

## Особенности формирования равномерных по толщине газотермических покрытий на плоских поверхностях

В.И. Кретинин<sup>a</sup>, В.А. Соколова<sup>b</sup>, А.В. Теппов<sup>c</sup>, В.А. Марков<sup>d</sup>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>a</sup> kvi\_1960@mail.ru, <sup>b</sup> sokolova\_vika@inbox.ru, <sup>c</sup> avt01@inbox.ru, <sup>d</sup> mactor85@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0467-4080>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8589-444X>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>

Статья поступила 09.09.2020, принята 24.09.2020

*В статье рассматриваются вопросы возможности нанесения газотермических покрытий на режущие плоские поверхности рабочих органов лесохозяйственных машин. Неравномерность толщины покрытия у почворежущих деталей при упрочнении рабочих органов лесохозяйственных машин крайне отрицательно влияет на стабилизацию и формообразование профиля лезвия, что приводит к неравномерности его износа. При упрочнении почворежущих деталей газопламенным напылением необходимо оценить влияние изменения технологических режимов напыления на равномерность покрытий и определить их допустимое поле допуска. Авторами обосновывается утверждение о том, что газотермические покрытия формируются за счет наложения друг на друга единичных волнистообразных полос. Неравномерность толщины объясняется тем, что распределение частиц порошка в факеле подчиняется нормальному закону, а сечение пятна напыления описывается уравнением Гаусса, в результате чего и образуется волнистость покрытия. При газопламенном напылении на плоскую поверхность покрытие формируется при перемещении пистолета вдоль этой поверхности со скоростью  $v$ . В конце прохода пистолет смещается на подачу  $S$  и передвигается в обратном направлении. При этом покрытие образуется за счет наложения одного прохода на другой. В этом случае равномерность толщины покрытия будет зависеть от скорости перемещения пистолета и подачи. В результате исследований теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены зависимости скорости передвижения и подачи газопламенной горелки от дистанции напыления, определена зависимость формирования толщины покрытия от скорости перемещения напылительного аппарата.*

**Ключевые слова:** газопламенное напыление; толщина покрытия; скорость; подача; радиус пятна напыления.

## Features of formation of uniform in thickness gas-thermal coatings on flat surfaces

V.I. Kretinin<sup>a</sup>, V.A. Sokolova<sup>b</sup>, A.V. Tepпов<sup>c</sup>, V.A. Markov<sup>d</sup>

St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky per., St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup> kvi\_1960@mail.ru, <sup>b</sup> sokolova\_vika@inbox.ru, <sup>c</sup> avt01@inbox.ru, <sup>d</sup> mactor85@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0467-4080>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8589-444X>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>

Received 09.09.2020, accepted 24.09.2020

*The article discusses the issues of the possibility of applying thermal spray coatings on the cutting flat surfaces of the working bodies of forestry machines. The unevenness of the coating thickness of the soil-cutting parts during the strengthening of the working bodies of forestry machines has an extremely negative effect on the stabilization and shaping of the blade profile, which leads to the unevenness of its wear. When strengthening soil-cutting parts by gas-flame spraying, it is necessary to evaluate the effect of changing the technological modes of spraying on the uniform thickness of coatings and determine their permissible tolerance field. The authors substantiate the assertion that thermal gas coatings are formed due to the superposition of single wavy stripes on top of each other. The unevenness of the thickness is explained by the fact that the distribution of powder particles in the flame obeys the normal law, and the cross section of the spraying spot is described by the Gaussian equation, as a result of which the waviness of the coating is formed. In gas-flame spraying on a flat surface, the coating is formed by moving the gun along this surface at a speed  $v$ . At the end of the pass, the gun shifts to feed  $S$  and moves in the opposite direction. In this case, the coating is formed by superimposing one pass on another. In this case, the uniformity of the coating thickness depends on the speed of movement of the gun and the feed. As a result of the research, the dependences of the speed of movement and supply of the gas-flame burner on the spraying distance are theoretically substantiated and experimentally confirmed, the dependence of the formation of the coating thickness on the speed of movement of the spraying apparatus is determined.*

**Keywords:** flame spraying; coating thickness; speed; feed; spraying spot radius.

**Введение.** Одним из наиболее эффективных путей повышения долговечности режущих рабочих органов лесохозяйственных машин, взаимодействующих с почвой и древесно-кустарниковой растительностью, является использование их с биметаллической рабочей частью, позволяющей реализовать эффект самозатачивания. По сравнению со стандартными, ресурс таких деталей увеличивается в 2–3 раза [1].

