

Секция 2: Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении

Список литературы

1. Шишковский И.В., Морозов Ю.Г., Фокеев С.В. и др. Лазерный синтез и сравнительное тестирование трехмерного пористого матрикса из титана и никелида титана как репозитария для стволовых клеток. Порошковая металлургия. 2011; 50(9/10): 42–57.
2. Астанин В.В., Каюмова Э.З., Никитин В.В., Фархетдинов А.И. Применение наводороженных титановых порошков для получения вакуумным спеканием пористых покрытий на хирургических имплантатах // Российский журнал биомеханики. 2015. №1. С. 116-122.
3. <https://www.dentaurum.de/eng/titanlegierung-rematitan-cl-23835.aspx>
4. <https://www.schuetz-dental.de/en/dentist/implants/>
5. <http://www.gs dental.ru/morita.php>
6. <https://www.ortronics.com/>
7. <https://dentaltechnic.info/index.php/implanty/zubnoe-protezyrovanye-na-ymlantatakh/2836-tyehnologiya-izgotovlyeniya-implanta>
8. Бутовский К., Лясников В. Влияние механической обработки поверхности имплантата и режима плазменного напыления на микрорельеф и остеоинтеграцию// Клиническая имплантология и стоматология. 1998. №4. С.36-41.
9. Вильяме Д.Ф., Роуф Р Имплантаты в хирургии. М.: Медицина, 1978. 552 с.
10. Вортингтон Ф., Ланг Б.Р, Лавелле В.Е. Оссеоинтеграция в стоматологии. Введение. Берлин: Квинтэс-сенция, 1994. 126 с.
11. Бабакова Е.В., Химич М.А., Сапрыкин А.А., Ибрагимов Е.А. Применение селективного лазерного сплавления для получения низкомолекулярного сплава системы титан - ниобий // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2016. №1. С. 117-131.
12. Влияние условий послойного лазерного спекания (плавления) на качество поверхности изделия [Электронный ресурс] / А. А. Сапрыкин [и др.] // Beam technologies & laser application : proceedings of the VIII International scientific and technical Conference : 20-24, September, 2015, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg : Publishing house SPbSPU, 2016. С. 315-321
13. Ibragimov E. A. , Saprykin A. A. , Babakova E. V. Influence of Laser Beam Machining Strategy at SLS Synthesis // Advanced Materials Research. – 2014 – Vol. 1040. – P. 764–767.
14. Saprykin A. A., Saprykina N. A., Arkhipova D. A. The effect of layer-by-layer laser sintering on the quality of copper powder sintered surface layer // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016) : 1-3 June 2016, Novosibirsk, Russia in 2 pt. Novosibirsk State Technical University. 2016. Pt. 1. P. 244-246.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ИПА

Ю. Г. Хусаинов¹, Д. Р. Лапицкий², Р. С. Есинов³

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

¹uldash990@mail.ru, ²LapitskyDR@gmail.com, ³esromles@mail.ru

Для повышения темпов внедрения и улучшения уровня контроля процесса ионно-плазменного азотирования разработана математическая модель влияния режимов азотирования на температуру подложки. Искомая зависимость была получена методами полного факторного эксперимента и “черного ящика”. Модель позволяет прогнозировать и определять температуру детали с точностью в 92%. Кроме того, обеспечивает расчет при работе в различных газовых средах вида N-H-Ag и N-Ag.

азотирование, ИПА; плазма; математическая модель азотирования; моделирование процессов ионно-плазменной обработки; температура подложки; прогнозирование температуры; газовая смесь; полный факторный эксперимент; ПФЭ.

Современные тенденции отечественного машиностроения провоцируют активную разработку новых материалов. В попытке найти компромисс для свойств твердости и обрабатываемости, применяют различные методы поверхностного упрочнения [1].

При выборе метода поверхностного упрочнения ионное азотирование является наиболее перспективным, поскольку позволяет упрочнять детали на самой последней стадии технологического процесса, после всех операций термической и механической обработки [2]. Кроме того, ионный процесс оценивается как высокопроизводительный, высокоэффективный, энергосберегающий и экологически чистый [3].

В процессе азотирования температура детали является важным параметром, требующим постоянного контроля и обычно составляет 450-600°C [4].

При перегреве детали возникают структурные изменения материала, приводящие к искажению технологических размеров [5]. В то же время, низкий температурный режим существенно снижает интенсивность диффузионного процесса, ограничивая производительность [5]. Кроме того, при азотировании сталей с температурой 450 °С позволит формировать высокопрочную фазу пересыщенного азотом твердого раствора в диффузионном слое [6].

