

Автоматизация и Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор
В.Л. Белоусов

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:**

Бучаченко А.Л.

Гусев А.А.

Дегтярев Ю.И.

Елисеев В.А.

Иванов А.П.

Мальцева С.В.

Нефедов Е.И.

Шебакин И.Ю.

(заместитель главного редактора)

РЕДАКЦИЯ:

Шебакин И.Ю. — зам. главного редактора

Гончарова Л.К. — научный редактор

Осипова В.Г. — научный редактор

Богус С.В. — секретарь

Адрес редакции:

107076, Москва,

Стромынский пер., 4

Тел.: (499) 748 0290,

E-mail: ast@mashin.ru; <http://www.mashin.ru>

10

2011

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

Журнал зарегистрирован 9 апреля
1999 г. за № 018684 в Комитете
Российской Федерации по печати

Журнал входит в перечень
утверждённых ВАК РФ изданий
для публикации трудов соискателей
учёных степеней

ООО «Издательство Машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва,

Стромынский пер., 4

Тел.: (499) 268 3858,

факс: (499) 269 4897



УДК 65.011.56

П.А. Тополянский, канд. техн. наук, доц., А.П. Тополянский,
Н.А. Соснин, д-р техн. наук, проф., С.А. Ермаков, канд. техн. наук, доц.
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

conf@plasmacentre.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Показано использование плазменной струи как датчика и дополнительного источника микротока, обеспечивающих автоматизацию контроля толщины наносимого покрытия в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: плазменная технология, нанопокрывтие, плазменная струя, датчик, автоматизация контроля, толщина наносимого покрытия.

Plasma jet utilization as transducer and additional microcurrent source that provide the control automation of the deposited coating thickness in the real time scale is shown.

Key words: plasma technology, nanocoating, plasma jet, transducer, control automation, deposited coating thickness.

Технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) обеспечивает нанесение износостойких нанопокровтий с помощью электродугового плазмотрона без применения вакуума, отличается мобильностью и малым энергопотреблением (порядка 5 кВА) [1].

Наносимое покрытие на основе системы Si–O–C–N в технологии ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи 10–100 мм/с формируется слоями толщиной 30–3 нм. Общая толщина покрытия, дающего значимый эффект повышения эксплуатационной стойкости, составляет 0,5–2 мкм (рис. 1).

Анализ распределения атомов элементов по толщине нанесённого покрытия, проведённый с помощью Оже-электронной спектроскопии, позволяет условно выделить три зоны (рис. 2).

В поверхностном слое покрытия протяжённостью 0,05–0,5 мкм (первая зона) наблюдаются значительные колебания концентрации углерода, кислорода и кремния, что характеризует не только неоднородность состава, но и некоторую шероховатость поверхности покрытия в пределах контрольной площадки размером 2×2 мм при последовательном травлении покрытия по глубине ионной бомбардировкой.

Вторая зона наиболее стабильна по составу. Соотношение концентраций атомов Si, C и O, а также анализ спектров углерода указывают на то, что около 20–30 % кремния может быть связано в соединение SiC, а около 70–80 % – в SiO₂ (с некоторым отличием от стехиометрического состава).

В третьей, переходной зоне наблюдается плавное снижение концентрации элементов. Ширина этой зоны порядка 0,5 мкм.

Рентгенофазовый анализ нанопокровтия проводился на рентгеновском дифрактометре фирмы «Rigaku» (Япония). На полученных рентгенограммах пики Si, SiC, SiO₂, SiO, Si₃N₄ и т. д., не относящихся к материалу подложки, отсутствовали. С учётом скорости охлаждения наносимого покрытия порядка (10¹⁰–10¹²) К/с [1] можно сделать вывод, что наносимое покрытие формируется в аморфном виде.

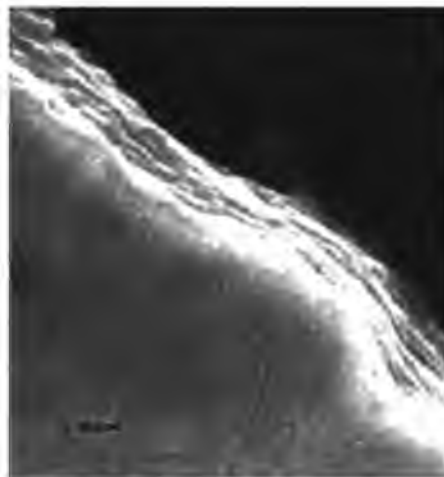


Рис. 1. Поперечный шлиф поверхности с покрытием толщиной 2 мкм (×5000)