Неравномерность толщины покрытия у почворежущих деталей при упрочнении рабочих органов лесохозяйственных машин крайне отрицательно влияет на стабилизацию и формообразование профиля лезвия, что приводит к неравномерности его износа. При упрочнении почворежущих деталей газопламенным напылением необходимо оценить влияние изменения технологических режимов напыления на равномерность покрытий и определить их допустимое поле допуска.

Во время перемещения газопламенной горелки на поверхности детали покрытие приобретает волнистообразную форму. Неравномерность толщины объясняется тем, что распределение частиц порошка в факеле подчиняется нормальному закону, а сечение пятна напыления описывается уравнением Гаусса [2; 3], в результате чего и образуется волнистость покрытия. При газопламенном напылении на плоскую поверхность покрытие формируется при перемещении пистолета вдоль этой поверхности со скоростью  $v$  [4–7]. В конце прохода пистолет смещается на подачу  $S$  и передвигается в обратном направлении. При этом покрытие образуется за счет наложения одного прохода на другой (рис. 1). В этом случае равномерность толщины покрытия будет зависеть от скорости перемещения пистолета и подачи. Поэтому необходимо определить такие технологические режимы процесса напыления, при которых нанесенное покрытие будет равномерным по толщине, а требуемая толщина получится за минимальное количество проходов.

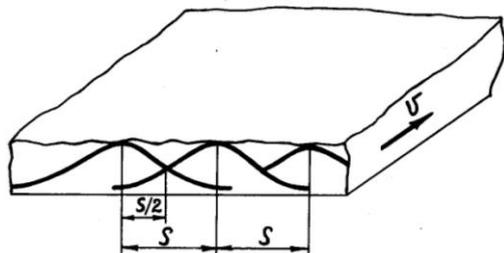


Рис. 1. Схема образования покрытия на плоской поверхности

Данные режимы обеспечиваются установлением соответствующих значений для плоских поверхностей: скорость перемещения —  $v$  и подачи напыления —  $S$ .

*Цель исследования:* выявить и теоретически

обосновать алгоритм определения технологических режимов газопламенного напыления для формирования равномерных по толщине покрытий.

**Методика исследования.** При прямолинейном перемещения распылителя относительно подложки на поверхности образуется единичная полоса покрытия, толщина которой в поперечном сечении подчиняется нормальному закону распределения:

$$y_x = y_0 \exp(-), \quad (1)$$

где  $y_0$  и  $y_x$  — соответственно толщина единичной полосы в центре пятна напыления и на расстоянии  $X$  от центра;  $\sigma^2$  — дисперсия. В теории ГТН предлагается использовать термин «радиус рассеивания»  $\rho = \sigma$  — среднее квадратичное отклонение.

Тогда форму струи и характер распределения напыляемых частиц по сечению пятна можно представить в виде рис. 2 с полем рассеивания случайной величины  $u_x$ , равным  $6\rho$ .

