



УДК 621.7.01:621.793.74  
ГРНТИ 55.22.01:55.20.15

## ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ ТРЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*С.Ю. ЖАЧКИН, доктор технических наук, профессор  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Г.И. ТРИФОНОВ  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье проведена оценка уровня остаточных напряжений у функционального покрытия плазменного напыления. Также проведен анализ расчетного уравнения по определению величины абразивного износа, в частности изнашивания при упругом и пластическом контакте частиц с напыленной поверхностью шнека.

*Ключевые слова:* абразивный износ, остаточные напряжения, покрытие, плазменное напыление, деталь, поверхность.

## ASSESSMENT OF PLASMA SPRAYING COATINGS PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS AFTER RESTORATION OF THE AVIATION INDUSTRY FRICTION PARTS

*S.YU. ZHACHKIN, Doctor of technical sciences, Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
G.I. TRIFONOV  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article assesses the level of residual stresses in the functional coating of plasma spraying. Also the analysis of the settlement equation on determination of size of abrasive wear, in particular wear at elastic and plastic contact of particles with the sprayed surface of the screw is carried out.

*Keywords:* abrasive wear, residual stresses, coating, plasma spraying, part, surface.

**Введение.** На сегодняшний день, как показывает практика [1], развитие авиационной и машиностроительной областей промышленности сопряжено с увеличением их производительности, что в свою очередь влечет за собой повышение темпа развития процессов трения в виду варьирования загруженности и скорости производственных процессов. Повышение нагрузок на специальном авиационном оборудовании, например, на винтовых конвейерах, приводит к сокращению их работоспособности в виду интенсивного износа ответственных деталей механизмов, следовательно, возникает задача по увеличению их износостойкости.

Опираясь на исследования [2], можно сделать вывод, о том, что наиболее востребованным способом повышения износостойкости деталей в виду своей универсальности и экономичности является плазменное напыление. Следовательно, вопросы научного анализа исследований в области улучшения эксплуатационных свойств деталей с помощью напыления являются весьма востребованными в теоретическом и практическом отношениях.

Также стоит отметить, что формирование функциональных покрытий, обладающих необходимыми физико-механическими и теплофизическими характеристиками, считается



активно развивающимся направлением на производствах авиационного, машиностроительного и специального оборудования, поскольку затраты на материалы, в том числе заготовок, значительно снижаются в виду применения газотермических технологий, таких как плазменное напыление [3]. Кроме того, одним из главных аспектов повышения износостойкости деталей является управление качеством покрытий, получаемых в процессе плазменного напыления.

**Актуальность.** Исследуя показатели качества формируемых покрытий при плазменном напылении, был выделен один из основных физико-механических параметров – уровень остаточных напряжений (растягивающих), которые напрямую влияют на величину адгезии покрытия с основной поверхности детали. Основными причинами их возникновения являются: формирование пор и усадок при формировании покрытия, частичный наклеп и деформация частиц материала напыления при соприкосновении их с основной детали, а также различие в коэффициентах теплового расширения материала подложки и наносимого покрытия и т.д. [4]. При напылении поверхностей деталей, как правило, уровень остаточных напряжений зависит от правильности подбора режимов напыления и сопряженности назначенного композитного материала напыления с материалом подложки.

Помимо остаточных напряжений при оценке износостойкости и физико-механических параметров покрытий плазменного напыления, основываясь на результатах работы [5], целесообразно провести исследования величины износа нанесенного покрытия. В частности, рассмотреть на примере универсального винтового конвейера, который применяется повсеместно в авиационной промышленности, величину абразивного износа у ответственной детали – шнека.

**Цель данной работы** – оценка уровня остаточных напряжений у функционального покрытия, сформировавшегося за счет применения технологии плазменного напыления. Также разработать расчетные уравнения по определению величины абразивного износа, в частности при упругом и пластическом контакте частиц с напыленной поверхностью шнека.