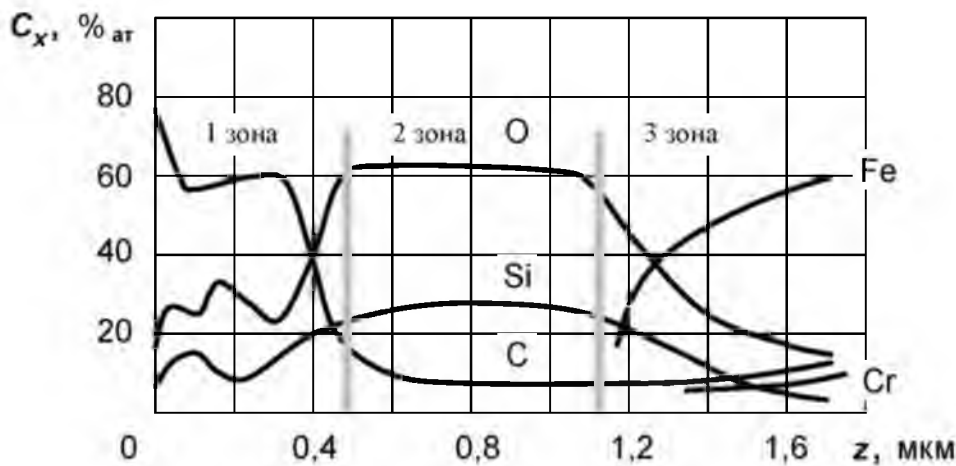


Рис. 2. Профили распределения атомов элементов по толщине упрочняющего нанопокрyтия

Зависимости напряжения между анодом плазмoтрона и обрабатываемым изделием $U_{\text{аи}}$ и микротока $I_{\text{аи}}$, протекающего по цепи: дополнительный источник питания – анод плазмoтрона – плазменная струя – изделие от напряжения ДИП и расстояния сопло плазмoтрона – изделие

$l_{\text{си}}$, мм	$U_{\text{ДИП}} = 0 \text{ В}$		$U_{\text{ДИП}} = 10 \text{ В}$		$U_{\text{ДИП}} = 20 \text{ В}$		$U_{\text{ДИП}} = 30 \text{ В}$	
	$U_{\text{аи}}$, В	$I_{\text{аи}}$, мА	$U_{\text{аи}}$, В	$I_{\text{аи}}$, мА	$U_{\text{аи}}$, В	$I_{\text{аи}}$, мА	$U_{\text{аи}}$, В	$I_{\text{аи}}$, мА
5	-3,9	13,6	-0,8	35,5	3,6	56,1	6,9	83,3
10	-2,7	9,4	3,3	23,3	12,1	27,2	16	53,03
15	-1,7	7,4	5,8	13,6	15	16,7	24,3	19,7
20	-0,7	3,3	7,3	10,2	16,5	11,2	26,5	12,7
25	-0,6	1,9	8,3	5,8	17,6	7,9	27,6	9,2
35	-0,2	0,8	9,3	2,7	18,9	3,6	28,8	4,5

По методике работы [2] проводились измерения комплексного сопротивления наносимого нанопокрyтия на основе анализа электротехнической схемы замещения, включающей ёмкость и сопротивление. Было установлено, что удельное электрическое сопротивление характеризует плазменное упрочняющее нанопокрyтие системы Si–O–C–N как диэлектрик ($\rho = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Проведённые исследования позволили выявить закономерности изменения микротока $I_{\text{аи}}$, протекающего по цепи: дополнительный источник питания (ДИП) – анод плазмoтрона – плазменная струя – изделие при использовании в качестве датчика самой плазменной струи.

В таблице приведены значения $I_{\text{аи}}$ и $U_{\text{аи}}$ при различных расстояниях между соплом плазмoтрона и изделием $l_{\text{си}} = (5–35) \text{ мм}$ и разном выходном напряжении дополнительного источника питания $U_{\text{ДИП}} = (0–30) \text{ В}$.

Из таблицы видно, что наиболее информативным параметром является микроток $I_{\text{аи}}$ во всём диапазоне нанесения покрyтия и при разных выходных напряжениях дополнительного источника питания.

На рис. 3 показано изменение микротока в зависимости от выходного напряжения ДИП при постоянной дистанции $l_{\text{си}} = 10 \text{ мм}$. Из рис. 3 видно, что с увеличением выходного напряжения ДИП от 0 до 30 В микроток возрастает примерно в 5 раз и только в диапазоне от 10 до 20 В мало зависит от напряжения ДИП.

