

УДК 004.65

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ

В. С. Жернаков¹, Т. Н. Мардимасова², А. М. Смыслов³, А. И. Дубин⁴, В. Р. Акбашев⁵

¹ zhvs@mail.rb.ru, ² toma_mard@mail.ru, ⁴ a5.550@rambler.ru, ⁵ vadj92@mail.ru

^{1, 2, 3, 5} ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

⁴ ПАО-ОДК «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО)

Поступила в редакцию 11.09.2019

Аннотация. Разработана схема моделирования конструкции с наличием вакуумного ионно-плазменного покрытия. Выполнен численный расчет технологических напряжений с применением метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS v.18.2. Получено напряженно-деформированное состояние в слоях покрытия системы $(Ti-TiN)_n$. Исследовано влияние толщины подслоев нитрида титана TiN и чистого титана Ti на характер распределения технологических осевых напряжений в однослойных и многослойных конструкциях. Произведена оценка влияния количества слоев в многослойных конструкциях.

Ключевые слова: ионно-плазменное покрытие, напыление, моделирование покрытия, нитрид титана TiN , технологические напряжения, ANSYS, титановый сплав, ВТ6, метод конечных элементов.

Использование титановых сплавов в изделиях ГТД требует обеспечения высоких эксплуатационных свойств, таких, как длительная прочность, усталостная долговечность, высокая трещиностойкость. Одним из перспективных методов повышения ресурса высоконагруженных деталей ГТД является модификация поверхности пучками заряженных частиц – электронных, ионных, плазменных, а также их комбинаций [1, 2]. При этом на поверхность детали может быть нанесено специальное защитное покрытие, обеспечивающее сопротивление износу, коррозии и эрозии. Прежде всего, это покрытия на основе металлоподобных и неметаллических соединений (карбидов, нитридов, и др.). В большинстве исследований установлено, что наиболее благоприятным сочетанием физико-химических и механических свойств обладают покрытия на основе нитридов титана [3].

Ионная имплантация представляет собой процесс внедрения легирующего элемента в поверхностный слой детали в ре-

зультате бомбардировки ее ускоренными ионами. Ионная имплантация приводит к увеличению концентрации дефектов (межузельных атомов, дислокаций и др.) в поверхностном слое облучаемого материала. В результате обработанная поверхность подвергается дислокационному и дисперсионному упрочнению; также упрочняющие воздействия оказывают возникающие в имплантированном материале микронапряжения сжатия [2, 3].

Перспективность ионно-плазменного нанесения определяется совокупностью следующих качеств.

1. Осаждение пленок металлов и диэлектриков, сплавов и композиционных соединений происходит без изменения стехиометрического состава, если температуры распыляемой мишени и подложки остаются достаточно низкими.

2. Поскольку процесс распыления не предусматривает расплавление материала, можно получать пленки тугоплавких материалов, а также неплавящихся материалов.

3. Регулировкой состава энергетических ионов и газовой среды во время нанесения можно изменять свойства получаемых пленок, контролировать и управлять их стехиометрией.

4. Подложку и растущую пленку можно очищать до начала процесса, в процессе и после окончания процесса нанесения ионной бомбардировкой.

5. Пленки имеют лучшую адгезию, чем пленки, полученные другими методами в силу высокой энергии распыленных частиц, поступающих на подложку. Высокая энергия обеспечивает получение плотных пленок.

В данной работе представлены математическое моделирование процесса получения конструкции с вакуумным ионно-плазменным покрытием толщиной t (рис. 1), а также результаты исследования напряженно-деформированного состояния полученной конструкции в зависимости от геометрических характеристик покрытия.