Таким образом, главным условием качества и производительности ионного процесса является обработка детали при оптимальной температуре подложки.

Обеспечение оптимальной температуры осуществляется подбором рабочих режимов процесса (разность потенциалов подложки и камеры, вакуумное давление в камере, концентрация и химический состав элементов газовой смеси). Зачастую, подбор производится эмпирически и занимает колоссальный объем времени, что приводит к существенным экономическим потерям и снижению производительности.

Решение проблемы прогнозирования и контроля температуры может быть найдено путем математического моделирования процесса. Однако учет внутренних химико-физических взаимодействий увеличивает объем входных данных и усложняет обработку полученной модели.

Следовательно, рационально работать только с входными и выходными параметрами, абстрагируясь от внутренних взаимодействий.

В ранее написанных работах, посвященных моделированию ионного процесса [4,6,7], температура подложки являлась уже установленным параметром. А вопрос совокупного влияния внешних факторов (рабочих режимов азотирования) на температуру подложки прежде не изучался.

Таким образом, целью данной работы является создание математической модели, позволяющей, определять и прогнозировать температуру подложки, исходя из входных параметров процесса.

Методика проведения исследований

Из выше написанного следует, что на температуру подложки в процессе ионно-плазменного азотирования влияет целый ряд фактор. С целью исключить из математической модели внутренние физико-химические взаимодействия необходимо использовать метод “черного ящика”. Структурная схема метода представлена на рисунке 1, где x_i - входные факторы, y_i – значение функции отклика, w_i - случайные возмущающие воздействия.

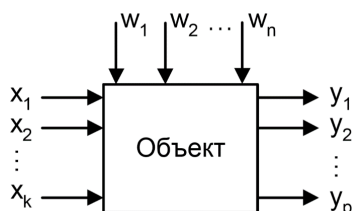


Рис. 1. Структура метода “черного ящика”.

Таким образом, используя только входные факторы, удастся уменьшить время на обработку модели и повысить ее точность, поскольку исключаются погрешности математического описания физико-химических явлений.

Входными факторами, влияющими на температуры подложки при ионно-плазменном азотировании, являются: разность потенциалов подложки и камеры, вакуумное давление в камере, концентрация и химический состав элементов газовой смеси [5]. Следовательно, математическая зависимость температуры подложки от входных факторов, представляет собой сложную многофакторную функцию.

При таком количестве независимых входных факторов целесообразно применить метод полного факторного эксперимента (ПФЭ) [8]. Данный метод, основанный на множественной регрессии, позволяет не только получить аналитическое уравнение, но и сократить количество необходимых экспериментов.

Таким образом, совместное применение методов ПФЭ и “черного ящика”, обеспечивает получение функции влияния внешних факторов ионного процесса на температуру подложки. Общий вид функции представлен формулой 1:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{j=k}^{i=f} \sum_{i=1} b_j c_i + \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

где y – функция отклика, x_i – входные факторы, K – число факторов, n – число экспериментов по методу ПФЭ, s_i – i -ый элемент множества сочетаний входных факторов, w_i – случайные ошибки наблюдения.

Согласно методу ПФЭ такой вид модели представляет собой результат разложения полинома функции отклика в ряд Фурье. Следовательно, каждый фактор ионного процесса x_i должен иметь общую область определения. Пределы значений параметров ионного процесса должны быть установлены до проведения эксперимента. Кроме того, количественное описание элементов газовой смеси приводит к возникновению недопустимой для метода линейной зависимости между факторами уравнения.

Для исключения линейной связи концентраций элементов газа, произведена замена количественных параметров водорода и азота на безразмерный коэффициент k показывающий их отношение.

$$k = \frac{\mu H_2}{\mu N_2} \quad (2)$$

Данный подход позволяет не только устранить линейную зависимость входных факторов, но и учесть различные химические составы газовой смеси: N-H-Ar и N-Ar.

Учет водородного азотирования является положительным свойством математической модели, в связи с интенсификацией процесса при его использовании [9]

Таким образом, входными факторами для модели температуры подложки при ионно-плазменном азотировании являются:

- Разность потенциалов, приложенная к подложке и корпусу установки (U, B).
- Вакуумное давление в камере ($P, Па$).
- Концентрация аргона ($\mu Ar, \%$)
- Безразмерный коэффициент k

Границы определения факторов были назначены благодаря статистическим данным лаборатории ионно-плазменной обработки ИАТМ.