Таким образом, предварительные исследования показали, что наиболее перспективным для оценки изменения проводимости измерительной цепи при нанесении упрочняющего нанопокрyтия является микроток при подключении к аноду плазмoтрона дополнительного источника питания напряжением 10–20 В.

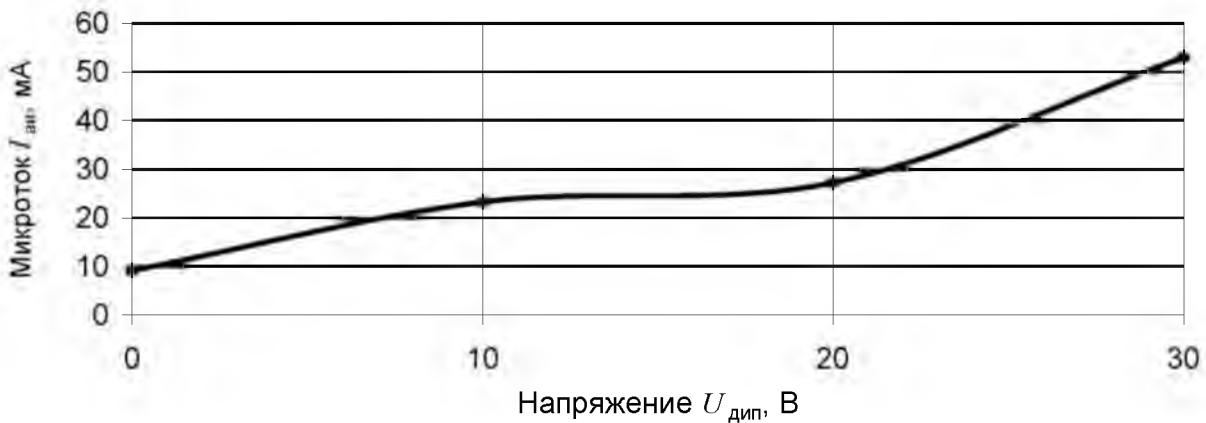


Рис. 3. Зависимость микротока от напряжения дополнительного источника питания при дистанции $l_{си} = 10$ мм

Данный метод проверялся при нанесении покрытия на цилиндрическую фрезу диаметром $d = 25$ мм.

На основании проведенных исследований и статистических экспериментальных данных по повышению стойкости аналогичного инструмента минимум в 2 раза после упрочнения расчётное общее время нанесения покрытия определяется по формуле

$$t_{об} = S_p / P,$$

где S_p – расчётная площадь поверхности, подлежащая упрочнению; P – производительность процесса.

При нанесении покрытия толщиной $F = 0,5$ мкм на локальный кольцевой участок производительность процесса $P = 2,2 / F = 4,4$ мм²/с (F измеряется в микрометрах).

Расчётная площадь упрочняемой поверхности S_p при длине рабочей зоны (по оси фрезы) $l_{раб} = 120$ мм равна реальной (заданной) площади упрочнения S :

$$S_p = S = \pi d l_{раб} = 9425 \text{ мм}^2.$$

Расчётное общее время нанесения покрытия

$$t_{об} = 9425 / 4,4 = 2142 \text{ с}.$$

Число локальных (кольцевых) участков упрочнения на длине цилиндрической рабочей зоны 120 мм равно $K = 120 / 8 = 15$ участков. Расчётное время обработки одного локального (кольцевого) участка равно $t_{уч} = 2142 / 15 = 142,8$ с.

Процесс нанесения покрытия на фрезу осуществлялся при режиме: ток сжатой дуги $I = 100$ А, расход плазмообразующего газа $G_{III} = 2,4$ л/мин, расход защитного газа $G_{зг} = 1,2$ л/мин, расход транспортирующего газа $G_{II} = 1,1$ л/мин, рас-

стояние между соплом плазмотрона и изделием $l_{си} = 17$ мм, напряжение дополнительного источника питания 20 В.

В процессе нанесения покрытия автоматически измерялось значение микротока, протекающего по цепи: дополнительный источник питания – анод плазмотрона – плазменная струя – изделие в зависимости от времени нанесения покрытия. На рис. 4 приведена зависимость значений микротока при вращении фрезы без осевого смещения плазмотрона.

Таким образом, установлено, что по мере роста толщины покрытия микроток нелинейно уменьшается.

