

УДК 669.3

Н.И. Артеменко<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕРИЙНОГО ПЛАЗМОТРОНА METCO F4 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИХ ГАЗОВ АРГОНА И АЗОТА

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-76-89

*Получены аналитические зависимости полной мощности и напряжения плазменной дуги серийного плазматрона Metco F4 от тока дуги и расходов аргона и азота. Установлено, что увеличение расхода азота оказывает наибольшее влияние на увеличение напряжения дуги. Предложена расчетно-графическая методика оценки средневзвешенной температуры и скорости плазменного потока на срезе сопла серийного плазматрона Metco F4.*

**Ключевые слова:** плазменное напыление, ток дуги, расход аргона, расход азота, температура плазменной струи, скорость плазменной струи.

N.I. Artemenko<sup>1</sup>

## RESEARCH OF THE OPERATION MODES OF THE METCO F4 SERIAL PLASMA-GUN USING PLASMA-FORMING GASES ARGON AND NITROGEN

*In this paper was obtained the analytical dependence of the total and voltage power of the plasma arc on the arc current and the flow rates of argon and nitrogen of the serial plasma-gun Metco F4. It is established that an increase in nitrogen consumption has the greatest effect on the increase in arc voltage. A computational and graphical technique for estimating the average temperature and the velocity of the plasma flow at the cutoff of the nozzle of the serial plasma-gun Metco F4 is proposed.*

**Keywords:** plasma spraying, arc current, argon consumption, nitrogen consumption, plasma jet temperature, plasma jet speed.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

В настоящее время для нанесения защитных покрытий на крупногабаритные детали ГТД применяются установки плазменного, детонационного и высокоскоростного напыления [1–8].

При плазменном напылении между вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом (соплом) возбуждается электрическая дуга, нагревающая рабочий газ, в результате чего он истекает из сопла в виде плазменной струи. Порошковый материал, подаваемый в плазменную струю потоком транспортирующего газа (аргона или азота), с большой энергией ударяется о поверхность обрабатываемой детали. Благодаря высоким температурам при плазменном напылении можно наносить тугоплавкие материалы. Кроме того, регулирование температуры и скорости плазменной струи позволяет расширить класс наносимых материалов. На рис. 1 представлена принципиальная схема плазматрона для нанесения покрытий методом плазменного напыления [9].

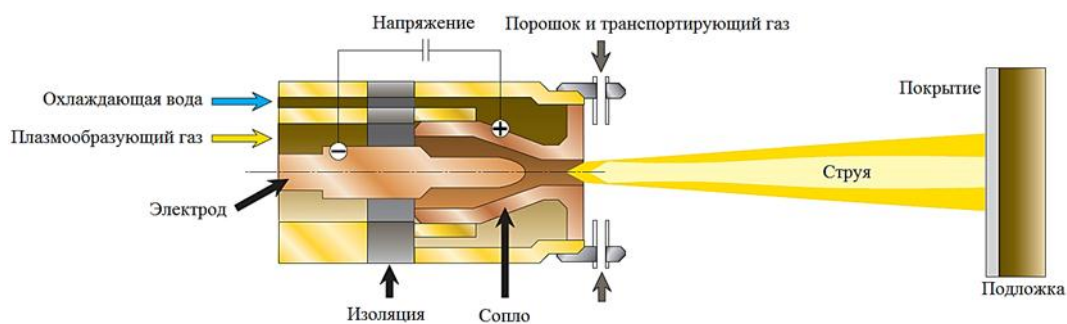


Рис. 1. Принципиальная схема плазмотрона

Плазменное напыление в зависимости от давления в камере напыления разделяют на атмосферное плазменное напыление (APS – Air Plasma Spray), плазменное напыление при пониженном давлении (LPPS – Low Pressure Plasma Spray) и вакуумное плазменное напыление (VPS – Vacuum Plasma Spray). Плазменными методами наносят широкий класс материалов: металлические сплавы систем Me–Cr–Al–Y, металлокерамические композиции типа MeC–NiCr/Co, покрытия на основе оксидов типа  $Al_2O_3/ZrO_2-Y_2O_3$ . Оборудование для атмосферного плазменного напыления фирм Sulzer Metco и AMT используется на предприятиях авиадвигателестроения «НПЦ газотурбостроения «Салют», ПАО «ОДК-УМПО», АО «ОДК-ПМ» и других научно-производственных объединениях.

Наиболее распространенным плазмотроном для нанесения покрытий методом атмосферного плазменного напыления является плазмотрон Metco F4 производства фирмы Sulzer Metco (в настоящее время – фирма Oerlikon Metco), который представлен на рис. 2.

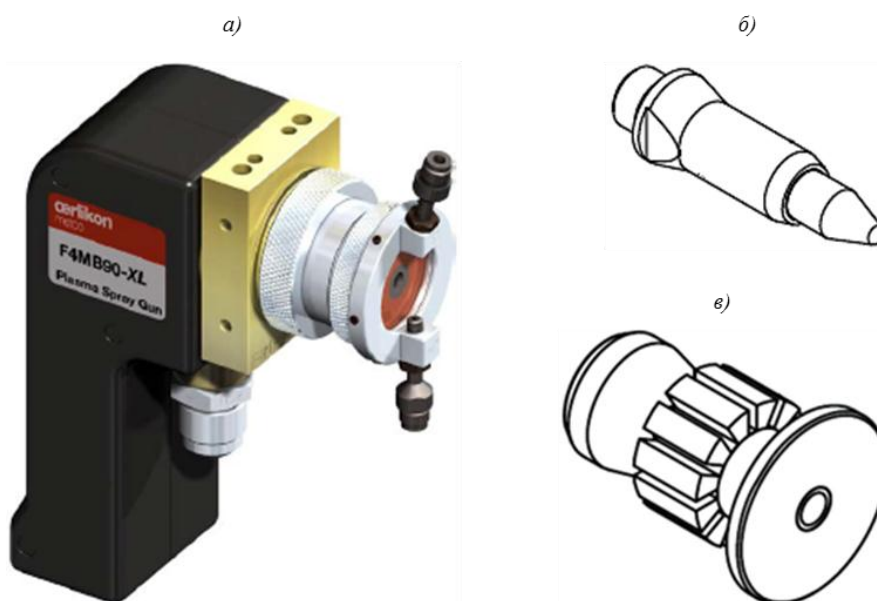


Рис. 2. Плазмотрон Metco F4 (а), электрод (б) и сопло (в)

