

Формализованный подход к оценке качественных условий процесса ионно-плазменного нанесения упрочняющих покрытий

А.А. Коряжкин¹, С.С. Дружков^{2*}, А.В. Баранов³, С.Л. Проскуряков⁴

^{1,2}АО «Новые инструментальные решения» (АО «НИР»), г. Рыбинск, Ярославская обл., Россия

^{3,4}ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва» (ФГБОУ ВО РГАТУ им. П. А Соловьёва), г. Рыбинск, Ярославская обл., Россия

Аннотация. Предлагается способ количественной оценки качественного состояния процессов ионно-плазменного нанесения покрытий путем анализа комплекса технологических условий процесса с применением методов квалиметрии. Рассматривается математическая модель комплекса качественных характеристик плазменной среды в процессе нанесения покрытия, предполагающая количественную оценку основных характеристических параметров, с учетом взаимосвязи величины рабочего давления газа в вакуумной камере с наличием в ней газовых примесей. Приводятся результаты апробации предлагаемого способа при различных условиях реализации ионно-плазменного нанесения покрытия.

Ключевые слова: упрочняющие покрытия, плазма, параметры качества, количественная оценка, модель.

*drugkov.s.s@rambler.ru

Введение

Модификация поверхности рабочей части режущего инструмента в настоящее время является целесообразным направлением повышения его эффективности при решении задач в области металлообработки [1]. Одним из наиболее распространенных методов поверхностной модификации является упрочнение режущей части с помощью создания дополнительного износостойкого поверхностного слоя путем осаждения специального функционального покрытия с учетом требований по эксплуатации инструмента. Особые свойства упрочняющих износостойких покрытий (такие как высокая твердость, прочность, сопротивляемость развитию трещин, низкий коэффициент трения, способность сохранять рабочие характеристики при высоких температурах [2]) проявляются при работе металлорежущего инструмента, улучшая его режущую способность, износостойкость и качество обработки деталей. Повышение рабочих характеристик инструмента с покрытием обусловлено тем, что материалы с ультрадисперсной структурой, обладающие большой суммарной площадью межзеренных границ, характеризуются наиболее сбалансированным соотношением между твердостью, которая определяет износостойкость, и модулем упругости, представляющим прочностную характеристику материала. Будучи нанесенными на поверхность режущей части инструмента, покрытия передают свои свойства ему, тем самым повышая работоспособность. Таким образом, данное направление совершенствования металлорежущего инструмента является эффективным в области развития металлообрабатывающего производства.

Постановка задачи исследования

При осуществлении процессов ионно-плазменного синтеза упрочняющих покрытий качественный состав рабочей среды – плазмы, являющейся источником частиц будущего покрытия, предопределяет его характеристики. Следовательно, для получения высококачественных покрытий качество плазмы требует надлежащего контроля и регулирования. Согласно правилам осуществления процессов ионно-плазменного синтеза функциональных покрытий, качество создаваемого облака плазмы в рабочей камере установки в процессе нанесения покрытия определяется за счет соблюдения перечня нормативов, установленных для того или иного технологического процесса. В общем случае это касается требований так

называемой «вакуумной гигиены». Конкретной методики по определению количественных значений качественных характеристик ионно-плазменного процесса не существует, однако для осуществления его контроля это является необходимым.

Специалистами предприятия АО «Новые инструментальные решения» при содействии научно-педагогических работников ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» в ходе аналитического обзора литературных источников и выявления характеристических параметров, а также функциональных зависимостей, имеющих место при реализации процессов ионно-плазменного синтеза покрытий, установлена взаимосвязь рабочего давления газа в вакуумной камере и комплекса соответствующих технологических условий, однако механизм данной взаимосвязи в существующих литературных источниках не выявлен. Таким образом определена необходимость выполнения количественного описания механизма влияния комплекса условий создания ионно-плазменного процесса на величину параметра рабочего давления газа в вакуумной камере. Существующие методики количественной оценки качества подробно рассмотрены в научно-предметной области квалиметрии, основным положением которой должна соответствовать и рассматриваемая сфера исследования, то есть технология нанесения упрочняющих покрытий из плазмы газового разряда. В данном случае целесообразно разработать конкретное математическое описание, которое будет представлять цифровой двойник процесса, состоящий из необходимого и достаточного набора количественных параметров, определяющих его качественные характеристики. Применение численной модели качества плазмы значительно ускорит процесс проведения оценки и в то же время улучшит степень соответствия ее результатов реальности.

