

УДК 629.7.023.2

Н.И. Артеменко¹, В.Н. Симонов²**ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ВЕЛИЧИНЫ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ОДНОСЛОЙНЫХ
ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-5-5

Предложена инженерная методика прогнозирования величины модуля упругости в ионно-плазменных конденсированных покрытиях, полученных методом плазмохимического синтеза. Рассмотрен процесс плазмохимического синтеза нитрида титана, обозначены основные закономерности процесса при степени превращения бинарного соединения менее 1. Установлено, что при избытке реакционного газа в вакуумной камере ионно-плазменной установки степень превращения вещества остается равной 1. Разработана и описана методика измерения модуля упругости материала покрытия методом изгиба свободного конца консольной балки. Измерены модули упругости материала покрытия, полученного методом плазмохимического синтеза, при недостатке реакционного газа в камере ионно-плазменной установки. Установлено, что модуль упругости материала покрытия пропорционален степени его превращения. Предложена формула для вычисления модуля упругости материала покрытия, полученного методом плазмохимического синтеза со степенью превращения менее 1, с использованием справочных величин модулей упругости веществ и соединений, находящихся в покрытии. Установлено, что достоверность прогнозирования величины модуля упругости материала покрытия составляет более 90%.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионностойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ», 17.4. «Многослойные защитные покрытия и плазмохимическое оборудование для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих прекурсоры элементов синтезируемого покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: ионно-плазменные конденсированные покрытия, модуль упругости, степень превращения, реакционный газ, плазмохимический синтез.

The paper presents an engineering method for predicting the value of the modulus of elasticity in the condensed ion-plasma coatings obtained by plasma-chemical synthesis. The process of plasma-chemical synthesis of titanium nitride is considered, the basic characteristics of the process at a degree of binary compound conversion less than 1 is designated. It is found that the degree of conversion is equal to 1 in the excess of reaction gas in vacuum chamber of the ion-plasma unit. The method of measuring the elastic modulus of the material coating by bending the free end of the cantilever beam is developed and described. The elastic modulus of the coating material obtained by plasma synthesis with a deficiency of the reaction gas in chamber of the ion plasma unit is measured. It is found that the elastic modulus of the coating material is proportional to the degree of conversion. A formula is suggested for calculating the modulus of elasticity of the coating obtained by plasma synthesis with conversion less than 1 using reference values of the elastic modulus of substances and compounds presented in the coating. It is found that the accuracy of forecasting value of the elastic modulus of the coating material is more than 90%.

Work is executed within the frames of the complex scientific direction 17.3. «Multilayer heat resistant and heat-protective coatings, nanostructural strengthening erosive and corrosion resistant, wear-resistant, antifretting coatings for protection of hot section details and the GTD and GTU compressor», 17.4. «Multilayer protecting coatings and the plasma chemical equipment for protective and strengthening coatings deposition from the gas streams of plasma containing elements precursors of the synthesized coating» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: condensed ion-plasma coatings, elastic modulus, degree of conversion, the reaction gas, plasma chemical synthesis.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University] E-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

В современном авиадвигателестроении все большее внимание уделяется проблеме продления ресурса деталей, увеличению срока службы, повышению надежности и долговечности. Одним из актуальных вопросов является увеличение ресурса деталей авиационной техники при уменьшении их стоимости. С этой целью используются различные защитные и упрочняющие покрытия. Они позволяют продлить ресурс деталей авиационной техники [2–5].

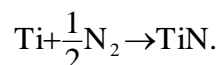
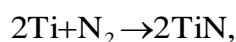
При защите деталей, подверженных различным видам изнашивания (износ при трении, фреттинг-износ, эрозионное изнашивание), используют упрочняющие покрытия. Существуют различные методы нанесения упрочняющих покрытий: атмосферно-плазменный, детонационный, ионно-плазменный, различные виды наплавки (газопламенная, лазерная) и др. Особое место занимает ионно-плазменный метод нанесения покрытий. В ВИАМ разработан оригинальный метод получения ионно-плазменных покрытий – вакуумно-плазменная технология высоких энергий (ВПТВЭ). Полученные покрытия отличаются высокой адгезией, хорошим качеством поверхности, высокими эксплуатационными характеристиками [6–15].

