

**А. С. Бычков<sup>1, \*</sup>, А. В. Кондратьев<sup>2, \*\*</sup>**

<sup>1</sup>Государственный научно-исследовательский  
экспертно-криминалистический центр МВД Украины,  
Украина, г. Киев

<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет  
им. Н. Е. Жуковского “Харьковский авиационный институт”,  
Украина, г. Харьков

\*asbychkov85@gmail.com

\*\*a.kondratiev@khai.edu

### **Критериальная оценка повышения эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций с газотермическими покрытиями**

*Представлена блок-схема, отражающая преимущества газотермических методов нанесения защитных покрытий и основные факторы, влияющие на структуру и свойства покрытий. Предложена методика предварительного установления приоритетности по эффективности конкретных покрытий и соответствующего им газотермического метода напыления. Учено влияние механической обработки на эксплуатационные свойства деталей с покрытием. Критериальную оценку повышения эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций с газотермическими покрытиями предложено реализовать в рамках концептуального подхода, основанного на использовании интегрального критерия эффективности, включающего единичные, групповые и комплексные составляющие.*

**Ключевые слова:** защитные покрытия, газотермические методы, критерии эффективности, эксплуатационные характеристик, детали авиаконструкций.

Как показано в работе [1], обобщающей результаты многочисленных публикаций [2–15], для защиты авиационных конструкций от воздействия различных факторов среды эксплуатации одними из наиболее эффективных являются покрытия, получаемые газотермическими методами напыления, включающими в себя газопламенные, плазменные и детонационные.

Одним из преимуществ газотермических покрытий является возможность использования широкого спектра присадочных материалов, позволяющих сформировать на поверхности обрабатываемой детали слои, существенно различающиеся по своим физико-механическим свойствам. В частности, микротвердость покрытий на основе металлов может достигать 10 ГПа, а на основе керамических порошков составляет 20–30 ГПа [16].

Анализ и синтез результатов исследований защитных покрытий позволили предложить блок-схему, показывающую преимущества газотермических методов нанесения защитных покрытий и факторы, влияющие на их структуру и свойства (рис. 1).

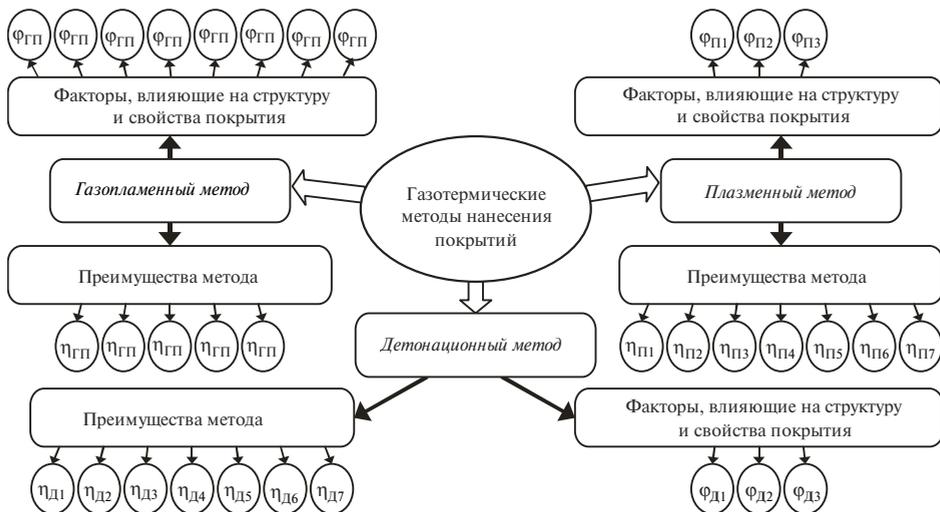


Рис. 1. Схема, показывающая преимущества газотермических методов нанесения защитных покрытий и факторы, влияющие на их структуру и свойства.

Представленные в блок-схеме основные факторы, влияющие на структуру и свойства газотермических покрытий, приведены в табл. 1, а в табл. 2 показаны основные преимущества анализируемого класса защитных покрытий.

Факторы, приведенные в табл. 1, влияющие на структуру и свойства покрытий, т. е. на его качество, еще не могут непосредственно использоваться для оценки сравнительной эффективности покрытий.

