

REFERENCES

1. Garkunov, D.N., Melnikov, E.L., Gavriluk, V.S. *Tribotechnics*. – M.: Knorus, 2011. – pp. 408.
2. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality in Machine Parts*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
3. Suslov, A.G., Bogomolov D.Yu., Shalygin M.G. Fatigue wear of friction surface on sub-roughness level // *Friction and Lubrication in Machinery*. 2015. №4. pp. 7-10.
4. Tian H., Zhao C., Zhu D. and Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces. *Int. J. of modeling and Optimization*, Vol. 2, No. 3, 2012.
5. Suslov A.G. and Shalygin M.G. The interrelation of the surface subroughness of martensitic steels with their granularity the quality of mechanical processing. *AIP Conf. Proc.* 1785, 040085 (2016).
6. Syslov A.G., Poroshin V.V., Shalygin M.G., Kuznetsov S.V. Interconnection of nano-roughness (sub-roughness of parts surfaces and material granularity) // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. № 11(53). pp. 3–7.
7. *Protection against Hydrogen Wear in Friction Units* / Authors Group; under the editorship A.A. Polyakova. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 135.

Рецензент д.т.н. В.И. Бутенко

УДК 621.9.047
DOI: 10.12737/24548

В.П. Смоленцев, д.т.н.,
С.В. Сафонов, к.п.н.
(Воронежский государственный технический университет,
394026, Воронеж, Московский пр., 14)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Способы и технологии модификации поверхностного слоя металлических изделий

Показана возможность проектирования комбинированных технологических процессов, обеспечивающих предельно возможные критериально оцениваемые эксплуатационные показатели изделий. Приведены научно обоснованные способы выбора и использования ранее созданных технологий, методы разработки перспективных видов покрытий, средств модификации поверхностного слоя и изменения толщины покрытий с приданием им нужных эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: способы обработки; качество поверхностного слоя; модификация; моделирование; технологические процессы; эксплуатационные показатели.

V.P. Smolentsev, D. Eng.,
S.V. Safonov, Can. P.
(Voronezh State Technical University, 14, Moscovsky Avenue, Voronezh, 394026)

Methods and technologies for surface layer modification in metal products

In the work it is shown that the design of combined technological processes ensuring the maximum possible operating characteristics of products assessed in a criterion way is possible. The science-based methods of choice and use of technologies created earlier, methods for the development of promising coating types, means for the modification of a surface layer and thickness changes of coatings with operating characteristics required are shown. The possibilities are considered for the creation of new methods realizing operating indices the fulfillment of which is impossible at common technologies. The well-known researches have shown that at the operation of science intensive products the mechanical characteristics including fatigue material resistance depend to a great extent upon a state and properties of a surface layer that is why there is offered a substantiated choice and design of technological processes for manufacturing products with properties corresponding most completely to operation conditions.

Keywords: processing method; surface layer quality; modification; modeling; technological processes; operation indices.

В основе проектирования новых технологий лежит моделирование процессов путем оптимизации, как отдельных воздействий, так и их комплексов [1]. Моделирование процесса может выполняться, если обоснованы начальные и конечные условия, определяющие область ее применения для проектирования эффективных технологических процессов, особенно при производстве современной наукоемкой техники (в транспортной отрасли, специальном машиностроении).

В основу модели положена научная концепция о возможности критериального выбора совместимых воздействий с помощью предложенного авторами принципа полезности, который позволяет объективно оценить качественные и количественные показатели положительных и негативных сторон как индивидуальных, так и комбинированных воздействий в проектируемых технологических процессах формирования поверхностного слоя для достижения наиболее полного обеспечения требуемых эксплуатационных показателей изделий.

Начальные условия для построения модели следующие:

- наличие исследованных методов и средств модификации поверхностного слоя и изменения его толщины для получения требуемых эксплуатационных свойств изделий.

- возможность разработки новых технологических процессов модификации и изменения толщины покрытия для оптимизации характеристик изделий в допустимые сроки их создания.

Граничные условия:

1. Предельные показатели эксплуатационных свойств изделий с модифицированным поверхностным слоем.