Краевые точки областей определения факторов представлены в таблице 1.

Согласно методу ПФЭ комбинацию входных факторов можно представить, как точку в многомерном пространстве, характеризующую состояние системы. [10]. Функция влияния входных факторов ионного процесса на температуру подложки определится в 4-х мерном пространстве, графическое отображение которого, после кодирования факторов, будет иметь форму гиперкуба, представленного на рисунке 2, где точке P соответствует максимальное значение функции отклика, точке A – минимальное.

Таблица 1

Краевые точки областей определения входных факторов

Фактор	Наименьшее значение	Наибольшее значение
U, B	400	450
$P, Па$	250	350
$\mu(Ar), \%$	30	80
k	0	1

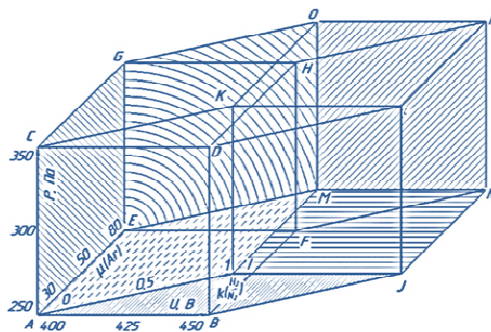


Рис. 2. Гиперкуб пространства определения функции отклика

Кодирование факторов производится согласно методу ПФЭ по формуле 3:

$$Z_i = \frac{x_i - x_{cp}}{\Delta x} \quad (3)$$

где x_{cp} - среднее значение фактора, Δx – дисперсия фактора.

Данное преобразование осуществляется ввиду интегрируемости ряда Фурье на интервале [-1;1] и позволяет привести входные факторы к общей области определения.

Доказательства адекватности полученного уравнения влияния параметров азотирования на температуру подложки осуществляется по F-критерию Фишера [8]:

$$F = \frac{S_{ab}^2}{S_b^2} \quad (4)$$

где F - критерий Фишера ($F = 19$ при доверительной вероятности β (чаще всего равной 0,95) [9]); S_{2ab} – дисперсия адекватности, S_b – величина ошибки коэффициентов b_i .

ход эксперимента

Согласно вышеописанной методике, была проведена серия экспериментов для получения требуемой выборки данных.

Эксперименты проводились на модернизированной установке ЭЛУ-5, предназначенной для проведения термической и химико-термической обработки в вакууме. Замеры температуры осуществлялись пирометром “Термикс”.

Схема установки представлена на рисунке 3, где 1 - камера ЭЛУ-5, 2 - крышка камеры ЭЛУ-5, 3 - катод, 4 - анод, 5 - образец, 6 - источник питания, 7 - пирометр, 8 - штатив.

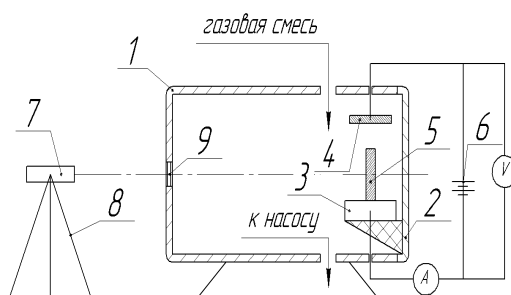


Рис. 3. Схема установки

Полученные результаты эксперимента представлены в таблице 2, где значение режимов ионного процесса приведены в кодированном виде, согласно методике ПФЭ по формуле 3.

Таблица 2

Результаты эксперимента

№	U, В	P, Па	$k \left(\frac{\mu H_2}{\mu N_2} \right)$	$\mu(\text{Ar}), \%$	T, °C
1	-1	-1	-1	-1	432
2	-1	-1	1	1	571
3	-1	-1	-1	1	472
4	-1	-1	1	-1	442
5	1	-1	-1	-1	609
6	1	-1	1	1	794
7	1	-1	-1	1	754
8	1	-1	1	-1	627
9	-1	1	-1	-1	442
10	-1	1	1	1	690
11	-1	1	-1	1	536
12	-1	1	1	-1	486

№	U, В	P, Па	$k \left(\frac{\mu H_2}{\mu N_2} \right)$	$\mu(\text{Ar}), \%$	T, °C
13	1	1	-1	-1	706
14	1	1	1	1	950
15	1	1	-1	1	889
16	1	1	1	-1	730
17	0	0	0	0	627

Полученные значения функции отклика (T, °C) составят исследуемую выборку, качество которой определится, согласно критерию Кохрена:

$$G \leq G_T \quad (5)$$

где GT - критерий Кохрена (GT=0.3346 для 2 степеней свободы), G - отношение максимальной дисперсии, к сумме всех дисперсий выборки.