Как видно из графика (рис. 4), на одном локальном участке время нанесения покрытия, оцениваемое по среднестатистическому микро-

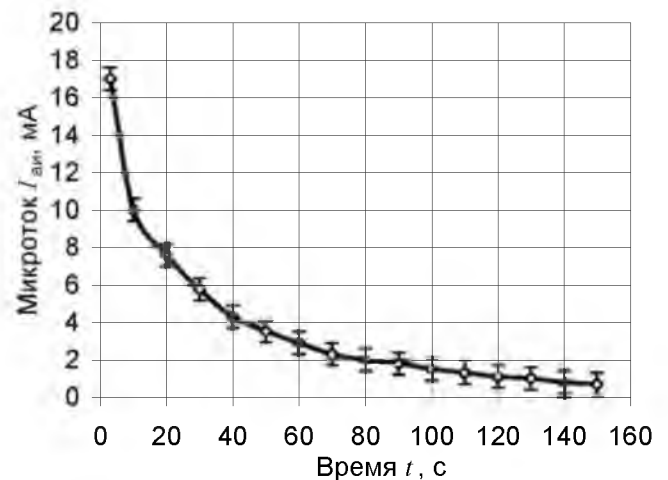


Рис. 4. Зависимость микротока в цепи анод плазмотрона – изделие от времени нанесения покрытия на одном локальном участке при упрочнении цилиндрической фрезы по кольцевой траектории

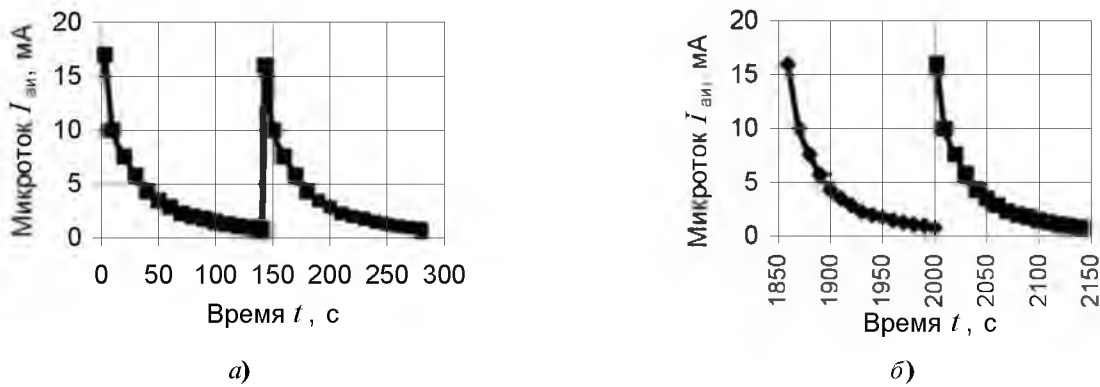


Рис. 5. Изменение микротока в разных промежутках времени нанесения покрытия на локальные кольцевые участки фрезы:

a – первый и второй участки; *б* – четырнадцатый и пятнадцатый участки

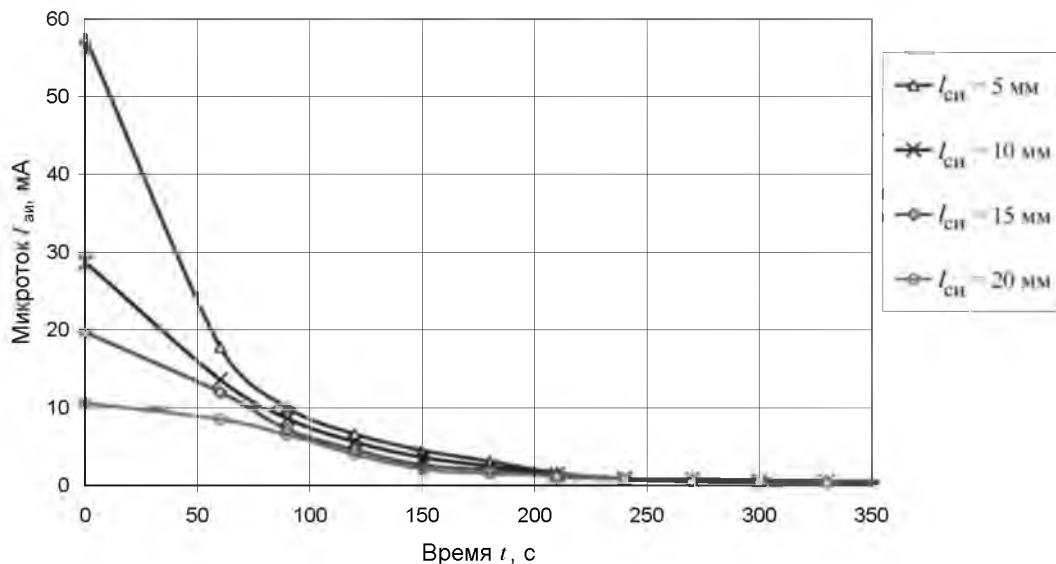


Рис. 6. Изменение микротока в зависимости от длительности процесса t и расстояния сопло плазматрона – изделие $l_{сп}$ при нанесении покрытия на образцы из стали X12 при температуре предварительного подогрева 60–80 °C

току установки 0,6–0,9 мА, составляет в среднем приблизительно 150 с и отличается на 5 % от расчётного времени обработки одного локального участка (142,8 с) для толщины покрытия 0,5 мкм.

На рис. 5 показано изменение микротока в разные промежутки времени нанесения покрытия на всю фрезу. В процессе нанесения покрытия на локальные участки фрезы при шаговом перемещении по оси вращения с шагом 8 мм микроток $I_{ам}$ в начальный момент на всех участках, начиная с первого и заканчивая последним, пятнадцатым, составляет 17 мА, в процессе дальнейшего нанесения покрытия на каждом локальном участке $I_{ам}$ плавно падает до 0,7 мА.

Таким образом, на примере нанесения покрытия на фрезу показана эффективность разрабо-

танного метода, который в реальном масштабе времени обеспечивает контроль нанесения покрытия.

Также исследовалось влияние дистанции нанесения покрытия и температуры предварительного и сопутствующего подогрева изделия на характер изменения микротока. Эксперименты проводились на образцах из трёх материалов: углеродистая сталь У8, хромистая сталь X12, быстрорежущая сталь Р6М5. Образцы представляли собой прутки диаметром 40 мм, длиной $l = 80$ мм, изготовленные механической обработкой с последующей термической обработкой и шлифовкой цилиндрической поверхности.

Процесс нанесения покрытия проводился при том же режиме (см. выше).



а)



б)

Рис. 7. Процесс финишного плазменного упрочнения фрезы (а) и прибор контроля нанесения покрытия (б)

Образцы из сталей У8 и Х12 предварительно нагревались до температуры 60–80 °С, а образцы из стали Р6М5 – до 180–200 °С. Покрытие наносили на образцы при разных расстояниях сопло плазматрона – изделие: $l_{\text{си}} = (5; 10; 15; 20)$ мм.

На рис. 6 представлены графики изменения микротока в зависимости от длительности нанесения покрытия и дистанции сопло плазматрона – изделие при обработке образцов диаметром 40 мм из стали Х12. Как видно из рис. 6, длительность нанесения покрытия для микротока установки 0,6–0,9 мА практически не зависит от дистанции обработки и находится в диапазоне 210–270 с при расчётном общем времени обработки 229 с для толщины покрытия 0,5 мкм.

При нанесении покрытия на образцы, изготовленные из сталей Х12, У8, Р6М5 при дистанции нанесения покрытия от 5 до 20 мм, зависимости $I_{\text{ан}}(t)$ (см. рис. 6) практически показывают одинаковую длительность обработки, которая находится в отмеченном выше диапазоне. Таким образом, отсутствует зависимость длительности нанесения покрытия от химического состава материала упрочняемого изделия.

На рис. 7, а показан процесс финишного плазменного упрочнения фрезы, а на рис. 7, б – общий вид прибора автоматического контроля к

установке для плазменного нанесения упрочняющего нанопокртия, в котором реализован описанный принцип контроля процесса ФПУ.

Таким образом, из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

изменение дистанции нанесения покрытия от 5 до 20 мм и температуры предварительного и сопутствующего подогрева изделия от 60 до 200 °С не влияет на закономерности изменения микротока;

выявленные закономерности изменения микротока, протекающего по цепи дополнительный источник питания – анод плазматрона – плазменная струя – обрабатываемое изделие, при увеличении толщины наносимого покрытия могут быть использованы для автоматизации контроля процесса нанесения упрочняющего нанопокртия в реальном масштабе времени.

Библиографические ссылки

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во политехн. ун-та. СПб., 2008. 406 с.

2. Калмыков А.В., Тополянский П.А. Исследование электрических характеристик тонких кремнийуглеродосодержащих покрытий // Дефектоскопия. 2003. № 10. С. 38–44.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При этом ссылка на журнал обязательна.