2. Обоснованность финансовых и временных затрат на создание новых процессов.

3. Возможность и целесообразность использования и приобретения требуемых технологий на стороне.

4. Степень собственной правовой защиты требуемых способов и устройств.

Моделирование может выполняться в виде задачи многокритериальной оптимизации с булевыми переменными [2]. Моделирование формируется на критериях, изложенных в [3]. Конечный результат R синтеза i внешних воздействий на изделие U :

$$R \subset \otimes U_n, n \in \Pi_p, \quad (1)$$

где \otimes – декартово произведение; $i = 0$; Π_{pi} – множество возможных технологий изменения свойств поверхностного слоя для конкретного изделия; Π_p – заданный разработчиком параметр изделия U , где определяющее воздействие оказывает Π_{pi} , а Π_{pi} – заданный показатель полезности i -го воздействия; R – результирующий показатель комбинации воздействий; n – количество используемых воздействий.

Технологический процесс может быть задан через множества m_i :

$$i \subset \otimes \{m_i; i \in m\}, \quad (2)$$

где $i = 0$; m_i – множество внешних воздействий, реализуемых в возможных технологических процессах модификации и покрытий поверхностного слоя; m – количество перспективных реально достигаемых технологических воздействий на поверхностный слой для повышения эксплуатационных показателей изделия.

Возможность реализации процесса оценивается формулой

$$\Pi_{pi} \subset R \otimes \Pi_{0i}, \quad (3)$$

где Π_{0i} – достигнутый показатель полезности i -го воздействия при взаимном влиянии воздействий.

$$\Pi_{0i} = \langle R_i, K_i \rangle, \quad (4)$$

где R_i – коэффициент полезности одного или нескольких внешних воздействий; K_i – коэффициент, характеризующий положительное воздействие на Π_i ; K_i – коэффициент, отражающий негативное воздействие на процесс Π_i .

Механизм проектирования технологического процесса модификации и изменения толщины поверхностного слоя для обеспечения заданных эксплуатационных показателей строится на закономерности

$$\langle R_i, K_{di} \rangle = \arg \text{ext } P\{\Psi \subset (R, K) \otimes \Pi_{di}\} = \quad (5)$$

$$\Pi_{pi}, i \in n,$$

где P – вероятность положительного воздействия факторов ($\overline{K_{0i}}$; $\overline{K_{di}}$); Ψ_i – функция, характеризующая связь между технологическим воздействием и главным эксплуатационным показателем, зависящим от характеристик поверхностного слоя.

Функция (5) определяет выбор воздействий для обеспечения наибольшего уровня полезности:

$$T_{di} (i = \overline{1, m}), \quad \text{где } R_{di}(\overline{1, m}). \quad (6)$$

Моделирование процедуры проектирования технологии выполняется с учетом возможностей достигнутых и достигаемых воздействий в несколько этапов:

– для конкретного изделия U находится минимальный набор технологических воздействий (\overline{T}_i);

– для достигнутых показателей (Π_{oi}):

$$\Pi_{di} = \arg \min \left\{ \sum_1^n \delta_{iT} ; i = \overline{1, n} \right\}; \quad (7)$$

$$\sum_1^n \alpha_{iT} \delta_{iT} \quad 1; i = \overline{1, n}$$

– для достижимых показателей воздействий (Π_{di}):

$$\Pi_{di} = \arg \min \left\{ \sum_1^m \delta_{iT} ; i = \overline{1, m} \right\}, \quad (8)$$

$$\sum_1^n \alpha_{iT} \delta_{iT} \quad 1; i = \overline{1, m}$$

где $\alpha_{iT} \delta_{iT}$ – булевы переменные, которые определяются по критериям:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{iT} &= \begin{cases} 1, \text{ если } T_i \text{ входит в } \overline{T}_i \in T; \\ 0, \text{ если не входит} \end{cases} \\ \alpha_{iT} &= \begin{cases} 1, \text{ если } \overline{T}_i \subset \overline{T} \\ 0 \text{ если не принадлежит} \end{cases} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Оценку воздействий выполняют по зависимостям, приведенным в табл. 1.