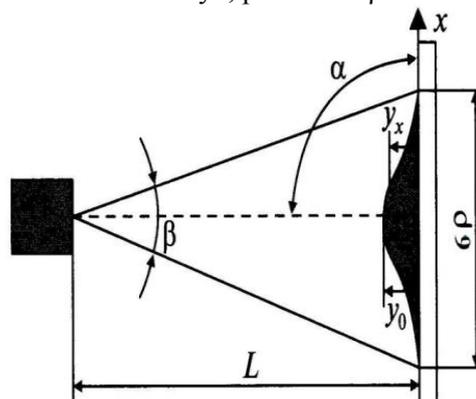


Рис. 2. Форма струи и распределение напыляемых частиц:  $\beta$  — угол раскрытия струи;  $\alpha$  — угол напыления;  $L$  — дистанция напыления;  $\rho$  — радиус рассеивания

Согласно рис. 1 ширину полосы покрытия  $S$ , в нашем случае это подача напыления, можно идентифицировать по закону Гаусса как поле рассеивания случайной величины, и тогда:

$$S = 3\rho, \quad (2)$$

где  $\rho$  — радиус рассеивания.

Из рис. 2 радиус рассеивания определяется следующим выражением:

$$\rho = 1/3 \operatorname{Ltg}(\beta/2). \quad (3)$$

Тогда из выражения (2):

$$S = \operatorname{Ltg}(\beta/2). \quad (4)$$

Для обоснованности выражения (1) были получены единичные полосы газопламенного покрытия при различной дистанции напыления (рис. 3).

Формирование единичной полосы осуществляли газовой наплавочной горелкой ГН-2. В качестве материала для напыления использовался самофлюсующийся порошковый сплав ПР-Н70Х17С4Р4 на основе никеля, фракцией 100 мкм.

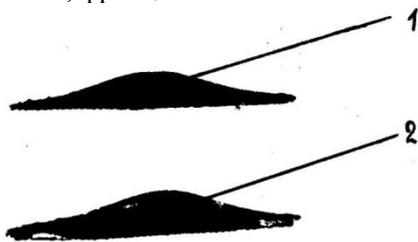


Рис. 3. Сечение пятна напыления по толщине покрытия: 1 — L = 170 мм; 2 — L = 200 мм

Анализ сечения пятна напыления (рис. 3) и результаты измерения координат кривой (рис. 4)

Таблица 1. Результаты измерений координат X и Y сечения пятна напыления

Расстояние от оси пятна напыления, X, мм	Дистанция напыления L, мм								
	140			170			200		
	Толщина покрытия Y, мм								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
-12	0,41	0,43	0,42	0,48	0,51	0,46	0,62	0,57	0,60
-10	0,69	0,68	0,73	0,82	0,84	0,77	0,87	0,93	0,91
-8	1,17	1,15	1,19	1,1	1,13	1,16	1,17	1,15	1,14
-6	1,69	1,62	1,65	1,58	1,55	1,53	1,48	1,46	1,5
-4	2,2	2,23	2,19	2,06	2,04	2,03	1,89	1,94	1,92
-2	2,99	2,97	3,01	2,73	2,72	2,73	2,51	2,49	2,53
0	3,43	3,37	3,39	3,13	3,18	3,15	2,93	2,87	2,89
2	3,02	3,05	2,97	2,74	2,79	2,75	2,5	2,52	2,48
4	2,24	2,21	2,17	2,06	2,02	2,05	1,93	1,90	1,88
6	1,63	1,68	1,65	1,56	1,58	1,61	1,47	1,49	1,51
8	1,18	1,16	1,20	1,19	1,16	1,18	1,14	1,11	1,16
10	0,67	0,7	0,71	0,81	0,85	0,78	0,92	0,94	0,86
12	0,45	0,39	0,40	0,48	0,53	0,51	0,59	0,61	0,63

Таблица 2. Результаты измерения радиуса пятна напыления и данные расчета коэффициента K в зависимости от дистанции напыления

Дистанция напыления, L, мм	Радиус пятна напыления						Коэффициент K, 1/мм²
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	$\bar{R}$	
140	16	17	16	15	16	16,0	0,028
170	18	18	18	19	19	18,6	0,024
200	21	20	20	21	21	20,6	0,02
230	22	23	22	24	22	22,6	0,016

Измерения координат y и x выполняли на инструментальном микроскопе МИМ-7 [8; 9].

