

УДК 621.793.74:621.791.927.55

UDC 621.793.74:621.791.927.55

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНО-МАСШТАБНЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ ПЛАЗМАТРОНА НА ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ****RESEARCH OF THE INFLUENCE OF LARGE SCALE FLUCTUATIONS OF POWER OF THE PLASMATRON ON PARAMETERS OF ENGINEERING PROCEDURE OF COATINGS SPRAYING WITH PLASMA**

Бабин Сергей Васильевич

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология производства авиационных двигателей»,  
SPIN-код: 9614-4459*Ступинский филиал «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Ступино, Россия*

Babin Sergey Vasilyevich

Cand.Tech.Sci., associate professor,  
head of the department "Production technology of  
aviation engines",  
SPIN-code: 9614-4459*Stupino branch "Moscow Aviation Institute (National Research University)", Stupino, Russia*

В статье проведены экспериментальные исследования колебаний мощности электрической дуги в различных типах плазматронов с различными источниками питания. Рассмотрено влияние колебаний мощности плазматрона на технологические параметры плазменной струи (ток, напряжение, энтальпия, температура, скорость плазменного потока) и на процесс формирования покрытий при импульсном плазменном напылении. Проведена теоретическая оценка влияния колебаний мощности плазматрона на прогрев частиц порошка в пульсирующем плазменном потоке. Экспериментально показано, что характер колебаний связан с колебаниями мощности источника питания, типом плазматрона, а также с колебаниями дуги. Колебания потребляемой мощности за период может составлять от 50 до 100%. Экспериментально показано, что импульсы мощности дуги способны препятствовать подаче порошка в плазматрон в момент наибольшей мощности. Теоретически определено, что данный вид колебаний параметров дуги плазматрона не приводит к созданию ударных волн в пределах линейных размеров плазматрона и расстояния от плазматрона до подложки. Колебания такого рода не приводят к диспергированию расплавленных частиц порошка. Сделаны выводы, что крупномасштабные пульсации способны существенно ухудшать качественные характеристики плазменных покрытий. Предложены мероприятия по улучшению качества плазменных покрытий

We have experimentally studied fluctuations of power of an electric arc in different types of plasmatrons with different power supplies in the article. Influence of fluctuations of power of the plasmatron on technology parameters of a plasma stream (current, voltage, an enthalpy, temperature, speed of a plasma flow) and on process of forming of coatings at impulse plasma was experimentally shown that the nature of fluctuations depends from fluctuations of voltage of the power supply, plasmatron type and also from fluctuations of an electrical arc. The size of fluctuations of power can be 50-100%. It is experimentally shown that impulses of power of an electric arc are capable to complicate supply of sprayed powder in to the plasmatron. Such fluctuations do not make dispersion of the melted powder particles. In the work, we have drawn conclusions that large-scale pulsations are capable to worsen quality characteristics of plasma coatings significantly

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ, ДУГОВОЙ ПЛАЗМАТРОН, КОЛЕБАНИЯ, ПУЛЬСИРУЮЩАЯ ПЛАЗМЕННАЯ СТРУЯ, ПРОГРЕВ ЧАСТИЦ ПОРОШКА

Keywords: PLASMA SPRAYING, PLASMA COATING, ARC PLAZMATRON, FLUCTUATIONS, PULSING PLASMA STREAM, WARMING UP OF POWDER PARTICLES

Doi: 10.21515/1990-4665-131-073

## **ВВЕДЕНИЕ**

Тенденции развития техники приводят к росту удельных нагрузок на детали машин, что требует применения современных технологий, позволяющих повысить качество новых и восстанавливаемых изделий. Для деталей, подверженных эксплуатационным изнашивающим воздействиям и коррозии, это может быть обеспечено путем создания покрытий с помощью прогрессивных технологий, к числу которых относят плазменное напыление [1]. Оно характеризуется малым термическим воздействием на напыляемую основу высокой производительностью (до 8 кг/ч и более), экономичностью, наиболее широкой номенклатурой напыляемых материалов по сравнению с другими методами создания покрытий. Однако, плазменное напыление имеет ограничения в использовании, к числу которых относятся: недостаточная когезионная и адгезионная прочность покрытия, остаточные растягивающие напряжения для большинства покрытий, отрицательно влияющие на сопротивление усталости и ограничивающие толщину покрытий, пористость и др. Возможный путь устранения данных недостатков и повышения эффективности технологии плазменного напыления заключаются в совершенствовании инструмента создания покрытий – плазмотрона, плазменной струи, стабильности технологического процесса напыления [2].

Статья посвящена исследованию характеристик плазмотрона, влияющих на качество плазменных покрытий и содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований.

