УДЕЛЬНАЯ ЭНТАЛЬПИЯ И СРЕДНЕМАССОВАЯ СКОРОСТЬ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПРИ ФИНИШНОМ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., ЕРМАКОВ С.А., ТОПОЛЯНСКИЙ А.П.
Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого,
НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты математического моделирования температуры и скорости плазмы в канале плазмотрона с плазмохимическим реактором, а также измерения удельной энтальпии и среднемассовой скорости плазменной струи для типичных режимов нанесения нанопокрытий при финишном плазменном упрочнении.

Ключевые слова: финишное плазменное упрочнение, плазма, удельная энтальпия, скорость плазмы.

Results of the mathematical simulation of the temperature and velocity of the plasma in a channel of a plasmatron with plasma-chemical reactor; measurements of the specific enthalpy and mass-averaged velocity of the plasma jet for typical modes of nanocoatings deposition at finishing plasma hardening.

Key words: finishing plasma hardening, plasma, specific enthalpy, plasma velocity.

Основным инструментом для нанесения покрытий в процессе финишного плазменного упрочнения (ФПУ) являются плазмотрон (ПЛ), предназначенный для создания и стабильного поддержания функционирования дежурной и основной сжатой электрической дуги и плазмохимический реактор (ПХР), где осуществляется анодная привязка основной электрической дуги, прохождение плазмохимических реакций паров вводимых соединений и создание направленного их потока к подложке (рис. 1).

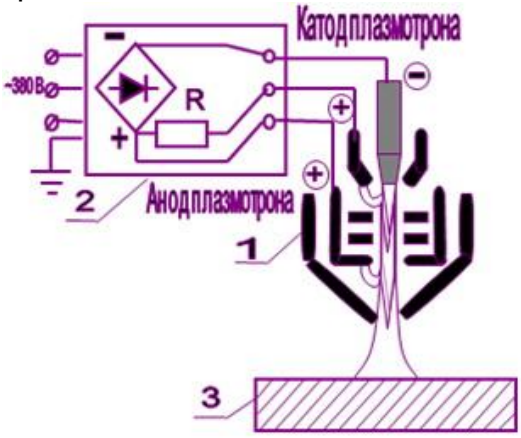

Рис. 1. Схема плазмотрона и плазмохимического реактора, используемых при ФПУ

Стабильность работы технологического оборудования определяется его энергетическими характеристиками. При ФПУ нагрев и ионизация газа осуществляется электрической дугой. В определенной зоне ПХР осуществляется смешивание нагретого ионизированного газа (плазмы) с транспортирующим газом, насыщенным парами специальных реагентов. На этом же участке происходит и плазмохимический синтез реагентов. Образуемая на выходе из ПХР плазменная струя, с определенными газодинамическими характеристиками, сталкивается с подложкой и формирует на ней покрытие.

Одним из главных требований к конструированию ПЛ и ПХР для ФПУ является обеспечение температуры плазмы в зоне ввода паров технологических препаратов не менее 3500К [1]. Соблюдение этого условия зависит от удельной энтальпии плазмы для конкретной конструкции канала плазмотрона и плазмохимического реактора [2].

Тепловая эффективность нагрева газа определяется величиной тепловых потерь в ПЛ и ПХР. Избыточно холодные стенки ПХР приводят к

понижению температуры плазмы в зоне ввода реагентов и тем самым к необходимости увеличения мощности дуги, а недостаток охлаждения - к экстремальной (ненадежной) работе всего оборудования в целом.

Одной из основных задач при длительном ведении процесса ФПУ является стабильное поддержание параметров генерируемой струи: удельной энтальпии плазмы, температуры и скорости плазменной струи, их распределения вдоль и поперек оси, усредненных и пульсационных составляющих. Обычно режим ФПУ устанавливается путем задания входных параметров установки – тока дуги, расхода и состава плазмообразующего и транспортирующего газа. С учетом минимизации колебаний тока дуги, совершенствования регулирующих приборов расхода газов изменение их значений в процессе работы плазменного оборудования составляет не более 5%. В этом случае удельная энтальпия плазмы и скорость плазменной струи может колебаться в пределах ±10% [3]. Однако в процессе длительной эксплуатации оборудования удельная энтальпия плазмы около среза ПХР (где примерно происходит формирование тонкопленочного покрытия) при сохранении практически неизменными тока дуги и расходов газов может уменьшаться в 1,5-1,8 раза только за счет отклонения напряжения на дуге в пределах 5%, что связано с нарушением исходной геометрии электродов ПЛ и ПХР вследствие эрозии, что в свою очередь изменяет место привязки дуги и газодинамику в канале. Очевидно, что физико-механические, адгезионные и другие свойства наносимого тонкопленочного покрытия при этом могут изменяться. Дополнительным негативным фактором отсутствия воспроизводимости качества покрытий является нестабильность системы охлаждения элементов ПЛ и ПХР, например, при использовании промышленных магистралей, в которых температура воды летом и зимой может колебаться в диапазоне 3-18°С. Поэтому оборудование для ФПУ требуется оснащать системой автономного охлаждения со строго определенной контролируемой температурой входящего хладагента.

В процессе ФПУ для поддержания постоянства температуры в зоне ввода транспортирующего газа необходимо обеспечивать постоянный заданный теплоотвод в элементы ПЛ и ПХР, кроме этого, для обеспечения оптимальной длительности прохождения плазмохимических реакций в плазме, скорость плазменной струи также должна иметь постоянное оптимальное значение.

С учетом постоянства применяемых конструктивных элементов ПЛ, ПХР и самой установки в качестве интегральных критериев, поддержание которых в заданном диапазоне связано с воспроизводимостью свойств наносимых покрытий, выбраны удельная энтальпия плазмы $\boldsymbol{H_{уд}}$ (количество тепла, содержащегося в единице массы плазменного потока) и среднемассовая скорость плазменной струи $\boldsymbol{V_{ср.м.}}$

Математическое моделирование плазменной струи

Расчет температуры и скорости движения плазмы в электродуговых плазмотронах определяется совместным решением уравнения баланса энергии, уравнения движения совместно с уравнением неразрывности и уравнения электромагнитного поля Максвелла [7 ,8].

Уравнение баланса энергии связывает мощность, выделяющуюся за счёт джоулева нагрева в плазмотроне, со всеми видами потерь и выражает собой закон сохранения энергии:

$$div\left(\rho\cdot\vec{v}\cdot H\right)=\sigma\cdot E^2-U_{rad}-div\left(-\frac{\lambda}{c_p}\cdot grad\left(H\right)\right)$$

где $\sigma\cdot E^2$ - удельная мощность джоулева нагрева; ρ – плотность плазмы; $\vec{v}$ - скорость; H - энтальпия; λ и c_p - теплопроводность и теплоемкость плазмы; U_{rad} - потери за счет излучения. Решая данное уравнение, можно получить распределение температуры и скорости плазмы в канале плазмотрона, позволяющее связать внутренние физические параметры плазмы (температура, плотность, теплоемкость, вязкость и др.) с внешними электроэнергетическими и геометрическими параметрами плазмотрона (ток, напряжение, диаметр и длина канала).

Для описания физических процессов в канале плазмотрона с плазмохимическим реактором при ФПУ можно использовать цилиндрическую систему координат, для которой уравнение движения в соответствии со вторым законом Ньютона имеет вид:

$$\begin{cases} div(\rho\overrightarrow{V}\cdot V_z)=-\dfrac{\partial p}{\partial z}+div\left(\mu\cdot grad\left(V_z\right)\right)+\left[\vec{J}\times\vec{B}\right]_Z \\ div(\rho\overrightarrow{V}\cdot V_r)=-\dfrac{\partial p}{\partial r}+div\left(\mu\cdot grad\left(V_r\right)\right)-\mu\dfrac{V_r}{r^2}+\left[\vec{J}\times\vec{B}\right]_r \end{cases}$$

где μ - коэффициент вязкости среды; p – газостатическое давление; $\left[\vec{J}\times\vec{B}\right]_Z$ и $\left[\vec{J}\times\vec{B}\right]_r$ - составляющие электромагнитной силы.

Для нахождения распределения неизвестных V_z, V_r и p уравнение движения необходимо решать совместно с уравнением неразрывности, выражающим собой закон сохранения массы:

$$div(\rho\overrightarrow{V})=0$$

Эти уравнения являются нелинейными, поэтому для их решения используются численные методы, в частности, метод контрольного объема, который включает в себя получение системы уравнений относительно значения искомой переменной в узловых точках [9].

Моделирование плазменной струи основывалось на следующих допущениях:

- плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия, которое в свою очередь предполагает: а) все компоненты плазмы распределены по скоростям в соответствии с распределением Максвелла; б) концентрация частиц в возбужденных состояниях определяется распределением Больцмана; в) все компоненты плазмы имеют одну и ту же температуру; г) концентрация различных компонент плазмы может быть найдена по закону действующих масс (формула Саха);
- плазма является оптически тонкой, при этом излучение беспрепятственно выходит из объема плазмы и не поглощается самой плазмой;
- пренебрегается работой давления и вязкой диссипацией.

При расчете температуры и скорости плазменного потока в канале плазмотрона и плазмохимического реактора в условиях ФПУ использовалась упрощенная модель геометрии внутреннего канала, представленная на рис. 2. Расход плазмообразующего газа принимался равным 3 л/мин, ток дуги – 100 А, падение напряжения в плазменном канале – 28 В, температура катода

принималась 1000ºС, температура анода – 500ºС, температура стенок плазмотрона – 350ºС.

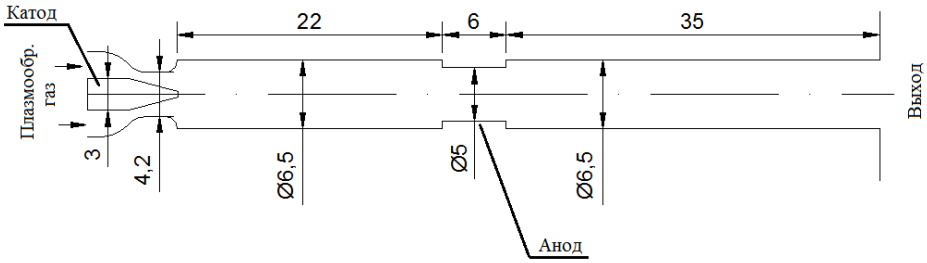

Рис. 2. Схема внутреннего канала плазмотрона и плазмохимического реактора

На рис. 3 приведено расчетное распределение температуры и скорости плазменной струи на типичных режимах ФПУ, а на рис. 4 и 5 представлено распределение температуры и скорости плазмы в различных сечениям дугового канала. Как видно из рис. 4 в области возможного нахождения подложки (z=85 мм) средняя температура плазмы равна 1000-1200 К. Эти значения близки к расчетным температурам в зоне касания плазмы с подложкой, найденным из оценки теплового состояния системы покрытие - подложка в условиях ФПУ при тепловом расчёте, в котором использовалась модель теплообмена двух слоев разнородных материалов [10].

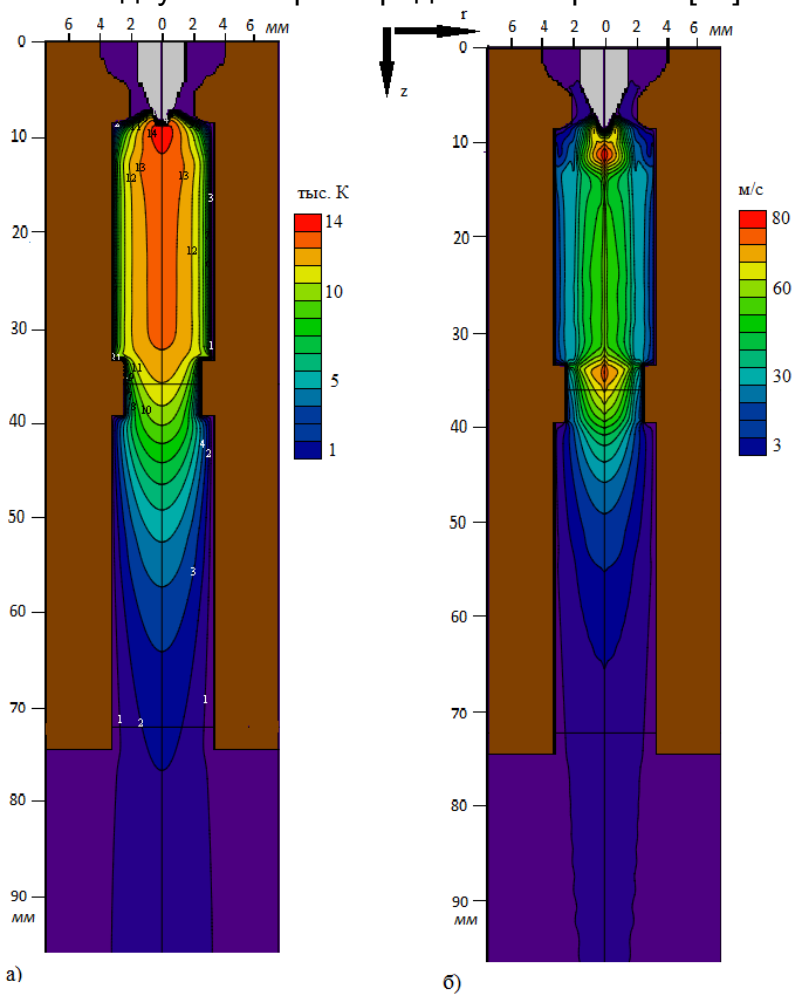

Рис. 3. Распределение температуры (а) и скорости (б) плазмы в канале плазмотрона и плазмохимического реактора

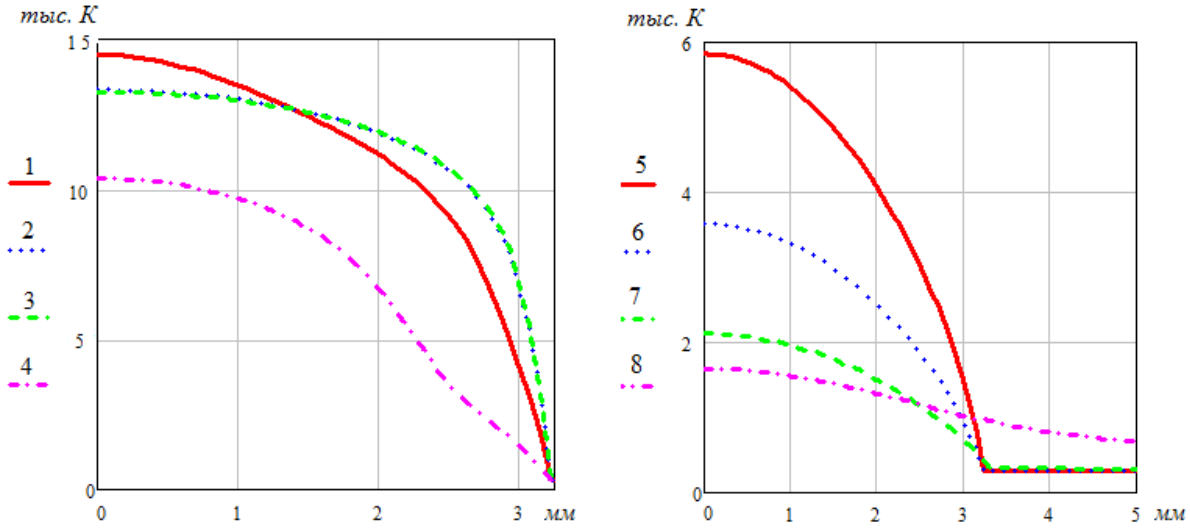

Рис. 4. Распределение температуры плазмы по сечениям:
1 – z=10мм, 2 – z=20мм, 3 – z=30мм, 4 – z=40мм, 5 – z=50мм, 6 – z=60мм, 7 – z=75мм (на срезе ПХР), 8 – z=85мм