При нанесении ионно-плазменных покрытий материал катода испаряется с помощью вакуумной дуги и конденсируется на поверхности деталей, образуя плотное, практически беспористое, покрытие. Зачастую при определении требуемых эксплуатационных характеристик необходимо оперировать физическими величинами, табличное значение которых отсутствует. В конденсированных ионно-плазменных покрытиях такой величиной может стать модуль упругости. Для бинарных соединений такие величины известны, но при плазмохимическом синтезе получаемый материал может отличаться по стехиометрическому составу от эталона. В данной работе рассматривается вопрос установления зависимости модуля упругости от состава конденсированного ионно-плазменного упрочняющего покрытия на основе нитрида титана [16, 17].

Материалы и методы

Процесс плазмохимического синтеза

При ионно-плазменном нанесении покрытий механизм плазмохимического синтеза реализуется на поверхности деталей. Ионы металлов, осаждаясь на поверхность детали, присоединяют к себе атомы реакционного газа, находящиеся в атмосфере вакуумной камеры, по стехиометрическим реакциям:



Очевидно, что для получения одной молекулы нитрида титана необходимо не менее одного атома азота, причем излишки азота вступать в реакцию с титаном не могут, они останутся в камере установки и будут удалены из камеры вакуумным насосом. При недостатке реакционного газа в камере часть атомов титана на поверхности останутся непрореагировавшими и покрытие будет состоять из двух самостоятельных фаз: TiN и Ti.

Удельный привес массы образца зависит от фазового состава материала покрытия, а так как молекулы нитрида титана и атомы титана распределены по матрице покрытия статистически, то содержание молекул нитрида титана и атомов титана в материале покрытия поддается расчету.

Для наглядности процесса плазмохимического синтеза провели эксперимент: на 12 образцов из титанового сплава марки ВТ8 нанесли покрытие из титана марки ВТ1-0 при различном давлении реакционного газа. Образцы взвешивали до и после нанесения, определяли величину удельного привеса Δm . На первый из двенадцати образцов нанесли покрытие при отсутствии реакционного газа, т. е. в естественном вакууме установки МАП-3; удельный привес составил $\Delta m_{\text{Ti}} = \Delta m_{P_0} = 47,6 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Для расчета необходимо ввести величину – удельный относительный привес, которая вычисляется по формуле:

$$\Delta M = \frac{\Delta m_{P_0} - \Delta m_P}{\Delta m_{P_0} - \Delta m_{P_{\text{max}}}}, \quad (1)$$

где Δm_P – удельный привес образца при давлении реакционного газа в камере установки P , $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $\Delta m_{P_{\text{max}}}$ – удельный привес образца при максимальном давлении реакционного газа в камере установки, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Удельный относительный привес образцов

Условный номер образца	Давление азота в камере, Па	Удельный привес Δm_P , $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Удельный относительный привес ΔM
1	0,002 (0)	31,735	0
2	0,01	32,118	0,039
3	0,025	33,928	0,221
4	0,04	36,433	0,473
5	0,055	38,711	0,702
6	0,07	40,272	0,859
7	0,085	41,117	0,944
8	0,1	41,495	0,982
9	0,115	41,624	0,995
10	0,13	41,674	1
11	0,145	41,654	0,998
12	0,16	41,674	1

Из зависимости на рис. 1 очевидно, что при давлении реакционного газа $>0,1$ Па удельный относительный привес массы образцов значительно меняться не будет, что свидетельствует о завершенности реакции синтеза нитрида титана (т. е. степень превращения практически равна 1), учитывая погрешность гравиметрических измерений. Далее в работе будут приниматься во внимание первые 10 образцов, так как данные с

последних двух образцов неинформативны. Толщину покрытий на образцах определяли с помощью металлографических исследований, данные о которых представлены в табл. 2 (время осаждения составляло 3 ч).