### **Состояние исследований и актуальность работы**

Элементом, определяющим качество и эффективность технологического процесса плазменного напыления, является электродуговой плазмотрон [3,4], так как стабильность технологических параметров напыления зависит от процессов, происходящих при прогреве газа и частиц напыляемых материалов. Проблемой, также, является достижение необхо-

димого качества плазменных покрытий, обеспечивающего их использование при динамических, в том числе ударных, и знакопеременных нагрузках [5].

Эффективность прогрева газа, а, следовательно, и частиц порошка, определяется [6,7] стабильностью параметров горения электрической дуги. Столб дуги колеблется с различной частотой, меняется длина столба. Изменение параметров электрической дуги (тока, напряжения) ведет [8,9] к появлению значительных колебаний потребляемой плазмотроном электрической мощности, а вследствие этого к неравномерному прогреву газа в плазматроне. Знание температуры, и технологических параметров пульсирующей плазменной струи необходимо для повышения качества плазменных покрытий. Значительное количество работ посвящено исследованиям пульсаций в электродуговой плазме [10,11], однако, в основном рассматриваются высокочастотные колебания, модуляция дуги и практически не рассматриваются вопросы крупномасштабных, низкочастотных колебаний мощности электрической дуги и связанных с этим технологических параметров плазматрона.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В настоящей работе проводились, в целях повышения эксплуатационных свойств покрытий, исследования крупномасштабных низкочастотных колебаний параметров электрической дуги и их влияние на технологические характеристики процесса плазменного напыления. Высокочастотные колебания не рассматривались, так как самостоятельные колебания параметров дуги с частотой 50-60 кГц не оказывают [9] заметного влияния на температуру в скорость плазменного потока.

### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Экспериментальные исследования крупномасштабных колебаний проводились с помощью экспериментальной установки рис.1. Измерительная система установки позволяет синхронно фиксировать колебания

тока дуги, напряжения дуги, колебания давления плазмообразующего газа в разрядной камере плазмотрона, в сопле, на расстоянии  $6 \cdot 10^{-3}$  м от разрядной камеры плазмотрона и в сопле на расстоянии  $4 \cdot 10^{-3}$  м от среза сопла плазмотрона, температуры и скорости, а также яркости плазменного потока на расстоянии  $6 \cdot 10^{-3}$  м от среза сопла плазмотрона. Все измерения проводились с применением магнитоэлектрического осциллографа Н117. Регистрация вышеуказанных параметров осуществлялась вибраторами осциллографа на светочувствительной ленте, с последующим определением величин по тарировочным графикам. Применение многоканального осциллографа обусловлено возможностью наблюдать колебания всех параметров одновременно и рассматривать влияние одних параметров на другие показатели плазменной струи.

Измерение температуры оценивалось вольфрамо-рениевой термопарой ВР 5/20 с диаметром спая  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м. Постоянная времени термопары составляла  $3 \cdot 10^{-3}$ , что позволяло регистрировать колебания температуры с частотой 100 Гц. Термопара располагалась по оси потока, на расстоянии  $L = 6 \cdot 10^{-3}$  м от среза сопла плазмотрона, где температура потока недостаточна для ее оплавления.

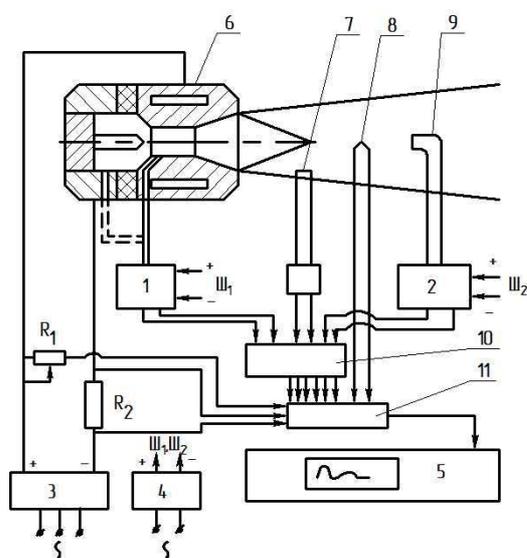


Рис.1. Схема измерений колебаний напряжения, силы тока цуги, давления в разрядной камере плазмотрона и параметров плазменного потока. 1 - датчик давления, 2 - датчик давления, 3 - источник питания плазмотрона, 4 - стабилизированный источник питания датчиков давления, 5 - осциллограф Н117, 6 - плазмотрон, 7 - датчик яркости плазменного потока, 8 - термопара, 9 - трубка Пито, 10 - клемная коробка, 11 - усилитель.

Колебания яркости плазменной струи фиксировались на расстоянии  $5 \cdot 10^{-3}$  м от среза сопла плазмотрона. В качестве датчика для регистрации яркости применяли фотодиод ФД-6Г, который работал в режиме фотозлемента.

Оценки колебаний полного давления в плазменной струе производили вблизи термопары трубкой Пито с датчиком давления 2.