При нанесении покрытий из различных порошковых материалов варьируются следующие параметры процесса: мощность дуги (кВт), расход плазмообразующего газа при атмосферном (нормальном) давлении (н.л/мин), расход транспортирующего газа (н.л/мин), количество подаваемого материала (г/мин), дистанция напыления (мм), скорость перемещения пятна напыления (мм/с). С увеличением мощности дуги возрастают

температура и энтальпия плазменной струи. Мощность дуги определяется силой тока и напряжением, которое, в свою очередь, определяется видом и расходом плазмообразующего газа [9].

В работе проведено исследование режимов работы плазмотрона, определены зависимости мощности, подводимой к плазмотрону, от тока дуги и расхода плазмообразующих газов аргона и азота.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных проблем 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» и 17.4. «Многослойные защитные покрытия и плазмохимическое оборудование для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих прекурсоры элементов синтезируемого покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

### Материалы и методы

Объектом исследования в данной работе является процесс атмосферного плазменного напыления с использованием серийного плазмотрона Metco F4 и плазмообразующих газов аргона и азота. Проведено исследование режима работы плазмотрона с варьированием следующих параметров: ток дуги 300–500 А с шагом 50 А, расход аргона 15–25 н.л/мин с шагом 5 н.л/мин, расход азота 0–15 н.л/мин (0, 11 и 15 н.л/мин в связи с технологическими ограничениями самой установки плазменного напыления). На каждом режиме работы фиксировали мощность  $P$ , которую подводили к плазмотрону. В свою очередь –  $P=IU$ , где  $I$  – ток дуги, А;  $U$  – напряжение, В. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Мощность плазмотрона при различных режимах работы**

Ток дуги $I$ , А	Мощность плазмотрона $P$ , кВт, при расходе газа, н.л/мин			
	азота $Q_N$	аргона $Q_{Ar}$		
		15	20	25
300	0	8,1	8,6	9,1
	11	21,2	21,7	22,2
	15	23,9	24,3	24,5
350	0	9,3	10	10,7
	11	24	24,6	25,2
	15	27	27,7	28,5
400	0	10,8	11,5	12,1
	11	26,5	26,8	27,2
	15	29,7	30,5	31,4
450	0	12,1	13	13,7
	11	29,1	29,3	29,7
	15	32,2	32,6	33,4
500	0	13,5	14,5	15,3
	11	31,3	31,9	32,5
	15	34,6	35,4	35,9

Полагая, что полная мощность плазмотрона складывается из индивидуальных вкладов мощности от использования аргона и азота, т. е.:

$$P=P_{Ar}+P_N, \quad (1)$$

из полной мощности следует вычесть мощность дуги при расходе азота 0 н.л/мин. Результат вычислений представлен в табл. 2.

Таблица 2

Мощность плазмотрона при использовании одного плазмобразующего газа – азота

Ток дуги I, А	Мощность плазмотрона P, кВт, при расходе газа, н.л/мин				Среднее значение P <sub>N</sub> , кВт
	азота Q <sub>N</sub>	аргона Q <sub>Ar</sub>			
		15	20	25	
300	0	0	0	0	0
	11	13,1	13,1	13,1	13,1
	15	15,8	15,7	15,4	15,633
350	0	0	0	0	0
	11	14,7	14,6	14,5	14,6
	15	17,7	17,7	17,8	17,733
400	0	0	0	0	0
	11	15,7	15,3	15,1	15,367
	15	18,9	19	19,3	19,067
450	0	0	0	0	0
	11	17	16,3	16	16,433
	15	20,1	19,6	19,7	19,8
500	0	0	0	0	0
	11	17,8	17,4	17,2	17,467
	15	21,1	20,9	20,6	20,867

Целью исследования является выявление зависимостей индивидуальных мощностей P<sub>Ar</sub> и P<sub>N</sub> от тока дуги и расходов газов аргона и азота. В связи с этим применены методы аппроксимации линеаризованных функций [10].

Если массив экспериментальных данных X (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>i</sub>, ... X<sub>n</sub>), Y (Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, ..., Y<sub>i</sub>, ... Y<sub>n</sub>) описывается функцией вида f(g)=ag<sup>b</sup>, то ее преобразуют в следующий вид:

$$\ln(f(g))=b \cdot \ln(g)+\ln a, \quad (2)$$

что соответствует виду y(x)=ax+b.

Затем коэффициенты в выражении (2) вычисляют по методу наименьших квадратов как:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad (3)$$

$$a = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \right), \quad (4)$$

где x<sub>i</sub>=ln(X<sub>i</sub>), y<sub>i</sub>=ln(Y<sub>i</sub>).