**Основная часть.** Для проведения исследований по оценке остаточных напряжений в качестве образцов использовались пластины из стали 30Х длиной 100 мм, шириной 100 мм и толщиной 15 мм. В качестве детали-представителя для проведения исследований по оценке величины абразивного износа сложнопрофильных поверхностей детали был выбран шнек, который является основным элементом в промышленных винтовых конвейерах.

*Оценка уровня остаточных напряжений.*

Известно, что при анализе величины остаточных напряжений износостойких покрытий применяются методы разрушающего и неразрушающего контроля [6]. В данном исследовании при оценки остаточных напряжений был выбран метод из категории неразрушающего контроля, а именно метод наращивания, поскольку он позволяет определять растягивающие напряжения, не создавая при этом дополнительные (второстепенные) напряжения, вносящие погрешность в итоговые показатели эксперимента. При его реализации на образец из стали 30Х размером 100×100×15 мм наносится слой покрытия толщиной  $h_1$ , в результате чего он деформируется, как показано на рисунке 1.

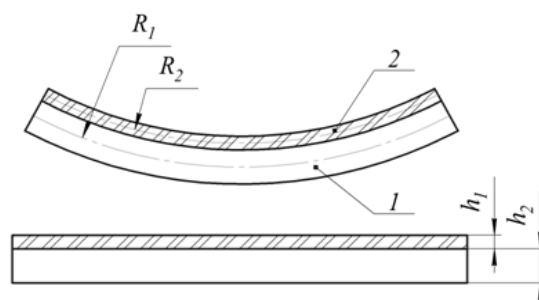


Рисунок 1 – Схематичное изображение процесса исследования величины остаточных напряжений износостойкого покрытия: 1 – пластина, 2 – нанесенное покрытие



При деформации образца и нанесенного покрытия, как показано на рисунке 1, производится их измерение, а затем определение уровня остаточных напряжений. Для расчета данной величины воспользуемся формулой (1), которая была получена в результате работы [7]. Стоит отметить, что данное расчетное уравнение учитывает толщины как нанесенного покрытия, так и экспериментального образца, а также физико-механические характеристики материалов:

$$\sigma = \left[ \frac{h_1^3 E_1 + h_2^3 E_2}{6R_M h_1 (h_1 + h_2)} + \frac{E_1 (h_1^3 E_1 + h_2^3 E_2)}{12R_M^2 (h_2 E_1 + h_2 E_2)} + \frac{E_1 E_2 h_2 (h_1 + h_2)}{2R_M (h_1 E_1 + h_2 E_2)} \right] \frac{1}{1 - \nu^2} \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где  $h_1$  – толщина нанесенного слоя, (мм);  $h_2$  – толщина экспериментального образца, (мм);  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости нанесенного слоя и образца, (ГПа);  $\nu$  – коэффициент Пуансона;  $R_M$  – средний радиус кривизны, (мм).

Анализируя формулу (1), стоит отметить, что при определении уровня остаточных напряжений используется закон Гука, поскольку поведение материалов (растяжение и сжатие) встречается во всех случаях упругой деформации. Для более детальной оценки уровня остаточных напряжений покрытия плазменного напыления, учитывая закон Гука, введем уравнения по определению коэффициентов Ламе  $\lambda$  и  $\mu$  через модули упругости нанесенного слоя и образца, а также коэффициент Пуансона [8]:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (2)$$

С учетом приведенных технологических параметров в формуле (1) и коэффициентов Ламе, модули упругости для нанесенного слоя и образца, а также коэффициент Пуансона запишутся:

$$E_1 = \frac{\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + \mu_1}, \quad E_2 = \frac{\mu_2(3\lambda_2 + 2\mu_2)}{\lambda_2 + \mu_2}, \quad \nu = \frac{\lambda_2}{2(\lambda_2 + \mu_2)}, \quad (3)$$

где  $\lambda_1$  и  $\mu_1$  – коэффициенты Ламе, применимые к материалу образца;  $\lambda_2$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Ламе, применимые к материалу нанесенного слоя.