**Результаты исследования.** Исследование зависимости радиуса пятна (табл. 2) от дистанции напыления показывает, что с ее увеличением радиус растет, а толщина покрытия при x = 0 уменьшается (рис. 4), поэтому в уравнение (5) необходимо ввести коэффициент K, учитывающий указанную зависимость. По мнению авторов, указанный коэффициент характеризует угол раскры-

(табл. 1) подтверждают, что сечение пятна напыления описывается уравнением Гаусса:

$$y = y_0 e^{-Kx^2}, \quad (5)$$

где y<sub>0</sub> — толщина покрытия при x = 0, K — коэффициент, зависящий от дистанции напыления.

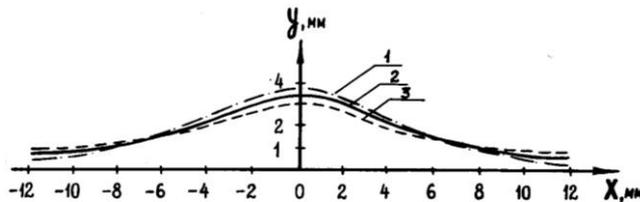


Рис. 4. Кривые сечения пятна напыления. Продолжительность напыления t = 90 с, дистанция напыления L: 1 — 140 мм; 2 — 170 мм; 3 — 200 мм

тия струи β, и определяет конструктивные особенности напылительных устройств.

В общем виде толщина покрытия в любой точке будет определяться следующим выражением:

$$h = y_0 e^{-Kx^2} + y_0 e^{-K(x-S)^2} + \dots + y_0 e^{-K(x-(n-1)S)^2}, \quad (6)$$

где S — подача при напылении; K — коэффициент наложения единичных полос друг на друга, зависящий от дистанции напыления.

Толщину покрытия в точках с координатами, кратными подаче напылительного аппарата, бу-

дем рассматривать как наложение друг на друга двух проходов (рис. 1).

Тогда между проходами толщина покрытия выражается как сумма двух членов, при  $x = S/2$  :

$$h = 2y_0 e^{-\frac{KS^2}{4}} \quad (7)$$

С другой стороны общая толщина покрытия должна быть равна  $y_0$  :

$$y_0 = 2y_0 e^{-\frac{KS^2}{4}} \quad (8)$$

Преобразуя уравнение (8), получим выражение по определению подачи  $S$  :

$$S = 2\sqrt{\frac{\ln 2}{K}} = \frac{1,665}{\sqrt{K}} \quad (9)$$

Таким образом, определение подачи  $S$  напылительного пистолета сводится к отысканию коэффициента  $K$ . Для этого прологарифмируем выражение (5) и получим:

$$K = \frac{\ln y_0 - \ln y}{x^2}, \quad (10)$$

где  $y, x$  — текущие координаты сечения пятна напыления, мм.

По данным табл. 1 и 2 построены зависимости  $K$  (рис. 5) и  $S$  (рис. 6) от дистанции напыления.