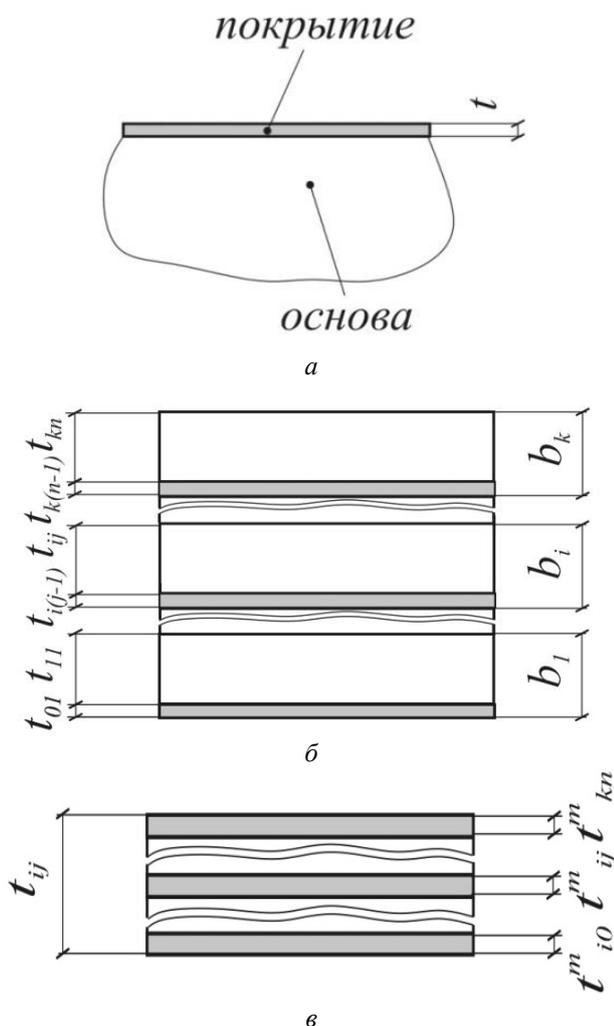


Рис. 1. Общий вид конструкции с покрытием

На рис. 1, б представлена схема архитектуры вакуумно-плазменного покрытия. В последнее время стали широко использоваться многослойные покрытия из периодически расположенных тонких чередующихся различных материалов, такие как Ti, Ti₂N и TiN. Характерный размер толщины не должен превышать 100 нм, количество же слоев может достигать несколько десятков. Многослойные покрытия обладают высокими эксплуатационными свойствами и повышенной прочностью.

Толщина покрытия t формируется из определенного количества композиций толщиной b_i :

$$t = \sum_{i=1}^k b_i. \quad (1)$$

Каждая наносимая композиция толщиной b_i технологически получается из j -го количества подслоев материалов, таких как VT1-0, TiN, VN и др.

$$b_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, \quad (2)$$

где t_{ij} – толщина подслоя одного материала.

Вследствие того, что технологически невозможно получить большую толщину одного подслоя покрытия, то его наносят в несколько этапов по толщине t^m_{ij} :

$$t_{ij} = \sum_{m=1}^s t^m_{ij}. \quad (3)$$

В данной работе рассмотрена конструкция из материала VT6 с покрытием, которое состояло из функционального подслоя TiN и подслоя чистого титана VT1-0. Напыляемый подслоем VT1-0 перед нанесением покрытия дополнительно упрочняет и активирует поверхность, создает плавный переход физико-химического состояния покрытия в матрицу, устраняет границу раздела покрытие – основа. В результате на поверхности основного материала конструкции отсутствуют ненормированные остаточные напряжения растяжения, а также повышается твердость поверхностного слоя, что способствует повышению усталостной прочности. В случае когда подслоем напыляют между слоями покрытия, его химический

состав должен быть максимально приближен к химическому составу слоя покрытия, на который он наносится.

Расчетные характеристики применяемых материалов – модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , коэффициент линейного расширения α , предел текучести σ_T представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	ν	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$	$\sigma_T, \text{МПа}$
основа ВТ6	20	83	0,32	8,6	850
	100			8,7	
	200			9	
	400			10	
подслой ВТ1-0	20	112	0,31	8,9	450
	100				
	200				
	400				
подслой нитрид титана TiN	20	256	0,25	9,3	360
	100				
	200				
	400				

Расчеты выполнены на деталях с количеством напыляемых слоев k ($k=1..5$). Каждая i -я композиция состоит из двух подслоев: чистый титан ВТ1-0 и нитрид титана TiN. Толщина чистого титана t_{0i} варьировалась от 0,2 до 0,4 мкм, а толщина нитрида титана t_{1i} менялась от 1,5 до 2,5 мкм.