Если массив экспериментальных данных X (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>i</sub>, ... X<sub>n</sub>), Y (Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, ..., Y<sub>i</sub>, ... Y<sub>n</sub>) описывается функцией вида f(g)=ag<sup>k</sup>, где k – константа, то ее аппроксимируют методом наименьших квадратов следующим образом:

$$\Sigma(a) = \sum_{i=1}^n (Y_i - a \cdot X_i^k); \quad (5)$$

$$a = \frac{a \cdot \frac{d^2 \Sigma(a)}{da^2} - \frac{d \Sigma(a)}{da}}{\frac{d^2 \Sigma(a)}{da^2}} \quad (6)$$

Достоверность аппроксимации определяется коэффициентом детерминации  $R^2$ , который, в свою очередь, является квадратом коэффициента корреляции  $r_{x,y}$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_i))^2}{\sum_{i=1}^n \left( Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \right)^2}; \quad (7)$$

$$r_{x,y} = \sqrt{R^2}, \quad (8)$$

где  $f(X_i)$  – значение функции аппроксимирующей зависимости в точке  $X_i$ .

Коэффициент корреляции  $r_{x,y}$  характеризует тесную взаимосвязь экспериментальных параметров с уравнением регрессии. По шкале Чеддока значения  $0,7 \leq r_{x,y} \leq 0,9$  соответствуют высокой корреляционной связи, при  $0,9 \leq r_{x,y} \leq 0,99$  – очень высокой [10].

### Результаты и обсуждение

#### *Расчет зависимости мощности плазматрона при использовании плазмообразующего газа аргона*

При расчете используются данные из табл. 1 при расходе азота  $Q_N=0$ . Очевидно, что при расходе аргона  $Q_{Ar}=0$ , мощность, подводимая к плазматрону, также будет равна  $P_{Ar}=0$ . С учетом этого предполагается, что зависимость мощности плазматрона от расхода аргона при постоянном токе дуги будет иметь вид:

$$P_{Ar}|_{I=\text{const}} = a \cdot Q_{Ar}^b.$$

Предварительный расчет показал, что коэффициент  $b \approx 0,25$ , тогда с учетом того, что  $P_{Ar}|_I = a \cdot Q_{Ar}^{0,25}$ , методом наименьших квадратов по формулам (5) и (6) получим зависимости мощности плазматрона Metco F4 при использовании плазмообразующего газа аргона при разных значениях тока дуги. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов зависимости мощности дуги от расхода аргона  $P_{Ar}(Q_{Ar}) = a \cdot Q_{Ar}^{0,25}$

Ток дуги $I$ , А	Коэффициент $a$	Коэффициент детерминации $R^2$	Коэффициент корреляции $r_{x,y}$
300	4,082	0,987	0,994
350	4,749	0,989	0,995
400	5,442	0,985	0,992
450	6,140	0,999	0,999
500	6,852	1	1

Зависимости мощности плазматрона от расхода аргона при токах дуги 300–500 А с шагом 50 А и их уравнения регрессии представлены на рис. 3.

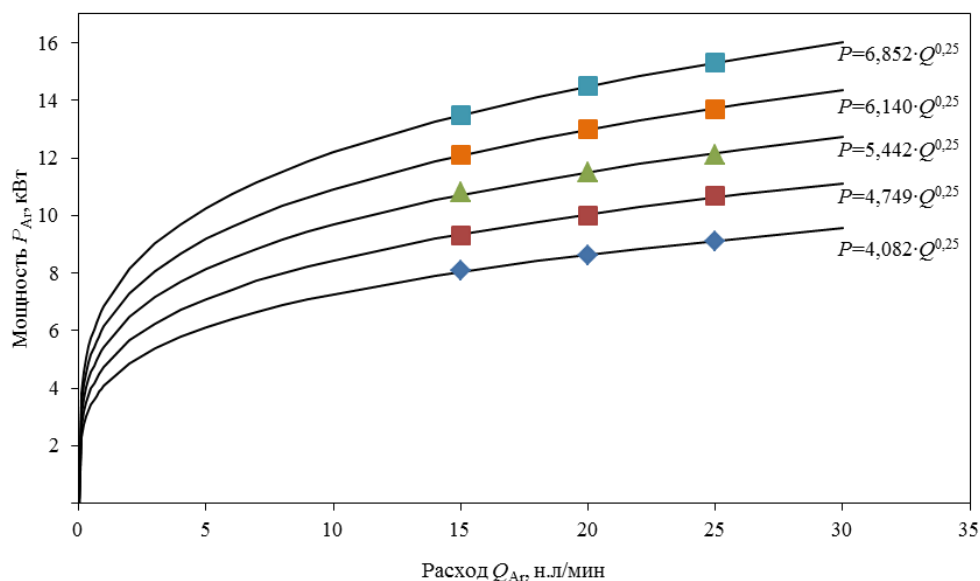


Рис. 3. Зависимость мощности дуги от расхода аргона при токе дуги 300 (◆); 350 (■); 400 (▲); 450 (■) и 500 А (■)

Из данных табл. 3 видно, что коэффициент  $a$  монотонно возрастает при увеличении тока дуги. Полагая, что при токе дуги 0 А мощность также составит 0 кВт, зависимость  $a(I)$  будет иметь вид  $f(g)=ag^b$ . Следовательно, уравнение регрессии будет найдено методом наименьших квадратов по формулам (3) и (4):

$$a(I)=0,012 \cdot I^{1,015};$$

$$R^2=1;$$

$$r_{x,y}=1.$$

Очевидно, что зависимость мощности плазматрона от тока дуги и расхода аргона находится из выражения:

$$P_{Ar}=0,012 \cdot I^{1,015} \cdot Q_{Ar}^{0,25}. \tag{9}$$

Зависимость (9) представлена на рис. 4.