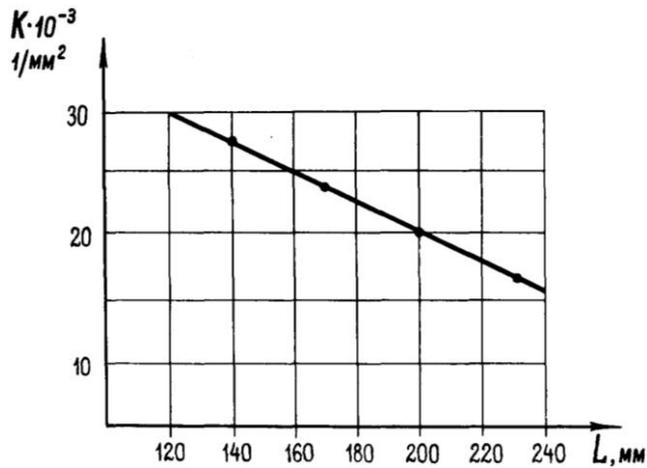


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $K$  от дистанции напыления

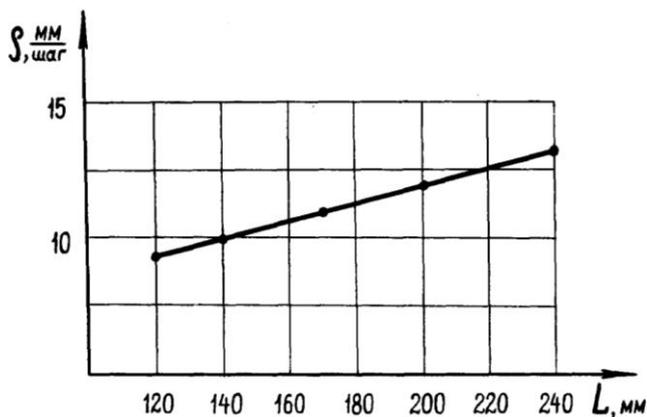


Рис. 6. Зависимость подачи  $S$  от дистанции напыления

Для определения скорости перемещения распылительного аппарата авторами определена ее связь с толщиной единичной полосы покрытия [10; 11].

Зная производительность распылительного аппарата и время напыления, определяем массу напыленного слоя:

$$m = G_p * K_{им} * t, \quad (11)$$

где  $G_p$  — производительность распыления;  $K_{им}$  — коэффициент использования материала;  $t$  — время напыления.

Массу напыленного слоя можно также выразить через плотность материала слоя  $\gamma_{сл}$  и его объем  $V_{сл}$  :

$$m = \gamma_{сл} * V_{сл} \quad (12)$$

Объем единичной полосы покрытия равен:

$$V_{сл} = F * v * t, \quad (13)$$

где  $F$  — площадь под кривой нормального распределения;  $v$  — скорость перемещения пятна напыления;  $t$  — время напыления:

$$F = y_0 * \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{S^2}\right) dx = y_0 * S * \sqrt{\pi} \quad (14)$$

Из выражений (11) — (14) толщину единичной полосы  $y_0$  можно определить следующим образом:

$$y_0 = \frac{G_p * K_{им}}{v * \gamma_{сл} * S * \sqrt{\pi}} \quad (15)$$

Из выражения (15) можно определить скорость перемещения напылительного аппарата:

$$v = \frac{G_p * K_{им}}{y_0 * \gamma_{сл} * S * \sqrt{\pi}} \quad (16)$$

Если известна производительность установки по газотермическому нанесению покрытий, то, задаваясь дистанцией напыления и толщиной покрытия, можно определить скорость перемещения напылительного аппарата. Измеренная нами производительность газопламенного напыления составляет 0,00055 кг/с [12].

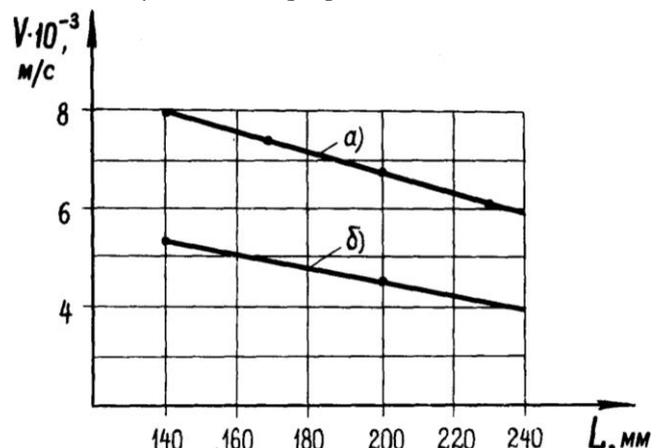


Рис. 7. Зависимость скорости перемещения пистолета от дистанции напыления при толщине покрытия:  $a$  —  $h = 1$  мм;  $b$  —  $h = 1,5$  мм

**Выводы.** Как видно на рис. 7, увеличение дистанции напыления вызывает уменьшение скорости перемещения пистолета вследствие изменения максимальной толщины пятна напыления.