Исследования влияния колебаний электрических параметров дуги на технологические свойства плазменной дуги проводились для, широко распространенных, плазмотронов с газовихревой стабилизацией дуги ПП-25, РП-6 с трансформаторным источником питания ИПН 160/600, РП-6 с тиристорным источником питания АТЕРЗ 200/460, плазматрон ГН-5 со стабилизацией дуги уступом и источником питания ИПН 160/600, плазмотрон с межэлектродными вставками ЭДП-159 и АТЕРЗ 200/460.

Исследовался также медицинский плазмотрон («Плазменный скальпель»). Для исследований использовались установки плазменного напыления УПУ-3М, УПУ-3Д, установка типа АПР-402.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Во всех исследованных плазмотронах и установках имели место крупномасштабные колебания (см. рис. 2 - рис. 5). На осциллограммах колебательные процессы представлены в относительных величинах (отнесены к максимальному отклонению измеряемого параметра) Частотный

спектр колебаний крупномасштабных колебаний находился в пределах 100-300 Гц. Амплитуда колебаний мощности, тока и напряжения дуги,

Результаты анализа осциллограмм

№	Тип плазматрона	Источник питания установки, Установка	Колебания тока в % от МАХ	Колебания напряжения в % от МАХ	Колебания мощности, %	Колебания давления в разрядной камере, %	Колебания температуры, в плазменном потоке %	Колебания давления в плазменном потоке, %	Колебания скорости в плазменном потоке, %
1	ГН-5	ИПН 160/600 УПУ-3М	42	22,5	60	-	43,8	68	-
2	ПП-25	ИПН 160/600 УПУ-3Д	45	11,1	51,3	14	32	-	85,7
3	РП-6	ИПН 160/600 УПУ-3Д	49	19	59	16	34	-	87
5	РП-6	АТЕР3-200/400	80	81,8	80	77,7	37,5	75	-
6	ЭДП-159	АТЕР3-200/400	100	100	100	100	32	-	-
7	Плазменный скальпель	-	26	80	18	-	-	-	-

давления в каналах плазматрона менялась в зависимости от вида плазматрона и источника питания. Результаты анализа осциллограмм сведены в таблицу.

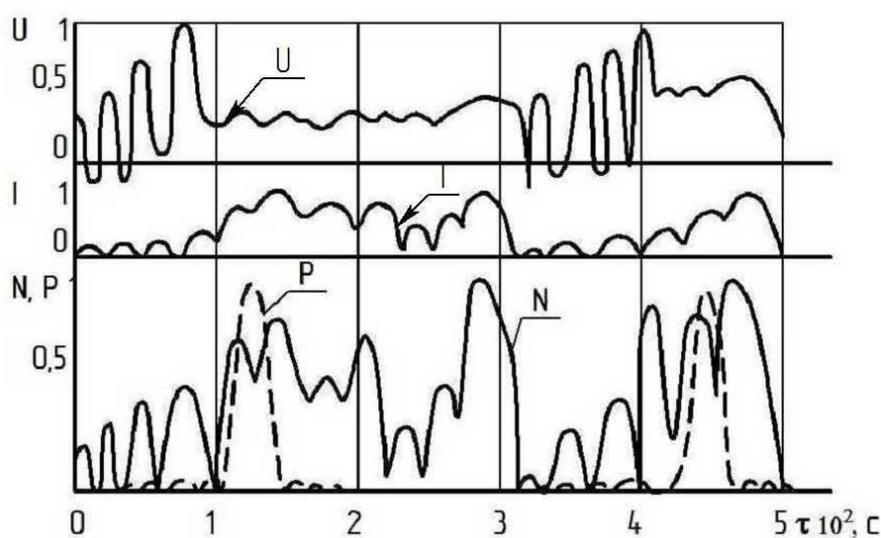


Рис.2. Осциллограммы изменений напряжения – U, тока дуги- I, мощности, потребляемой плазматроном – N, давления в разрядной камере плазматро-

на – Р для плазмотрона РП - 6 с тиристорным источником питания АТЕРЗ - 200/400. Действующее напряжение и ток измеренные по приборам установки  $U=80В$ ,  $I=160А$ . Максимальное давление, зафиксированное в разрядной камере плазмотрона  $P=5 \cdot 10^3 Па$ .