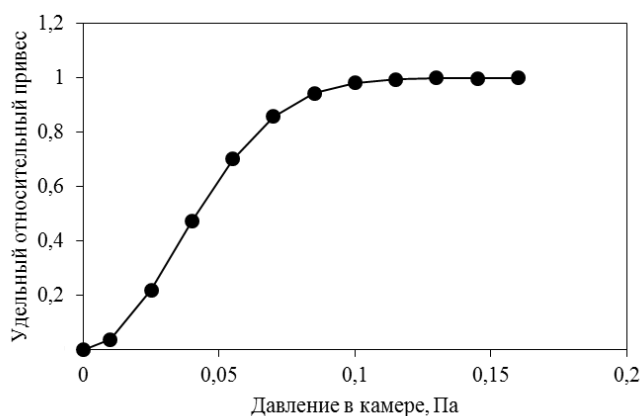


Рис. 1. Удельный относительный привес образцов в зависимости от давления реакционного газа в камере

Таблица 2

Толщина покрытий на образцах		
Условный номер образца	Давление азота в камере, Па	Толщина покрытия, мкм
1	0,002 (0)	21,3
2	0,01	20,9
3	0,025	21,1
4	0,04	21,2
5	0,055	20,6
6	0,07	20,7
7	0,085	20,6
8	0,1	20,9
9	0,115	21,5
10	0,13	21,1

Методика испытаний

Для определения модуля упругости применяли метод измерения перемещения свободного конца консольной балки в виде образца (рис. 2). При нагружении свободного конца консольно закрепленной балки образуется перемещение δ , которое измеряется бесконтактным триангуляционным датчиком РИФТЕК РФ603 с точностью измерения до 0,0001 мм. Схема изгиба образца под нагрузкой P представлена на рис. 3.

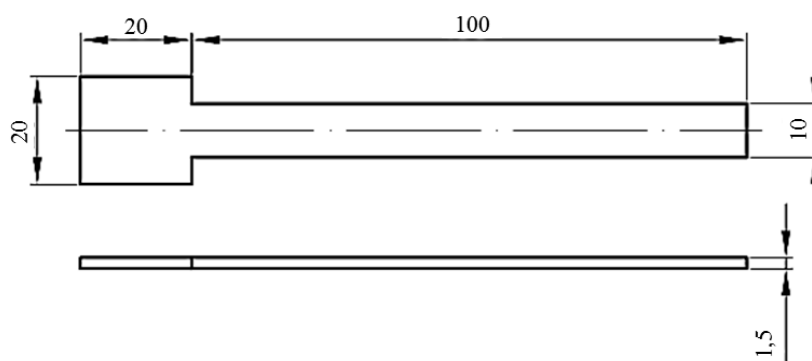


Рис. 2. Эскиз образца в виде консольной балки



Рис. 3. Схема изгиба консольной балки под нагрузкой

Для определения механических характеристик материала балки применяется известная формула [18]:

$$E_m = \frac{Pl^3}{3\delta J_m}, \quad (2)$$

где E_m – модуль упругости материала образца, МПа; l – длина образца от заделки до свободного конца, мм; δ – перемещение свободного конца образца, мм; J_m – момент инерции поперечного сечения образца, мм⁴.

В общем виде при наличии покрытия на образце перемещение свободного конца консольной балки рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{Pl^3}{3(E_m J_m + E_n J_n)}, \quad (3)$$

где E_n – модуль упругости материала покрытия, МПа; J_n – момент инерции участка поперечного сечения образца с покрытием, мм⁴.

Поперечное сечение образца с покрытием представлено на рис. 4.

