

УДК 533.9.07

А.Н. Довгань,
В.В. Зиновьев,
В.П. Колесник, канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЛАЗМЫ

В настоящее время ионно-плазменные технологии нашли широкое применение в различных областях машиностроения. Данные технологии позволяют получать модифицированные поверхностные слои материала изделия с заданными свойствами. Поверхностные атомные слои толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрометров оказывают, как правило, более сильное влияние на общие свойства материала или изделия, чем весь остальной объем. Для получения пленок с заданными свойствами необходимо четко контролировать и управлять параметрами генераторов плазмы.

Одной из важных характеристик технологического генератора ускоренных частиц является теплосодержание потока плазмы. В зависимости от типа источника плазмы, энергетических параметров струи подложка нагревается до температур, характерных для данных процессов. Для контроля технологического процесса необходимо поддерживать температуру подложки в четко заданных пределах, а для этого необходимо знать, каким образом и в какой степени влияют параметры генератора ускоренных частиц на плотность теплового потока.

В общем случае при взаимодействии ускоренного потока плазмы с поверхностью твердого тела передача тепла осуществляется за счет ряда физических и химических процессов, происходящих в источнике плазмы, в потоке ускоренных частиц, приповерхностном слое плазмы, на поверхности твердого тела и в слое твердого тела, размер которого определяется глубиной проникновения бомбардирующих частиц. Из перечисленного выше следует, что теоретическое и экспериментальное определение влияния тепловых потоков на деталь является одним из основных вопросов при разработке технологического процесса ионно-плазменной обработки. Как следствие – определение интегральной температуры детали и разработка методики ее регулирования.

Для точного измерения температуры и плотности теплового потока в рамках технологического процесса или научного эксперимента необходимо корректно построить измерительную систему с учетом всех влияющих факторов.

При обработке в плазменной технологической установке изделий различного назначения их тепловой режим можно рассматривать по одному из допущений:

- 1) температуру обрабатываемого объекта во всех точках можно считать одинаковой;

2) температура обрабатываемого объекта существенно неоднородна по координатам;

3) время установившегося теплового равновесия сравнимо со временем технологического процесса;

4) уравнения баланса энергии для детали в режиме чистки и нанесения покрытия имеют один и тот же вид

$$Q_{\Sigma}(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) + Q_4(t) + Q_5(t), \quad (1)$$

где $Q_{\Sigma}(t)$ – поток энергии на деталь;

$Q_1(t)$ – поток энергии, излучаемый нерабочей поверхностью детали;

$Q_2(t)$ – поток энергии, излучаемый обрабатываемой поверхностью детали;

$Q_3(t)$ – энергия, накопленная в детали;

$Q_4(t)$ – поток энергии, отраженный обрабатываемой частью детали;

$Q_5(t)$ – поток энергии, затрачиваемый на образование химических связей (в зависимости от вида реакций может иметь знак + или -).

Уравнение (1) описывает баланс энергии любого объекта, помещенного в плазменно-ионную технологическую установку. К такому объекту можно отнести и датчик для измерения плотности теплового потока.

Существуют различные методы определения удельной энергии струи плазмы [1]. Наиболее распространенным является метод определения тепловых потоков с помощью калориметров разного исполнения. Однако данные методы имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение для измерений тепловых потоков плазмы: громоздкое техническое решение, сложность обработки получаемого сигнала и низкая точность конечных результатов из-за большего количества зависимых переменных.

Проводя анализ датчиков с точки зрения помехоустойчивости и удобства эксплуатации при длительных режимах была выбрана схема абсолютного компенсационного тепломера с замещением [2]. Для увеличения степени черноты приемника излучения использован коллектор сложной конфигурации с коэффициентом поглощения не ниже 0,99 [2]. В качестве теплоизмерительного элемента используется тепломер типа ДТП-0.5, представляющий собой термоэлектрическую батарею из 400 последовательно соединенных медно-константановых термопар, позволяющий при минимальных тепловых потоках проводить регистрацию сигнала цифровыми измерительными приборами. Теплоизмерительный элемент гальванически оторван от корпуса датчика. Конструкция датчика приведена на рис. 1.

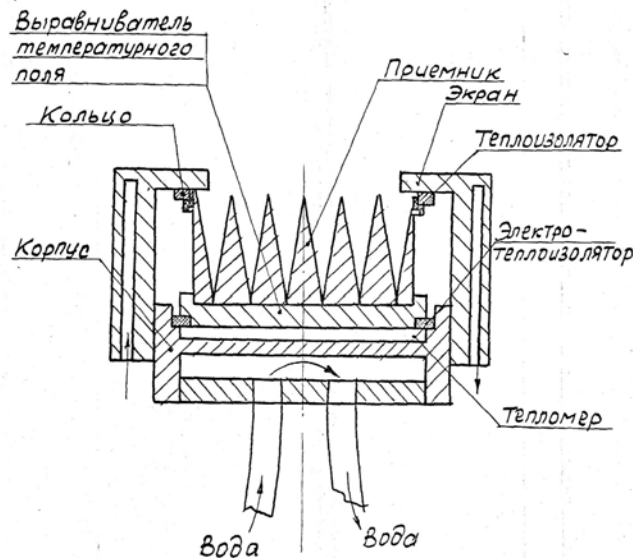


Рисунок 1 – Схема датчика теплового потока

В соответствии с конструкцией датчика для стационарного режима можно записать

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta l}. \quad (2)$$

При нагреве или охлаждении любого тела процесс можно записать в виде степенного ряда [4]

$$u(x, y, z, \tau) - t = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cdot U_i(x, y, z) \cdot e^{-m\tau}, \quad (3)$$

где $u(x, y, z, \tau)$ – значение температуры в выбранной точке системы координат x, y, z, τ ;

$U_i(x, y, z)$ – функция, зависящая от теплофизических свойств теплообменника, теплообмена и формы тела;

A_i – коэффициенты, определяемые начальными распределениями температуры внутри системы;

m – темп регулярного режима.

Выражение (3) по истечении некоторого времени после начала процесса примет вид [3]

$$u(x, y, z, \tau) - t = A \cdot U \cdot e^{-m\tau}, \quad (4)$$

где $u(x, y, z, \tau)$ – текущая температура теплообменника;

t – температура теплоприемника в стационарном режиме;

A – коэффициенты, определяемые начальными распределениями температуры в датчике;

U – функция, зависящая от теплофизических свойств теплообменника, теплообмена и формы тела.

Выполнение зависимости (4) означает, что наступил регулярный режим теплообмена, скорость которого можно определить из выражения [3]

$$m = -\frac{\partial \ln(t)}{\partial \tau} \quad (5)$$

Исходя из линейной зависимости напряжения на выходе тепломера [4] от потока энергии, проходящего через него, получим связь между значением потока энергии в датчик, переходной характеристикой датчика и калибровочным коэффициентом.

Продифференцировав уравнение (4) и решив совместно уравнение (2) и (4), получим зависимость плотности теплового потока выраженную через текущее значение на выходе датчика [3]

$$q = k \left(\frac{1}{m} \cdot \frac{\partial V_\tau}{\partial \tau} + V_\tau \right) \quad (6)$$

где V_τ - текущие показания датчика.

Значение m для любого $\tau > 0$ получено в виде выражения [4]

$$m = \frac{\ln \left| \frac{\partial V_{\tau_1} / \partial \tau_1}{\partial V_{\tau_2} / \partial \tau_2} \right|}{\tau_1 - \tau_2} \quad (7)$$

где $\partial V_{\tau_1} / \partial \tau_1$ и $\partial V_{\tau_2} / \partial \tau_2$ - скорость изменения напряжения на выходе датчика соответственно в момент времени τ_1 и τ_2 .

Прекращение изменения m считается наступлением регулярного режима. Используя экспериментальные данные, по формуле (7) определяют m , а по формуле (6) - q .

Для пересчета измеряемого теплового потока в реальный формула (6) с учетом соотношения площади тепломера S_T площади входной диафрагмы S_q примет вид

$$q = S \cdot k \left(\frac{1}{m} \cdot \frac{\partial V_\tau}{\partial \tau} + V_\tau \right) \quad (8)$$

где $S = \frac{S_q}{S_T}$.

При установившемся квазистационарном режиме работы датчика, т.е. когда $\frac{\partial V_\tau}{\partial \tau} \rightarrow 0$, выражение (8) примет вид

$$q = S \cdot k \cdot V_\tau \quad (9)$$

где k – тарировочный коэффициент тепломера.

На первом этапе эксперимента проводилось исследование теплового режима подложки при фиксированной геометрии для разных режимов работы импульсного источника плазмы. Схема измерений температуры показана на рис. 2.

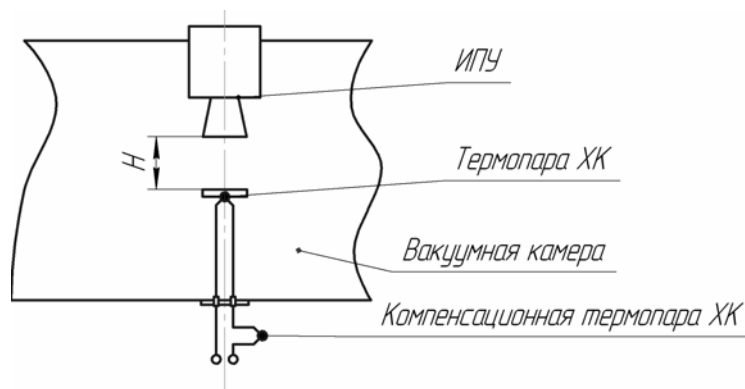


Рисунок 2 – Схема измерений температуры подложки

Имитатором детали служила пластина с закрепленной на ней термопарой хромель-капель. Для учета влияния на тепловые измерения изменения температуры окружающей среды последовательно с основной термопарой подключена компенсационная термопара. Результаты измерений теплового режима подложки приведены на рис.3.

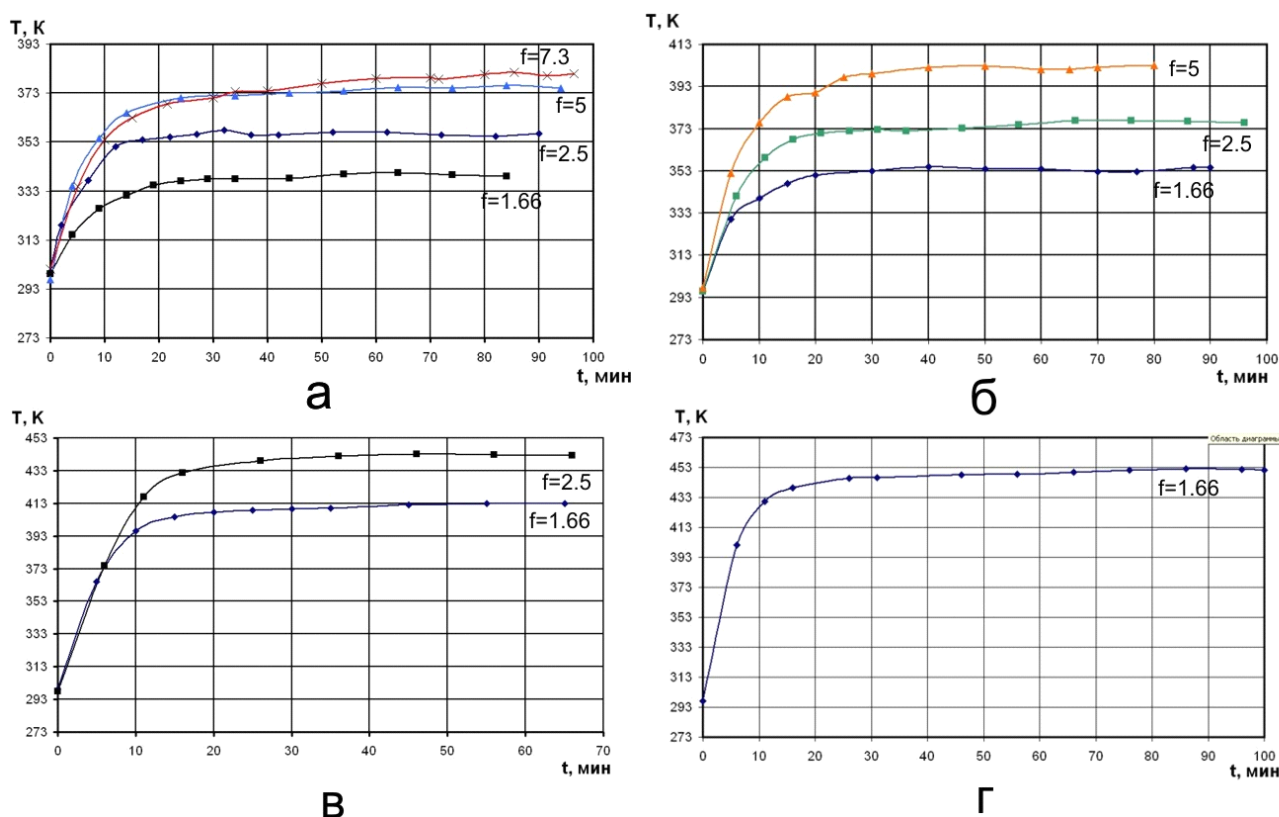


Рисунок 3 – Зависимость температуры подложки от параметров разряда: а – $U_p=800$ В; б – $U_p=1000$ В; в – $U_p=1420$ В; г – $U_p=1700$ В

Для исследования теплового потока импульсного плазменного ускорителя была создана измерительная система на базе абсолютного компенсационного тепломера с замещением (рис. 4).

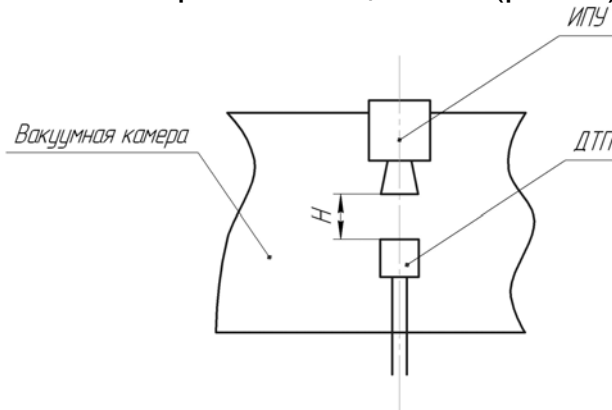


Рисунок 4 – Схема измерений теплового потока

Датчик устанавливается соосно с ИПУ. Расстояние между срезом ускорителя и датчиком составляет $H=140$ мм. Измерения проводились при неизменной геометрии эксперимента и фиксированном напряжении разряда. Полученные экспериментальные зависимости приведены на рис. 5.

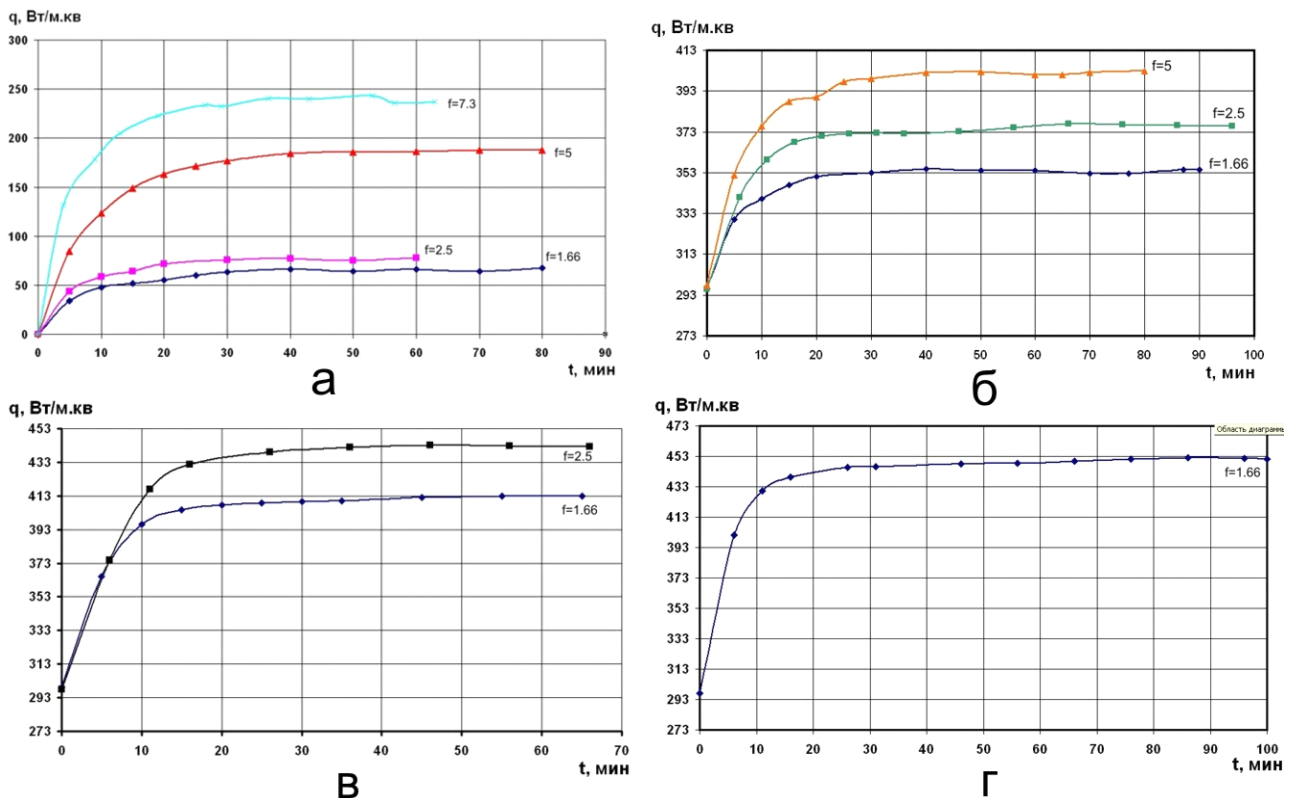


Рисунок 5 – Зависимость плотности теплового потока от параметров разряда:

а – $U_p=800$ В; б – $U_p=1000$ В; в – $U_p=1420$ В; г – $U_p=1700$ В

Из полученных зависимостей видно, что скорость прогрева подложки m и ее максимальная температура T_{Π} зависят от интегральной плотности теплового потока, которая в свою очередь зависит от мощности, вложенной в разряд:

$$m = F(f, t_i, Q_p); \quad (10)$$

$$T_{\Pi} = F(f, t_i, Q_p), \quad (11)$$

где f – частота следования импульсов, Гц;

t_i – длительность импульсов, с;

Q_p – интегральная плотность теплового потока, Вт/м².

В данной статье показано возможность применения абсолютного компенсационного тепломера с замещением для исследования теплоемкости плазменной струи технологического импульсного ускорителя.

Использование в приемнике излучения последовательно включенных термопар позволило увеличить чувствительность, помехоустойчивость и условия согласования с измерительной аппаратурой. Примененная методика обработки данных позволила существенно уменьшить время экспериментальных измерений.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Экспериментальное исследование теплообмена твердого тела с потоком высокоэнтальпийного газа в области точки торможения / А.В. Лыков, В.Л. Сергеев, А.Г. Шаников // Высокоэнтальпийная теплофизика. – М. : Наука, 1969. - С. 7-18.

2. Анатычук, Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л.И. Анатычук.- К. : Наук. думка, 1979.- 768 с.

3. Ярышев, Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. / Н.А. Ярышев.- Л. : Энергия, 1967. - С.37-39, 56.

Поступила в редакцию 07.07.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский, УкрНИИТМ, г. Днепропетровск