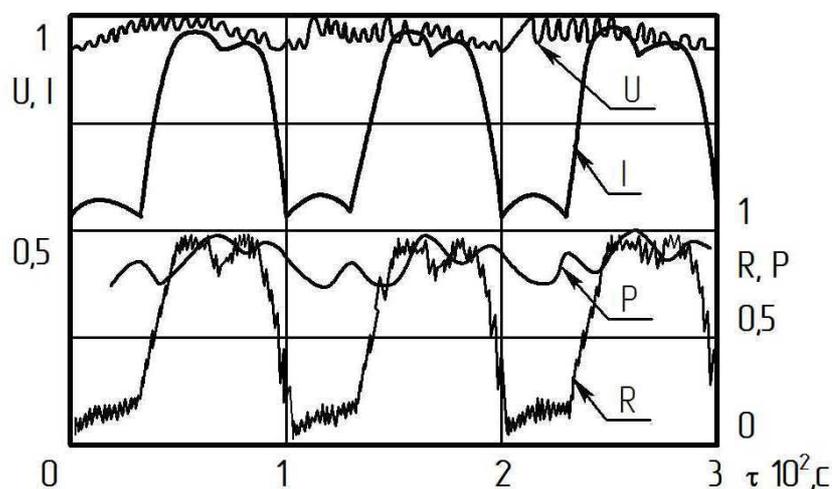


Рис.3. Осциллограммы изменений напряжения – U, тока дуги- I, яркости плазменной струи - R, давления в разрядной камере плазматрона - P (для плазмотрона РП-6 с плазменной установкой УПУ-3Д).

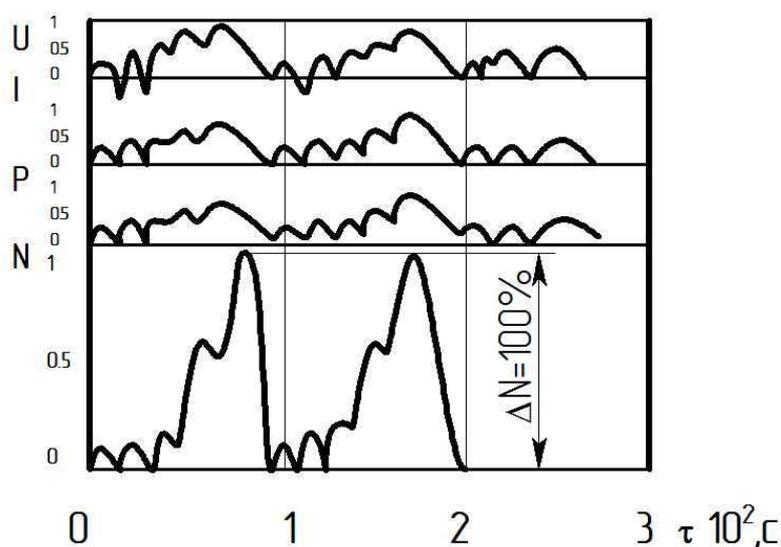


Рис.4. Осциллограммы изменений напряжения – U, тока дуги- I, мощности, потребляемой плазмотроном – N (для плазмотрона (ГН-5 со стабилизация дуги уступом), плазменной установки УПУ-3М).

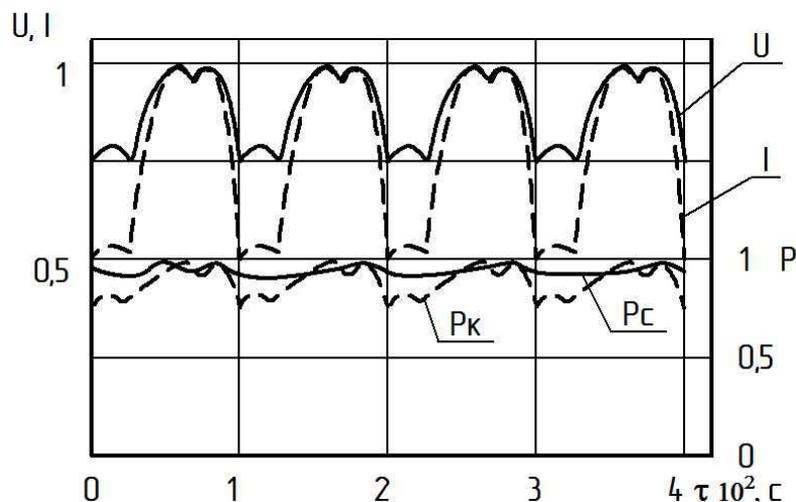


Рис.5. Осциллограммы изменений напряжения –  $U$ , тока дуги-  $I$ , мощности, потребляемой плазмотроном –  $N$ , давления плазмы в разрядной камере плазмотрона –  $P_k$ , давления плазмы на срезе сопла плазмотрона –  $P_c$ , для плазмотрона ГН-5 с установкой УПУ-3Д.