Под качеством выборки мы будем понимать совокупное значение точности и вероятности, при котором полученные значения функции отклика достоверно описывают реальные величины нагрева подложки.

Таким образом, утверждение о качестве выборки позволит доказать следующее неравенство, составленное по формуле 5:

$$0,29749 \leq 0,3346$$

Возможность повторения опыта подтверждается дисперсией всего эксперимента (дисперсией параметров оптимизации S2(y)), которую получают в результате усреднения дисперсий всех итераций. При 2 итерациях:

$$S^2(\sigma) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2 = 44,6$$

где (Si2) - сумма всех дисперсий эксперимента.

Таким образом совокупность значений температуры подложки в процессе ионно-плазменного азотирования, полученную в результате эксперимента можно признать качественной и доказуемой выборкой, которая пригодна для составления математической модели в заданной области определения.

обработка экспериментальных данных

По полученной выборке эксперимента значения коэффициентов входных факторов bi формулы 1 определяются согласно следующей формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{N} \quad (6)$$

Значимость кодированных коэффициентов регрессии bi уравнения 1 определяется условием Стьюдента:

$$\frac{|b_i|}{S_b} \geq t_T \quad (7)$$

где tT-число Стьюдента (1,746 для 16 степеней свободы и уровня значимости $\alpha=0.05$)

Полученные значения коэффициентов bi, по формуле 6 и прошедшие проверку согласно формуле 7 приведены в таблице 3.

Кроме того, из общего уравнения можно исключить значение нулевого коэффициента b0, поскольку функция отклика определяет только максимальную стабильную температуру в процессе ионного упрочнения, при заданных постоянных входных факторах.

Таким образом, искомая математическая модель величины нагрева подложки в процессе ионно-плазменного азотирования имеет следующий вид:

$$T^{\circ}C = 124,25 \cdot U + 45,5 \cdot P + 28,125 \cdot k + 73,875 \mu(Ar) + 15,875UP + 15,5U \mu(Ar) + 16,125(k \mu(Ar))$$

Таблица 3

Значения кодированных коэффициентов b_i

коэффициент	значение	Условие по формуле5
$b_1(U, B)$	124,25	15,759285 > 1,746
$b_2(P, Па)$	45,5	5,771006 > 1,746
$b_3(k)$	28,125	3,567243 > 1,746
$b_4(\mu(Ar))$	73,875	9,369958 > 1,746
$b_{12}(UP)$	15,875	2,013510 > 1,746
$b_{13}(U\mu(Ar))$	15,5	1,965947 > 1,746
$b_{34}(k\mu(Ar))$	16,125	2,045219 > 1,746

Данное уравнение позволяет описать изменение функции отклика относительно её среднего значения в ранее указанном пространстве её значений.

Адекватность полученной модели подтверждается согласно формуле 4 следующим неравенством:

$$F = 19 \geq \frac{S^2_{ab}}{S^2_b} = 4,5$$

Таким образом, в результате работы была получена математическая модель позволяющая, определять и прогнозировать температуру подложки, исходя из входных параметров процесса ионно-плазменного азотирования.

Модель позволяет спрогнозировать температуру подложки с точностью в 92%. Данную точность можно легко повысить проведением параллельной серии опытов с последующей корректировкой факторных коэффициентов b_i . Результат сравнения эмпирических и расчётных данных представлен в таблице 4

Таблица 4

Результат сравнения эмпирических и расчетных данных.