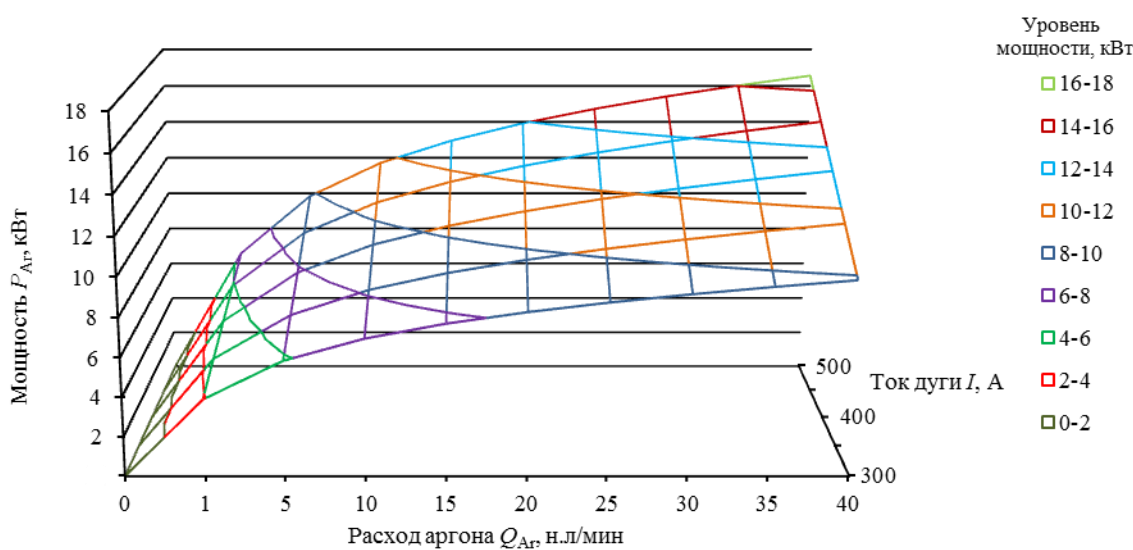


Рис. 4. Зависимость мощности плазматрона от тока дуги и расхода аргона

*Расчет зависимости мощности плазмотрона при использовании плазмообразующего газа азота*

При расчете используются средние значения мощности  $P_N$  из табл. 2 при расходах азота  $Q_N$ , н.л/мин: 0; 11 и 15. Очевидно, что при расходе азота  $Q_N=0$ , мощность, подводимая к плазмотрону, также будет равна  $P_N=0$ . С учетом этого предполагается, что зависимость мощности плазмотрона от расхода азота при постоянном токе дуги будет иметь вид:

$$P_N|_{I=\text{const}} = a \cdot Q_N^b.$$

Предварительный расчет показал, что коэффициент  $b \approx 0,6$ , тогда с учетом того, что  $P_N|_I = a \cdot Q_N^{0,6}$ , методом наименьших квадратов по формулам (5) и (6) получим зависимость мощности плазмотрона Metco F4 при использовании плазмообразующего газа азота при разных значениях тока дуги. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов зависимости мощности дуги от расхода азота  $P_N(Q_N) = a \cdot Q_N^{0,6}$

Ток дуги $I$ , А	Коэффициент $a$	Коэффициент детерминации $R^2$	Коэффициент корреляции $r_{x,y}$
300	3,091	0,997	0,999
350	3,481	0,998	0,999
400	3,710	0,982	0,991
450	3,899	1	1
500	4,126	0,998	0,999

Зависимости мощности плазмотрона от расхода азота при токах дуги 300–500 А с шагом 50 А и их уравнения регрессии представлены на рис. 5.

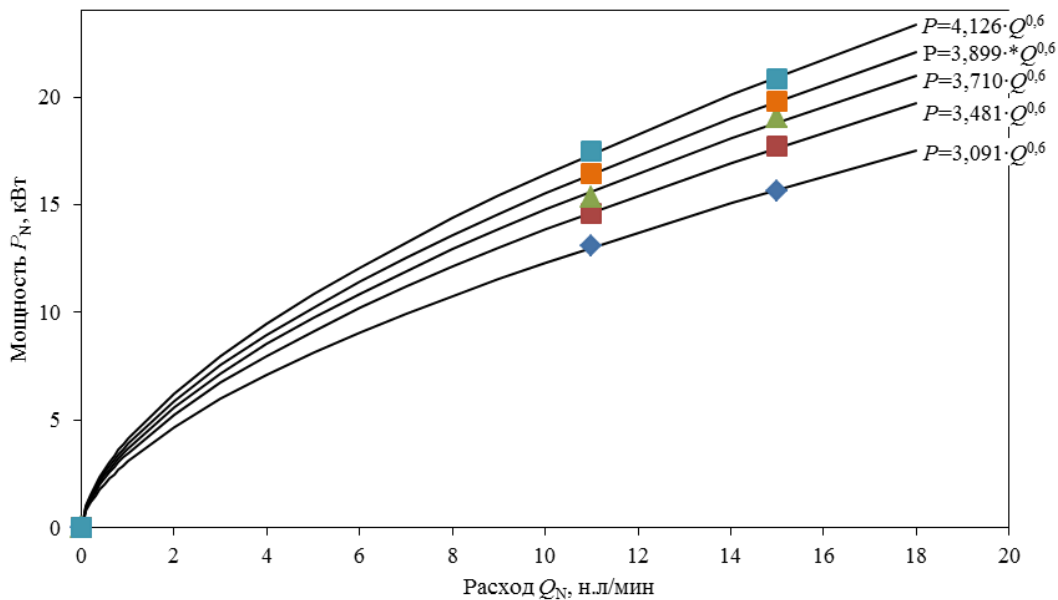


Рис. 5. Зависимость мощности дуги от расхода азота при токе дуги 300 (◆); 350 (■); 400 (▲); 450 (□) и 500 А (■)

Из данных табл. 4 видно, что коэффициент  $a$  монотонно возрастает при увеличении тока дуги. Полагая, что при токе дуги 0 А мощность также составит 0 кВт, зависимость  $a(I)$  будет иметь вид  $f(g)=ag^b$ . Следовательно, уравнение регрессии будет найдено методом наименьших квадратов по формулам (3) и (4):

$$\begin{aligned} a(I) &= 0,139 \cdot I^{0,547}; \\ R^2 &= 0,986; \\ r_{x,y} &= 0,993. \end{aligned}$$

Очевидно, что зависимость мощности плазматрона от тока дуги и расхода азота находится из выражения:

$$P_N = 0,139 \cdot I^{0,547} \cdot Q_N^{0,6}. \quad (10)$$

Зависимость (10) представлена на рис. 6.