Применительно к напыленным покрытиям, одним из принципиально важных показателей является возможность эффективной механической обработки. Термобарическое нагружение в зоне обработки может привести к существенному изменению механических свойств покрытия. Как известно [17], последние неравномерно распределяются по слою покрытия и процесс механической обработки должен обеспечить формирование на детали поверхностного слоя с повышенными механическими характеристиками. Такая организация процесса механической обработки позволит реализовать высокие потенциальные возможности материалов покрытий и обеспечить наиболее высокие эксплуатационные показатели композиционных деталей. Практический опыт показывает, что для механической обработки покрытий перспективными являются режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми материалами – как монокристаллическими порошками, так и поликристаллическими композитами [18].

Для оценки сравнительной эффективности покрытий каждый из рассмотренных в табл. 1 факторов должен быть гармонизирован с некоторыми количественными индексами, сумма которых по каждому из видов покрытий должна являться показателем сравнительной эффективности того или иного вида для данного конкретного материала покрытия и основного материала.

Основой такой количественной индексации факторов может быть аналог генеральной определительной таблицы (ГОТ), которая успешно используется при инженерном прогнозировании развития любых объектов [19], в том числе объемов применения конструкционных материалов в авиастроении [20].

ГОТ представлена в виде нормированного специального словаря, позволяющего преобразовать содержащиеся в источниках информации данные в

формализованные оценки. Уровни реализации устанавливаются экспертами по пятибалльной шкале [21] (табл. 3).

**Таблица 1. Факторы, влияющие на структуру и свойства покрытий**

Газопламенные покрытия $\varphi_{ГПi}$	
$\varphi_{ГП1}$	Степень соответствия регламенту способа подготовки поверхности покрытия
$\varphi_{ГП2}$	Степень соответствия параметров струйной обработки поверхности покрытия регламентным требованиям
$\varphi_{ГП3}$	Степень соответствия времени выдержки поверхности покрытия после обработки регламенту
$\varphi_{ГП4}$	Степень соответствия параметров предварительного подогрева поверхности покрытия регламентным условиям
$\varphi_{ГП5}$	Степень соответствия параметров подслоя поверхности покрытия регламентным требованиям
$\varphi_{ГП6}$	Степень обеспечения эффективной мощности пламени струи требованиям к качеству покрытия
$\varphi_{ГП7}$	Степень соответствия параметров процесса распыления струи требованиям к качеству покрытия
$\varphi_{ГП8}$	Степень обеспечения материала покрытия регламентным требованиям к его условиям эксплуатации по прочности, надежности и ресурсу
Плазменные покрытия $\varphi_{Pi}$	
$\varphi_{P1}$	Степень соответствия параметров предварительного подогрева поверхности регламентным условиям
$\varphi_{P2}$	Степень соответствия характеристик плазмотрона обеспечению требований к качеству покрытия
$\varphi_{P3}$	Степень обеспечения потребного расстояния от плазмотрона до рабочего тела условиям потребного качества покрытия
Детонационные покрытия $\varphi_{Di}$	
$\varphi_{D1}$	Степень реализации необходимой мощности ударной волны для регламентного качества покрытия
$\varphi_{D2}$	Степень обеспечения необходимой скорости перемещения частиц порошка для реализации регламентного качества покрытия
$\varphi_{D3}$	Степень соответствия габаритов изолирующего бокса регламентам к обеспечению качества покрытия

Возвращаясь к системе факторов (см. табл. 1), отметим, что порядок этих синтезированных факторов не определяет их значимость в аспекте вклада в рост эффективности того или иного газотермического метода в интегральное качество покрытия. Установление значимости каждого фактора определяется экспертом (экспертной группой).

Таким образом, уровень эффективности конкретного покрытия определяется как

$$R = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i, \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  – значение  $i$ -го фактора табл. 1, выраженное экспертом в баллах, скорректированных по уровням их реализации для конкретного материала по-

крытия и метода напыления;  $\alpha_i$  – коэффициент весомости (значимости)  $i$ -го фактора по экспертной оценке;  $n$  – число факторов, учитываемых при реализации соответствующего метода газотермического напыления.