Стоит отметить, что при определении коэффициент Пуансона применялся коэффициент Ламе. Остаточные напряжения, которые направлены на растяжение, при применении технологии напыления в большей степени образуются именно в верхнем подслое нанесенного материала.

Опираясь на полученные расчетные уравнения (2, 3), формула (1) запишется в виде:

$$\sigma = \left[ \frac{h_1^3 \frac{\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + \mu_1} + h_2^3 \frac{\mu_2(3\lambda_2 + 2\mu_2)}{\lambda_2 + \mu_2}}{6R_M h_1 (h_1 + h_2)} + \frac{E_1 \left( h_1^3 \frac{\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + \mu_1} + h_2^3 E_2 \right)}{12R_M^2 \left( h_2 \frac{\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + \mu_1} + h_2 E_2 \right)} + \frac{\frac{\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + \mu_1} \frac{\mu_2(3\lambda_2 + 2\mu_2)}{\lambda_2 + \mu_2} h_2 (h_1 + h_2)}{2R_M \left( h_1 \frac{\mu_1(3\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + \mu_1} + h_2 \frac{\mu_2(3\lambda_2 + 2\mu_2)}{\lambda_2 + \mu_2} \right)} \right] \frac{1}{1 - \left( \frac{\lambda_2}{2(\lambda_2 + \mu_2)} \right)^2} \cdot 10^{-6} \quad (4)$$



В итоге, на основе приведенных данных, а также научно-исследовательском анализе остаточных напряжений коэффициентов Ламе, получено усовершенствованное уравнение по определению уровня остаточных напряжений у образцов после применения технологии плазменного напыления.

*Оценка величины абразивного износа.*

При подробном анализе условий работы шнека винтового конвейера, который представлен на рисунке 2, а также видов нагрузок, приходящихся на его рабочую поверхность, были определены основные виды его износа: абразивный, поверхностная усталость, адгезивное изнашивание.

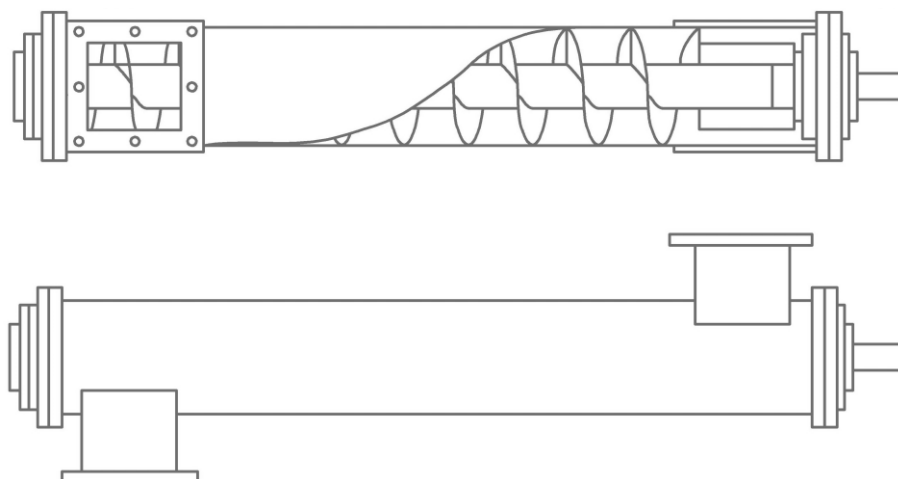


Рисунок 2 – Схематичное изображение винтового конвейера

Кроме того, при детальном разборе условий эксплуатации и их влияния на целостность рабочей поверхности шнека, было выявлено, что если абразивный износ достигает значения до 0,1 мм и выше за установленный срок работы, то шнек уже не в состоянии в полной мере обеспечивать необходимый эксплуатационный процесс.

