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment]. 1992, no. 3, pp. 88–92.
- [4] Babin S.V., Fursov A.A. Vliianie sherokhovatosti poverkhnosti podlozhki i distantsii napyleniia na makrostrukturu kapilliarno-poristogo pokrytiia iz titana [Influence of roughness of the surface of the substrate on the macrostructure of the capillary and porous covering from the titan]. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)* [Scientific papers (Herald MATI)]. 2014, no. 23(95), pp. 95–99.
- [5] Kalita V.I., Gnedovets A.G., Komlev D.M. Formirovanie poristosti pri plazmennom napylenii [Porosity formation during plasma spraying]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment]. 2006, no. 6, pp. 26–31.
- [6] Solonenko O.P., Shurina E.P., Golovin A.A. Konechno-elementnoe modelirovanie soudareniia kapli rasplava s podlozhkoi pri plazmennom napylenii [Finite-element modeling of the «droplet-substrate» interaction in plasma spraying]. *Fizicheskaiia mezomekhanika* [Physical Mesomechanics]. 2001, vol. 4, no. 1, pp. 29–42.
- [7] Madejski J. Solidification of droplets on cold surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1976, vol. 19, iss. 9, pp. 1009–1013.
- [8] Mostaghimi J., Pasandideh-Fard M., Chandra S. Dynamics of splat formation in plasma spray coating process. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2002, vol. 22, no. 1, pp. 59–84.
- [9] Babin S.V., Fursov A.A. Vliianie krivizny poverkhnosti podlozhki na makrostrukturu kapilliarno-poristogo pokrytiia iz titana [Influence of curvature of the surface of the substrate on the macrostructure of the capillary and porous covering from the titan]. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)* [Scientific papers (Herald MATI)]. 2013, no. 20(92), pp. 46–50.
- [10] Babin S.V., Egorov E.N., Karpov V.N., Poliakov O.A. Vliianie rezhimov plazmennogo napyleniia na strukturu i svoistva granitsy «poristoe titanovoe pokrytie – spлав VT6» [Influence of plasma spraying on the structure and properties of the boundaries of the «porous titanium coating – alloy VT6»]. *Tekhnologiia legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2007, no. 3, pp. 119–122.
- [11] Il'in A.A., Mamonov A.M., Karpov V.N., Balberkin A.V., Zagorodnii N.V., Babin S.V., Egorov E.N. Poristye sloistye kompozitsionnye materialy na osnove titana v endoprotezakh tazobedrennogo sustava [Application of Titanium-Based Porous Lamellar Composite Materials in Hip-Joint Endoprostheses]. *Tekhnologiia legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2008, no. 3, pp. 73–79.

## Информация об авторах

**БАБИН Сергей Васильевич** (Ступино) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства авиационных двигателей». Ступинский филиал МАТИ (142800, Ступино, Российская Федерация, Пристанционная ул., д. 4, e-mail: babinsv@mati.ru).

**ЕГОРОВ Евгений Николаевич** (Ступино) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства авиационных двигателей». Ступинский филиал МАТИ (142800, Ступино, Российская Федерация, Пристанционная ул., д. 4, e-mail: egoroven@mati.ru).

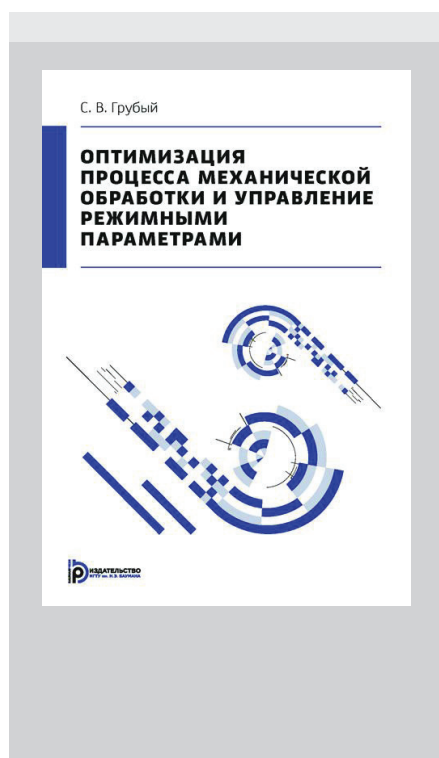
**ФУРСОВ Андрей Александрович** (Ступино) — инженер кафедры «Технология производства авиационных двигателей». Ступинский филиал МАТИ (142800, Ступино, Российская Федерация, Пристанционная ул., д. 4, e-mail: sfmati@mail.ru).

## Information about the authors

**BABIN Sergey Vasil'evich** (Stupino) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Technology of Production of Aircraft Engines» Department. Stupino Branch of Russian State University of Aviation Technology (Pristantsionnaya str., 4, 142800, Stupino, Russian Federation, e-mail: babinsv@mati.ru).

**EGOROV Evgeniy Nikolaevich** (Stupino) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Technology of Production of Aircraft Engines» Department. Stupino Branch of Russian State University of Aviation Technology (Pristantsionnaya str., 4, 142800, Stupino, Russian Federation, e-mail: egoroven@mati.ru).

**FURSOV Andrey Aleksandrovich** (Stupino) — Engineer of «Technology of Production of Aircraft Engines» Department. Stupino Branch of Russian State University of Aviation Technology (Pristantsionnaya str., 4, 142800, Stupino, Russian Federation, e-mail: sfmati@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла свет монография  
**С.В. Грубого**

### «Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами»

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса резания и изнашивания инструментов. Проведено математическое моделирование процесса и дана методика многофакторной аппроксимации полиномиальными уравнениями экспериментальных зависимостей резания металлов. Выполнен анализ методов и рассмотрены типовые задачи оптимизации режимных параметров. Разработаны математические основы оптимизации и управления режимными параметрами механической обработки с использованием уравнений скорости изнашивания инструментов.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru