

УДК 537.525.7:621.762

А. А. Хубатхузин, И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин,  
А. Ю. Шемахин, А. А. Башкирцев

## УПРОЧНЕНИЕ НОЖЕЙ УСТАНОВКИ ГРАНУЛЯЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ Пониженного Давления

*Ключевые слова:* струя, ВЧ плазма, температура, пониженное давление.

*В статье рассматривается перспективный метод химико-термической обработки материалов воздействием высокочастотной плазмы пониженного давления с целью повышения качества, надежности и долговечности изделий. Рассмотрен механизм воздействия на обрабатываемые изделия установки грануляции полиэтилена, определены оптимальные параметры газового разряда. Предложена математическая модель взаимодействия потока ионизированного газа с поверхностью изделия*

*Keywords:* RF plasma, stream, temperature, low pressure.

*In the articles prospective method of chemo-thermal material processing is considered by the application of high-frequency low pressure plasma with the goal of improving quality, reliability and durability of products. Impact mechanism on processed details is considered for polyethylene granulation unit, optimal parameters of gas discharge were determined. Mathematical model of interaction of ionized gas stream with detail surface was suggested.*

При открытой рыночной экономике расширение промышленного производства невозможно без решения проблем повышения качества и конкурентоспособности выпускаемых машин. Одной из важных задач при обеспечении качества машины является повышение эксплуатационных показателей их деталей. Эти показатели определяются параметрами качества поверхностного слоя. Известно, что до 70% причин выхода из строя машин и механизмов связано с износом узлов трения.

Повышение качества, надежности и долговечности изделий является одной из основных задач промышленности России, особенно в условиях обострения международной конкуренции, вызванной глобализацией экономики.

Одним из эффективных способов повышения качества изделий машиностроения является модификация свойств рабочих поверхностей, подвергающихся действию различных сред в процессе эксплуатации. Результаты экспериментальных исследований процессов износа и разрушения различных изделий при их эксплуатации показали, что надежность изделия и срок службы зависят, а нередко и полностью определяются состоянием поверхностного слоя [1-3].

Большое значение при практическом использовании металлов и сплавов на их основе имеют вопросы повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости поверхности металлических изделий.

Оптимальным путем решения проблемы повышения качества, надежности и долговечности изделий является разработка методов модификации, позволяющих улучшить сразу несколько характеристик поверхностного слоя, таких как шероховатость, дефектность, удалить трещиноватый и

рельфный слой, перераспределить внутренние напряжения.

Повышение межремонтного периода эксплуатации технологических установок грануляции является важной задачей на пути к повышению производительности на существующих, а также строящихся установках грануляции полиэтилена, карбамида, а также строительных материалов. Увеличения производительности можно добиться в том числе и за счёт улучшения механических характеристик рабочих ножей установок грануляции, а именно повышения механической прочности, износостойкости и микротвердости данных ножей.

Процесс грануляции проводят, как правило; в аппаратах с псевдоожиженным слоем.

Процесс грануляции полиэтилена происходит следующим образом: нити, выступающие из отверстий формующей плиты, разрезаются быстровращающимся ножом на гранулы равномерной формы, которые падают при этом в специально сконструированный улавливающий кожух.

В Республике Татарстан основными предприятиями, использующими на своих производственных мощностях, установки грануляции являются ОАО «Казаньоргсинтез» (установка грануляции полиэтилена высокой давления), ОАО «Нижнекамскнефтехим» (установка грануляции полиэтилена высокой давления), а также строящийся ОАО «Аммоний» (установка грануляции карбамида).

Для обработки в высокочастотной (ВЧ) плазме пониженного давления был отобран комплект ножей установки грануляции ОАО «Казаньоргсинтез».

Химический состав материала ножа представлен в таблице 1.

Таблица 1

	Массовая доля, %		
	Co	Fe	C общий
ВК6	5,83	0,14	5,58

На рисунке 1 приведена фотография ножа гранулятора после обработки в высокочастотной плазме пониженного давления.



Рис. 1 - Рабочий нож установки грануляции полиэтилена

Для определения оптимальной зоны обработки ножей с помощью математической модели и метода, предложенного в [4,5] проведен расчет заряженной компоненты ВЧ-плазмы пониженного давления. Для расчета характеристик течения применен метод конечных объемов для следующей системы уравнений:

Уравнение неразрывности электронного и соответствующие граничные условия:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} - \text{div}(D_a \text{grad} n_e - v_a n_e) = v_i n_e, \quad (1)$$

$$n_e|_{\text{inlet}} = n_{\text{inlet}},$$

$$n_e|_{\text{outlet}} = 0, n_e|_{\text{walls}} = 0, n_e|_{\text{body}} = 0$$

Уравнение сохранения энергии электронного газа и соответствующие граничные условия:

$$c_p \rho_e \frac{\partial T_e}{\partial t} - \text{div}(\lambda_e \text{grad} T_e - \frac{5}{2} k_B n_e T_e v_e) + \frac{3}{2} k_B \delta v_e n_e (T_e - T_a) = \sigma E^2 - v_i n_e E_i,$$

$$T_e|_{\text{inlet}} = T_{\text{inlet}}, T_e|_{\text{outlet}} = T_{\text{room}}, T_e|_{\text{walls}} = T_{\text{room}}, \frac{\partial T_e}{\partial n}|_{\text{body}} = 0,$$

Скорость электронов вычисляется из соотношения:

$$v_e = v_a - (D_a / n_e) \text{grad} n_e.$$

Здесь  $n_e$  - концентрация электронов,  $D_a$  - коэффициент амбиполярной диффузии,  $\lambda_e$  - коэффициент теплопроводности электронного газа,  $v_i$  - частота ионизации,  $c_p$  - теплоёмкость электронного газа,  $v_e$  - частота упругих столкновений электронов с атомами и ионами,  $\sigma$  - проводимость плазмы,  $E$  - вектор напряженности электрического поля,  $E_i$  - потенциал ионизации,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $\delta = 2m_e/m_a$ ,  $m_a$  - масса атома,  $m_e$  - масса электрона.

Рассчитаны электронная температура и концентрация электронов. Расчет проводился для модели вакуумной камеры радиусом  $R_{vk} = 0.2$  м, радиусом входного отверстия  $R_{rk} = 0.012$  м и длиной камеры  $L_{vk} = 0.5$  м. Предполагается, что через входное отверстие вакуумной камеры втекает поток плазмы

аргона с давлением на входе в диапазоне  $P_{\text{inlet}} = 35 \div 165$  Па, температурой  $T_{\text{inlet}} = 300 \div 700$  К, скоростью потока  $v_{\text{inlet}} = 300 \div 1000$  м/с и электронной температурой  $T_e = 1 \div 4$  эВ. Расход газа составлял  $G = 0.05-0.25$  г/с, степень ионизации в камере  $10^{-7}-10^{-4}$ , начальное давление в камере  $P_0 = 3.5 \div 16.5$  Па. Обрабатываемое изделие моделировалось цилиндром размерами  $R_b = 0.03$  м,  $L_b = 0.02$  м, который располагался по центру потока на расстоянии  $L_{tb} = 0.03 \div 0.13$  м от входного отверстия. Плоскость образца перпендикулярна потоку.

На рис 1, 2, 3 представлены температура нейтральной компоненты ВЧ-плазмы пониженного давления, электронная температура и концентрация электронов. На рис. 1 видно, что при увеличении расхода газа и скорости потока при уменьшении давления происходит образование зоны перегрева по периферии струи. Поэтому необходимо определить зону равномерной обработки материалов, в виду появления эффекта перегрева струи ВЧ-плазмы [6-10], (рис.2) по периферии, что подтверждено экспериментальными измерениями. Из рис. 2, 3 видно, что оптимальный режим обработки ножей по температуре нейтрального и электронного газов и концентрации электронного газа достигается на расстоянии 7 - 12 см от входного отверстия при скорости потока не более 350 м/с и расходе газа не менее 0.08 г/с.

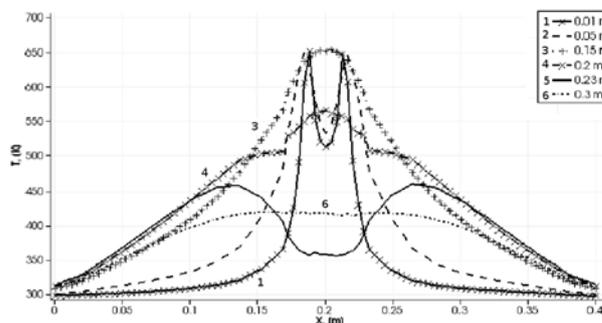


Рис. 2 - Радиальное распределение температуры  $T_a$  нейтральной компоненты ВЧ-плазмы в поперечном сечении струи. Образец располагался на расстоянии  $L_{tb} = 0:2$  м от входного отверстия ( $R_{rk} = 0:012$  м,  $R_{vk} = 0:2$  м,  $L_{vk} = 0:5$  м,  $G = 0:24$  г/с,  $T_{\text{inlet}} = 500$  К,  $v_{\text{inlet}} = 1000$  м/с)

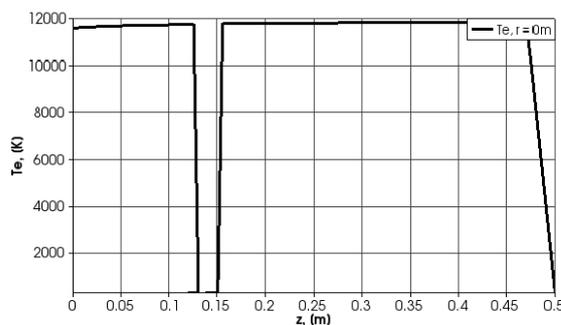
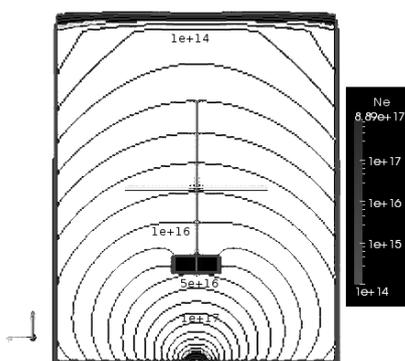


Рис. 3 - Распределение электронной температуры  $T_e$  вдоль струи в модели с образцом ( $R_{rk} = 0:012$  м,  $R_{vk} = 0:2$  м,  $L_{vk} = 0:5$  м,  $L_{tb} = 0:13$  м,  $G = 0:08$  г/с,  $T_{\text{inlet}} = 400$  К,  $v_{\text{inlet}} = 350$  м/с,  $n_{\text{inlet}} = 1018$  1/м<sup>3</sup>,  $T_{\text{inlet}} = 11600$  К)



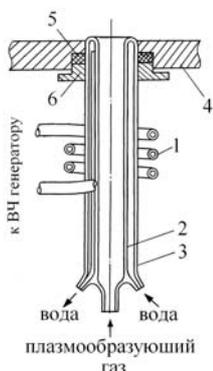
**Рис. 4 -** Изолинии концентрации электронов  $n_e$  в срезе вакуумной камеры по центру потока от входного отверстия ( $R_{rk} = 0:012$  м,  $R_{vk} = 0:2$  м,  $L_{vk} = 0:5$  м,  $L_{tb} = 0:13$  м,  $G = 0:08$  г/с,  $T_{inlet} = 400$  К,  $v_{inlet} = 350$  м/с,  $n_{inlet} = 1018$  1/м<sup>3</sup>,  $T_{einlet} = 11600$  К)

В результате численного моделирования определены оптимальные параметры воздействия газового разряда на изделия. Обработка изделий проводилась на установке, описанной в [5]

ВЧ-плазменная установка состоит из ВЧ генератора, вакуумной части (блока), системы питания рабочим газом, высоковольтного выпрямителя, ВЧ плазмотрона и аппаратуры контроля.