В связи с вышесказанным, задачей исследования является формирование математической модели, которая представит собой количественный эквивалент качественного состава плазменной среды, основанной на отображении наиболее значимых ее характеристик. Данная математическая модель, предусматривающая учет основных определяющих факторов процесса, будет основой для контроля его качества.

Аналитическая проработка поставленной задачи

Для решения задачи количественного определения качественных характеристик, в первую очередь, необходимо осуществить систематизацию параметров оцениваемого объекта. Для этого из множества характеристик ионно-плазменного процесса нанесения покрытия был выделен перечень показателей, необходимый и достаточный для описания процесса с точки зрения качества его осуществления [2, 3]. Также определен разумный компромисс между моделью с ограниченной номенклатурой параметров качества, используемых для расчета, и неоправданно усложненной моделью, использование которой будет затруднено.

Качественная оценка осуществления ионно-плазменного процесса предполагает выявление наиболее значимых технологических условий, которые характеризуют качественный состав плазмы (то есть отражают наличие в ней посторонних газовых примесей), и при этом могут быть количественно охарактеризованы. В ходе работы был определен необходимый и достаточный набор характеристик условий осуществления процесса нанесения покрытия:

- продолжительность пребывания вакуумной камеры под атмосферным давлением;
- продолжительность стадии откачки вакуумной камеры до достижения высокого вакуума;
- продолжительность стадии ионной очистки изделий;
- толщина технологической корки покрытия на стенках вакуумной камеры и внутрикамерной оснастке;
- степень соответствия качества подготовки изделий требованиям вакуумной гигиены;
- степень соответствия показателей микроклимата (температура воздуха, относительная влажность, запыленность) в рабочем помещении заданным нормативам;
- чистота используемых технологических газов и материалов распыляемых мишеней;
- производительность откачной системы (диффузионного насоса).

Предварительная формализация полученной информации была выполнена путем структуризации показателей (Рис. 1). На этом этапе были дополнительно введены два комплексных показателя: содержание атмосферных и технических примесей в плазме, кроме того, комплексные показатели разделены на частные.

Согласно положениям квалиметрии [4, 5], оценка уровня качества объекта основана на сопоставлении комплекса определяющих его показателей с подобными показателями базового образца, принятого в качестве эталона. В качестве таких показателей были приняты значения характеристик, указанные в технической документации к установке для нанесения упрочняющих покрытий [2, 3], при отсутствии необходимых данных применялся метод экспертной оценки [6].

Математическое описание качественных условий процесса происходит за счет образования комплекса единичных показателей, определяющих соответствие того или иного технологического условия выполнения процесса нанесению покрытия установленному нормативу. Формула для расчета единичного показателя выглядит следующим образом [4]:

$$K_i = \frac{k_i}{k_i^{\text{баз}}}, \quad (1)$$

где K_i – значение единичного показателя качества; k_i – количественная характеристика единичного показателя; $k_i^{\text{баз}}$ – количественная характеристика соответствующего показателя базового образца.



Рисунок 1. Структурный комплекс показателей качества процесса ионно-плазменного напыления.