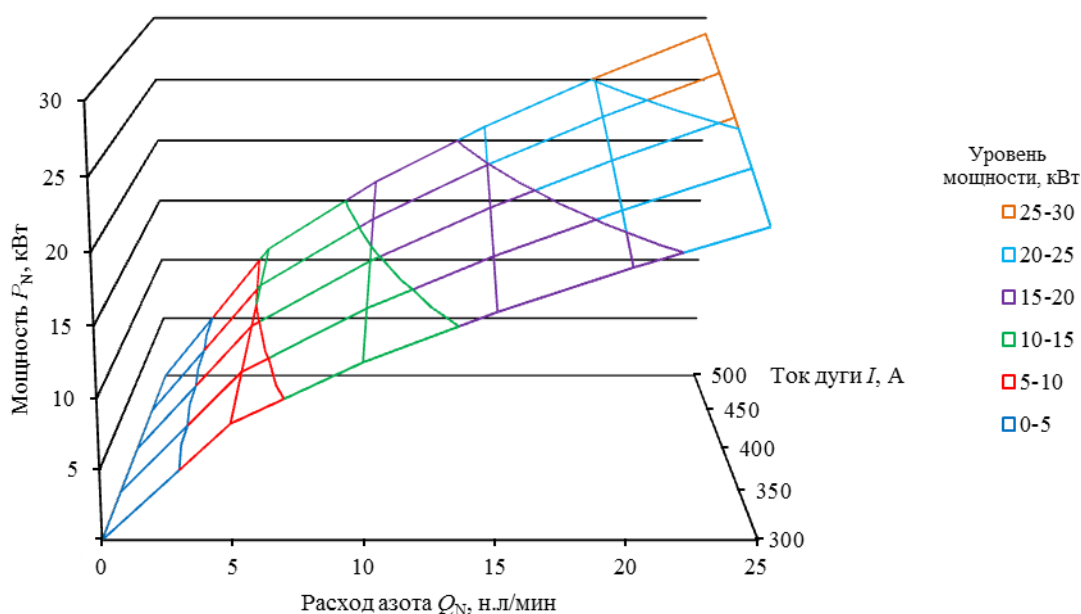


Рис. 6. Зависимость мощности плазматрона от тока дуги и расхода азота

Очевидно, что полная мощность серийного плазматрона Metco F4 при использовании плазмообразующих газов аргона и азота вычисляется как:

$$P = 0,012 \cdot I^{1,015} \cdot Q_{Ar}^{0,25} + 0,139 \cdot I^{0,547} \cdot Q_N^{0,6}. \quad (11)$$

#### *Исследование зависимости полной мощности плазматрона при использовании плазмообразующих газов аргона и азота*

Оценка адекватности математической модели проведена путем вычисления относительной погрешности  $\epsilon_{отн}$ :

$$\epsilon_{отн} = \frac{P_{эксп} - P_{расч}}{P_{эксп}} \cdot 100\%,$$

где  $P_{эксп}$ ,  $P_{расч}$  – соответственно экспериментальные значения мощности дуги из табл. 1 и расчетные значения мощности дуги, полученные по формуле (11).

Результаты оценки представлены в табл. 5.

Таблица 5

Оценка адекватности математической модели, описываемой формулой (11)

Ток дуги $I$ , А	Относительная погрешность модели, %, при расходе газа, н.л/мин			
	азота $Q_N$	аргона $Q_{Ar}$		
		15	20	25
300	0	4,721	3,569	3,639
	11	1,007	0,636	0,731
	15	0,835	0,099	-1,028
350	0	2,960	3,023	4,168
	11	2,246	1,894	2,022
	15	2,171	2,214	3,007
400	0	4,309	3,432	2,955
	11	2,397	0,614	-0,267
	15	2,218	2,256	3,028
450	0	3,744	3,727	3,405
	11	3,056	0,753	-0,328
	15	1,868	0,408	0,643
500	0	3,988	3,944	3,744
	11	2,530	1,334	0,697
	15	1,454	0,951	0,105

Из данных табл. 5 видно, что максимальная относительная погрешность модели составляет не более 5%, следовательно, математическая модель достаточно точно описывает зависимость мощности дуги серийного плазматрона Metco F4 от тока дуги в рабочем диапазоне 300–500 А и расходов аргона и азота в диапазонах 15–25 и 11–15 н.л/мин соответственно.

Известно [9, 11–16], что для наиболее эффективного использования энергии при плазменном напылении необходимо выбирать режим работы плазматрона с максимальным напряжением. С учетом того, что  $P=UI$ , из выражения (11) получаем:

$$U=0,012 \cdot I^{0,015} \cdot Q_{Ar}^{0,25} + 0,139 \cdot I^{-0,453} \cdot Q_N^{0,6} . \quad (12)$$