**ВЧ генератор.** В данной установке используется ВЧ генератор, собранный по одноконтурной схеме, настроенных на индукционную нагрузку на частоте 1,76 МГц.

**ВЧ плазмотроны.** Для изготовления разрядных камер плазмотрона использовалось кварцевое стекло. Причиной такого выбора послужили хорошая оптическая прозрачность, высокие термостойкость и механическая прочность, а также малость диэлектрических потерь кварца в используемом диапазоне частот. В установке реализованы струйные ВЧ разряды индукционного типа с соленоидальным индуктором. Конструкция плазмотрона, предназначенного для получения потока плазмы, представлена на рис.5.



**Рис. 5 -** Конструкции плазмотрона: 1 – индуктор; 2 – разрядная камера; 3 – рубашка охлаждения; 4 – базовая плита; 5 – уплотнительное кольцо; 6 – прижимной фланец

Вакуумный блок (рис.6) создан на базе установки, предназначенной для нанесения тонких слоев металлов и диэлектриков в вакууме. Основание

вакуумного блока смонтировано в виде сварного каркаса, на верхней плоскости которого крепится плита. На ней размещены вакуумный колпак и подколпачные механизмы: карусели с образцами, устройства подъема и опускания карусели. Внутри каркаса блока размещены ВЧ плазмотрон, система вакуумных трубопроводов, вентили, подъемник колпака с электроприводом, блок электропитания, система водяного охлаждения узлов установки. В колпаке предусмотрены устройства ввода и вывода для подачи дополнительного потенциала на изделие.



**Рис. 6 -** Вакуумный блок установки для получения ВЧ плазмы

Вакуумная откачная система построена на базе двухроторного насоса типа АВР-50 с быстротой действия 50 л/с.

Система питания плазмотрона рабочим газом состоит из баллона со сжатым газом, редуктора для понижения давления, образцового манометра и ротаметра для определения расхода газа и игольчатого натека для регулирования расхода, устройства для получения смеси газов.

Система водоснабжения установки служит для обеспечения заданного теплового режима деталей и узлов, наиболее нагруженных в тепловом отношении: генераторной лампы, индуктора, разрядной камеры, вакуумного колпака. Подвод воды к установке и отвод из нее осуществляется при помощи резиновых шлангов.

Аппаратура контроля применяется для контроля входных параметров установки: ВЧ напряжения и тока, частоты генератора при проведении всех экспериментов по обработке материалов.

Для измерения давления в ходе исследования использовался образцовый манометр. Калибровка образцового манометра производилась по показаниям компрессионного манометра «вакустата» Брунера, с помощью которого оценивалась также точность показаний. Погрешность измерения давления в рабочей камере составляет 5%.

С целью установления закономерностей взаимодействия ВЧ-плазмы с поверхностью материалов проводилась обработка образцов при варьировании входных параметров установки в следующих диапазонах: расход плазмообразующего газа 0,025-0,15 г/с, потребляемая мощность – от 2,5 до 10 кВт, частота генератора – 1,76 МГц.

В качестве рабочего газа при исследовании процессов финишной очистки и нанополировки поверхностей использовался технически чистый аргон. Для повышения микротвердости поверхности изделия использовалась смесь газов из аргона и азота в соотношении 70% на 30%. Предварительное давление в рабочей камере – от 1,33 до 13,3 Па, рабочее давление – от 13,3 до 133 Па, расход плазмообразующего газа – до 0,15 г/с.