-	$T, ^{\circ}C$	$T_{рас}, ^{\circ}C$	отклонения в %
1	432	402,75	6,770833
2	571	575,75	0,831874
3	472	487,25	3,230932
4	442	426,75	3,450226
5	609	588,5	3,366174
6	794	823,5	3,715365
7	754	735	2,519894
8	627	612,5	2,3126
9	442	462	4,524887
10	690	635	7,971014
11	536	546,5	1,958955
12	486	486	0
13	706	711,25	0,743626
14	950	946,25	0,394737
15	889	857,75	3,515186
16	730	735,25	0,719178
сумма	10130	10032	46,02548
17 Среднее	633,125	627	2,876593

Основываясь на коэффициентах значимости b_i , полученной модели стало возможным сделать следующие наблюдения:

- Наибольшее влияние на величину нагрева детали оказывает значение приложенной разности потенциалов. Это обусловлено ростом энергии ионов в процессе бомбардировки подложки.
- Так же на значение температуры сильное влияние оказывают количественные и качественные характеристики газовой смеси. При этом можно отметить, что чистое количество азота (N₂) оказывает меньшее влияние на рост функции отклика, чем количество водорода (H₂), хотя согласно физическому смыслу процесса нагрева влияние должно быть обратным в счет атомарной массы. Предположительно чистое количество азота уменьшается из-за его перехода в нитриды железа еще в газовой смеси, что может стать подтверждением теории Ю.М. Лахтина [5]. Однако также причиной может стать отмеченная И. М. Пастухом возможность образования водородом более тяжелых соединений с примесными газами и его специфическое поведение в плазменном потоке [5] Данный вопрос нуждается в дальнейшем более детальном исследовании.

Данная статья описывает процесс создания математической модели, позволяющей, определять и прогнозировать температуру подложки, исходя из входных параметров процесса ионного азотирования.

Модель обеспечивает точность определения температуры до 92 % с возможностью её повышения за счет дополнительных серий эксперимента.

Входе работы с моделью необходимым является перевод факторов в ортогональные базисы, определяемые в пространстве значений функции отклика согласно уравнению 3. Выход факторов за пределы пространства приводит к нарушению метода построения модели и, следовательно, к ошибочному результату. Гиперкуб функции отклика может быть расширен за счет повторных расчётов и экспериментов.

Математическая модель отличается комплексным учетом всех входных факторов ионно-плазменного процесса и простотой обработки данных.

Дальнейшие исследования предполагается продолжить в направлении моделирования процесса ионного азотирования с целью увеличения уровня контроля и уменьшения временных потерь.

Список литературы

1. Вишняков М.А, Вашуков Ю.А. Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения М.: Самара, СГАУ 2005.96 с. [M.A. Vishnyakov, Yu.A. Vashukov Design and Technological Methods for Ensuring the Quality of Mechanical Engineering Products M : Samara, SGAU 2005.96 p].
2. Берлин Е. В, Коваль Н. Н, Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. – 464с. ISBN: 978-5-94836-328-8. [Berlin E. V, Koval N. N., Seidman LA Plasma chemical-thermal treatment of the surface of steel parts. M.: Technosphere, 2012. - 464с. ISBN: 978-5-94836-328-8.]
3. Герасимов С. А., Крукович М. Г., Бадерко Е. А., Ключков Н. П. Моделирование процесса ионного азотирования. // научное издание МГТУ им.Баумана Наука и Образование [S. A. Gerasimov, M. G. Krukovich, E. A. Baderko, N. P. Klochkov, "Simulation of ion nitriding," (in Russian), in Scientific pereodical of thee Bauman MSTU, vol. 19, 10.7463/0113.0501016, 2013.]
4. Andres Bernal. Investigation on nitriding with emphasis in Plasma nitriding process, curren technology and equipment: Review Article//materials processing Royal institute of technology – kth Stockholm -100 44 Sweden. Vol.38.
5. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. М.: Научное издание НИЦ ХФТИ, 2006. 364с. [Pastukh, IM The theory and practice of non-hydrogen nitriding in a glow discharge. M .: Scientific edition of the NSC KIPT, 2006. 364p.]
6. Спевак Л. Ф, Нефедова О. А, Макаров А. В, Самойлов Г. В. Математическое моделирование плазменного азотирования аустенитной нержавеющей стали // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, 2015/DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.068-079 [L. F. Spevak, O. A. Nefedova, A. V. Makarov, G. V. Samoilova "Mathematical modelling of plasma nitriding of austenitic stainless steel" (in Russian), in Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, 2015/DOI: 10.17804/2410-9908.2015.6.068-079].
7. Будилов В. В, Рамазанов К. Н, Хусаинов Ю. Г, Золотов И. В. Моделирование процесса локально-ионного азотирования с эффектом полого катода на примере детали «зубчатого колеса» // Вестник УГАТУ. [S.I.], v. 19, n. 2, p. 3-8, июнь 2015. ISSN 1992-6502. [V.V. Budilov, K. N. Ramazanov, Yu. G. Husainov, I. V. Zolotov. "Simulation of the local nitriding process with the effect of