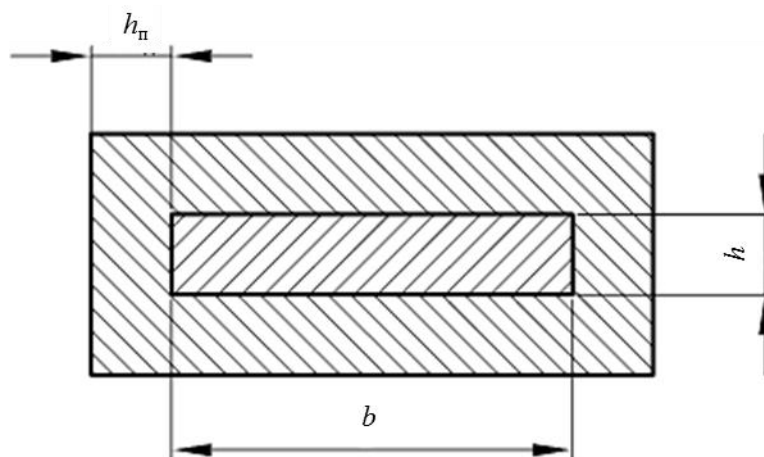


Рис. 4. Поперечное сечение образца с покрытием:
 h – толщина образца; b – ширина образца; h_n – толщина покрытия

Таким образом, моменты инерции сечения образца рассчитывают по формулам [18]:

$$J_m = \frac{bh^3}{12}, \quad (4)$$

$$J_n = \frac{(b+2h_n)(h+2h_n)^3 - bh^3}{12}, \quad (5)$$

где b – ширина образца; h – толщина образца; h_n – толщина покрытия.

Нагружение образца происходит при подвешивании на свободный конец груза массой 1 кг, при этом сила P , действующая на свободный конец образца, составляет 9,81 Н.

Модуль упругости покрытия вычисляют согласно выражению, полученному из формулы (3):

$$E_{\text{п}} = \frac{Pl^3}{3\delta J_{\text{п}}} - \frac{E_{\text{м}} J_{\text{м}}}{J_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Результаты

Измерение модуля упругости материала основы

Для измерения модуля упругости материала основы (сплава ВТ8), изготовлен образец без покрытия со следующими исходными данными для вычисления: ширина $b=10$ мм; толщина $h=1,51$ мм; нагрузка $P=9,81$ Н; длина образца от заделки до свободного конца $l=100$ мм; измеренный прогиб образца $\delta=9,557$ мм.

По формуле (4) рассчитали момент инерции сечения:

$$J_{\text{м}} = \frac{10 \cdot 1,51^3}{12} = 2,869 \text{ мм}^4.$$

По формуле (2) рассчитали модуль упругости материала образца:

$$E_{\text{м}} = \frac{9,81 \cdot 100^3}{3 \cdot 9,557 \cdot 2,869} = 119251 \text{ МПа}.$$

Данный результат довольно точно согласуется со справочными данными: 120000 МПа [18].

Измерение модуля упругости материала покрытия

Для измерения модуля упругости материала покрытия взяли 10 образцов с покрытием, полученным при различном давлении реакционного газа, и, следовательно, с различными значениями удельного относительного привеса. Толщина образцов указана в табл. 3.

Таблица 3

Толщина образцов

Условный номер образца	Удельный относительный привес ΔM	Толщина образцов h , мм
1	0	1,51
2	0,039	1,52
3	0,221	1,49
4	0,473	1,5
5	0,702	1,48
6	0,859	1,52
7	0,944	1,51
8	0,982	1,5
9	0,995	1,49
10	1	1,51

Моменты инерции сечения материалов образца и покрытия рассчитывали по формулам (4) и (5), данные о которых приведены в табл. 4.

Получены прогибы свободного конца образца, а также значения модуля упругости покрытия, рассчитанные по формуле (6), которые представлены в табл. 5.

Таблица 4

Моменты инерции сечения материалов образца и покрытия

Условный номер образца	Удельный относительный привес ΔM	Момент инерции J_m сечения материала образца, мм ⁴	Момент инерции J_n сечения материала покрытия, мм ⁴
1	0	2,869	0,263
2	0,039	2,926	0,261
3	0,221	2,757	0,254
4	0,473	2,812	0,258
5	0,702	2,701	0,244
6	0,859	2,926	0,259
7	0,944	2,869	0,254
8	0,982	2,812	0,254
9	0,995	2,757	0,259
10	1	2,869	0,260