Для оценки нанесенного функционального покрытия на контактной поверхности шнека необходимо проводить расчеты напряжений, которым подвергается поверхность, в частности напряжение смятия  $\sigma_{см}$ , расчет на прочность с учетом устойчивости  $\sigma_{сж}$ , приведенное напряжение  $\sigma_{пр}$  [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_{см} &\leq [\sigma_{см}] \\ \sigma_{сж} &= \psi_1 [\sigma_{см}] \\ \sigma_{пр} &= [\sigma] \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\psi_1$  – коэффициент уменьшения допускаемых напряжений для сжатых стержней, который выбирают в зависимости от гибкости  $\beta$  из таблицы 1 [9].

Таблица 1 – Зависимость коэффициента уменьшения допускаемых напряжений от гибкости

$\beta$	30	50	60	80	100	120	140	160
$\psi_1$	0,91	0,86	0,82	0,70	0,51	0,37	0,29	0,24
	0,91	0,83	0,79	0,65	0,43	0,30	0,23	0,19

Из выше приведенных результатов анализа износа рабочей поверхности шнека следует, что существует необходимость в разработке усовершенствованных расчетных уравнений по



оценке износа пар трения скольжения, а именно уравнения расчета износа при упругом и пластическом контакте абразивных частиц с поверхностью, а также при микрорезании.

Внедрение абразивных частиц в поверхность сопровождается их относительным скольжением. Объем вовлеченного в контактную деформацию материала [10]:

$$\Delta V = \pi H^2 \left( r - \frac{1}{3} H \right) n_a, \quad (6)$$

где  $H$  – глубина внедрения частицы, (мкм);  $r$  – усредненный радиус частиц, (мкм);  $n_a$  – число частиц, находящихся в зоне трения.

Удельная интенсивность изнашивания рассчитывается следующим образом:

$$i_H = \frac{\Delta V}{2A_r a n_p}, \quad (7)$$

где  $A_r$  – фактическая площадь контакта, (мкм<sup>2</sup>);  $a$  – радиус пятна контакта, (мкм);  $n_p$  – число циклов.

Интенсивность абразивного изнашивания, основанная на усталостной природе разрушения поверхности трения и микрорезании [11]:

$$I = \frac{4i_H A_r}{\pi A_a}, \quad (8)$$

где  $A_a$  – номинальная площадь контакта, (мкм<sup>2</sup>).

Учтем уравнения, описывающие винтовую поверхность шнека [12]:

$$\begin{cases} x = R_v \cos \varphi \\ y = R_v \sin \varphi, \\ z = b\varphi \end{cases} \quad (9)$$

где  $0 < R_v < B$ ,  $0 < \varphi < 2\pi$ ;  $R_v$  – внешний радиус винтовой поверхности, (мкм);  $b$  – шаг винтовой линии;  $B$  – ширина винтовой поверхности, (мкм);  $\varphi$  – угол подъема винтовой линии.

На основе уравнений винтовой поверхности шнека и приведенных математических зависимостей абразивного износа поверхности, запишем уравнение площади винтовой поверхности, при этом учитываем площадь той части поверхности, на которой нанесено функциональное покрытие:

$$S = \pi \left[ (R_v - R_{v1}) \sqrt{(R_v - R_{v1})^2 + b^2} + b^2 \ln \frac{(R_v - R_{v1}) + \sqrt{(R_v - R_{v1})^2 + b^2}}{b^2} \right] \cdot m, \quad (10)$$

где  $R_{v1}$  – максимальный радиус рабочей поверхности, которая не подвергалась плазменному напылению, (мкм);  $m$  – количество витков шнека.