Как несложно заметить,  $U(I, Q_{Ar}, Q_N)$  является функцией трех переменных, поэтому при ее исследовании попеременно фиксируют два параметра и рассматривается зависимость функции от третьего параметра. В качестве фиксированных параметров принимаются значения середины диапазона вариации:  $\tilde{I}=400$  А,  $\tilde{Q}_{Ar}=20$  н.л/мин,  $\tilde{Q}_N=13$  н.л/мин, тогда

$$U(I)=U|_{Q_{Ar}, Q_N} = 0,025 \cdot I^{0,015} + 0,648 \cdot I^{-0,453} ;$$

$$U(Q_{Ar})=U|_{I, Q_N} = 0,013 \cdot Q_{Ar}^{0,25} + 0,043 ;$$

$$U(Q_N)=U|_{I, Q_{Ar}} = 0,028 + 0,009 \cdot Q_N^{0,6} .$$

Очевидно, скорость изменения функции оценивается по величине первой производной, тогда:

$$\frac{dU(I)}{dI} = 3,75 \cdot 10^{-4} \cdot I^{-0,985} - 0,294 \cdot I^{-1,453} ;$$

$$\frac{dU(Q_{Ar})}{dQ_{Ar}} = 3,25 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{Ar}^{-0,75} ;$$

$$\frac{dU(Q_N)}{dQ_N} = 5,4 \cdot 10^{-3} \cdot Q_N^{-0,4} .$$

На рис. 7 показаны зависимости функций  $U(I)$ ,  $U(Q_{Ar})$ ,  $U(Q_N)$ , а также их первые производные.

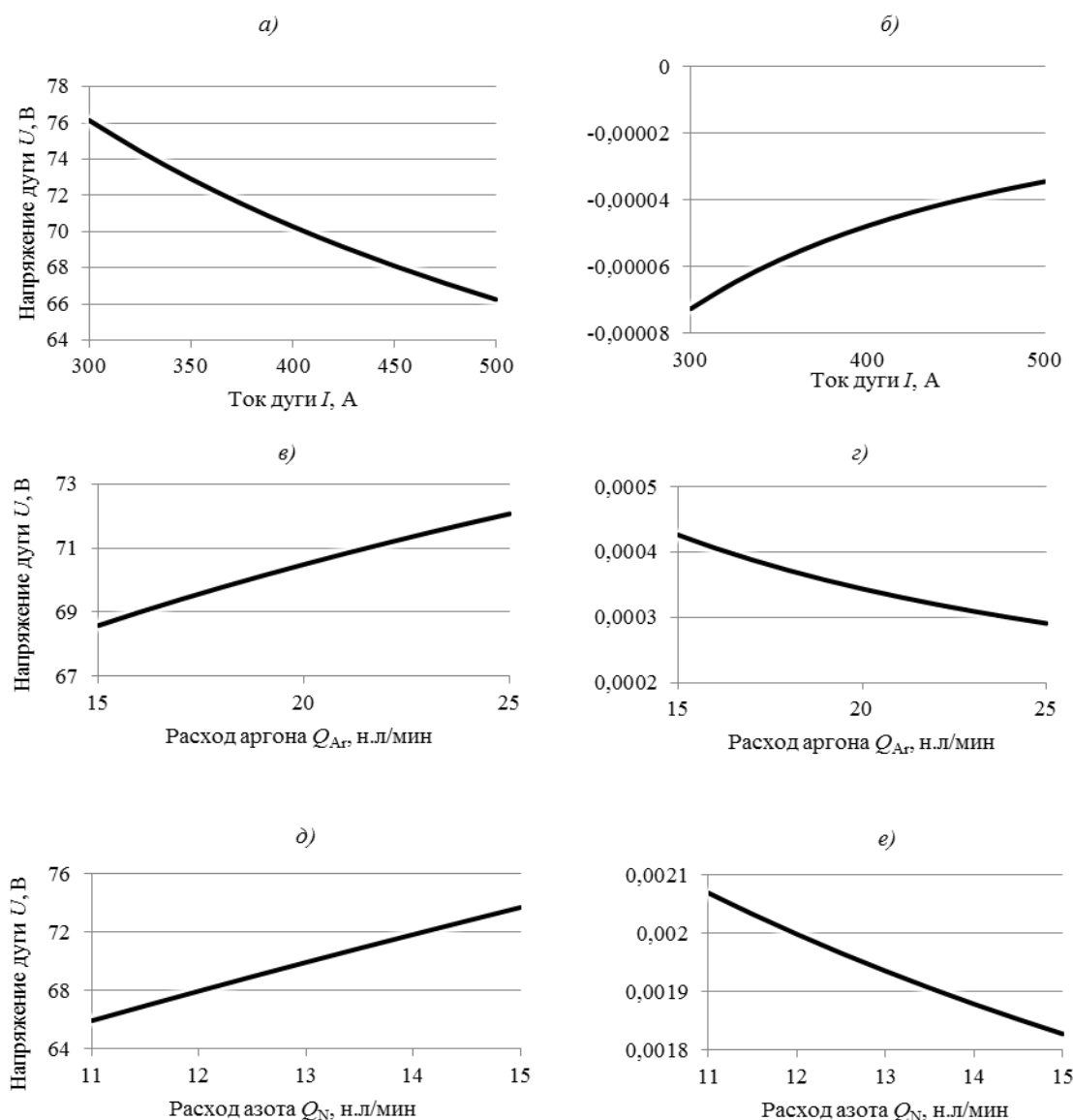


Рис. 7. Зависимости функций  $U(I)$  (а);  $dU(I)/dI$  (б);  $U(Q_{Ar})$  (в);  $dU(Q_{Ar})/dQ_{Ar}$  (г);  $U(Q_N)$  (д);  $dU(Q_N)/dQ_N$  (е)

Видно (рис. 7, а, б), что увеличение тока дуги при сохранении значений остальных параметров снижает напряжение дуги, а повышение расхода аргона увеличивает напряжение дуги (рис. 7, в, г). Видно также (рис. 7, д, е), что повышение расхода азота увеличивает напряжение дуги. Сравнивая значения первых производных функций  $U(Q_{Ar})$  и  $U(Q_N)$  на рис. 7, г, е, видим, что расход азота вносит больший вклад в увеличение напряжения дуги, чем расход аргона.