Численное решение задачи моделирования технологического процесса напыления выполнено с помощью метода конечных элементов, реализованного в двухмерной постановке с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS v.18.2 [4].

В качестве примера, на рис. 2 представлены картины распределения напряжений σ_x в однослойных конструкциях ($k=1$) с одинаковой толщиной чистого титана ВТ1-0 $t_{01}=0,4$ мкм, но разными толщинами нитрида титана TiN t_{11} равными 2,5 мкм (кривая 1) и 1,5 мкм (кривая 2). Видно, что в нанесенном слое t_k возникают сжимающие напряжения σ_x , наибольшие из которых находятся в подслое нитрида титана TiN , а в основном материале ВТ6 формируются растягивающие напряжения.

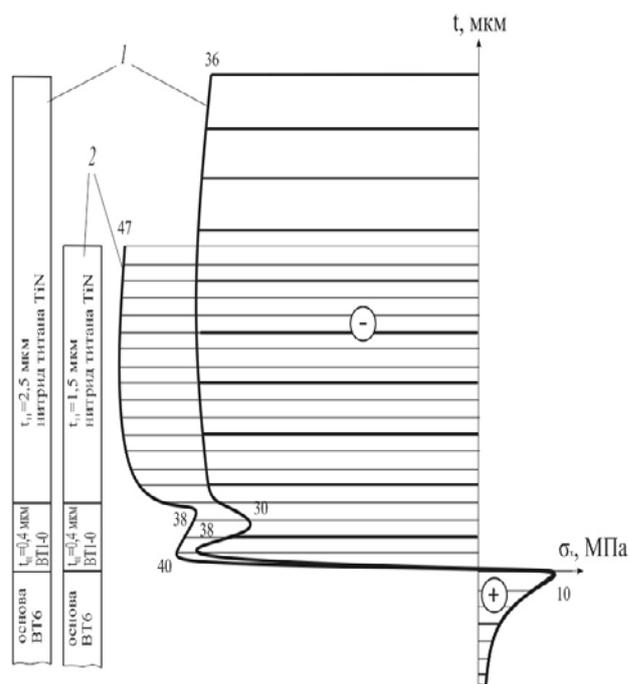


Рис. 2. Эпюры распределения осевых напряжений σ_x в однослойных конструкциях с толщиной $t_{01}=0,4$ мкм: кривая 1 – $t_{11}=2,5$ мкм; кривая 2 – $t_{11}=1,5$ мкм

Установлено, что характер распределения напряжений σ_x в подслое нитрида титана не меняется от величины t_{11} , однако отличается по величине: с увеличением толщины t_{11} с 1,5 мкм до 2,5 мкм происходит снижение осевых напряжений σ_x на поверхности конструкции с 47 до 36 МПа, что составляет 17 %.

В подслое чистого титана ВТ1-0 наблюдается снижение осевых напряжений σ_x с возникновением так называемой «лунки» напряжений на эпюре σ_x , что негативно влияет на равномерное распределение напряжений в конструкции. Так в конструкции с толщиной $t_{11}=2,5$ мкм происходит снижение напряжений на 21 % (с 38 до 30 МПа). В то время как в конструкции

с толщиной $t_{11}=1,5$ мкм также наблюдается снижение напряжений в подложке ВТ1-0, но на меньшую величину – с 40 до 38 МПа, что равно 5 %.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что величина неравномерности напряжений в подслое ВТ1-0 зависит от отношения толщины t_{11} функционального слоя TiN и толщины t_{01} – чем больше величина отношения, тем сильнее неравномерность сжимающих напряжений σ_x .

Выявлено, что изменение толщины подслоя функционального слоя t_{11} не влияет на растягивающие напряжения, возникающие в основном материале ВТ6, и в обеих конструкциях достигают значения 10 МПа. Стоит отметить, что формирование напряжений растяжения на границе оказывает неблагоприятное влияние на трещино- и износостойкость деталей.

