

ТОЛЩИНА ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ФИНИШНОМ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., ЕРМАКОВ С.А., СОСНИН Н.А.
Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, Россия

Новая технология финишного плазменного упрочнения поверхности (ФПУ) [1] требует детального изучения геометрических параметров наносимого упрочняющего тонкопленочного аморфного покрытия, прежде всего, с целью получения покрытия заданной толщины, а на развитых поверхностях – с максимальной равномерностью покрытия по толщине. В данной работе решались следующие задачи:

1. экспериментальное определение распределения толщины покрытия по радиусу неподвижного пятна;
2. расчет распределения толщины покрытия поперек полосы упрочнения движущегося пятна;
3. расчет распределения толщины покрытия на развитой поверхности при параллельном нанесении перекрывающихся полос упрочнения.

Первая задача решалась методом, основанном на использовании цветов тонких пленок [2].

Применялись образцы из стали X18H9T, прокаленные после нанесения покрытия в печи при температуре 730 °С. Видимая зона покрытия после прокалики образцов не имела следов окисления, в отличие от всей остальной поверхности образцов, что позволило четко выявить внешнюю границу пятна нанесенного пленочного покрытия.

Известно, что, падая на тонкую пленку луч света частично отражается от верхней, а частично от нижней поверхности пленки. В результате возникает интерференционная картина, обусловленная наложением волн. В тонких пленках на поверхности прозрачных и непрозрачных твердых тел оба луча отражаются от оптически более плотной среды с потерей фазы 180°, следовательно, согласно [2] условие усиления волн имеет вид:

$$\lambda = \frac{2 \cdot d \cdot n}{k}, \quad (1)$$

где λ – длина волны света;
 d – толщина пленки;

n – показатель преломления пленки (для кварца – в среднем [3] – 1,55);
 $k = 1, 2, 3, \dots$

По интерференционной картине, возникающей на поверхности отполированного образца после нанесения тонкопленочного покрытия, можно рассчитать распределение толщины покрытия по радиусу неподвижного пятна. Из выражения (1) толщина покрытия равна

$$d = \frac{\lambda \cdot k}{2 \cdot n},$$

где k – номер кольца данного цвета от внешней границы пятна покрытия.

Принимавшиеся в расчете длины световых волн приведены в табл. 1.

Таблица 1

Принимавшиеся в расчете длины световых волн [2]

Цвет	Крас- ный	Оранже- вый	Жел- тый	Зеле- ный	Голу- бой	Си- ний	Фиоле- товый
λ , мкм	0,69	0,60	0,57	0,53	0,49	0,47	0,42

Принимая распределение толщины покрытия по радиусу неподвижного пятна близким к нормальному закону распределения Гаусса

$$f(r) = fm \exp\left(-\frac{r^2}{R_{\text{э}}^2}\right),$$

где fm – толщина покрытия в центре неподвижного пятна;

$R_{\text{э}}$ – эффективный радиус неподвижного пятна покрытия,

Можно из опытов определить эффективный радиус неподвижного пятна покрытия $R_{\text{э}}$

$$R_{\text{э}} = \frac{r}{\sqrt{(-\ln fm - \ln f(r))}},$$

где r – радиус внешней границы цветного кольца, где определяется толщина покрытия $f(r)$.

Граница наружного кольца (желтого цвета) одновременно является внешней границей неокисленной зоны.

Результаты экспериментов и расчетов по цветам тонких пленок представлены в таблице 2. Видно, что внешней границе неокисленной зоны соответствует толщина покрытия 0,18 мкм.

Среднее значение эффективного радиуса неподвижного пятна покрытия для типичных режимов ФПУ, как это следует из табл.1, составляет $R_{\text{э}} = (10,97 \pm 0,35)$ мм или, округляя, – $R_{\text{э}} = 11$ мм, что и будет в дальнейшем приниматься в расчетах. Следует отметить, что данное значение эффективного радиуса неподвижного пятна покрытия (11 мм) больше ранее полученного для плазмохимического генератора НПХ-1 $R_{\text{э}} = 8$ мм, т.к. по данным проведенных исследований было установлено, что с ростом эффективного радиуса неподвижного пятна $R_{\text{э}}$ при прочих равных условиях толщина покрытия при ФПУ развитых поверхностей возрастает и покрытие формируется более равномерное, и с этой целью была разработана усовершенствованная конструкция плазмохимического генератора НПХ-3 в соответствии с выработанными рекомендациями. Все последующие исследования проводились с модернизированным плазмохимическим генератором НПХ-3, обеспечивающим получение эффективного радиуса неподвижного пятна покрытия **$R_{\text{э}} = 11$ мм.**