Таблица 5

Прогибы свободного конца образцов и модули упругости покрытий

Условный номер образца	Удельный относительный привес ΔM	Прогиб свободного конца образца, мм	Модуль упругости материала покрытия, МПа
1	0	8,809	110500,3
2	0,039	8,602	119183,1
3	0,221	8,977	140137,0
4	0,473	8,567	179284,2
5	0,702	8,804	201881,4
6	0,859	8,012	228523,0
7	0,944	8,060	250111,0
8	0,982	8,178	253275,6
9	0,995	8,295	253296,2
10	1	8,011	253534,9

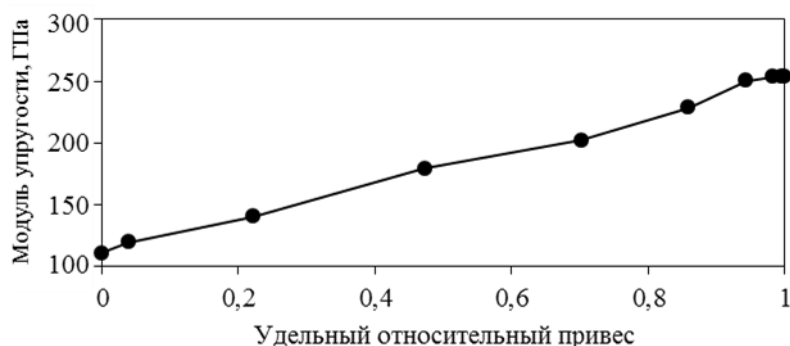


Рис. 5. Зависимость модуля упругости покрытия от удельного относительного привеса

На рис. 5 дана зависимость модуля упругости покрытия от значений относительного удельного привеса. Видно, что зависимость модуля упругости материала покрытия от удельного относительного привеса носит линейный характер. Следует также отметить, что значения модуля упругости чистого титана $E_n=110500,3$ МПа и нитрида титана $E_n=253534,9$ МПа практически совпадают со справочными значениями: 112000 и 256000 МПа соответственно [19, 20].

Линейная аппроксимация значений модуля упругости материала покрытия

В связи с близостью экспериментальных и справочных значений модулей упругости титана и нитрида титана, линейную аппроксимацию значений модуля упругости

возможно связать со справочными (теоретическими) значениями модулей упругости E_{Ti} и E_{TiN} . Из данных рис. 6 видно, что погрешность при вычислении составит не более 10%. Таким образом, выражение для модуля упругости имеет вид:

$$E = E_{Ti} + (E_{TiN} - E_{Ti}) \Delta M = E_{Ti} (1 - \Delta M) + E_{TiN} \Delta M. \quad (7)$$

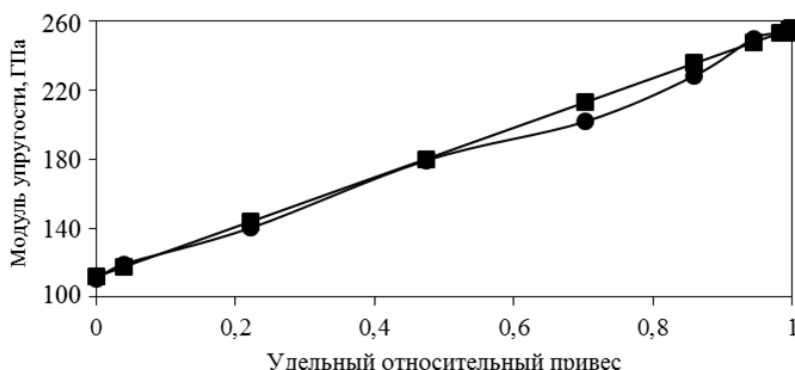


Рис. 6. Экспериментальный (●) и теоретический (■) модуль упругости материала покрытия

В общем случае в ионно-плазменных покрытиях для бинарных соединений, полученных плазмохимическим методом, справедливо следующее выражение:

$$E = E_{Me} (1 - \Delta M) + E_{Me-R} \Delta M, \quad (8)$$

где R – неметаллический компонент в реакционном газе; E_{Me} – справочное значение модуля упругости металла испаряемого катода; E_{Me-R} – справочное значение модуля упругости бинарного соединения на основе металла испаряемого катода.