Анализ причин, вызывающих низкочастотные колебания электрических параметров дуги, показал, что, как правило, колебания вызваны несовершенством источника питания. Небольшое (15-20%) снижение параметров питающего напряжения, по одной из фаз, способно вызвать существенные изменения мощности, потребляемой плазмотроном, а, следовательно, меняются и технологические свойства плазменной струи. Амплитуда колебаний зависит от источника питания и режимов работы плазмотрона. На рис.6, рис.7 представлены экспериментальные зависимости относительной амплитуды колебаний мощности, потребляемой плазмотроном, от режимов работы плазмотрона (средней потребляемой мощности, расхода и состава плазмообразующего газа). Из рис.6 видно, что увеличение средней мощности, потребляемой плазмотроном, снижает амплитуду колебаний. Увеличения расхода рабочего газа (см. рис.7) приводят к увеличению амплитуды колебаний мощности, особенно сильно уве-

личивается амплитуда с повышением расхода азота, что связано [12], видимо, с сильной турбулизацией потока и усилением процессов шунтирования дуги, которые суммируются с колебаниями, возникающими за счет колебаний питающего напряжения. Увеличение расхода рабочего газа ведет [13] к удлинению дуги, а в условиях пульсаций питающего напряжения, к усилению процессов шунтирования, что отражается повышением относительной амплитуды колебаний напряжения дуги.

Таким образом, из сказанного следует, что, варьируя параметрами режима работы плазматрона, можно снизить амплитуду пульсаций.

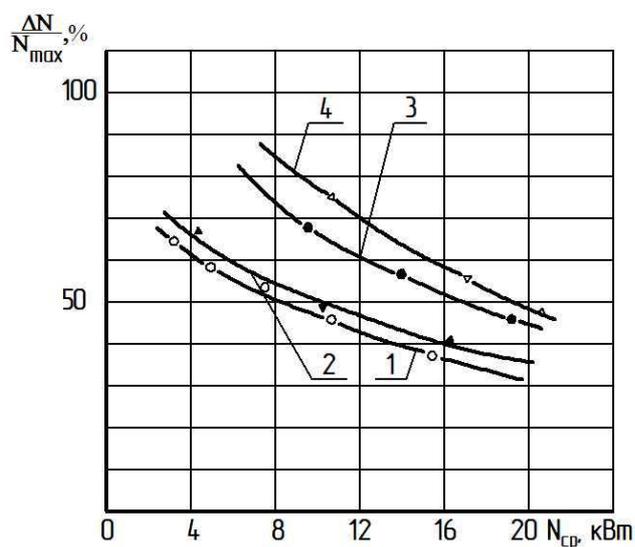


Рис.6. Зависимость относительной амплитуды колебаний мощности, потребляемой плазматроном от средней мощности. 1 –  $G_{Ar}=0,23$  г/с, 2 –  $G_{Ar}=0,7$  г/с, 3 –  $G_{смеси} = (0,2Ar+0,08 N_2)$  г/с, 4 –  $G_{смеси} = (0,6Ar+0,15 N_2)$  г/с.

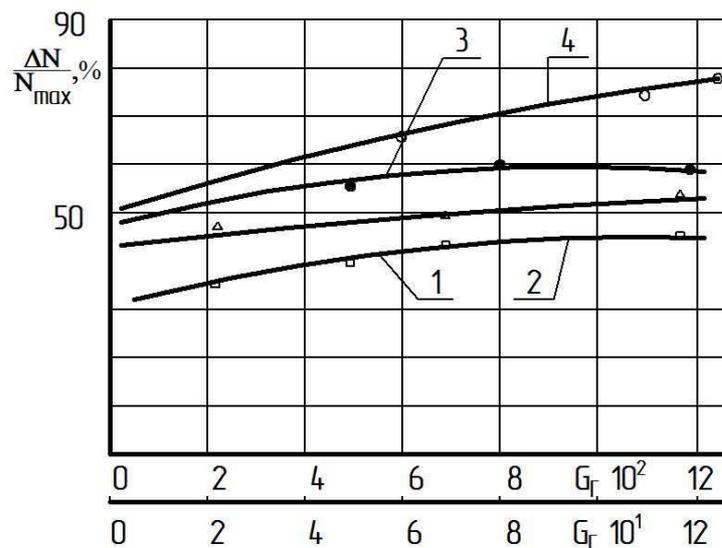


Рис.7. Зависимость относительной амплитуды колебаний мощности, потребляемой плазмотроном от расхода и состава плазмообразующего газа. 1 –  $N_{cp}=15$  кВт, 2 –  $N_{cp}=10$  кВт, 3 –  $N_{cp}=10$  кВт  $G_T = (0,2Ar+0,08 N_2)$  г/с, 4 –  $N_{cp}=10$  кВт –  $G_{смеси} = (0,6Ar+0,15 N_2)$  г/с.

В работе [14,15] отмечается положительное влияние модуляции параметров плазменного потока на процесс напыления покрытий. В частности повышается прочность сцепления с подложкой и уменьшение пористости. Полученный эффект объясняется воздействием ударных волн на расплавленные частицы порошка в модулированной плазменной струе. В данной работе рассмотрена возможность возникновения ударных волн в плазмотроне или на дистанции напыления в условиях зафиксированных в экспериментах при импульсном подводе мощности с длительностью импульса порядка  $10^{-2}$ с и амплитудой  $(0.5-0,6)N_{max}$ .