В итоге, учитывая объем вовлеченного в контактную деформацию материала и удельную интенсивность изнашивания и уравнение по расчету площади, выводим уравнение для расчета интенсивности абразивного изнашивания рабочей поверхности шнека:



$$I_H = \frac{2H^2 \left( r - \frac{1}{3} \right) n_a}{m \cdot a \cdot n_p \cdot \left[ (R_v - R_{v1}) \sqrt{(R_v - R_{v1})^2 + b^2} + b^2 \ln \frac{(R_v - R_{v1}) + \sqrt{(R_v - R_{v1})^2 + b^2}}{b^2} \right]}. \quad (11)$$

После проведенных математических преобразований в расчетных уравнениях по оценке изнашивания винтовой поверхности шнека после плазменной обработки можно рассчитать величину износа во всех описанных случаях.

В общем виде величина износа определяется, как [13]:

$$U = I_H \cdot L \cdot 10^{-6}, \quad (12)$$

где  $L$  – путь трения, (мм). При этом, согласно работе [14], существует несколько предположений, что с увеличением скорости скольжения интенсивность изнашивания быстро уменьшается, износ зависит не от скорости скольжения, а лишь от пути трения.

Путь трения можно определить по формуле [14]:

$$L = L_1 \cdot N, \quad (13)$$

где  $L_1$  – путь трения за один оборот шнека, (мм);  $N$  – число циклов за время работы.

Число циклов за время работы определяется [11]:

$$N = 60 \cdot n \cdot t \cdot K_E, \quad (14)$$

где  $n$  – частота вращения шнека, (об/мин);  $t$  – время работы, (сек);  $K_E$  – коэффициент эквивалентности.

В итоге, опираясь на приведенные зависимости и условия работы шнека, выводим уравнение для расчета величины износа  $U$  (мм) при упругом и пластическом контакте абразивных частиц с поверхностью и микрорезании:

$$U = \frac{120 \cdot H^2 \cdot \left( r - \frac{1}{3} \right) n_a \cdot n \cdot t \cdot K_E}{m \cdot a \cdot n_p \cdot \left[ (R_v - R_{v1}) \sqrt{(R_v - R_{v1})^2 + b^2} + b^2 \ln \frac{(R_v - R_{v1}) + \sqrt{(R_v - R_{v1})^2 + b^2}}{b^2} \right]} \cdot 10^{-6}. \quad (15)$$

**Выводы.** На основе существующих математических зависимостей и расчетных уравнений по определению коэффициентов Ламе разработана математическая зависимость, направленная на определение уровня остаточных напряжений у функциональных покрытий плазменного напыления.

Опираясь на уравнения по расчету винтовых передач, а также на существующие математические зависимости по определению величины абразивного износа детали, были разработаны уравнения прогнозирования износа рабочей поверхности шнека. Кроме того, разработано уравнение по определению величины абразивного износа функциональных покрытий на винтовой поверхности шнека.





На основе полученных математических зависимостей был смоделирован программный продукт, который направлен на расчет интенсивности изнашивания покрытия и его величины абразивного износа на винтовой поверхности детали трения [15].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Лазарев С.В. Определение физико-механических свойств деталей летательных аппаратов в авиационной промышленности после комбинированной плазменной обработки // Воздушно-космические силы. Теория и практика. Выпуск № 2. 2017. С. 18–25.
2. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления // Учеб. Пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
3. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Трегубчак П.В. Плазменное напыление износостойких покрытий // В мире научных открытий. 2010. № 2–3. С. 100–102.
4. Леонов С.Л., Ситников А.А., Татаркин М.Е. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей // Ползуновский альманах. 2012. № 1. С. 228–229.
5. Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю. Расчетные методы оценки абразивного износа плазменного покрытия винтовой поверхности детали // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов. 2018. Т. 23. № 122. С. 294–298.
6. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) // М.: Машиностроение, 2003. С. 107–139.
7. Зверев Е.А., Скиба В.Ю., Вахрушев Н.В., Гаврилов А.К. Оценка уровня остаточных напряжений в плазменных покрытиях // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. Выпуск 5 (59). С. 42–47.
8. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование // Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
9. Зотов Б.Н. Расчет характеристик шнеков постоянного и переменного шага // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. № 3. С. 29–40.
10. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа // М.: Машиностроение, 1987 г. 288 с.
11. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков // М. Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. 128 с.
12. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
13. Трифонов Г.И. Оценка износа сложнопрофильной детали после плазменного напыления // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». № 1 (22). 2019. С. 51–56.
14. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию // М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
15. Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Лазарев С.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663842 «Программа по расчету параметров напыления для винтовой поверхности детали» от 06.11.2018 г.