Для учета превосходства одних показателей над другими по степени значимости в общей системе оценки устанавливается удельный вес показателей: это происходит путем назначения коэффициентов весомости, которые рассчитываются по методу оценок Фишборна [5]. Оценку комплексного критерия качества ионно-плазменного процесса было принято осуществить по среднему квадратичному показателю [7]. Выбор обусловлен тем, что данный критерий предполагает использование различных по природе единичных показателей, а также характеризуется относительной простотой расчета. В результате комплексные показатели качества были представлены в виде математических выражений, а затем объединены в общую модель комплексной оценки качества ионно-плазменного нанесения покрытия:

$$\bar{K}_{\text{КП}} = \sqrt{\left[\begin{aligned} & q_{\text{АП}} \cdot (q_{h_{\text{К}}} \cdot K_{h_{\text{К}}}^2 + q_{t_{\text{АД}}} \cdot K_{t_{\text{АД}}}^2 + q_{t_{\text{ВО}}} \cdot K_{t_{\text{ВО}}}^2) + \\ & + q_{\text{ТП}} \cdot (q_{q_{\text{Г}}} \cdot K_{q_{\text{Г}}}^2 + q_{q_{\text{М}}} \cdot K_{q_{\text{М}}}^2) + q_{t_{\text{ИО}}} \cdot K_{t_{\text{ИО}}}^2 + q_{q_{\text{ОС}}} \cdot K_{q_{\text{ОС}}}^2 + \\ & + q_{\text{ВГ}} \cdot [q_{\text{ЧП}} \cdot K_{\text{ЧП}}^2 + q_{\text{МП}} \cdot (q_{\text{Т}} \cdot K_{\text{Т}}^2 + q_{\text{RH}} \cdot K_{\text{RH}}^2 + q_{\text{Z}} \cdot K_{\text{Z}}^2)] \end{aligned} \right]}, \quad (2)$$

где $\bar{K}_{\text{КП}}$ – комплексный показатель качества процесса ионно-плазменного нанесения покрытия; $q_{\text{АП}}$ – весомость комплексного показателя наличия атмосферных примесей в плазме; $Kh_{\text{К}}$, $qh_{\text{К}}$ – единичный показатель толщины слоя технологической корки покрытия и его весомость; $Kt_{\text{АД}}$, $qt_{\text{АД}}$ – единичный показатель продолжительности пребывания вакуумной камеры под атмосферным давлением и его весомость; $Kt_{\text{ВО}}$, $qt_{\text{ВО}}$ – единичный показатель продолжительности стадии высоковакуумной откачки и его весомость; $q_{\text{ТП}}$ – весомость комплексного показателя технических примесей в плазме; $Kq_{\text{Г}}$, $qq_{\text{Г}}$ – единичный показатель чистоты технологических газов и его весомость; $Kq_{\text{М}}$, $qq_{\text{М}}$ – единичный показатель чистоты материалов мишеней и его весомость; $Kt_{\text{ИО}}$, $qt_{\text{ИО}}$ – единичный показатель продолжительности стадии ионной очистки и его весомость; $Kq_{\text{ОС}}$, $qq_{\text{ОС}}$ – единичный показатель производительности откачной системы и его весомость; $q_{\text{ВГ}}$ – весомость комплексного показателя соблюдения требований вакуумной гигиены; $K_{\text{ЧП}}$, $q_{\text{ЧП}}$ – единичный показатель чистоты осуществления процесса нанесения покрытия и его весомость; $q_{\text{МП}}$ – весомость комплексного показателя микроклимата рабочего помещения; $K_{\text{Т}}$, $q_{\text{Т}}$ – единичный показатель стабильности температуры воздуха в рабочем помещении и его весомость; K_{RH} , q_{RH} – единичный показатель относительной влажности воздуха в рабочем помещении и его весомость; K_{Z} , q_{Z} – единичный показатель запыленности в рабочем помещении и его весомость.