**Таблица 2. Преимущества газотермических методов нанесения защитных покрытий**

Газопламенный метод $\eta_{ГПi}$	
$\eta_{ГП1}$	Высокая производительность процесса
$\eta_{ГП2}$	Локальность обработки поверхности покрытия
$\eta_{ГП3}$	Слабое влияние параметров процесса на подложку
$\eta_{ГП4}$	Возможность нанесения покрытия на поверхность изделия больших размеров
$\eta_{ГП5}$	Отсутствие регламентов сочетания материалов покрытия и подложки
Плазменный метод $\eta_{Пi}$	
$\eta_{П1}$	Высокая производительность процесса
$\eta_{П2}$	Широкие возможности гибкого регулирования процесса напыления его параметрами
$\eta_{П3}$	Регулирование в широких пределах качества покрытия
$\eta_{П4}$	Высокий коэффициент использования материала (до 0,8)
$\eta_{П5}$	Возможность комплексной механизации и автоматизации процесса напыления
$\eta_{П6}$	Широкая доступность метода
$\eta_{П7}$	Экономичность процесса напыления
Детонационный метод $\eta_{Дi}$	
$\eta_{Д1}$	Высокое качество напыленных покрытий с пористостью $\Pi \leq 1\%$
$\eta_{Д2}$	Высокая прочность сцепления покрытия с материалом подложки
$\eta_{Д3}$	Возможность напыления покрытия на изделие при низкотемпературном нагреве ( $T_{изд} \leq 200\text{ }^\circ\text{C}$ )
$\eta_{Д4}$	Умеренный нагрев изделия при напылении покрытия ( $T_{изд} \leq 250\text{ }^\circ\text{C}$ )
$\eta_{Д5}$	Высокая производительность процесса напыления
$\eta_{Д6}$	Широкая номенклатура напыляемых материалов
$\eta_{Д7}$	Низкая чувствительность к состоянию исходной поверхности подложки

**Таблица 3. Генеральная определительная таблица уровней факторов и их составляющих**

Позиция	Уровень реализации фактора (составляющей)	Оценка	
		базисные баллы	баллы, скорректированные по весам
1	Реализация фактора практически отсутствует	1	0,1–1
2	Низкий уровень реализации фактора (составляющей)	2	1,5–2
3	Средний уровень реализации фактора (составляющей)	3	2,5–3
4	Высокий уровень реализации фактора (составляющей)	4	3,5–4
5	Реализация фактора (составляющей) практически полная	5	4,5–5

Установление приоритетности по эффективности того или иного покрытия в рамках реализации соответствующего метода определяется максимальным значением  $R_{\max}$ . При этом  $R_{\max}$  для разных методов различен по величине.

Вопрос о приоритетности того или иного метода напыления должен решаться путем экспертной оценки по ГОТ таблицы преимуществ газотермических методов посредством анализа их сравнительной значимости приоритетов  $\eta_i$  в табл. 2, преобразованной к установлению их уровней (степени соответствия регламентным требованиям) аналогично представленным в табл. 1.

Тогда уровень эффективности реализации конкретного газотермического метода для определенного покрытия  $Q$  определяется как

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \eta_i, \quad (2)$$

где  $\eta_i$  – значение  $i$ -го преимущества преобразованной табл. 2, выраженное экспертом в баллах, скоординированных по уровням их реализации для конкретного метода напыления;  $b_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го преимущества по экспертной оценке;  $m$  – число преимуществ соответствующего метода напыления покрытия.

Аналогично установлению приоритетности факторов эффективности покрытия эффективность метода определится максимальным значением  $Q_{\max}$ .

Таким образом, вопрос о качественном выборе эффективного по условиям эксплуатации покрытия, реализуемого соответствующим методом напыления, в первом приближении следует считать решенным.

Однако этот подход не дает еще достаточного представления о возможности критериальной оценки уровня эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций с защитными покрытиями, наносимыми газотермическими методами.

Для решения этой задачи оправдано воспользоваться концептуальным подходом к критериальной оценке, реализованным в [22] (рис. 2).

Входящие в блок-схему на рис. 2 комплексные критерии представлены с включенными в них групповыми за исключением показателей качества и технологичности, по которым имеют место как неоднозначности, касающиеся как их содержания, так и статуса определяемого соответствующими стандартами или аналогичными им документами [22].

Предложенная классификация критериев эффективности в перспективе не исключает расширения путем обоснованного введения новых дополнительных единичных групповых и комплексных критериев, не противоречащих правилам теории классификации [23].