На рис. 3 представлена зависимость максимальных сжимающих напряжений σ_x , возникающих на поверхности нанесенных слоев от отношения толщин t_{11}/t_{01} в однослойных конструкциях при постоянной толщине подложки t_{01} .

Определили, что с увеличением отношения t_{11}/t_{01} во всех конструкциях происходит снижение сжимающих напряжений σ_x . Так в конструкции с толщиной подложки $t_{01}=0,4$ мкм происходит снижение сжимающих остаточных напряжений σ_x на 17 % (от 47 МПа при величине отношения $t_{11}/t_{01}=3,75$ до 36 МПа при $t_{11}/t_{01} = 6,25$ (кривая 1)). При толщине подслоя чистого титана $t_{01}=0,3$ мкм наблюдается снижение напряжений σ_x на 15 % (от 47 МПа при отношении $t_{11}/t_{01}=5$ до 40 МПа при $t_{11}/t_{01} = 8,3$ (кривая 2)). В конструкции с толщиной $t_{01}=0,2$ мкм наблюдается спад напряжений на 5 % (кривая 3).

Таким образом, можно отметить, что чем больше отношение толщины t_{11} нитрида титана TiN к толщине t_{01} чистого титана ВТ1-0, тем ниже величина спада остаточных поверхностных напряжений σ_x . Однако, несмотря на то, что наименее интенсивный спад наблюдается при толщине $t_{01}=0,2$ мкм, максимальные сжимающие напряжения возникают именно в данной конструкции и

достигают значения 89 МПа при отношении $t_{11}/t_{01}=7,5$.

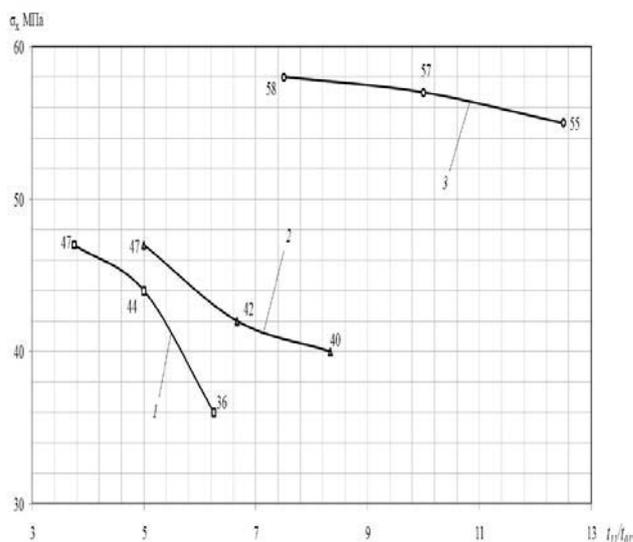


Рис. 3. Зависимость максимальных сжимающих напряжений σ_x на поверхности конструкции от толщины слоев t_{11}/t_{01} : кривая 1 – $t_{01}=0,4$ мкм; кривая 2 – $t_{01}=0,3$ мкм; кривая 3 – $t_{01}=0,2$ мкм

В подавляющем большинстве разрушение деталей авиационных двигателей начинается с поверхности либо в тонком приповерхностном слое, поэтому чрезвычайно важно и экономически выгодно разработать технологии получения защитных и упрочняющих покрытий, свойства которых по прочности и пластичности превосходят традиционные моно- и поликристаллические структуры. Современные тенденции развития тонкопленочных композиционных материалов ведут к снижению толщины слоев и к увеличению их количества [7].

Выполнено исследование влияния количества нанесенных слоев k в конструкции на распределение остаточных напряжений σ_x . Количество нанесенных слоев варьировалось в диапазоне $k=(2..5)$. Дальнейшее увеличение количества слоев покрытия приводило к росту величины растягивающих поверхностных напряжений σ_x .

В качестве примера, на рис. 4 представлен характер распределения технологических осевых напряжений σ_x по глубине конструкций с количеством слоев $k=3$. Толщина слоя t_i составляла 2,7 мкм (толщина подложки ВТ1-0 принималась $t_{0i}=0,2$ мкм, толщина подслоя TiN – $t_{1i}=2,5$ мкм).