Считалось что импульсы давления в газе будут распространяться в виде бегущей волны, движущейся слева-направо и справа-налево от участка подвода тепла. Распространение волн давления (волн сжатия) может быть описано Римановским решением [16].

$$X=(u+c)t+F(u) \tag{1}$$

$$u = 2/(k-1) \cdot (c - c_0)$$

Функция  $F(u)$  определяется из граничного условия, согласно которому при  $x=0$

$$u = f(x) = u_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $X$  – координата волны,  $t$  – время,  $u$  – скорость волны,  $c$ ,  $c_0$  – скорость звука и начальная скорость звука соответственно,  $\omega$  – угловая скорость.

$$F(u) = (u+c) \cdot 1/\omega \cdot \arcsin(\omega t), \quad (3)$$

$$\text{отсюда } X = (u+c) \cdot (t - 1/\omega \cdot \arcsin(u/u_0)) \quad (4),$$

$$\text{или } u = (\sin \omega (t - x/(u+c))). \quad (5)$$

Решение получено для колебаний конечной амплитуды и, в начальный момент времени, представляет собой импульс синусоидальной формы. Через некоторое время распространения импульса, в результате деформации волны за счет разности скоростей отдельных областей волны фронт ее будет становиться все более крутым, и волна, в некоторый момент времени, станет ударной. Приравнивая нулю производные  $dX/du$  и  $d^2X/du^2$  найдем время и скорость, необходимые для преобразования волны в ударную волну.

$$\omega t = \arcsin(u_0/u) + 1/\sqrt{(u_0^2 - u^2)} \cdot (2/(k+1) \cdot c_0 + u) \quad (6)$$

$$u = c_0/(k+1) \pm \sqrt{(c_0/(k+1))^2 + 2u_0^2} \quad (7)$$

По проведенным оценкам, скорость частиц газа на выходе из плазмотрона, при максимальном значении импульса электрической мощности, составляет  $\approx 1000$  м/с. т.е.  $u_0 = 1000$  м/с. Начальную скорость звука примем при средней температуре аргоновой плазмы 10000 К, что составляет  $\approx 1600$  м/с. Скорость волны в момент образования ударной волны составляет  $\approx 864$  м/с. Время, необходимое для получения такой скорости частицами газа составляет (оценено по формуле (6))  $8.9 \cdot 10^{-3}$  с. При этом дистанция, на кото-

рой образуется ударная волна, составляет 17,83 м. Это при условии течения газа без диссипации энергии.

Таким образом, данный вид колебаний параметров дуги плазмотрона не приводит к созданию ударных волн в пределах линейных размеров плазмотрона и расстояния от плазмотрона до подложки. Так как эти дистанции намного меньше, полученных по оценкам. Импульсы давления, распространяющиеся против течения плазмообразующего газа в область повышенного давления, уменьшаются встречным потоком более холодного и плотного газа. Они также не приводят к возникновению ударных волн, что подтверждается экспериментальными данными о колебаниях давления рабочего газа в транспортирующих каналах (Рис.8). Импульсы давления, распространяющиеся по каналу транспортировки порошка могут замедлять его движение, что должно затруднять подачу порошка именно в момент максимальной мощности плазмотрона и, следовательно, ухудшать качество покрытий. Данные предположения были проверены экспериментально, путем измерения плотности двухфазного потока порошок-транспортирующий газ в транспортирующем канале. Для этого использовалась система динамической регистрации расхода порошка, основанная на светопрозрачности двухфазного потока. Светопрозрачность оценивалась с помощью источника света и фотодиода, размещенных поперек прозрачного канала, транспортирующего порошок. Повышение плотности потока приводило к уменьшению освещенности датчика фотодиода, что уменьшало уровень электрического сигнала фиксируемого осциллографом Н117. Зарегистрированные колебания представлены на рис.8.