#### REFERENCES

1. Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu., Lazarev S.V. Opredelenie fiziko-mehaničkih svojstv detalej letatel'nyh apparatov v aviacionnoj promyshlennosti posle kombinirovannoj plazmennoj obrabotki // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika. Vypusk № 2. 2017. Pp. 18–25.



2. Puzryakov A.F. Teoreticheskie osnovy tehnologii plazmennogo napyleniya // Ucheb. Posobie po kursu «Tehnologiya konstrukcij iz metallokompozitov». 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. 360 p.
3. Chesov Yu.S., Zverev E.A., Tregubchak P.V. Plazmennoe napylenie iznosostojkikh pokrytij // V mire nauchnyh otkrytij. 2010. № 2–3. Pp. 100–102.
4. Leonov S.L., Sitnikov A.A., Tatarkin M.E. Modelirovanie iznosa naplavlennyh poverhnostej detalej // Polzunovskij al'manah. 2012. № 1. Pp. 228–229.
5. Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu. Raschetnye metody ocenki abrazivnogo iznosa plazmennogo pokrytiya vintovoj poverhnosti detali // Prilozhenie k zhurnalu. Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tehniczeskie nauki. Tambov. 2018. T. 23. № 122. Pp. 294–298.
6. Chichinadze A.V., Berliner `E.M., Braun `E.D. i dr. Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotehnika) // M.: Mashinostroenie, 2003. Pp. 107–139.
7. Zverev E.A., Skiba V.Yu., Vahrushev N.V., Gavrilov A.K. Ocenka urovnya ostatochnyh napryazhenij v plazmennyh pokrytyyah // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2017. Vypusk 5 (59). Pp. 42–47.
8. Il'yuschenko A.F., Shevcov A.I., Okovityj V.A., Gromyko G.F. Processy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytij i ih modelirovanie // Minsk: Belarus. navuka, 2011. 357 p.
9. Zotov B.N. Raschet harakteristik shnekov postoyannogo i peremennogo shaga // Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i `ekspluataciya. MGTU im. N.E. Baumana. `Elektronnyj zhurnal. 2015. № 3. Pp. 29–40.
10. Ikramov U.A. Raschetnye metody ocenki abrazivnogo iznosa // M.: Mashinostroenie, 1987 g. 288 p.
11. Gevko B.M. Tehnologiya izgotovleniya spiralej shnekov // M. L'vov: Vischa shk. Izd-vo pri L'vov. un-te, 1986. 128 p.
12. Grigor'ev A.M. Vintovye konvejery. M.: Mashinostroenie, 1972. 184 p.
13. Trifonov G.I. Ocenka iznosa slozhnoprofil'noj detali posle plazmennogo napyleniya // Nauchno-prakticheskij zhurnal «Sovremennye materialy, tehnika i tehnologii». № 1 (22). 2019. Pp. 51–56.
14. Tenenbaum M.M. Soprotivlenie abrazivnomu iznashivaniyu // M.: Mashinostroenie, 1976. 271 s.
15. Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu., Lazarev S.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya `EVM № 2018663842 «Programma po raschetu parametrov napyleniya dlya vintovoj poverhnosti detali» ot 06.11.2018 g.

© Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., 2019

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, преподаватель кафедры защитных сооружений, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, zhach@list.ru.

Трифонов Григорий Игоревич, младший научный сотрудник 12 отдела научно-исследовательского 1 управления научно-исследовательского НИЦ (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, trifonov\_gi@mail.ru.