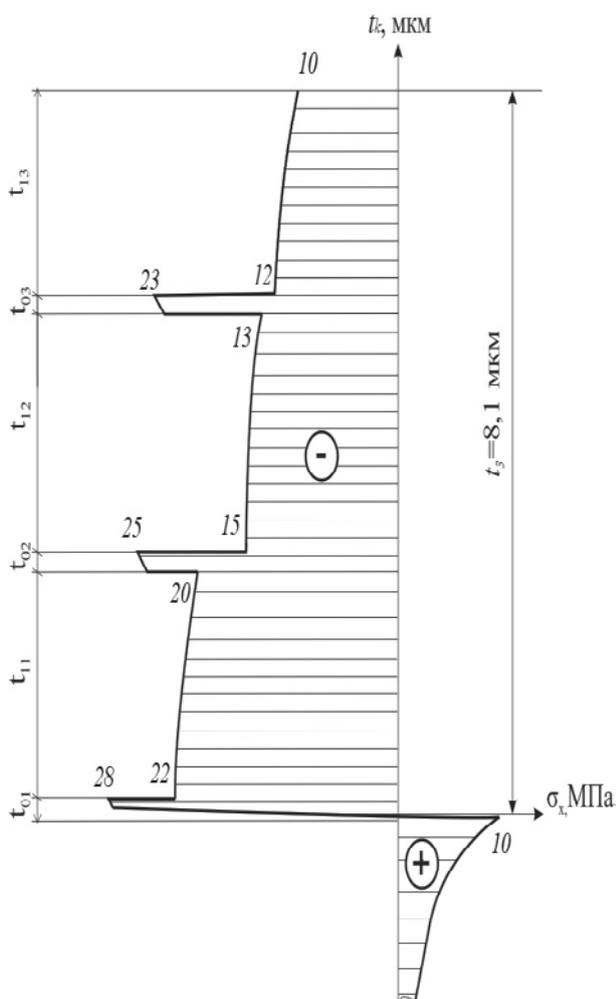


Рис. 4. Распределение технологических осевых напряжений σ_x в конструкции с 3 слоями

На рис. 4 изображена эпюра распределения напряжений σ_x в конструкции с тремя нанесенными слоями и общей толщиной слоев $t_3=8,1$ мкм. Видно, что значение осевых поверхностных напряжений сжатия σ_x составляет 10 МПа. Стоит отметить, что в многослойной конструкции наибольшие сжимающие напряжения σ_x возникают не в подслое нитрида титана TiN, в отличие от нанесения одного слоя, а в первом слое чистого титана VT1-0 и достигает значения 28 МПа; величина сжимающих напряжений в первом слое нитрида титана равна 22 МПа. Чем дальше находится слой от основного материала конструкции, тем больше разница сжимающих напряжений σ_x внутри слоя, так в первом слое отличие в 1,27 раза меньше, а в третьем слое – в 1,9 раза.

Наблюдается снижение остаточных напряжений в функциональных слоях нитрида титана TiN с 22 МПа до 10 МПа, что составляет 55 %.