Таблица 2

Определение толщины покрытия на неподвижном пятне по цветам тонких пленок

Время нанесения пятна покрытия, t_0 , с	20	30	40
Цвет наружного кольца	1-й желтый	1-й желтый	1-й желтый
Средняя длина волны света λ , мкм	0,57	0,57	0,57
Наружный радиус кольца r , мм	8,5	9,0	10,5
Толщина покрытия на радиусе $r - f(r)$, мкм	0,18	0,18	0,18
Цвет центра	2-й голубой	2-й желтый	2-й красный
Средняя длина волны света λ , мкм	0,49	0,57	0,69
Толщина покрытия в центре f_m , мкм	0,32	0,37	0,45
Эффективный радиус пятна покрытия $R_{\text{э}}$, мм	11,3	10,6	11,0

Эффективный радиус неподвижного пятна покрытия $R_{\text{э}}$ совпадает по значению с эффективным радиусом пятна тепловвода струи плазмы модернизированного плазмохимического генератора

R_Q при средней эффективной мощности плазменной струи нового плазмохимического генератора на типичных режимах ФПУ $Q_{\text{Эср.}} = 110$ Вт.

$$R_{\text{Э}} = R_Q$$

Для движущегося плазмотрона подвижное пятно покрытия будет формировать полосу покрытия, поперечное распределение толщины покрытия в которой определяется интегральным действием плазменного потока с активными реагентами. Целесообразно рассчитать интегральную толщину покрытия на каждой хорде пятна покрытия параллельной оси движения, т.е. площадь вертикального «среза» по хорде (в кв. мкм) (рис. 1).

Длина каждой хорды для текущей координаты y равна (рис. 2).

$$2 \cdot a = 2 \cdot \sqrt{(Rm^2 - y^2)},$$

где Rm – максимальный радиус неподвижного пятна покрытия (может быть принят $Rm = 3 R_{\text{Э}}$).

Для каждой точки хорды толщина покрытия $f(x)$ определяется с учетом (см. рис. 2)

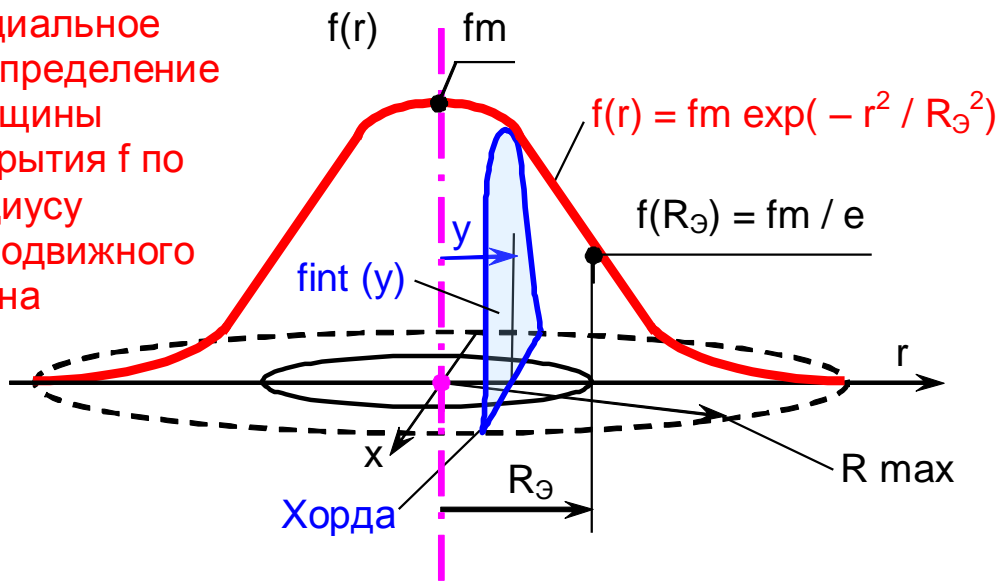
$$r^2 = x^2 + y^2$$

как

$$f(x) = fm \exp\left(-\frac{r^2}{Ry^2}\right) = fm \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{Ry^2}\right),$$

где x – текущая координата x при интегрировании.