1. Выбор факторов при проектировании технологий с единичным и комбинированным воздействием

Описание процесса	Вид технологического процесса	
	С главным единичным воздействием	С комбинированным воздействием нескольких факторов
Логические связи	Оценка по главному (генеральному) воздействию	Рассматриваются комбинированные воздействия на заданный эксплуатационный показатель
Формализация связей	$\overline{T}_{di} U_i$ при $i = \overline{1, m}$	$i \in \overline{\overline{T}_{di}} U_i; i = \overline{1, n}$
Критерий выбора технологий	$i \subset (\overline{T}_{d1} U_1 \dots \dots \overline{T}_{dm} U_m)$	$i \subset (\overline{T}_{d1} U_1 \dots \dots \overline{T}_{dm} U_m) >$ $(\overline{T}_{01} U_1 \dots \dots \overline{T}_{0m} U_m)$

На следующем этапе проектирования необходимо обосновать выбор одного главного (генерального) воздействия F .

$$\left. \begin{aligned} (\delta_{in}, \delta_{im}) &= \arg \max P (\Psi_i, \delta_{in}, \delta_{im}) = F_i; i \in n, i \in m \\ U &\subset \arg \min K_{oi}; i = \overline{1, n} \\ \sum_1^{Rn} \delta_{in} &= 1; i = \overline{1, n} \\ \sum_1^{Rm} \delta_{im} &= 1; i = \overline{1, m} \\ \Pi_{di} &> \Pi_{oi} (\overline{K}_{di}); \Pi_{oi} > \Pi_{pi}, i_{io} = \overline{1, n}, i_{pi} = \overline{1, n} \quad i_{di} = 1, m \\ \delta_{in} &= \begin{cases} 1, \text{ если } \Pi_{di}(\overline{K}_{di}) > \Pi_{pi}(\overline{K}_{di}) \\ 0, \text{ если } \Pi_{oi}(\overline{K}_{oi}) < \Pi_{pi}(\overline{K}_{pi}) \end{cases} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Для комбинированного воздействия (см. табл. 1) требуется упорядочивание как известных n , так и перспективных m воздействий по эксплуатационным показателям. Здесь для каждого главного (генерального) показателя может оказаться несколько сочетаний воздействий, где присутствуют как положительные (K_i) так и негативные (\overline{K}_i) показатели. После ранжирования воздействий выполняется перебор их комбинаций с учетом ограничений и уровня полезности. После этого формируется технологический процесс для модификации изменения геометрии поверхностного слоя.

Для оценки результата взаимного воздействия нескольких факторов может быть использована система:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{in} &= \arg \max \left\{ \Pi_{di} \triangleq \Psi_i [f(\delta_{in})] \right\} \\ \sum_1^n \delta_{in} &= 1, \quad n = \overline{1, n} \\ \sum_1^m \delta_{im} &= 1, \quad m = \overline{1, m} \\ (\overline{K}_{di}) - K_{oi} + n\delta_{in} &\leq n - 1, \quad n = \overline{1, n} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где Π_{di} – допустимый показатель достижимого уровня воздействия при $\overline{K_{di}} \rightarrow \max$, $\overline{K_{di}} \rightarrow \min$; Δ – оператор входящих разностей. Объединение воздействий в группы $n = \overline{1, i}$; $m = \overline{1, m}$ производится с помощью

$$\left. \begin{aligned} \delta_{im} &= \arg \text{ext} \{ \Psi_i \overline{K_{di}}(T_{di}) \delta_{im} \\ \sum_1^m \delta_{im} &= 1, \quad m = \overline{1, m} \quad \Pi_{di}(\overline{K_{di}}) > \Pi_{oi}(\overline{K_{oi}}) \\ \delta_{im} &= 1, \text{ если } \Pi_{di} \subset \Pi_{oi} \\ \delta_{im} &= 0, \text{ если } \Pi_{di} \not\subset \Pi_{oi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Суммарное воздействие может иметь как положительное, так и отрицательное влияние проектируемого процесса на эксплуатационные показатели:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_{o\Sigma} &\subset \sum_1^n \Pi_{oi}(\overline{K_{oi}}), \quad \text{при } \Pi_{oi}(\overline{K_{oi}}) \rightarrow \min; \\ \Pi_{d\Sigma} &\subset \sum_1^m \Pi_{di}(\overline{K_{di}}), \quad \text{при } \Pi_{di}(\overline{K_{di}}) \rightarrow \min. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