Кроме того, из классификационной схемы (см. рис. 2) могут исключаться те или иные критерии и их составляющие при оценке эффективности изготовления того или иного класса (подкласса) деталей методами порошковой металлургии, если заменяющий материал или сфера эксплуатации детали не требуют учета исключаемых показателей.

Количественная оценка критериев эффективности производится в соответствии с общепринятыми принципами и правилами, приведенными в достаточно полном объеме, например в [21].

Каждому из критериев блок-схемы (см. рис. 2) соответствует комплекс эксплуатационных характеристик (свойств), сумма которых предопределяет уровень повышения эффективности покрытия из того или иного материала,

полученного соответствующим газотермическим методом, в сравнении с базовым (заменяемым) покрытием или незащищенным материалом.

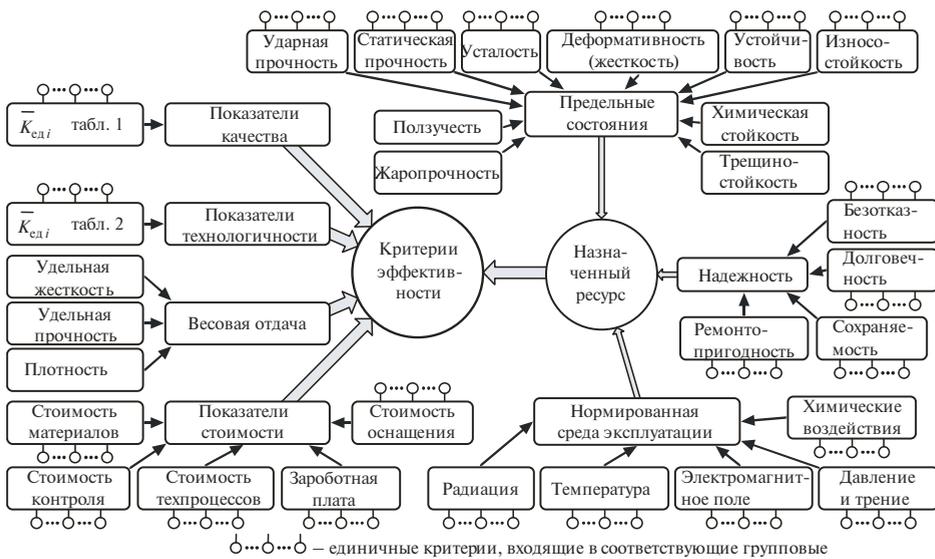


Рис. 2. Блок-схема критериев эффективности повышения эксплуатационных характеристик газотермических покрытий деталей самолета.

Большинство из выделенных выше комплексных критериев определяют эффективность замены материала покрытия на выбранный по изложенной выше методике, если сумма входящих в них групповых критериев не меньше единицы.

Таким образом

$$\bar{R}_i(K) = \frac{R_{\text{МПП}i}}{R_{\text{баз}i}} \geq 1, \quad K \in (K_{\text{пред.с}}, K_{\text{н}}, K_{\text{кач}}, K_{\text{техн}}, K_{\text{в.о}}). \quad (3)$$

Здесь  $\bar{R}_i(K)$  –  $i$ -й комплексный критерий, определяемый отношением критерия заменяющего материала порошковой металлургии (МПП)  $R_{\text{МПП}i}$  к аналогичному критерию базового материала  $R_{\text{баз}i}$ ;  $K_{\text{пред.с}}$ ,  $K_{\text{н}}$ ,  $K_{\text{кач}}$ ,  $K_{\text{техн}}$ ,  $K_{\text{в.о}}$  – соответственно критерии предельного состояния, надежности, качества, технологичности, весовой отдачи.

Однако, если по своему характеру входящие в заменяемый материал составляющие комплексного критерия при своем снижении обеспечивают повышение эффективности (роста) комплексного критерия, то относительный комплексный критерий такой замены должен отражаться обратной по отношению к формуле (3) зависимостью.