Радиальное
распределение
толщины
покрытия f по
радиусу
неподвижного
пятна



$f_{int}(y)$ – рассчитываемая в программе площадь вертикального «среза» по хорде (т.е. интегральная толщина покрытия на хорде), кв.мкм.

Рис.1. К расчету распределения толщины покрытия поперек полосы упрочнения

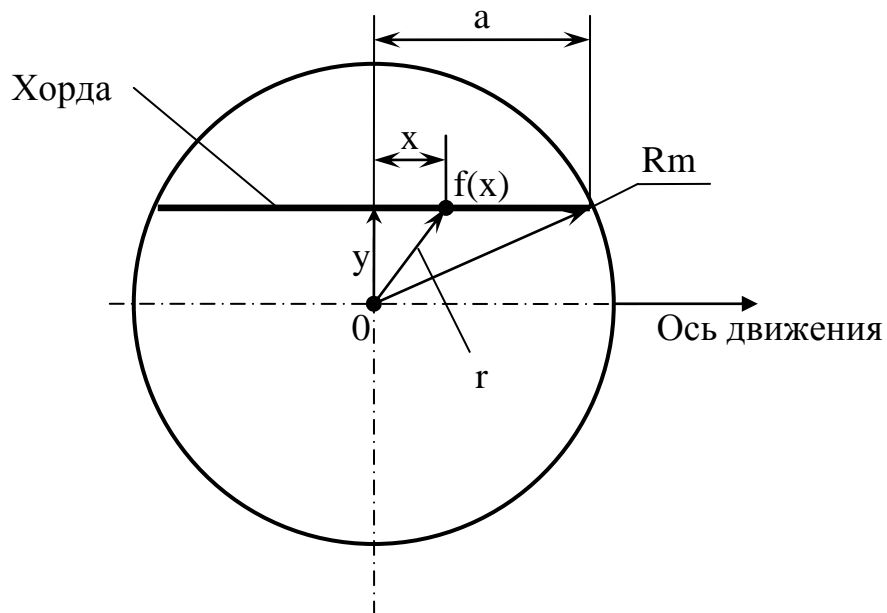


Рис. 2. К расчету распределения толщины покрытия поперек полосы упрочнения

Теперь легко вычислить распределение интегральной толщины покрытия $f_{int}(y)$ поперек неподвижного пятна покрытия:

$$f \text{ int } (y) = 2 \int_0^a f(x) dx = 2 \int_0^a fm \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{Ry^2}\right) dx \quad (2)$$

Интегральная толщина покрытия $f \text{ int } (y)$ пропорциональна максимальной толщине покрытия в центре неподвижного пятна покрытия fm (см. выражение (2))

$$f \text{ int } \propto fm$$

Из экспериментов было установлено, что толщина покрытия и связанная с ней микротвердость композиции покрытие-подложка линейно растут до некоторого предельного значения (см. рис. 3, седьмой цикл).

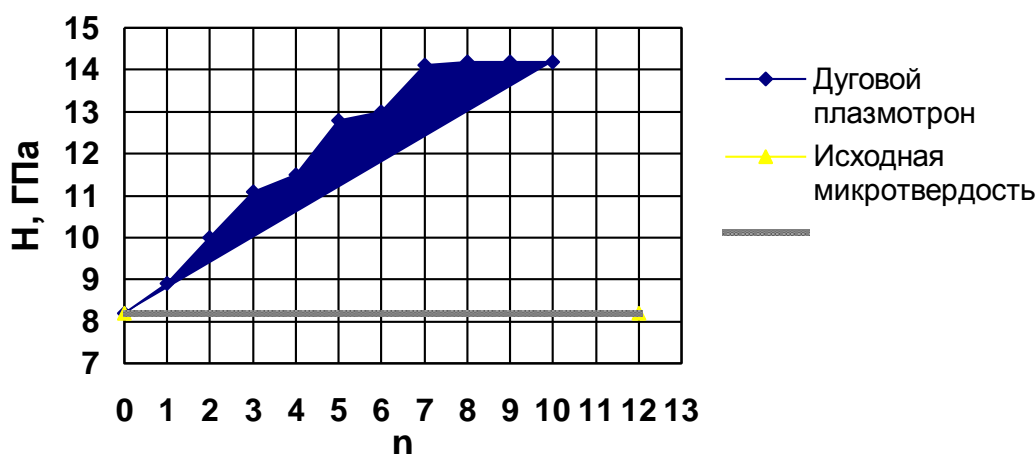


Рис. 3. Зависимость микротвердости композиции покрытие-подложка от числа циклов

Предельное время формирования качественного покрытия на неподвижном пятне (с линейной зависимостью от времени) обозначим как t_{max}

Имея распределение интегральной толщины покрытия поперек неподвижного пятна $f \text{ int } (y)$, можно рассчитать распределение толщины покрытия $f(y)$ поперек полосы, формируемой пятном, движущимся на некотором расчетном пути L .