Режимы нанесения износостойких покрытий из самофлюсующихся сплавов ГПН на плоские поверхности зависят от конструкции применяемого аппарата, вида и грануляции порошка и других факторов. Это создает серьезные препятствия для текущего контроля геометрических

размеров напыляемых покрытий, поэтому требуемую толщину покрытия получают за счет стабилизации или регулирования технологических параметров процесса ГПН. Таким образом, приведенные зависимости позволяют рассчитать необходимые номинальные значения и диапазон регулирования технологических параметров управления формой по заданным требованиям к средней толщине, волнистости покрытия и режиму напыления.

#### *Литература*

1. Калинин Н.П., Силаев Г.В., Шапкин О.М. Организация и технология лесохозяйственных работ. М.: Агропромиздат, 1986. 280 с.
2. Лазаренко Г.П. Прогнозирование условий напыления газотермических покрытий с заданной толщиной и волнистостью // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 1983. № 7. С. 102–108.
3. Катц Н.В., Антошин Е.В. Металлизация распылением. М.: Машиностроение, 1966. 199 с.
4. Корнеев А.Н. и др. Исследование некоторых технологических параметров процесса металлизации // Машиностроение и приборостроение. 1977. № 9. С. 20–44.
5. Сбрижер А.Г. Разработка технологии получения покрытий из самофлюсующихся сплавов на деталях, работающих в условиях периодического нагружения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1983. 17 с.
6. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия порошковых материалов: справ. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
7. Линник В.А., Пекшев П.Ю. Современная техника газотермического нанесения покрытий. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
8. Кретинин В.И. Повышение долговечности рабочих органов лесопосадочных машин газопламенным напылением при ремонте: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Л.: 1990. 19 с.
9. Хасуй А. Техника напыления / пер. с яп. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
10. Черноиванов В.Н., Каракозов Э.С. Физико-химические процессы образования соединения при напылении порошковых материалов // Сварочное производство. 1984. № 2. С. 10–12.
11. Похмурский В.И., Студент М.М., Пих В.С. Основы формирования защитных и восстановительных покрытий электродуговым напылением из порошковых проволок // Физико-химическая механика материалов. 1986. № 6. С. 11–16.

12. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: МГТУ, 2003. 358 с.

#### *References*

1. Kalinichenko N.P., Silaev G.V., SHapkin O.M. Organization and technology of forestry works. M.: Agropromizdat, 1986. 280 p.
2. Lazarenko G.P. Forecasting the conditions for spraying gas-thermal coatings with a given thickness and waviness // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 1983. № 7. P. 102–108.
3. Katc N.V., Antoshin E.V. Metallization by spray. M.: Mashinostroenie, 1966. 199 p.
4. Korneev A.N. i dr. Research of some technological parameters of the metallization process // Mashinostroenie i priboroostroenie. 1977. № 9. P. 20–44.
5. Sbrizher A.G. Development of technology for obtaining coatings from self-fluxing alloys on parts operating in the conditions of periodic loading: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Minsk, 1983. 17 p.
6. Borisov YU.S., Harlamov YU.A., Sidorenko S.L., Ardатовskaya E.N. Gas-thermal coatings of powder materials: sprav. Kiev: Naukova dumka, 1987. 544 p.
7. Linnik V.A., Pekshev P.YU. Modern technology of gas - thermal coating. M.: Mashinostroenie, 1985. 128 p.
8. Kretinin V.I. Increasing the durability of the working bodies of forest planting machines by gas-flame spraying during repair nte: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. L.: 1990. 19 p.
9. Hasuj A. Technique of spraying / per. s yap. M.: Mashinostroenie, 1975. 288 p.
10. CHernoivanov V.N., Karakozov E.S. Physical and chemical processes of compound formation during deposition of powder materials // Welding International. 1984. № 2. P. 10–12.
11. Pohmurskij V.I., Student M.M., Pih V.S. Fundamentals of formation protective and restorative coatings with electric arc deposition from powder wires // Materials Science. 1986. № 6. P. 11–16.
12. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma deposition technology. M.: MGTU, 2003. 358 p.