Полученная математическая модель комплексного показателя качества процесса ионно-плазменного нанесения покрытия позволяет дать ему количественное определение. В результате расчета по представленному выражению может быть получен коэффициент, отражающий степень соответствия комплекса характеристик ионно-плазменной среды при конкретном процессе напыления нормативному набору условий. Данный коэффициент позволяет производить расчет величины рабочего давления газа в вакуумной камере для стабилизации процесса напыления с учетом конкретных его условий. За счет использования в данной модели безразмерных количественных комплексов обеспечивается универсальность ее применения, предусматривающая возможность корректировок набора учитываемых факторов.

Методика эксперимента

Определение возможности практического применения разработанной математической модели комплекса качественных условий процесса ионно-плазменного синтеза покрытий предполагает оценку ее адекватности. В связи с этим дальнейшей задачей исследования являлась экспериментальная проверка разработанной математической модели качества плазменной среды. Проведение экспериментальных исследований предполагает затраты времени, а также расходование трудовых и материальных ресурсов, поэтому определение методики экспериментов производилось с учетом достижения оптимального соотношения затрат и получаемых результатов. В качестве лабораторного оборудования для выполнения испытаний использовалась установка ионно-плазменного напыления магнетронного типа. На катоды были установлены пластины из титана (ВТ1–0, ВТ3–1 и ВТ5–1). Технологическим газом в процессах напыления являлся аргон концентрации 99,995 %, а также 99,95 % и 99,98 %. Режимы напыления соответствовали следующим значениям: напряжение разряда на катодах – $U_d=600$ В; сила тока разряда – $I_d=5$ А; напряжение на изделиях – $U_b=40$ В; ток смещения – $I_b=30$ А.

План проведения экспериментов предполагал изменение значений варьируемых факторов: сначала был установлен базовый комплекс технологических условий, затем значения параметров последовательно уменьшались, за счет чего состояние процесса переходило от

наилучшего качественного уровня к наихудшему в рамках установленных границ варьирования. В качестве варьируемых факторов были назначены основные характеристические параметры, определяющие технологические условия процесса:

- 1) толщина слоя технологической корки покрытия на стенках камеры h_K ;
- 2) продолжительность пребывания вакуумной камеры под атмосферным давлением t_{AD} ;
- 3) продолжительность стадии высоковакуумной откачки камеры t_{BO} ;
- 4) чистота используемых газов q_G ;
- 5) чистота материалов распыляемых мишеней q_M ;
- 6) чистота осуществления процесса напыления ЧП (экспертная оценка);
- 7) колебание температуры воздуха в рабочем помещении ΔT ;
- 8) относительная влажность воздуха в рабочем помещении RH ;
- 9) запыленность воздуха в рабочем помещении z ;
- 10) продолжительность стадии ионной очистки изделий t_{IO} ;
- 11) производительность откачной системы q_{OC} .

Диапазон варьирования факторов был подобран с учетом наиболее характерных условий при реализации процессов напыления (Табл. 1).

Таблица 1. Уровни варьирования факторов эксперимента.

Наименование фактора	$h_K \cdot 10^{-6}$, м	t_{AD} , с	t_{BO} , с	q_G , %	q_M , %	ЧП	ΔT , °C	RH , %	$z \cdot 10^{-6}$, кг/м ³	t_{IO} , с	$q_{OC} \cdot 10^{-6}$, кг/с
Базовый уровень	50	600	2700	99,995	99	10	3	60	0,1	600	2
Величина варьирования	50	600	600	станд.	2	2	2	10	0,1	180	4
Уровень № 1	100	1200	2100	99,98	97	8	5	70	0,2	420	6
Уровень № 2	150	1800	1500	99,95	95	6	7	80	0,3	240	10

При проведении эксперимента в соответствии с уровнями задаваемых факторов был сформирован набор комплексов искусственно воссоздаваемых условий процесса ионно-плазменного нанесения покрытия. Выходным параметром (откликом) была величина рабочего давления газа в вакуумной камере (Рис. 2). Различные комплексы технологических условий были последовательно реализованы на экспериментально-лабораторной базе исследования. При этом методом подбора определялась величина рабочего давления в вакуумной камере, которая обеспечивала стабильное существование тлеющего разряда в газовой среде.