При разработке методологии проектирования технологических процессов для изменения параметров поверхностного слоя может использоваться несколько структур:

– Если имеется необходимость использования только одного воздействия, заданного разработчиком, для получения эксплуатационного показателя Π_{pi} . Здесь решается задача линейного программирования с попарной оценкой $\overline{K_{oi}}$, $\overline{K_{oi}}$ и $\overline{K_{di}}$, $\overline{K_{di}}$, как показано в табл. 1.

– Если имеется суммарное требование к достижению эксплуатационного показателя путем комбинации нескольких независимых технологических воздействий. Здесь проектирование комбинированного процесса выполняется по критериям (12), (13). Оценочным показателем служит критерий:

$$\Pi_{di}(\overline{K_{di}}) > \Pi_{pi}, \quad \text{если } \Pi_{di} > \Pi_{oi}. \quad (14)$$

$$\Pi_{oi}(\overline{K_{oi}}) > \Pi_{pi}, \quad \text{если } \Pi_{di} \leq \Pi_{oi}. \quad (15)$$

При этом учитываются ограничения по требуемому времени разработки (при необходимости) нового технологического режима и обоснованности финансовых вложений на разработку (рассматривается в форме ограничений в модели).

– Если суммарное эксплуатационное требование может быть реализовано при использовании нескольких физических воздействий, все или часть которых преобразуются в новые воздействия в процессе проведения технологических операций по изменению характеристик поверхностного слоя. Здесь имеет место

булевых переменных δ_{in} и δ_{im} .

Если принять, что суммарное воздействие в (11) возможно создать только при отсутствии внутренних преобразований (например, химических реакций), то

многокритериальная задача с минимизацией числа воздействий и вероятностным показателем исполнимости принятого технологического решения P .

Проектирование технологических процессов совершенствования поверхностного слоя

Построение системы базируется на состоянии имеющихся и перспективных разработок в рассматриваемый период времени и допустимых интервалах до получения требуемых процессов, включающих достижение конечного результата (период t_R):

$$t_R \leq t_0 + t_d,$$

где t_0 – время освоения процессов для получения Π_p ; t_d – время, необходимое для разработки наиболее трудоемкого достижимого показателя $\overline{\Pi_{d \max}}$.

Система включает:

– параметрическую адаптацию имеющихся и проектируемых воздействий к их возможностям воздействия на поверхностный слой, обеспечивающих получение заданного (Π_p) или перспективного ($\overline{\Pi_{d \max}}$) эксплуатационного показателя;

– структурную адаптацию воздействий к комбинированным технологическим процессам формирования поверхностного слоя;

– параметрическую и структурную адаптацию к ранее используемым технологиям изго-

товления аналогичных объектов производства. Для заданных (Π_p), достигнутых (Π_0), достижимых (Π_d) эксплуатационных показателей требуется соответственно n и m воздействий. Требуемая система может быть сформирована проектированием технологических процессов T при наибольшем воздействии критерия полезности K :

$$\left. \begin{array}{l} K_{di}(T_1, T_2, \dots); \quad i = \overline{1, m} \\ \overline{K}_{di}; \quad i = \overline{1, m} \rightarrow \min \\ \overline{K}_{di}; \quad i = \overline{1, m} \rightarrow \min \\ \Pi_{di} \subset \Pi_{oi} \subset \Pi_{pi} \end{array} \right\} \quad (16)$$

Проектирование осуществляется в несколько этапов, которые включают:

- детализацию требуемых (заданных) эксплуатационных показателей и оценку уровня значимости каждого параметра с учетом возможности использования достигнутых воздействий;