Для неподвижного пятна толщина покрытия пропорциональна времени, т.е. $fm \propto t$ (линейно в пределах до t_{max}). В первые 20-25 секунд скорость формирования покрытия несколько выше, чем в последующее время, что можно объяснить прогревом упрочняемой поверхности плазменной струей и, тем самым, замедлением осаждения на подложке реагентов из плазмы. Начиная с 30 секунд, скорость формирования покрытия стабилизируется и можно

использовать линейное уравнение связи толщины покрытия fm с временем обработки t_0 (см. рис. 4):

$$fm = 0,011 \cdot t.$$

Интегральная толщина покрытия тоже будет пропорциональна времени обработки – $f_{int} \propto t$, а тогда толщина покрытия для полосы, формируемой подвижным пятном, f_v на некотором расчетном пути L будет (при $v \neq 0$):

$$f_v = f_{int} \frac{t_v}{t_0} \frac{1}{L} = f_{int} \frac{t_v}{t_0 \cdot v \cdot t_v} = \frac{f_{int}}{t_0 \cdot v} \quad (3)$$

где $L = v \cdot t_v$ – расчетная длина полосы упрочнения при ФПУ;
 t_v – время движения пятна покрытия на пути L ;
 t_0 – время действия неподвижного пятна (в опытах по определению fm и R_3) ($t_0 \leq t_{0max}$).

Коэффициент линейной связи $k = fm / t_0$

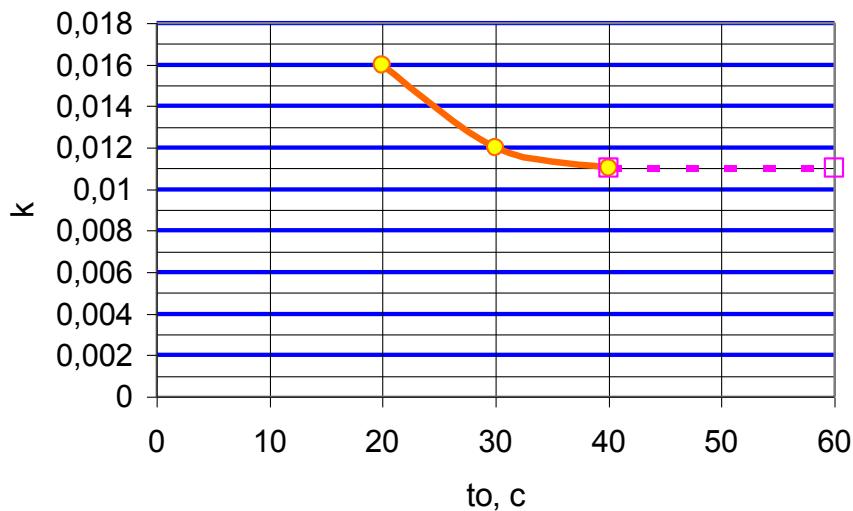


Рис. 4. Зависимость коэффициента линейной связи толщины покрытия и времени формирования неподвижного пятна – $fm(t_0)$

Как видно, время t_v движения пятна покрытия на пути L в числителе и знаменателе формулы (3) сокращается, следовательно, толщина покрытия на полосе упрочнения не зависит от пути L , а только от $f_{int}(fm, R_3)$, t_0 и v . С ростом скорости движения v на расчетном пути $L = v \cdot t_v$ уменьшается время t_v (считаем $L = const$), а с уменьшением скорости v растет t_v , но согласно исходным

данной толщиной покрытия линейно растет только в пределах времени $t_{o\max}$.