Рисунок 2. Схема экспериментального исследования.

Замеры величины давления производились с помощью датчика MKS979B. Измерения давления выполнялись многократно, за результат принималось среднее арифметическое значение ряда однократных измерений. Далее для каждого набора параметров осуществления процесса напыления величина рабочего давления газа была определена расчетным способом с использованием ранее разработанной математической модели (2), а также равенства

$$P_p^{расч} = \frac{P_p^{баз}}{K_{КП}}, \tag{3}$$

где $P_p^{расч}$ – расчетное значение давления газа в вакуумной камере, Па; $P_p^{баз}$ – значение давления газа в вакуумной камере при базовых условиях эксперимента, Па.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе эксперимента значения давления и соответствующие им результаты расчетов приведены в Табл. 2, а их графическое сопоставление представлено на Рис. 3.

Таблица 2. Теоретические и экспериментальные значения рабочего давления газа в вакуумной камере.

№ Опыта	$P_p^{расч}$, Па	$\overline{P_p^{экс}}$, Па	№ Опыта	$P_p^{расч}$, Па	$\overline{P_p^{экс}}$, Па
1	0,110	0,110	13	0,132	0,130
2	0,112	0,110	14	0,132	0,130
3	0,114	0,120	15	0,135	0,140
4	0,116	0,120	16	0,135	0,140
5	0,116	0,115	17	0,136	0,135
6	0,116	0,115	18	0,138	0,140
7	0,118	0,115	19	0,139	0,135
8	0,119	0,120	20	0,139	0,140
9	0,120	0,115	21	0,140	0,140
10	0,121	0,120	22	0,140	0,140
11	0,125	0,120	23	0,144	0,150
12	0,131	0,135			

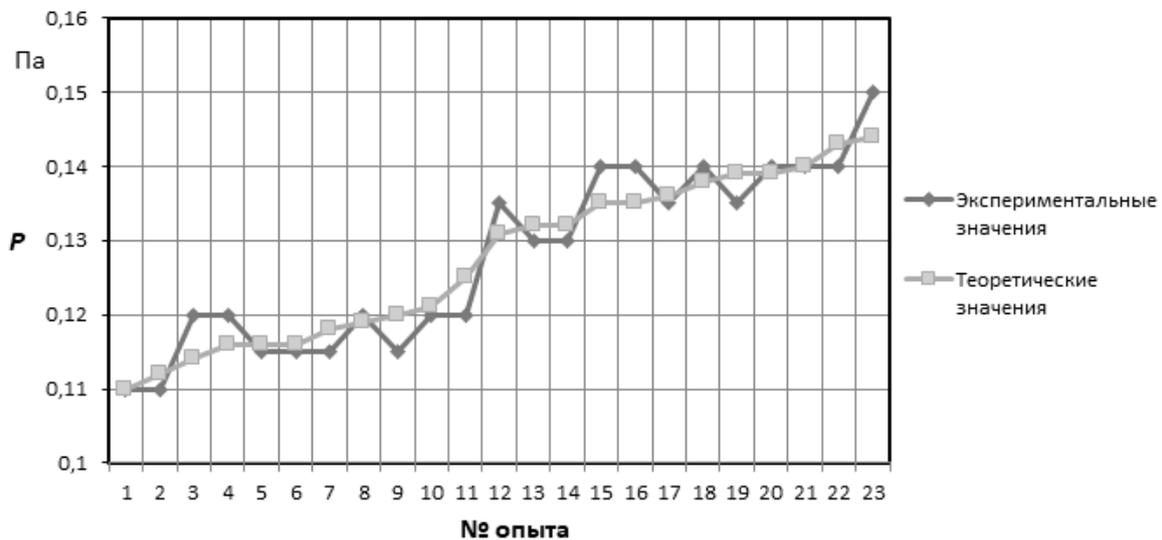


Рисунок 3. Теоретический и экспериментальный варианты динамики изменения рабочего давления.

Сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментальных данных осуществлялся с помощью методов математической статистики [7]. Оценка корреляции полученных значений выполнена путем расчета коэффициента парной корреляции Пирсона, значение которого составило 0,9188. Графическая интерпретация корреляции ряда прогнозных и фактических значений для величины рабочего давления (Рис. 4) показывает ее достаточность: аппроксимирующая облака точек – линия, ориентированная подобно биссектрисе координатного угла.

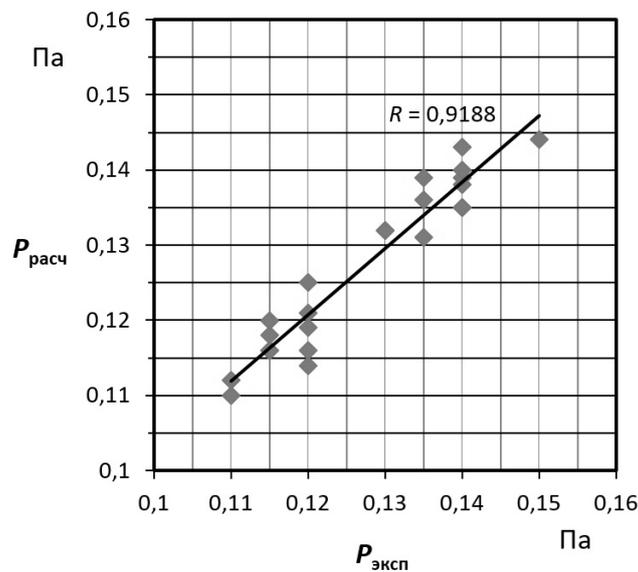


Рисунок 4. Корреляция теоретических и экспериментальных данных.

В качестве дополнительного статистического параметра определен коэффициент степени расхождения расчетных и экспериментальных данных (коэффициент Тейла), характеризующий среднеквадратическую погрешность прогноза. Его значение получилось равным 0,026, что является допустимым [7]. Таким образом, значения статистических критериев, полученные в ходе сравнительного анализа, указывают на достаточное соответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований, что подтверждает адекватность полученной модели и правомерность ее практического применения.

Заключение

1. Предложена математическая модель комплексного показателя качественного состава плазменной среды, как формализованное выражение взаимосвязи качественных характеристик процесса ионно-плазменного нанесения покрытия с величиной рабочего давления газа в вакуумной камере, обусловленной влиянием газовых примесей.

2. Проверка полученной модели для расчетного определения величины рабочего давления газа при различных условиях реализации ионно-плазменного нанесения покрытия показала возможность ее практического применения.

Литература:

1. Коряжкин А. А., Орлов А. А., Пичужкин С. А. Тенденции развития электрохимической и механической обработки лопаток компрессора в рамках реализации «умного» производства // Вестник РГАТА им. П. А. Соловьева. 2018. № 4. С. 90–96. [A. A. Koryazhkin, A. A. Orlov, S. A. Pichuzhkin. Trends in the development of electrochemical and mechanical processing of compressor blades in the framework of the implementation of "smart" production // Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva. 2018. No. 4. P. 90–96 (in Russian).]
2. Волков Д. И., Дружков С. С., Сергеев А. Е., Мезенцев М. О. Технологическая база типовых процессов нанесения упрочняющих 3D-нанокompозитных покрытий технологической оснастки для газотурбинной техники: база данных // Свидетельство 13-423. Заявитель ООО «Пико»; Правообладатель ООО «Пико»; заявл. 02.2013; опубли. 11.02.2013. 58 с.: ил. [D. I. Volkov, S. S. Druzhkov, A. E. Sergeev, M. O. Mezentsev, Technological base of typical processes for applying reinforcing 3D nanocomposite coatings for technological equipment for gas turbine technology: database // Certificate 13-423. Applicant LLC "Pico"; Copyright holder LLC "Pico"; application 02.2013; published 11.02.2013. 58 p.: ill. (in Russian).]