Очевидно, что величина удельного относительного привеса (ΔM) является ничем иным как степенью превращения вещества. При $\Delta M=0$ испаряемый материал катода (титан) не присоединяет ни одного атома азота, при $\Delta M=1$ все атомы титана присоединяют к себе по одному атому азота. Следовательно, при $0 \leq \Delta M \leq 1$ в качестве материала покрытия выступает механическая смесь атомов титана и молекул нитрида титана в соотношении $(1 - \Delta M)$ и ΔM соответственно.

Применение

Формула (8) справедлива для расчета модуля упругости материала ионно-плазменного покрытия, полученного плазмохимическим методом, при недостатке реакционного газа в камере ионно-плазменной установки. Зачастую при проектировании конструкций покрытий или прогнозировании их свойств требуется значение модуля упругости материала покрытия. При определении модуля упругости покрытия методом перемещения свободного конца консольной балки требуется дополнительное нетривиальное оборудование, тогда как при расчете по предлагаемой формуле (8) из дополнительного оборудования требуются только весы.

При расчете величины удельного относительного привеса образца с покрытием, нанесенным с недостатком реакционного газа в камере, требуется нанесение покрытия из материала катода при отсутствии реакционного газа и нанесение покрытия с избыточным количеством реакционного газа в камере.

Для демонстрации применения предлагаемой формулы (8) выполнили нанесение покрытия из титана в атмосфере ацетилена (C_2H_2). Выполнили нанесение покрытия с давлением реакционного газа: 0; 0,05 и 0,4 Па. Результаты гравиметрических измерений представлены в табл. 6.

Таблица 6

Удельный относительный привес образцов

Условный номер образца	Давление ацетилена в камере, Па	Удельный привес Δm_p , г/(м ² ·ч)	Удельный относительный привес ΔM
1	0,002 (0)	31,735	0
2	0,05	32,802	0,352
3	0,4	34,767	1

Модули упругости титана и карбида титана равны [19, 20]:

$$E_{Ti}=112000 \text{ МПа}, E_{TiC}=460000 \text{ МПа}.$$

По формуле (8) модуль упругости покрытия, нанесенного по режиму 2:

$$E_{теор}=112000(1-0,352)+460000 \cdot 0,352=234496 \text{ МПа}.$$

Для подтверждения расчета проведены механические испытания со следующими исходными данными: ширина образца $b=10$ мм; толщина образца $h=1,49$ мм; нагрузка $P=9,81$ Н; толщина покрытия $h_n=20,7$ мкм; длина образца от заделки до свободного конца $l=100$ мм; модуль упругости материала образца $E_{ВТ8}=119251$ МПа.

По формуле (4) рассчитывается момент инерции сечения материала образца:

$$J_m = \frac{10 \cdot 1,49^3}{12} = 2,757 \text{ мм}^4.$$

По формуле (5) рассчитали момент инерции сечения материала покрытия:

$$J_n = \frac{(10+2 \cdot 0,0207)(1,49+2 \cdot 0,0207)^3}{12} - \frac{10 \cdot 1,49^3}{12} = 0,249 \text{ мм}^4.$$

Измеренный прогиб образца составил $\delta=8,538$ мм.

По формуле (6) рассчитали модуль упругости материала покрытия:

$$E_n = \frac{9,81 \cdot 100^3}{3 \cdot 8,538 \cdot 0,249} - \frac{119251 \cdot 2,757}{0,249} = 217745,7 \text{ МПа}.$$

Относительная погрешность измерения составила:

$$\varepsilon = \frac{|E_{теор} - E_n|}{E_{теор}} \cdot 100\% = \frac{|234496 - 217745,7|}{234496} \cdot 100\% = 7,14\%.$$

Таким образом, формула (8) довольно точно, с погрешностью $<10\%$, дает возможность для вычисления модуля упругости материала покрытия, полученного методом плазмохимического синтеза в ионно-плазменной установке при степени превращения бинарного соединения менее 1.