В принятой модели расчета учитывается все покрытие, распределенное по пятну максимальным радиусом R_m , следовательно, на минимальном расчетном пути $L_{\min} = 2 \cdot R_m$ должно выполняться условие

$$t_{v\max} \leq t_{o\max} \quad (4)$$

Чтобы выполнялось условие (4) линейной связи толщины покрытия с временем действия плазмы на упрочняемую поверхность, скорость движения должна быть не меньше допустимого минимального значения, определяемого как

$$v_{\min} = \frac{L_{\min}}{t_{o\max}}$$

Если принять за минимальный расчетный путь подвижного пятна L_{\min} максимальный диаметр пятна покрытия $2R_m \approx 6 \cdot R_{\text{Э}}$ (чтобы учесть все покрытие, распределенное по пятну):

$$L_{\min} = 2R_m = 6R_{\text{Э}},$$

то для выполнения условия (4) допустимая минимальная скорость движения будет

$$v_{\min} = \frac{L_{\min}}{t_{v\max}} = \frac{6 \cdot R_{\text{Э}}}{t_{o\max}} \quad (5)$$

При $t_{o\max} = 60\text{с}$ и $R_{\text{Э}} = 11\text{мм}$ получаем $v_{\min} = 1,1\text{ мм/с}$. Чтобы исключить перегрев обрабатываемого изделия при ФПУ обычно скорости движения плазматрона превышают (7...10) мм/с и, как правило, не опускаются ниже 3 мм/с. Таким образом, принятая расчетная модель будет адекватно описывать реальный процесс получения упрочняющего тонкопленочного покрытия.

Для поверхностей с явно выраженными локальными участками (кромка вырубного штампа, лезвие ножа и т.п.) при повторных проходах суммируются максимальные толщины по оси одиночных полос покрытия, накладываемых одна на другую (см. рис. 5).

Производительность ФПУ для этого случая можно брать по эмпирической зависимости $\Pi = 2 / f$. (Здесь: Π – в кв.мм/с; f – в мкм).

При этом реальное покрытие будет всего на 20% тоньше задаваемого, что можно считать в пределах допусков толщины тонкопленочного покрытия (например, при заданных 0,5 мкм получим реально 0,4 мкм, при заданном 1мкм получим реально 0,8 мкм и т.д. – см. рис.5).



Рис. 5. Распределение толщины покрытия поперек одиночной полосы упрочнения при $R_э = 11$ мм для одного прохода и двух проходов

Согласно формуле (3) для $t_0 = 40$ с и скорости движения равной минимальной ($v = 1,1$ мм/с) получаем распределение толщины покрытия поперек полосы упрочнения (рис. 6). При наложении параллельных полос упрочнения с шагом 8 мм (при $R_э = 11$ мм) получаем при суммировании 7-ми полос толщину покрытия $f = 0,4821 \pm 0,004$ мкм (напомним, что для неподвижного пятна толщина покрытия в центре за 40 с была 0,45 мкм). Покрытие имеет высокую равномерность – отклонения от средней толщины покрытия не превышают $\pm 0,8\%$.

Если взять поверхность, подлежащую ФПУ, с размерами 110 x 80 мм и обрабатывать ее восемью полосами шириной по 8 мм, то общая длина прохода при ФПУ будет $L = 8 \cdot 110 = 880$ мм. Время

одного полного прохода при ФПУ данной площади при скорости $v = 1,1$ мм/с будет

$$t_n = \frac{L}{v}$$

т.е. $t_n = 880 / 1,1 = 800$ с.

При этом за один полный проход формируется покрытие толщиной $f \approx 0,5$ мкм т.е. общее время ФПУ равно времени одного полного прохода: $t_{об} = t_n$

Производительность Π будет

$$\Pi = \frac{S}{t_{об}},$$

или $\Pi = 8800 / 800 = 11$ кв.мм/с.

При этом коэффициент K в числителе формулы для производительности ФПУ Π при толщине покрытия $f = 0,5$ мкм будет: $K = \Pi \cdot f = 11 \cdot 0,5 = 5,5$.