#### Расчет температуры плазменного потока

Образование плазмы из молекул двухатомного газа представлено на рис. 8. При низких температурах до 10 К молекулы совершают поступательные движения (а), при повышении температуры до 1000 К у молекул появляется вращательное движение (б).

Столкновения молекул провоцируют их диссоциацию (в), и при дальнейшем повышении температуры происходит их ионизация (з) [11].

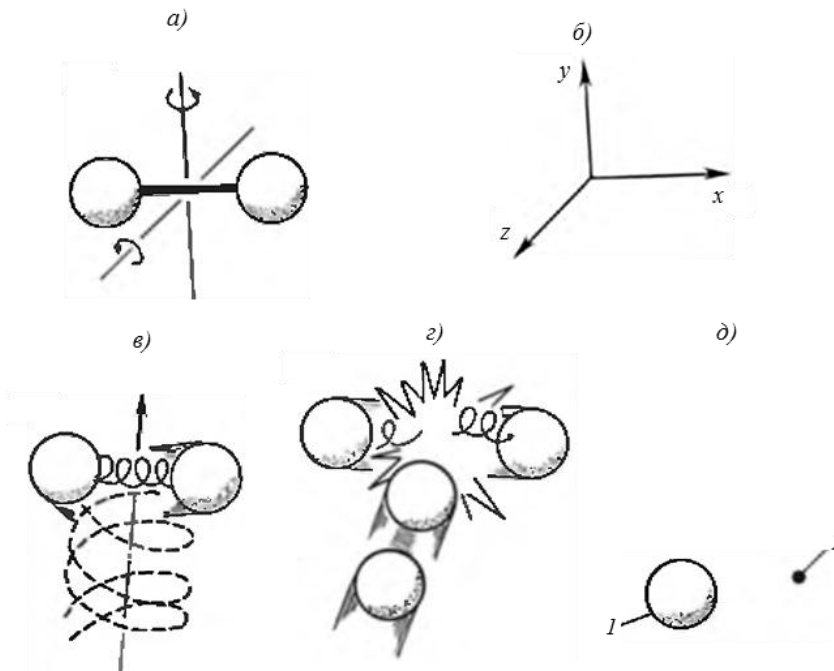


Рис. 8. Механизм образования плазмы:  
1 – положительный ион; 2 – электрон

Типичное распределение температур в плазменной струе в зависимости от расстояния от среза сопла показано в работе [12] при силе тока дуги 400 А и расходе аргона 10 н.л/мин и представлено на рис. 9.

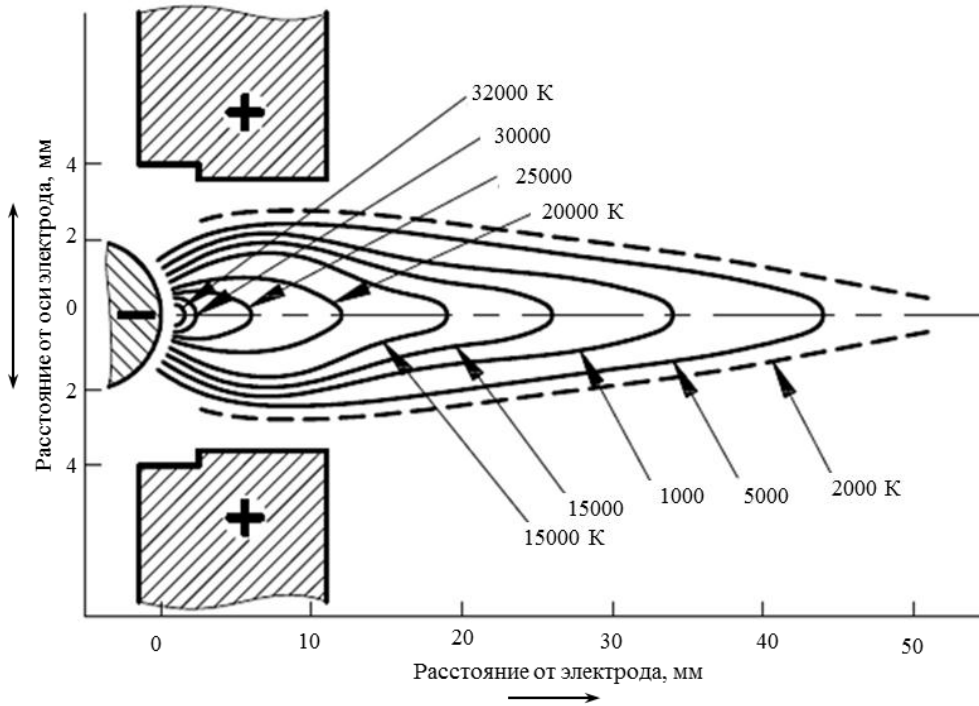


Рис. 9. Распределение температуры в плазменной струе

Известно [12], что эффективность использования энергии плазменной дуги на нагрев плазмообразующего газа составляет величину ~30%. Среднеинтегральная объемная энтальпия определяется как [15]:

$$\Delta H = \frac{\Delta E}{V} \text{ [Дж/м}^3\text{]},$$

где  $\Delta E = 0,3 \cdot P \cdot t$  – энергия, передаваемая газу при нагреве в течение времени  $t$  с учетом эффективности процесса, Дж;  $V = \frac{Q \cdot 10^{-3} \cdot t}{60}$  – объем газа в течение времени  $t$ , проходящий через срез сопла, м<sup>3</sup>.