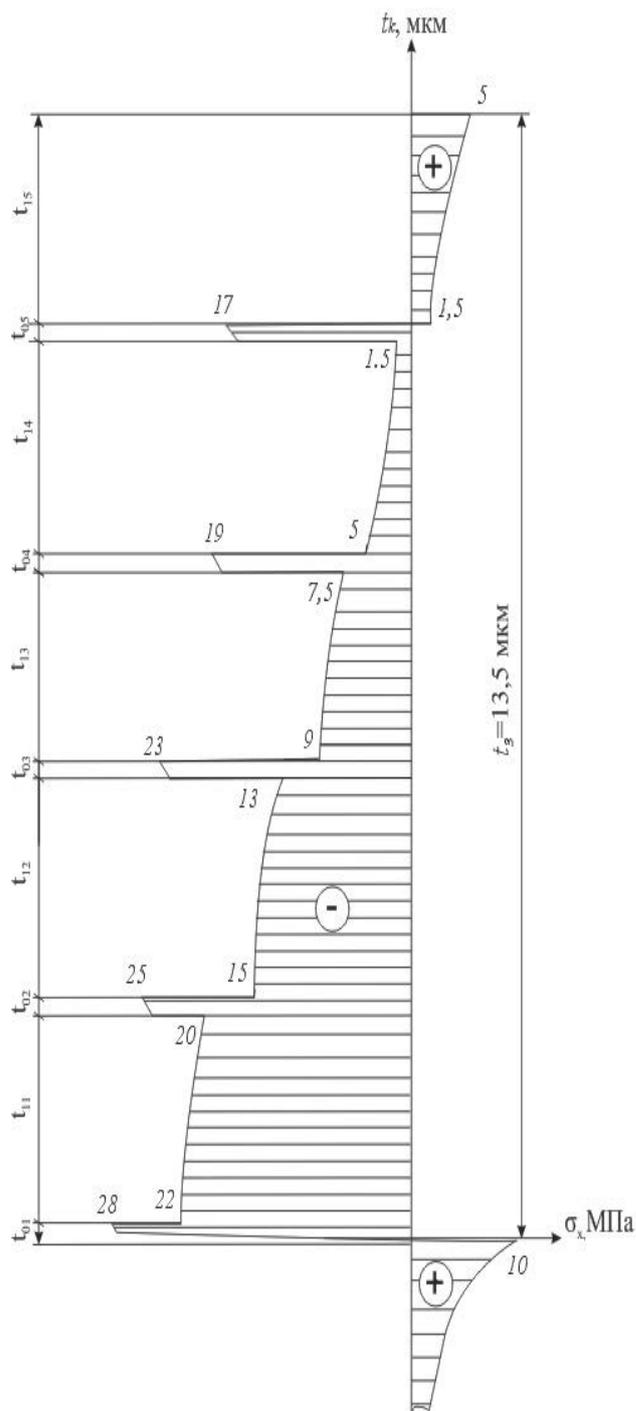


Рис. 5. Распределение технологических осевых напряжений σ_x в конструкции с 5 слоями

В пятислойной конструкции (рис. 5) общая толщина слоев составила $t_k=13,5$ мкм. Толщина слоя t_i составляла 2,7 мкм (толщина подложки VT1-0 принималась $t_{0i}=0,2$ мкм, толщина подслоя TiN – $t_{1i}=2,5$ мкм) аналогично модели с тремя слоями.

Основным отличием картины распределения остаточных напряжений σ_x в пятислойной конструкции является то, что на поверхности напряжения становятся рас-

тягивающими и равны 5 МПа. Разница между напряжениями в одном слое увеличивается с 1,27 на первом слое, до 13,3 на пятом слое.

Таким образом, важно отметить, что увеличение количества слоев в композиции приводит к снижению уровня сжимающих поверхностных напряжений σ_x , а также приводит к смене знака поверхностных напряжений, что неблагоприятно влияет на эксплуатационные свойства конструкций.

При этом в основном материале ВТ6 при нанесении нескольких слоев так же, как и в однослойных конструкциях возникают растягивающие напряжения σ_x и достигают значения 10 МПа.

Зависимость величины поверхностных технологических напряжений σ_x от количества нанесенных слоев k представлена на рис. 6.

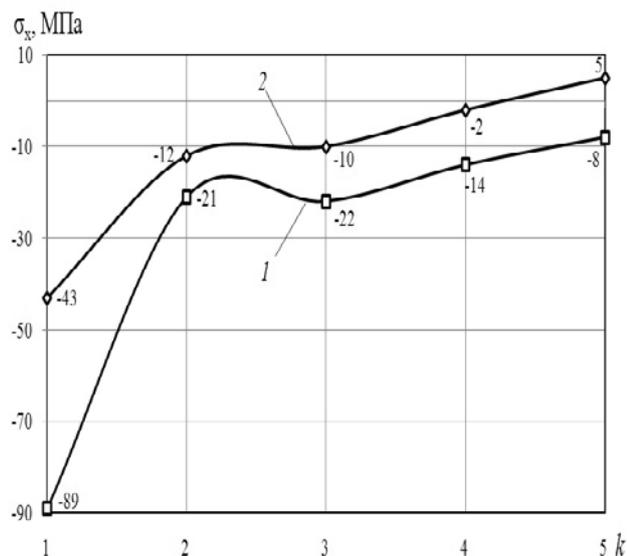


Рис. 6. Влияние поверхностных напряжений σ_x от количества нанесенных слоев k при $t_{0i}=0,2$ мкм: кривая 1 – $t_{1i} = 1,5$ мкм; кривая 2 – $t_{1i} = 2,5$ мкм