3. Локтев Д. А. Методы нанесения износостойких покрытий и оборудование для их реализации // Стружка. 2004. № 12. С. 6–11. [D. A. Loktev, Methods of applying wear-resistant coatings and equipment for their implementation (in Russian) // Struzhka. 2004. No. 12. P. 6–11.]
4. Азгальдов Г. Г., Азгальдова Л. А. Количественная оценка качества – Квалиметрия // М.: Издательство стандартов, 1971. 178 с. [G. G. Azgaldov, L. A. Azgaldova Quantitative assessment of quality – Qualimetry // Moscow: Izdatelstvo standartov, 1971. 178 p. (in Russian)]
5. Шишкин И. Ф., Станякин В. М. Квалиметрия и управление качеством: Учебник для вузов // М.: Издательство ВЗПИ, 1992. 210 с. [I. F. Shishkin, V. M. Stanyakin, Qualimetry and quality management: A textbook for universities // Moscow: Izdatelstvo VZPI, 1992. 210 p. (in Russian).]
6. Хвастунов Р. М., Ягелло О. И. Экспертные оценки в квалиметрии: Учебное пособие // М.: Издательство МГУ, 2002. 142 с. [R. M. Khvastunov, O. I. Jagiello, Expert assessments in qualimetry: A textbook // Moscow: Izdatelstvo MGU, 2002. 142 p. (in Russian).]
7. Нанивская В. Г., Андропова И. В. Теория экономического прогнозирования: Учебное пособие // Тюмень: ТюмГНГУ, 2000. 98 с. [V. G. Nativskaya, I. V. Andronova, The theory of economic forecasting: A textbook // Tyumen: TyumSPGU, 2000. 98 p. (in Russian).]

Об авторах:

КОРЯЖКИН Андрей Александрович, доктор технических наук, генеральный директор, АО «Новые инструментальные решения». +7(4855)292602, koryazhkin.andrey@zao-nir.com

ДРУЖКОВ Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист опытно-технологического бюро, АО «Новые инструментальные решения». +7(4855)292643, drugkov.s.s@rambler.ru.

БАРАНОВ Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационное машиностроение», ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева». +7(4855)222556, alexbar57@mail.ru.

ПРОСКУРЯКОВ Сергей Львович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инновационное машиностроение», ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева». +7(4855)222556, proskuryakov56@list.ru.

Metadata:

Title: A formalized approach to assessing the qualitative conditions of the ion-plasma hardening coating process.

Author 1: Andrey Aleksandrovich Koryazhkin, Doctor of Technical Sciences, General Director of JSC "New Instrumental Solutions".

Author 2: Stanislav Sergeevich Druzhkov, Candidate of Technical Sciences, Leading specialist of the Department of Experimental Technology, JSC "New Instrumental Solutions".

Author 3: Alexander Vladimirovich Baranov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department "Innovative Mechanical Engineering", Rybinsk State Aviation Technical University.

Author 4: Sergey Lvovich Proskuryakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Innovative Mechanical Engineering", Rybinsk State Aviation Technical University.

Abstract: A method is proposed for quantifying the qualitative state of ion-plasma coating processes by analyzing a set of technological conditions of the process using qualimetry methods. A mathematical model of the complex of qualitative characteristics of the plasma medium in the coating process is considered, which assumes a quantitative assessment of the main characteristic parameters, taking into account the relationship between the operating pressure of the gas in the vacuum chamber and the presence of gas impurities in it. The results of the approbation of the proposed method under various conditions for the implementation of ion-plasma coating are presented.

Keywords: reinforcing coatings, plasma, quality parameters, quantitative assessment, model.