Тогда:

$$\Delta H_{Ar} = 0,216 \cdot I^{1,015} \cdot Q_{Ar}^{-0,75}; \quad (13)$$

$$\Delta H_N = 2,502 \cdot I^{0,547} \cdot Q_N^{-0,4}. \quad (14)$$

Энтальпия газа, вычисленная по формулам (13) и (14), определяет индивидуальные температуры аргона  $T_{Ar}$  и азота  $T_N$  по графику [11], представленному на рис. 10.

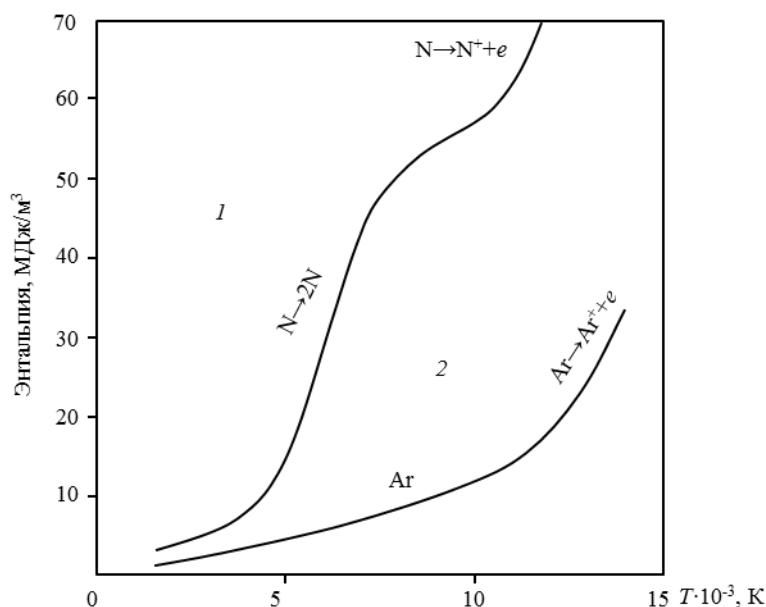


Рис. 10. Зависимость энтальпии от температуры для аргона и азота в областях диссоциации (1) и ионизации (2)

Среднюю температуру аргон-азотной плазмы  $T_{Ar-N}$  можно приблизительно оценить из уравнения теплосодержания системы:

$$T_{Ar-N} = \frac{Q_{Ar} \cdot C_{Ar} \cdot \rho_{Ar} \cdot T_{Ar} + Q_N \cdot C_N \cdot \rho_N \cdot T_N}{Q_{Ar} \cdot C_{Ar} \cdot \rho_{Ar} + Q_N \cdot C_N \cdot \rho_N}, \quad (15)$$

где  $C_{Ar} = 523$  Дж/(кг·К) – теплоемкость аргона при нормальных условиях;  $C_N = 1051$  Дж/(кг·К) – теплоемкость азота при нормальных условиях;  $\rho_{Ar} = 1,784$  кг/м<sup>3</sup> – плотность аргона при нормальных условиях;  $\rho_N = 1,25$  кг/м<sup>3</sup> – плотность азота при нормальных условиях.

При режиме работы плазмотрона  $\tilde{I}=400$  А,  $\tilde{Q}_{Ar}=20$  н.л/мин,  $\tilde{Q}_N=13$  н.л/мин приближительная температура аргон-азотной плазмы составляет  $T_{Ar-N}=7305$  К.

Среднемассовая скорость потока  $v_{Ar-N}$  плазменной струи на срезе сопла может быть определена из уравнения неразрывности течения и уравнения состояния [15]:

$$\frac{v_{хол}}{T_{хол}} = \frac{v_{Ar-N}}{T_{Ar-N}},$$

где  $v_{хол} = \frac{Q_{Ar} + Q_N}{0,047 \cdot d_c^2}$ , м/с – скорость истечения из сопла плазмотрона Metco F4 диаметром  $d_c=6$  мм холодного газа;  $T_{хол}=293$  К – температура холодного газа.

Тогда:

$$v_{Ar-N} = \frac{(Q_{Ar} + Q_N) \cdot T_{Ar-N}}{0,047 \cdot d_c^2 \cdot T_{хол}}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) с учетом  $T_{Ar-N}=7305$  К получаем среднемассовую скорость потока плазменной струи  $v_{Ar-N}=486,3$  м/с.

### Заключения

В результате исследования режимов работы серийного плазмотрона Metco F4 с использованием плазмообразующих газов аргона и азота получены следующие результаты.

1. Получена аналитическая зависимость полной мощности плазменной дуги от тока дуги и расходов аргона и азота. Относительная погрешность предложенной модели составляет не более 5%.

2. Получена аналитическая зависимость напряжения плазменной дуги от тока дуги и расходов аргона и азота. В результате исследования зависимости и ее частных производных установлено, что увеличение тока дуги снижает напряжение дуги, а повышение расходов аргона и азота повышает напряжение дуги, причем расход азота вносит больший вклад в повышение напряжения дуги.

3. Предложена расчетно-графическая методика оценки средневзвешенной температуры и скорости плазменного потока на срезе сопла серийного плазмотрона Metco F4.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Сб. докл. конф. «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники». М.: ВИАМ, 2015. С. 3.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
4. Мубояджян С.А., Будинковский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.

5. Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-38-44.
6. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 12–15.
7. Матвеев П.В., Будиновский С.А. Исследование свойств защитных жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для рабочих температур до 1300°C // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 22–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26.
8. Кашин Д.С., Стехов П.А. Защитные покрытия для жаропрочных сплавов на основе ниобия // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-work.ru> (дата обращения 16.04.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-1-1.
9. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларуская навука, 2011. 357 с.
10. Кибзун А.И., Горянова Е.Р., Наумов А.В., Сиротин А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. М.: Физматлит, 2002. 224 с.
11. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
12. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
13. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
14. Газотермическое напыление: учеб. пособие / под общ. ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
15. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
16. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.