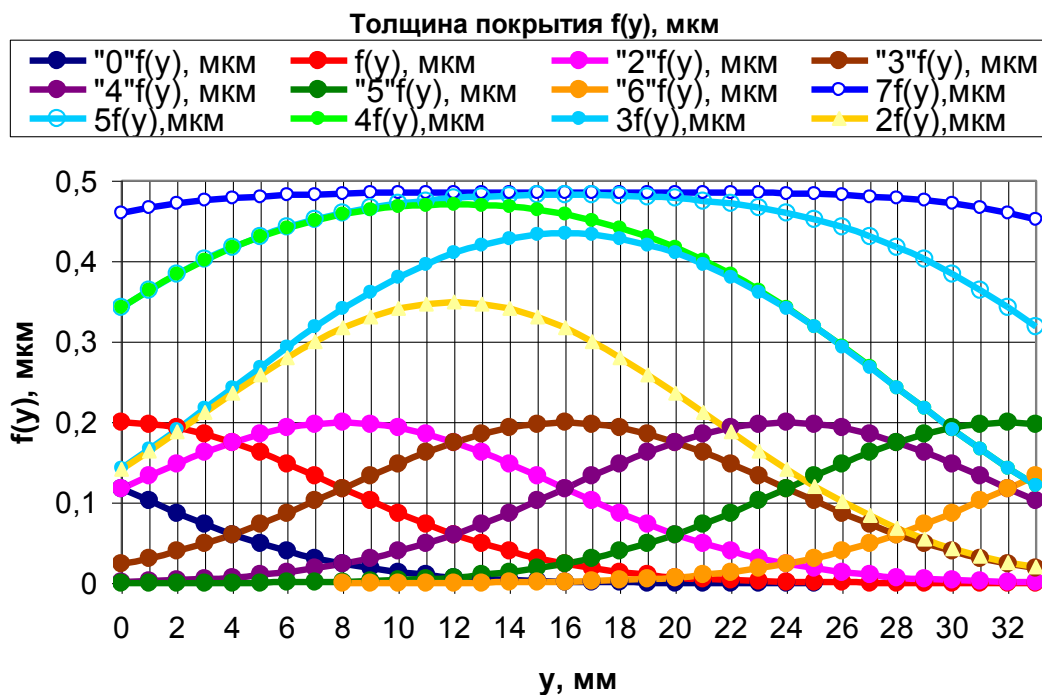


Рис. 6. Распределение толщины покрытия поперек полос упрочнения при $Rэ = 11$ мм и шаге 8 мм для одиночных полос (№№ "0" ... "7") и суммы 2, 3, 4, 5 и 7-ми полос

Таким образом, можно для развитых поверхностей (поверхности гибочных штампов, прессформ, цилиндрические поверхности) с числом локальных участков $K_{уч} \geq 2$ можно брать (с

некоторым запасом) производительность ФПУ $\Pi = 5 / f$. При этом даже для трех параллельных полос с шагом 8 мм реальная толщина покрытия будет отличаться от заданной менее чем на 13%.

ВЫВОДЫ:

1. Эффективный радиус неподвижного пятна покрытия $R_{\text{Э}}$ совпадает по значению с эффективным радиусом пятна тепловвода струи плазмы R_{Q} и для модернизированного плазмохимического генератора НПХ-3 равен в среднем 11 мм при эффективной мощности плазменной струи для типичных режимов ФПУ 110 Вт.
2. Толщина покрытия на полосе упрочнения не зависит от длины полосы L , а только от толщины покрытия в центре неподвижного пятна fm , времени его формирования t_0 и от скорости движения плазмотрона v .
3. Чтобы выполнялось условие линейной связи толщины покрытия с временем действия плазмы на упрочняемую поверхность, скорость движения плазмотрона v должна быть не меньше допустимого минимального значения, определяемого максимальным радиусом пятна покрытия (прибл. $3R_{\text{Э}}$) и максимальным временем формирования неподвижного пятна (t_{omax}) $v_{\text{min}} = 6R_{\text{Э}} / t_{\text{omax}}$. На реальных режимах ФПУ скорости движения всегда больше минимально допустимой.
4. При наложении параллельных полос упрочнения с шагом, меньшим эффективного радиуса пятна покрытия можно получить заданную толщину покрытия на всей упрочняемой поверхности с высокой равномерностью достигающей $\pm 0,8\%$ от средней толщины покрытия.
5. Разработанная расчетная модель адекватна реальному процессу получения упрочняющего тонкопленочного покрытия движущимся циклически плазмотроном с плазмохимическим реактором, обеспечивая линейный рост толщины покрытия в зависимости от времени ФПУ и числа циклов (проходов) и минимальное термическое воздействие на упрочняемое изделие.

Литература

1. Тополянский П.А., Ермаков С.А, Соснин Н.А. Финишное плазменное упрочнение с нанесением тонкопленочного покрытия. В сб. Международная научно-техническая конференция "Высокие технологии в современном материаловедении". СПб: СПбГТУ.- 1997.- С.99-100
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. Пер. с нем. М. Мир. 1983. 520с., илл.
3. Краткий технический справочник. Т.1. ОГИЗ. М. 1939.