- по критериям формализуют реальные связи между заданными, достигнутыми и достижимыми показателями и ограничивают множество внешних воздействий (n, m) граничными условиями, заданными, как правило, разработчиком. При необходимости детализируют воздействия до выявления главного векторного критерия полезности;

- для выбранных критериев полезности устанавливают диапазон возможных воздействий и показателей. Разрабатывают возможные сочетания воздействий для формирования вариантов комбинированных процессов, из которых назначают рабочий, учитывающий имеющиеся ограничения;

- детализируют процессы, учитывающие принятые воздействия, проводят их анализ на соответствие критерию $\Pi_o(\overline{K}_{oi}) \rightarrow \max$. Принимают решение о технологической подготовке производства для использования технологий, включающих достигнутые показатели полезности;

- затем обосновывается целесообразность создания новых процессов, учитывающих воздействие при условиях $\Pi_{di}(\overline{K}_{di}) \rightarrow \max$; $\Pi_{di}(\overline{K}_{di}) \rightarrow \min$. Здесь используется принцип подобия технических систем, подробно рассмотренный в [4, 5], также комбинированные воздействия с наложением электрического поля [6];

- создается программное и информацион-

ное обеспечение имеющихся и проектируемых технологических процессов, применяемых для формирования поверхностного слоя с требуемыми эксплуатационными показателями [7, 8].

Применение технологических процессов, спроектированных на базе принципа полезности

Анализ влияния многолетних исследований традиционных и новых технологических процессов на повышение эксплуатационных показателей деталей показывает, что требуется использовать не только имеющиеся методы обработки, но и целенаправленно комбинировать их в единый технологический процесс, учитывающий условия эксплуатации деталей в изделии [6, 9].

При модификации поверхностного слоя можно придать объектам нужное сочетание эксплуатационных свойств, которые неосуществимы при индивидуальных технологических воздействиях, или такие процессы оказываются неэффективными. Примером воздействий является химическое и электрохимическое изменение слоя материала, обеспечивающее получение деталей с новыми свойствами, например, с использованием легкой основы из легких сплавов с твердым покрытием из чугуна, обладающего высокой твердостью и износоустойчивостью, в том числе при повышенных температурах эксплуатации.

В особо сложных условиях работают роторы и статоры лопаточных машин (рис. 1), где наряду с высокими механическими воздействиями имеется высокий перепад температур (жидкие газы – зона горения), наличие агрессивных сред (кислород, водород, кислоты и др.).



Рис. 1. Ротор лопаточной машины

Рабочие колеса обычно выполняются цельными с зазором между лопатками в несколько

миллиметров (рис. 2), что ограничивает доступ инструмента (например, металлических гранул) в зону упрочнения. Здесь достижение требуемого состояния поверхностного слоя комбинированными технологическими процессами определяет принципиальную возможность создания современных лопаточных машин.

Научно обоснованный выбор по предложенной методике технологического процесса дает возможность повысить ресурс лопаток двигателей летательных аппаратов до уровня, позволяющего создать изделия многократного использования с повышенным ресурсом работы.

Детали, приведенные на рис. 2, упрочнены комбинированным способом, включающим плазменное напыление металла, химическое преобразование осадка, и механической раскаткой слоя.



Рис. 2. Фрагменты рабочего колеса осевой турбины

В табл. 2 приведена критериальная оценка эффективности комбинированных способов воздействия на поверхностный слой лопаточных агрегатов.

2. Технологические методы повышения эксплуатационных показателей лопаточных машин

Эксплуатационный показатель	Технологические методы воздействия	Коэффициенты полезности		Повышение эксплуатационных показателей изделия
		\vec{K}_1	\vec{K}_2	
Теплостойкость материала	Комбинированные покрытия с наполнителем	1,3...1,5	1,5...1,8	Повышение ресурса лопаточных машин
Защита от внешних воздействий	Специальное покрытие, замена материалов	1,5...2,0	2,0...10	Эксплуатация изделий в суровых климатических условиях
Усталостная прочность и надежность	Виброударное упрочнение	1,2...1,3	1,2...1,5	Повышенная усталостная прочность и надежность изделий
Снижение гидравлического сопротивления	Комбинированное экструдирование наполнителя с анодным растворением микронеровности	1,3...1,5	1,5...2,0	Снижение расхода топлива

В табл. 2 $\vec{K}_1 = \frac{P_p}{P_o}$; $\vec{K}_2 = \frac{P_d}{P_o}$, где P_o – эксплуатационный показатель изделия без модификации поверхностного слоя; P_p – показатель после модификации; P_d – показатель после разработки и применения комбинированных методов модификации, разработанных авторами.