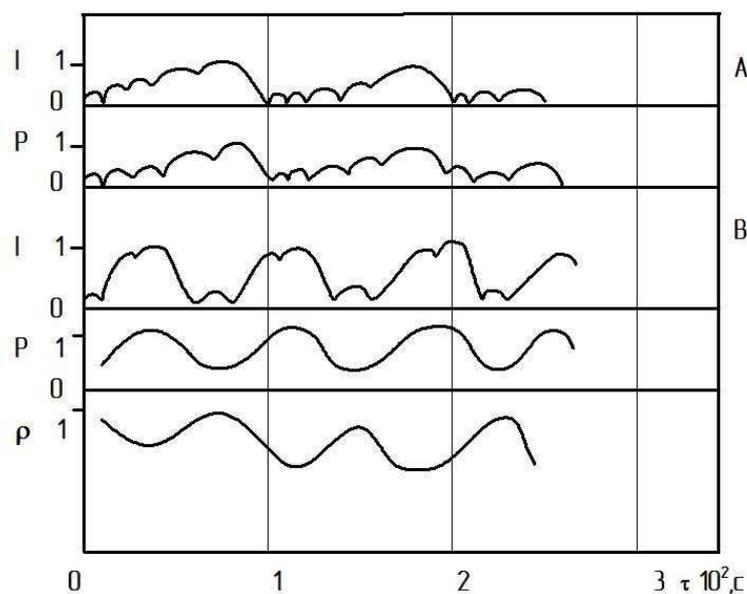


Рис.8. Осциллограммы колебаний тока дуги плазмоторна, давления газа, транспортирующего порошок и плотности двухфазного потока порошок-транспортирующий газ для плазмоторнов РП-6 и ПП-25. I – ток дуги, P – давления транспортирующего газа,  $\rho$  – плотность двухфазного потока.

А - РП-6 источник питания АТЕРЗ 200/460; Б - ПП-25 источник питания ИПН 160/600.

Из осциллограмм видно, что при минимальном уровне мощности имеет место некоторое увеличение плотности двухфазного потока, что свидетельствует об увеличении количества частиц порошка в потоке, а, следовательно, и расхода порошка. Наоборот, при максимальном уровне тока и напряжения расход порошка уменьшается. Таким образом, изменение расхода порошка, по проведенным оценочным измерениям, составляет 15 – 23 % от максимальной величины. Повышение давления рабочего газа в каналах плазмоторна, в момент увеличения электрической мощности в импульсе, приводит к затруднению подачи напыляемого материала в плазменную струю и снижению эффективности использования тепловой энергии струи, так как значительное количество порошка подается в струю в момент ми-

нимальной электрической мощности дуги и относительно низких температурах газа.

## ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что:

1. В технологических плазматронах имеют место крупномасштабные колебания технологических параметров плазматрона.
2. Характер этих колебаний связан с колебаниями напряжения источника питания, типом плазматрона, а также с колебаниями дуги. Колебания потребляемой мощности за период составляет от 50 до 100%.
3. Данный вид колебаний параметров дуги плазматрона не приводит к созданию ударных волн в пределах линейных размеров плазматрона и расстоянии от плазматрона до подложки и не приводит к диспергированию частиц порошка.
4. Увеличение мощности плазматрона в процессе напыления приводит к уменьшению крупномасштабных колебаний в пламенной струе.
5. Увеличение расхода плазмообразующего газа увеличивает колебательные процессы в плазменном потоке.
6. Колебания технологических параметров плазматрона затрудняет подачу порошка в плазменную струю, что может приводить к ухудшению качества покрытий, так как чередования прогретых и не прогретых частиц ведет к повышению пористости и снижению адгезионной и когезионной прочности. Применение электромагнитного клапана в канале транспортирующего порошок газа синхронизированного, например, с колебаниями тока дуги плазматрона, позволит уменьшить подачу порошка в периоды с минимальной мощностью дуги и тем самым повысить коэффициент использования порошка и качество покрытия.

## Литература

1. Кадырметов, А. М. Технологический ряд прогрессивных плазменных и газотермических процессов. Обзор /А. М. Кадырметов // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2008. – С. 119-136.
2. Ильин А.А. Исследование влияния технологических параметров плазменного напыления на структуру и адгезионную прочность титанового покрытия / А.А. Ильин, С.В. Бабин, Е.Н. Егоров // Москва. Технология легких сплавов, 2006 г. № 1-2, С. 202-207.
3. Ю.С.Борисов, Ю.А. и др. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1987 г. 587 с.
4. Хасуй А., Моригака О. Наплавка и напыление. М.: Металлургия, 1985. С. 12-39.
5. Кадырметов А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством /А.М. Кадырметов //Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс], - Краснодар: КубГАУ, 2012 №81(07)
6. Г.Ю.Даутов, В.Л.Дзюба, И.Н.Карп Плазмотрон со стабилизированными электрическими дугами, Киев: Наук. Думка., 1984. 315 с.
7. Жданов С.К., Курнаев В.А. и др. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках Учебное пособие. М: МИФИ, 2007 г., 372 с.
8. Дзюба В. Л., Корсунов К. А. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы: Монография. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2007. –448 с
9. В.Е.Гутман Электродуговой плазмотрон как источник ударных волн. /В.Е. Гутман //Физика и химия обработки материалов, 1988, №3, С.136-138.
10. И.М. Закиров Исследование пульсаций в электродуговом плазмотроне / И.М. Закиров, Ф.Ф. Залялиева, Д.Б. Тимеркаева, Р.С. Тухватуллин // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2010. № 3
11. Б.Е.Мошкин Исследование пульсаций температуры струй дугового подогревателя / Б.Е.Мошкин // Теплофизика высоких температур, 1967, т.5, №1 С.100-105.
12. А.В Бразявичус Влияние режима течения газа на пульсацию электрических параметров дуги постоянного тока / А.В Бразявичус, В.П. Григарас //тез. Докл. Всесоюзная конф. По генераторам генераторам низкотемпературной плазмы, 1980, Новосибирск, v1.
13. М.Ф.Жуков, А.С.Аньшаков Электродуговые плазмотроны с межэлектродными вставками, 1981, 280с.
14. В.Е.Гутман Влияние модуляции плазменной дуги на адгезию и газопроницаемость порошковых покрытий / В.Е.Гутман //Физика и химия обработки материалов, 1986, №6. С.62-65.
15. Кадырметов, А. М. Технологические возможности и проблемные вопросы плазменного нанесения и упрочнения покрытий с модуляцией электрических параметров /А.М. Кадырметов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – №8. – С. 79 -82.
16. К.Н Станюкович Нестационарные движения сплошной среды. М.: Наука, 1975. 645 с.