Для определения физико-механических свойств применялось измерение твердости на твердомере ТП-2, микротвердости с помощью микротвердомера ПМТ-3, шероховатости поверхности на профилометре (модель 283), рельеф и микрорельеф поверхности исследовался на электронных микроскопах “JSM-35”.

Замеры микротвердости проводились на поверхности полированных образцов на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 2999-75 при нагрузке 100 гс. Измерения микротвердости проводились в соответствии с ТУ 9437-025-40686779-2001. Увеличение значения микротвердости составило от 12 до 29 %. Исследование шероховатости поверхности проводилось на профилометре (модель 283). Было установлено уменьшение шероховатости на 24-37%, определены оптимальные параметры достижения этого значения. Микрорельеф поверхности, который исследовался на электронных микроскопах “JSM-35” показал отсутствие трещиноватого и рельефного слоев. Исследования износостойкости проводились экспериментальным путем на натуральных испытаниях в ОАО «Казаньоргсинтез», они показали, что у всех обработанных изделий увеличился срок службы в среднем в 3 – 3,5 раза.

В связи с повышением микротвердости был увеличен межремонтный период работы установки грануляции, что в свою очередь повлекло за собой увеличение производительности установки, снижение накладных расходов, а также увеличение рентабельности производства в целом.

Таким образом, показана перспективность высокочастотной плазменной обработки, хорошая согласованность численных экспериментов по представленной математической модели и экспериментальных результатов, определены оптимальные параметры газового разряда, воздействующего на обрабатываемые изделия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по соглашению 14.В37.21.1948 от 14 ноября 2012г. и гранта РФФИ № 12-01-31458 мол\_а*

## Литература

1. Зуев В.М. Термическая обработка металлов. М., Высшая школа, 1981, 296 с.
2. D.F. Ollis, H. Al-Ekabi (Eds.). Photocatalytic Purification of Water and Air. Elsevier, Amsterdam, 1993. 432 p.
3. M. Xu, N. Huang, Z. Xiao, Z. Lu, Supramol. Sci., 5, 449 – 451 (1998).
4. Желтухин В.С., Шемахин А.Ю. Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. Науки, 4, Е. 153., 135-142 (2011.).
5. V. Zheltukhin, A. Shemakhin. Труды VIII международной конференции РРРТ-7, Минск, 2012 г. С. 283 – 286.
6. И.Ш. Абдуллин, А.А. Хубатхузин, *Вестник Казанского технологического университета*, 11; 625 – 627 (2010).
7. И.Ш. Абдуллин, А.А. Хубатхузин, *Вестник Казанского технологического университета*, 11; 628 – 629 (2010).
8. Абдуллин И.Ш., Канарская З.А., Хубатхузин А.А., Калашников Д.И., Гатина Э.Б., *Вестник Казанского технологического университета*, 10, 15; 158 – 166 (2012).
9. Хубатхузин А.А., Абдуллин И.Ш., Гатина Э.Б., Желтухин В.С., Шемахин А.Ю., *Вестник Казанского технологического университета*, 14, 15; 37 – 41 (2012).
10. Хубатхузин А.А., Абдуллин И.Ш., Гатина Э.Б., Желтухин В.С., Шемахин А.Ю., *Вестник Казанского технологического университета*, 14, 15; 43 – 48 (2012).

© А. А. Хубатхузин - канд. техн. наук, доц. каф. вакуумная техника электрофизических установок, КНИТУ, al\_kstu@mail.ru; И. Ш. Абдуллин – д-р техн. наук, проф., зав. каф. плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов КНИТУ, abdullin\_i@kstu.ru; В. С. Желтухин – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф. математической статистики КФУ, vzheltukhin@gmail.com; А. Ю. Шемахин - асп., асс. той же кафедры, shemakhin@gmail.com; А. А. Башкирцев — асп. той же кафедры, al\_kstu@mail.ru.