- a hollow cathode using the example of the gear” (in Russian), in Vestnik UGATU., vol. 19, no. 2 (68), pp. 3-8, 2015. ISSN 2225-2789]
8. Реброва И.А. Планирование эксперимента М.: СибАДИ Омск, 2010. 107с. [Rebrova I.A. Planning the experiment M.: Si-BADI Omsk, 2010. 107с]
 9. Хусаинов Ю. Г, Рамазанов К.Н, Есипов Р.С, Исяндавлетова Г.Б. Влияние водорода на процесс ионного азотирования аустенитной стали 12X18H10T // Вестник УГАТУ. [S.I.], v. 21, n. 2, p. 24-29, июнь 2017. ISSN 1992-6502.. [Yu. G. Khusainov, K. N. Ramazanov, R. S. Esipov, G. B. Isyandavletova. “Effect of hydrogen on the process of ion nitriding of austenitic steel 12Kh18N10T.” (in Russian), in Vestnik UGATU., vol. 21, no. 2 (76), pp. 24-29, 2017. ISSN 2225-2789]
 10. Умнов А.Е. Методы математического моделирования. М.: МФТИ, 2012. 295 с [A.E. Umnov Methods of mathematical modeling. M.: Moscow MIPT, 2012. 295p.]

СВС-МЕХАНОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ДВС

*А. В. Собачкин, к.т.н., с.н.с., М. В. Логинова, к.т.н., с.н.с., А. С. Мигина, магистрант
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
656038, г. Барнаул, пр. Ленина 46, тел. 8 (3852) 29-08-15
E-mail: anicpt@rambler.ru*

Работа посвящена исследованию экологически безвредных технологий получения наноструктурных материалов методами механохимии с проведением реакции высокотемпературного синтеза в металлической матрице для использования полученного порошкового материала в процессах газодетонационного нанесения покрытий, которые могут заменить гальваническое хромирование.

The work is devoted to the study of environmentally friendly technologies for the production of nanostructured materials by mechanochemistry methods with the reaction of high-temperature synthesis in a metal matrix for the use of the obtained powder material in gas-detonation coating processes that can replace galvanic chromium plating.

В машиностроении важную роль играют вопросы, связанные с поверхностью изделия. Низкий ресурс работы элементов различных конструкций связан, прежде всего, с процессами изнашивания поверхностных слоев. Например, в результате износа деталей цилиндрической группы автомобиля снижается мощность двигателя, возрастает расход горюче-смазочных материалов, а в отработанных газах значительно увеличивается содержание вредных элементов [1].

Повысить общий моторесурс двигателя позволяют теплозащитные покрытия на деталях цилиндрической группы ДВС [2]. Однако применяемые в настоящее время электролитические способы создания покрытий приводят к большому потреблению воды, ее загрязнению токсичными элементами в процессе нанесения покрытия и, как следствие, к необходимости проведения очищения сточных вод [3]. В этой связи перспективным выглядит применение сухих методов нанесения покрытий – газотермических, вакуумных и др. Из существующих методов газотермического нанесения покрытий газодетонационный обладает рядом преимуществ, и может быть применен для упрочнения и восстановления деталей, работающих в условиях больших контактных нагрузок, ударного воздействия, эрозионного и абразивного износа [4].

Перспективным способом создания материалов для нанесения покрытий является проведение реакций синтеза частиц упрочняющей фазы в матрицах [5–7]. Достоинства этой технологии состоят, во-первых, в преодолении проблемы введения ультрадисперсных и наноразмерных частиц упрочняющей фазы в матрицу, во-вторых, в возможности управления в определенных пределах реакцией синтеза этой фазы, а в-третьих, в получении однородной микроструктуры продукта реакции в целом [8].

Используя особенности реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в механоактивированных системах, возможен синтез интерметаллидов, нитридов, карбидов, боридов и других тугоплавких соединений и многофазных систем на их основе [9–14]. Наиболее широкое применение в различных отраслях машиностроения нашли порошки монокарбида титана. В связи с этим в работе исследовали условия проведения синтеза в механоактивированных системах Ti–C–Ni для детонационного напыления покрытий на прецизионные детали машиностроения, которые могут заменить гальваническое хромирование [15].

Для приготовления исходных порошковых смесей использовали порошки титана марки ПМТ и углерода марки ПМ-15. В качестве металлической связки (матрицы) применялся наплавочный по-