Так, комплексный критерий стоимости  $K_c$  предопределяет эффективность замены базового материала на полученный МПП, если сумма входящих в него групповых критериев базового материала  $R_i$  ниже, чем ее значение у заменяемого материала, т. е. имеет место обратная относительно формулы (3) зависимость

$$\bar{R}_i(K_c) = \frac{R_{\text{баз}i}}{R_{\text{МПП}i}} \geq 1. \quad (4)$$

Тогда полная критериальная оценка эффективности замены материала покрытия определится зависимостью

$$\bar{K}_{\text{инт}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{R}_{i \text{ компл}} (\bar{K}_i) > 1, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ,  $\bar{R}_{i \text{ компл}}$  – относительные комплексные критерии;  $\alpha_i$  – коэффициенты значимости соответствующих эксплуатационных характеристик материала, определяемые экспертным путем принятия решений.

Входящие в (5) относительные комплексные критерии  $\bar{R}_{\text{компл}}$  в качестве составляющих включают в себя соответствующие относительные групповые

$$\bar{K}_{\text{компл}} = \sum_{i=1}^m \bar{R}_{\text{гр}i} \beta_i, \quad (6)$$

где  $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$ ,  $\beta_i$  – коэффициенты значимости соответствующих критериев  $\bar{K}_{\text{гр}i}$ .

В свою очередь,  $\bar{K}_{\text{гр}i}$  включают в себя единичные  $\bar{K}_{\text{ед}i}$ :

$$\bar{K}_{\text{гр}i} = \sum_{i=1}^r \bar{R}_{\text{ед}i} \gamma_i, \quad (7)$$

где  $\sum_{i=1}^r \gamma_i = 1$ ,  $\gamma_i$  – коэффициенты значимости соответствующих критериев  $\bar{K}_{\text{ед}i}$ .

## ВЫВОДЫ

Проведенный анализ возможностей повышения эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций с защитными порошковыми покрытиями, наносимыми газотермическими методами, позволяет сделать следующие выводы.

Эксплуатационные характеристики деталей авиаконструкций с газотермическими покрытиями в целом могут оцениваться критериями, предложенными в рамках концептуального подхода к критериальной оценке возможностей повышения свойств деталей из традиционных конструкционных материалов, заменяемых деталями, формуемыми методами порошковой металлургии, включающими единичные, групповые, комплексные уровни, составляющие интегральный критерий эффективности [15].

При этом должны учитываться возможности методов механической обработки, особенно в случае применения инструментов из сверхтвердых материалов, по технологическому управлению состоянием поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей с покрытиями.

При этом из каждого уровня рассмотренных критериев могут быть исключены те или иные составляющие, не являющиеся определяющими (характерными) для изделий рассматриваемого класса.

Однако в настоящее время фактические данные по эксплуатационным характеристикам деталей с газотермическими покрытиями, предопределяющими их критериальную эффективность как по предельным состояниям (усталость, износостойкость, химическая стойкость и др.), надежности (долговечность, ремонтпригодность и др.), так и по показателям качества, технологичности и стоимости, весьма ограничены, носят преимущественно качественный характер и, следовательно, количественная оценка критериальной эффективности по сравнению с деталями без покрытий не представляется возможной.

В то же время проведенный анализ по своей направленности, по-видимому, стимулирует в перспективе реализацию концептуального подхода к критериальной оценке характеристик изделий данного класса, в первую очередь, в плане последовательного расширения полноты этого оценивания.

*Представлено блок-схему, що показує переваги газотермічних методів нанесення захисних покриттів і основні фактори, що впливають на структуру та властивості покриттів. Запропоновано методику попереднього встановлення пріоритетності за ефективністю конкретних покриттів та відповідного їм газотермічного методу напилення. Враховано вплив механічної обробки на експлуатаційні властивості деталей з покриттям. Критеріальну оцінку підвищення експлуатаційних характеристик деталей авіаконструкцій з газотермічними покриттями запропоновано реалізувати в рамках концептуального підходу, що базується на використанні інтегрального критерію ефективності, що включає одиничні, групові та комплексні компоненти.*

**Ключові слова:** захисні покриття, газотермічні методи, критерії ефективності, експлуатаційні характеристики, деталі авіаконструкцій.

*The block-diagram reflecting the advantages of gas-thermal methods of application of protective coatings and the main factors influencing on the structure and properties of coatings was synthesized. The technique of preliminary determination of the priority on the efficiency of concrete coatings and the corresponding gas-thermal method of spraying is proposed. The criterial assessment of the enhancement of operational characteristics of components of aircraft structures with gas-thermal coatings is proposed to be implemented within the framework of a conceptual approach based on the use of an integral efficiency criterion which includes unit, group and complex components.*

**Keywords:** protective coatings, gas-thermal methods, efficiency criteria, operational characteristics, details of aircraft constructions.