Исследованы композиции с нанесенными слоями $k=1..5$ при толщинах $t_{0i}=0,2$ мкм, $t_{1i}=1,5$ мкм (кривая 1) и $t_{0i}=0,2$ мкм, $t_{1i}=2,5$ мкм (кривая 2). В обоих случаях с увеличением количества слоев k наблюдается снижение поверхностных сжимающих напряжений σ_x . В модели с толщиной нитрида титана $t_{1i}=1,5$ мкм (кривая 1) происходит снижение величины сжимающих напряжений на 91 % (с 89 МПа до 8 МПа). В модели с $t_{1i}=2,5$ мкм (кривая 2) при нанесении 5 слоев формируются растягивающие

поверхностные напряжения, а общее снижение напряжений составляет 90 %. Стоит отметить, что значительное уменьшение напряжения происходит при нанесении уже двух слоев вместо одного – на 76 % и на 72 % при $t_{1i}=1,5$ мкм и $t_{1i}=2,5$ мкм соответственно. Нанесение двух или трех слоев покрытия практически не оказывает влияния на величину поверхностных напряжений σ_x . Однако, сказывается влияние отношения толщин подслоя чистого титана ВТ1-0 и подслоя нитрида титана TiN. Так, распределение остаточных напряжений σ_x более благоприятно, когда минимальное отношение толщин – в пятислойной конструкции с t_{1i} равной 1,5 мкм поверхностные напряжения равны –8 МПа, а при t_{1i} равной 2,5 мкм поверхностные напряжения равны 5 МПа, а наличие напряжений растяжения негативно влияет на эксплуатационные характеристики конструкций и деталей.

В целом, следует заметить, что при меньшей толщине t_{1i} нитрида титана TiN возникают большие значения поверхностных напряжений: 89 МПа вместо 43 МПа при нанесении одного слоя и 14 МПа вместо 2 МПа при нанесении четырех слоев. Таким образом, можно сделать вывод, что при нанесении одного слоя формируются наибольшие остаточные технологические напряжения σ_x .

ВЫВОДЫ

- Разработана методика контроля технологических остаточных напряжений в элементах конструкций при вакуумной ионно-плазменной обработке.
- Выполнено моделирование процесса получения конструкции с вакуумным ионно-плазменным покрытием толщиной t .
- Получены поля распределения осевых напряжений σ_x в однослойных конструкциях.
- Исследовано влияние толщины подложки t_{01} и функционального слоя t_{11} на напряженно-деформированное состояние конструкции.
- Рассчитано напряженно-деформированное состояние в многослойных конструкциях с количеством слоев $k=2..5$.

• Установлено неблагоприятное влияние количества слоев k на величину остаточных сжимающих поверхностных напряжений σ_x .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смыслов А. М.** Исследование влияния параметров комплексной ионно-плазменной обработки на физико-химические и эксплуатационные свойства упрочняемых титановых сплавов / А. М. Смыслов, Ю. М. Дыбленко, М. К. Смыслова // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов: Всероссийская научно-практическая конференция. Уфа, 2001. С. 241-243. [А. М. Smyslov, Y. M. Dyblenko, M. K. Smyslova, "Study of the effect of parameters of complex ion-plasma treatment on the physico-chemical and operational properties of titanium alloys", in *Promising technologies of physical and chemical dimensional processing and formation of operational properties of metals and alloys* : All-Russian scientific and practical conference, Ufa, 2001, pp. 241-243.]