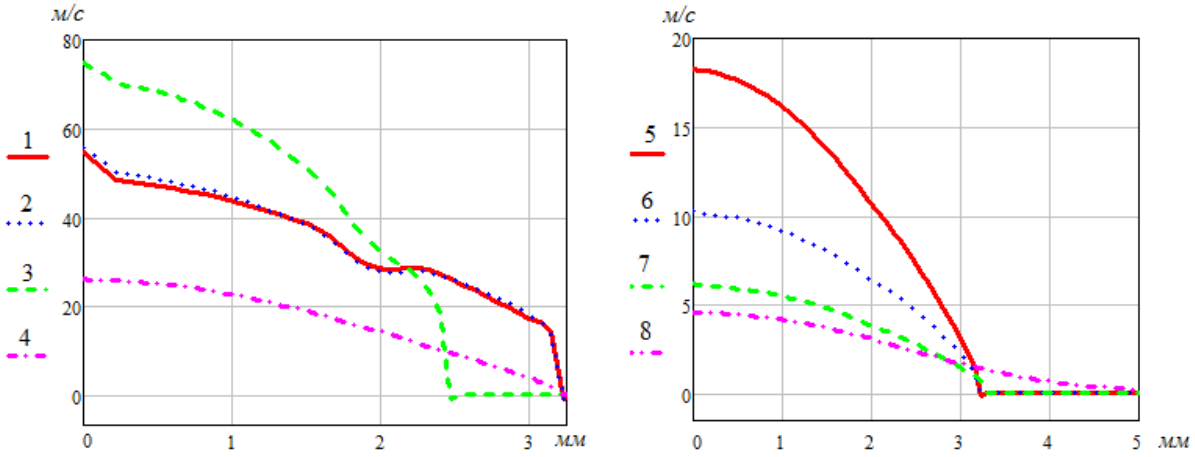

Рис. 5. Распределение скорости плазмы по сечениям:
1 – z=20мм, 2 – z=30мм, 3 – z=35мм, 4 – z=45мм, 5 – z=50мм, 6 – z=60мм, 7 – z=75мм (на срезе ПХР), 8 – z=85мм

Для полученной на срезе ПХР температуры плазмы 2000К и её скорости 6 м/с, удельная энтальпия плазменной струи составляет около 2000 Дж/г [11].

Измерение удельной энтальпии и среднемассовой скорости плазменной струи в процессе ФПУ

С целью определения влияния расхода плазмообразующего газа - аргона (2,8-3,8 л/мин) на удельную энтальпию плазмы в процессе ФПУ производилась её оценка по формуле:

$$H_{уд} = \frac{U_{д1} \cdot I + U_{пр.кат.} \cdot I + U_{пр.ан.} \cdot I - G_у \cdot c_{хл} \cdot \rho_{хл} \cdot \Delta T_у}{G_1 \cdot \rho_1} [Дж/г],$$

где $\boldsymbol{U_{д1}}$ [В] и $\boldsymbol{I}$ [А] – напряжение и ток электрической дуги между катодом ПЛ и анодом ПХР; $U_{пр.кат.}$ [В] – падение напряжения на токоведущем проводе ПЛ (водотокоподводе); $U_{пр.ан.}$ [В] – падение напряжения на токоведущем проводе ПХР (водотокоподводе); $G_у$ [м^3/с] – расход хладагента через установку в целом; $c_{хл}$ = *4,178 Дж/г·К* – удельная теплоемкость воды; $\Delta T_у$ [К] – разность температур

воды на входе и на выходе с установки; $\rho_{хл} = 10^6$ *г/м*^{3} – плотность воды (в диапазоне температур 20-40°С примем постоянное значение); G_1 [м^3/с] – расход плазмообразующего газа – аргона; ρ_1 [г/м^3] – плотность плазмообразующего газа – аргона при 300 К (ρ_{Ar}(300К) = 1,784 кг/м^3).

Как показали измерения и расчеты, влияние расхода плазмообразующего газа (в рассматриваемом диапазоне) на удельную энтальпию плазменной струи при ФПУ мало (рис. 6), поэтому для регулирования и поддержания на постоянном уровне энтальпии плазменной струи целесообразно использовать ток дуги.