1. Бычков А.С., Нечипоренко О.Ю. Анализ эффективности применения газотермических покрытий для деталей авиационной техники. *Технологические системы*. 2017. № 4(81). С. 82–90.
2. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б.С. Митина. Москва: Металлургия, 1987. 792 с.
3. Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С., Никитин М.Д. Газотермическое напыление композиционных порошков. Ленинград: Машиностроение, Ленинград. отделение, 1985. 199 с.
4. Молодых Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин: справ. Москва: Машиностроение, 1989. 480 с.
5. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: в 2-х кн. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. Москва: Металлургия, 1995. 384 с.
6. Шведков Е.Л. Денисенко Э.Т., Ковенский И.И. Словарь-справочник по порошковой металлургии. Киев: Наук. думка, 1982. 272 с.
7. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техніка, 1986. 223 с.
8. Черновол М.И. Упрочнение и восстановление деталей машин композиционными покрытиями: Учеб. пос. Киев: Вища школа, 1992. 79 с.

9. Лакиза С.М. Тищенко Я.С., Лопато Л.М. Діаграми стану систем  $Al_2O_3-Zr(Hf)O_2-La_2O_3$  як наукова основа для створення нових теплозахисних покриттів. *Порошк. металургія*. 2014. № 4/6. С. 92–99.
10. Быков М.Н. Выбор и назначение директивной технологии нанесения покрытий силовых авиаконструкций по критериям долговечности и экономической эффективности: дис. ... канд. техн. наук. Киев: Нац. авиац. ун-т, 2013. 205 с.
11. Коцюба А.А., Бычков А.С., Нечипоренко О.Ю., Лавренко И.Г. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники. Киев: КВИЦ, 2016. 304 с.
12. Калинович Д.Ф., Кузнецова Л.И., Денисенко Э.П. Диоксид циркония: свойства и применение. *Порошковая металлургия*. 1987. № 11. С. 98–103.
13. Кудрін А.П., Духота О.І., Кіндрачук М.В., Зайченко Г.М. Організація та трибології авіаремонтного виробництва. Київ: НАУ, 2015. 212 с.
14. Моляр А.Г., Коцюба А.А., Бычков А.С., Нечипоренко О.Ю. Конструкционные материалы в самолетостроении. Киев: КВИЦ, 2015. 400 с.
15. Коцюба А.А., Бычков А.С., Нечипоренко О.Ю., Лавренко И.Г. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники. Киев: КВИЦ, 2016. 304 с.
16. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И. Плазменные покрытия на основе керамических материалов. Минск: Бестпринт, 2006. 316 с.
17. Клименко С.А., Коломиец В.В., Хейфец М.Л. и др. Обработка резанием деталей с покрытиями / под ред. С.А. Клименко. Киев: ИСМ НАН Украины, 2011. 353 с.
18. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. Москва: Машиностроение, 2014. 608 с.
19. Гмошинский В.Г. Инженерное прогнозирование. Москва: Энергоиздат, 1982. 298 с.
20. Коцюба А.А., Кондратьев А.В., Кириченко В.В. Методология прогнозирования объемов применения полимерных композиционных материалов в отечественных гражданских самолетах на долгосрочные периоды. *Технологические системы*. 2017. № 3 (80). С. 59–97.
21. Макаров Н.М., Виноградов Т.И., Рыбчинский А.А. и др. Теория выбора и принятия решения. – Москва: Наука, 1982. 326 с.
22. Бычков А.С. Концептуальный подход к критериальной оценке возможностей повышения эксплуатационных характеристик деталей авиаконструкций, формуемых методами порошковой металлургии. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Вып. 4 (92). Харьков, 2017. С. 42–54.
23. Бычков А.С. Метод последовательного расширения полноты критериальной оценки эффективности использования спеченных порошковых материалов в агрегатах авиаконструкций. Сообщение 1. Спеченные порошковые материалы на основе алюминия. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Вып. 1 (93). Харьков, 2018. С. 53–64.

Поступила 25.07.18

После доработки 11.09.18

Принята к публикации 11.09.18