2. **Сулима А. М.** Основы технологии производства газотурбинных двигателей [Текст] / А. А. Носков, Г. З. Серебренников // Машиностроение, 1996. С. 480. [А. М. Sulima, A. A. Noskov, G. Z. Serebrennikov, *Basics of gas turbine engine production technology*, (in Russian). Mashinostroenie. 1996.]

3. **Исследование** газоабразивного износа образцов из титанового сплава ВТ-6 с наноструктурированными защитными покрытиями / Ю. М. Дыбленко и др. // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 1 (41). С. 83–86. [Y. M. Dyblenko et al., "Investigation of gas-abrasive wear of samples from titanium alloy VT-6 with nanostructured protective coatings", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 1 (41), pp. 83-86, 2011.]

4. **Каблов Е. Н.** Перспективы применения ионной обработки в авиадвигателестроении // Авиационная промышленность. 1992. № 9. С. 9–12. [Е. Н. Kablov, "Prospects for the use of ion processing in the aircraft engine industry", (in Russian), in *Aviation industry*, no. 9, pp.9-12, 1992.]

5. **Костюк Г. И.** Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий. Харьков: АИНУ, 2002. 587с. [G. I. Kostyuk, *Physical and technical bases of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies*, (in Russian). Kharkov: AINU, 2002.]

6. **Зенкевич О. С.** Метод конечных элементов. М.: Мир, 1975. 540 с. [O. S. Zenkevich, *Finite element method*, (in Russian). Moscow: Mir, 1975.]

ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, зав. каф. сопротивления материалов, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Член-корреспондент АН РБ. Область научных интересов – решение фундаментальных и прикладных задач теории упругости, пластичности, ползучести и механики разрушения применительно к основным элементам авиационных конструкций.

МАРДИМАСОВА Тамара Николаевна, канд. техн. наук, доцент. Область научных интересов – решение задач механики процессов упруговязкого пластического деформирования конструкций.

СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович, д-р техн. наук, профессор. Область научных интересов – исследование технологических методов, обеспечивающих качество поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей из конструкционных материалов.

ДУБИН Алексей Иванович, канд. техн. наук, начальник лаборатории прочности «ОДК-УМПО».

АКБАШЕВ Вадим Ринатович, аспирант кафедры СМ, магистр техники и технологии (УГАТУ, 2015).

METADATA

Title: Modeling of residual stresses under ion-plasma spray in construction elements

Authors: V. S. Zhernakov¹, T. N. Mardimasova², A. M., Smyslov³, A. I. Dubin⁴, V. R. Akbashev⁵

Affiliation:

^{1, 2, 3, 5} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

⁴ Ufa Engine Industrial Association (UMPO), Russia

Email: ¹zhvs@mail.rb.ru, ²toma_mard@mail.ru, ⁴a5.550@rambler.ru, ⁵vadja92@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 3 (85), pp. 39-45, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The method intended for the doping of the surface layers of a metallic material, which consists in treating the surface with a stream of high-energy ions and introducing them into the bulk of the material is called ion implantation. Ion implantation allows you to create surface layers with high physicomechanical properties, which are not always possible to obtain by other processing methods.

Key words: ion-plasma coating, sputtering, coating modeling, titanium nitride TiN, technological stresses, ANSYS

About authors:

ZHERNAKOV, Vladimir Sergeyevich, Head of the Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation. Corresponding Member of the Academy of Sciences of RB. Research interests – the solution of fundamental and applied problems, the theory of elasticity, plasticity, creeping and fracture mechanics as applied to the basic elements of aircraft structures.

MARDIMASOVA, Tamara Nikolaevna, candidate of Technical Sciences., associate professor. Author of 5 textbooks and over 100 Publications, 4 patents. Research interests – the solution of problems of mechanics processes viscoelastic plastic deformation structures.

SMYSLOV Anatoly Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, professor. The author of more than 100 scientific papers and 25 inventions. The area of scientific interests is the study of technological methods that ensure the quality of the surface layer and the operational properties of parts made of structural materials.

DUBIN, Alexey Ivanovich, candidate of technical Sciences, head of strength laboratory «UEC-UMPO».

AKBASHEV, Vadim Rinatovich, graduate student Department of Strength of Materials USATY. Master of Engineering and Technology (USATU 2015).