Обсуждение и заключения

В результате проведенного исследования установлено, что величина модуля упругости бинарного соединения, полученного плазмохимическим синтезом, поддается расчету, и зависимость величины модуля упругости от удельного относительного привеса носит линейный характер. Такие расчеты могут быть полезны, например, при оценке внутренних напряжений в конденсированных ионно-плазменных покрытиях, расчет которых проводят по формулам:

$$\sigma = \frac{E_n}{1-\nu_n} (\alpha_n - \alpha_m) \Delta T \quad [21], \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{(T_m - T_n)}{(T_m - 500)} \cdot \frac{0,0135 \Delta T}{(T_n - 500 - 0,0135 \Delta T)} \cdot \frac{E_n}{1 + \frac{E_n \cdot h_n}{E_m \cdot h_m}} \quad [22], \quad (10)$$

где E_n – модуль упругости материала покрытия, МПа; E_m – модуль упругости материала основы, МПа; T_m – температура плавления материала основы, К; T_n – температура плавления мате-

риала покрытия, K ; ΔT – разница между температурой нанесения покрытия и температурой измерения внутренних напряжений, K ; α_n – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала покрытия, K^{-1} ; α_m – ТКЛР материала основы, K^{-1} ; ν_n – коэффициент Пуассона материала покрытия; h_n – толщина покрытия, мкм; h_m – толщина основы, мкм.

К достоинствам данной методики следует также отнести сравнительную быстроту получения величины модуля упругости с погрешностью не более 10% без использования сложного или нетривиального оборудования и без специальной подготовки образцов.

В результате работы:

- рассмотрен процесс плазмохимического синтеза нитрида титана, обозначены основные закономерности процесса при степени превращения бинарного соединения менее 1. Установлено, что при избытке реакционного газа в вакуумной камере ионно-плазменной установки степень превращения вещества остается равной 1;
- разработана и описана методика измерения модуля упругости материала покрытия методом изгиба свободного конца консольной балки;
- измерен модуль упругости материала покрытия, полученного методом плазмохимического синтеза, при недостатке реакционного газа в камере ионно-плазменной установки. Установлено, что модуль упругости материала покрытия пропорционален степени его превращения;
- предложена формула для вычисления модуля упругости материала покрытия, полученного методом плазмохимического синтеза со степенью превращения менее 1, с использованием справочных величин модулей упругости веществ и соединений, находящихся в покрытии. Установлено, что достоверность прогнозирования величины модуля упругости материала покрытия составляет >90%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 36–52.
3. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 57–60.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 60–70.
5. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 71–81.
6. Мубояджян С.А. Особенности осаждения потока многокомпонентной плазмы вакуумно-дугового разряда, содержащего микрокапли испаряемого материала // *Металлы*. 2008. №2. С. 20–34.
7. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 12–15.
8. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. Нанослойные упрочняющие покрытия для защиты стальных и титановых лопаток компрессора ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 3–8.
9. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ // *МиТОМ*. 2011. №1. С. 34–40.

10. Гаямов А.М. Жаростойкое покрытие с композиционным барьерным слоем для защиты внешней поверхности рабочих лопаток ГТД из ренийсодержащих жаропрочных никелевых сплавов // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. матер. XI Рос. ежегод. конф. молодых научных сотрудников и аспирантов. М.: ИМЕТ РАН, 2012. С. 473–475.
11. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.
12. Способ обработки поверхности металлического изделия: пат. 2368701 Рос. Федерация; опубл. 27.09.09.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
14. Способ нанесения комбинированного жаростойкого покрытия: пат. 2402633 Рос. Федерация; 31.03.09.
15. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением // МиТОМ. 2008. №6. С. 31–36.
16. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №2. С. 26–37.
17. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №3. С. 3–11.
18. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
19. Самсонов Г.В. Свойства элементов: справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. Ч. 1. Физические свойства. 600 с.
20. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения: справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
21. Bielawski M. Residual stress control in TiN/Si coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 200. P. 3987–3995.
22. Артеменко Н.И., Мубояджян С.А. Инженерная методика оценки величины и характера внутренних напряжений в однослойных упрочняющих конденсированных покрытиях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.02.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-1-25-35.