## References

1. Kadyrmetov, A. M. Tehnologicheskij rjad progressivnyh plazmennyyh i gazotermicheskikh processov. Obzor /A. M. Kadyrmetov // Perspektivnye tehnologii, transportnye

sredstva i oborudovanie pri proizvodstve, jekspluatacii, servise i re-monte: mezhvuz. sb. nauch. tr. Voronezh: VGLTA, 2008. – S. 119-136.

2. Il'in A.A. Issledovanie vlijanija tehnologicheskikh parametrov plazmennogo napylenija na strukturu i adgezionnuju prochnost' titanovogo pokrytija / A.A. Il'in , S.V. Babin, E.N. Egorov // Moskva. Tehnologija legkih splavov, 2006 g. № 1-2, S. 202-207.

3. Ju.S.Borisov, Ju.A. i dr. Gazotermicheskie pokrytija iz poroshkovyh materialov. Spravochnik. Kiev: Naukova dumka, 1987 g. 587 s.

4. Hasuj A., Morigaka O. Naplavka i napylenie. M.: Metallurgija, 1985. S. 12-39.

5. Kadyrmetov A. M. Issledovanie processov plazmennogo nanosenija i uprochnenija pokrytij i puti upravlenija ih kachestvom /A.M. Kadyrmetov //Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs], - Krasnodar: KubGAU, 2012 №81(07)

6. G.Ju.Dautov, V.L.Dzjuba, I.N.Karp Plazmotron so stabilizirovannymi jelektricheskimi dugami, Kiev: Nauk. Dumka., 1984. 315 s.

7. Zhdanov S.K., Kurnaev V.A. i dr. Osnovy fizicheskikh processov v plazme i plazmennyh ustanovkakh Uchebnoe posobie. M: MIFI, 2007 g., 372 s.

8. Dzjuba V. L., Korsunov K. A. Fizika, tehnika i primenenie nizkotemperaturnoj plazmy: Monografija. – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalja, 2007. –448 s

9. V.E.Gutman Jelektrodugovoj plazmotron kak istochnik udarnyh voln. /V.E. Gutman //Fizika i himija obrabotki materialov, 1988, №3, S.136-138.

10. I.M. Zakirov Issledovanie pul'sacij v jelektrodugovom plazmotrone / I.M. Zaki-rov, F.F. Zaljalieva, D.B. Timerkaeva, R.S. Tuhvatullin // Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. 2010. № 3

11. B.E.Moshkin Issledovanie pul'sacij temperatury struj dugovogo podogrevatelja / B.E.Moshkin // Teplofizika vysokih temperatur, 1967, t.5, №1 S.100-105.

12. A.V Brazjavichus Vlijanie rezhima techenija gaza na pul'saciju jelektricheskikh parametrov dugi postojannogo toka / A.V Brazjavichus, V.P. Grigaras //tez. Dokl. Vseso-juznaja konf. Po generatoram generatoram nizkotemperaturnoj plazmy, 1980, No-vosibirsk,v1.

13. M.F.Zhukov, A.S.An'shakov Jelektrodugovye plazmotrony s mezhelektrodnymi vstavkami, 1981, 280s.

14. V.E.Gutman Vlijanie moduljaciei plazmennoj dugi na adgeziju i gazopronicaemost' poroshkovyh pokrytij / V.E.Gutman //Fizika i himija obrabotki materialov, 1986, №6. S.62-65.

15. Kadyrmetov, A. M. Tehnologicheskie vozmozhnosti i problemnye voprosy plazmennogo nanosenija i uprochnenija pokrytij s moduljaciej jelektricheskikh parametrov /A.M. Kadyrmetov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2011. – T. 7. – №8. – S. 79 -82.

16. K.N Stanjukovich Nestacionarnoe dvizhenija sploshnoj sredy. M.: Nauka, 1975. 645 s.