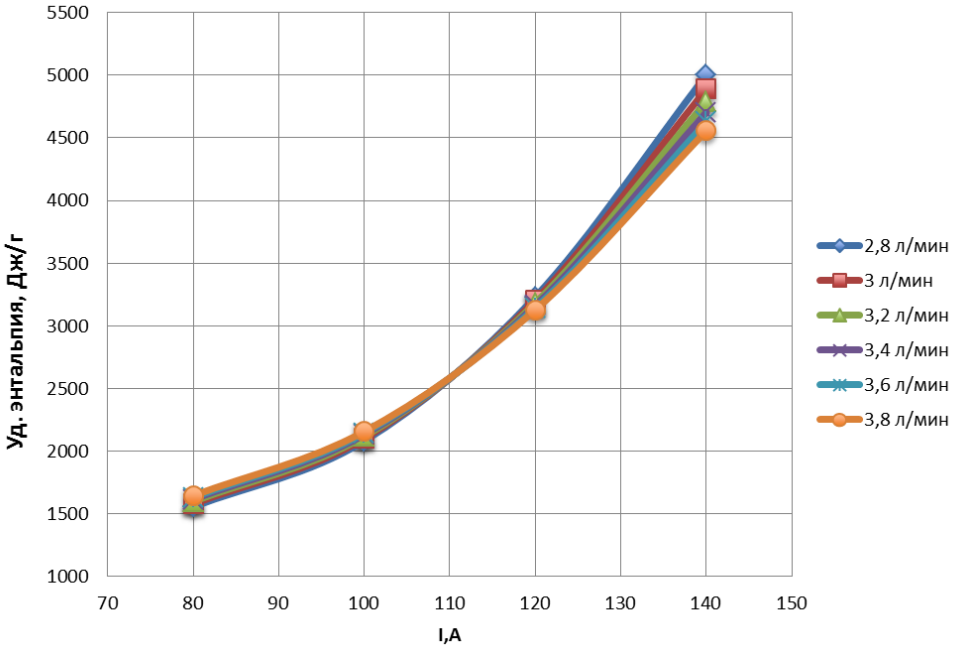

Рис. 6. Зависимость удельной энтальпии плазмы от тока дуги при разных расходах плазмообразующего газа

Среднемассовая скорость плазменной струи на срезе ПХР с учетом принимаемой температуре на срезе сопла ПХР 2000 К и температуре входящего газа 300 К составляет 9,5 м/с. Определение среднемассовой скорости производилось по формуле

$$\upsilon_{ср.м} = \frac{G_{пл1}\rho_{Ar}(300K)}{S \cdot \rho_{Ar}(2000K)}\left[\frac{м}{с}\right],$$

где $G_{пл1}$ - расход плазмообразующего газа – аргона 0,5·10^{-5} м^3/с; S – выходное сечение ПХР, равное 38,5·10^{-6} м^2 (диаметр канала 7 мм); плотность плазмообразующего газа - аргона при температуре ввода газа 300 К - ρ_{Ar}(300К) = 1,784 кг/м^3, плотность плазмообразующего газа - аргона при температуре выхода газа 2000 К - ρ_{Ar}(2000К) = 0,243 кг/м^3. Значения плотности аргона соответствуют табличным значениям при давлении 1 атм [4].

Выводы

1. Температура и скорость плазменной струи по результатам математического моделирования на срезе плазмохимического реактора составляют в среднем, соответственно, 2000К и 6 м/с.

2. На типичных режимах ФПУ на расстоянии нахождения подложки за срезом ПХР (в пределах до 10 мм) удельная энтальпия плазменной струи соответствует 1,5-2,2 кДж/г, а её среднемассовая скорость - 5-9,5 м/с.
3. В условиях ФПУ для регулирования и поддержания на постоянном уровне энтальпии плазменной струи целесообразно использовать ток дуги, так как влияние расхода плазмообразующего газа мало.

Литература

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического ун-та. СПб.: 2008. - 406 с.
2. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
3. Петров С.В., Сааков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. ТОПАС. Киев: 2000. - 220 с.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. - 721 с.
5. Термодинамические функции воздуха для температур от 1000 до 12000 К и давлений от 0,001 до 1000 атм. / Под ред. А.С. Предводителева. М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 56 с.
6. Теория столба электрической дуги / Низкотемпературная плазма. Т.1. Новосибирск: Наука СО, 1990. -376 с.
7. Дресвин С.В., Иванов Д.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Часть 1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 227с.
8. Дресвин С.В., Донской А.В., Гольдфарб В.М., Клубникин В.С. Физика и техника низкотемпературной плазмы. М. Атомиздат, 1972. 352 с.
9. Иванов Д.В., Родионов А.В., Тополянский П.А. Математическое моделирование параметров плазменной струи в технологии нанесения тонкопленочных покрытий. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: В 2 ч. Часть 2: Материалы 13-й Международной научно-практической конференции: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, С. 141-148
10. Тополянский П.А., Ермаков С.А., Соснин Н.А., Тополянский А.П. Тепловое состояние системы покрытие - основа в условиях финишного плазменного упрочнения. Физика и химия обработки материалов. № 1, 2011, С. 32-35
11. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: Машиностроение. - 1079. - 221 с.