Заключение

Критериальный метод оценки полезности позволяет выбрать или разработать техно-

логические процессы, обеспечивающие результаты механических и усталостных испытаний (жаростойкость, защита от внешних воздействий, прочность) и показатели пролива через межлопаточный канал (гидравлическое сопротивление потоку).

Для конкретных узлов и условий эксплуатации значения коэффициентов полезности уточняются, что открывает возможность выбора минимального количества требуемых воздействий, являющихся базой для проектирования (при необходимости) технологических процессов и разработки технического задания для исследовательских работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

REFERENCES

1. **Научноёмкие технологии в машиностроении** /А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
2. **Сафонов, С.В., Григорьев, С.Н., Смоленцев, В.П.** Модификация поверхностного слоя металлических изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Том 2. – №2. – 2015. – С. 19 – 26.
3. **Сафонов, С.В., Смоленцев, В.П., Портных, А.И.** Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя/ монография «Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты»: в 5 т. / под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2014. Т. 3. – С. 365 – 406.
4. **Смоленцев, В.П., Грицюк, В.Г., Сафонов, С.В.** Проектирование технологического процесса электроискрового легирования и покрытия металлических изделий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. № – 11. – С. 36–41.
5. **Смоленцев, В.П., Грицюк, В.Г., Сафонов, С.В.** Эксплуатационные свойства изделий после электроискрового легирования и нанесения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №12. – С. 31–37.
6. **Смоленцев, Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.
7. **Сафонов, С.В., Смоленцев, В.П., Шаров, Ю.В.** Изготовление фильтров многоэлектродным инструментом // Авиационная техника. – 2016. – № 2. – С. 70–74.
8. **Смоленцев, В.П., Шаров, Ю.В., Коптев, И.И.** Многоэлектродная обработка каналов в фильтрах тепловых двигателей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 8(50). С. 22–27.
9. **Михайлов, А.Н., Михайлов, Д.А., Грубка, Р.М., Петров, М.Г.** Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. №7(49). С. 30–38.

1. “*Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*” /A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2012. pp. 528.
2. Safonov, S.V., Grigoriev, S.N., Smolentsev, V.P. Surface layer modification in metal products // *Bulletin of Voronezh State Technical University*. – Vol. 2. – №2. – 2015. – pp. 19 – 26.
3. Safonov, S.V., Smolentsev, V.P., Portnykh, A.I. Increase of operating characteristics of parts by surface layer modification/ monograph “*Efficient Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Tools*”: in 5 Vol. / under the editorship of A.V. Kirichek. – M.: Spectrum, 2014. Vol. 3. – pp. 365 – 406.
4. Smolentsev, V.P., Gritsyuk, V.G., Safonov, S.V. Design of technological process of electro-spark alloying and coating of metal parts // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2014. № – 11. – pp. 36–41.
5. Smolentsev, V.P., Gritsyuk, V.G., Safonov, S.V. Operating properties of products after electro-spark alloying and coatings // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2014. – №12. – pp. 31–37.
6. Smolentsev, E.V. *Design of Electric and Combined Methods of Processing*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 511.
7. Safonov, S.V., Smolentsev, V.P., Sharov, Yu.V. Filter production by multi-electrode tool // *Aircraft Engineering*. – 2016. – № 2. – pp. 70–74.
8. Smolentsev, V.P., Sharov, Yu.V., Koptev, I.I. Multi-electrode processing of channels in filters of heat engines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. № 8(50). pp. 22–27.
9. Michailov, A.N., Michailov, D.A., Grubka, R.M., Petrov, M.G. Machinery life increase based on functionally-directed coatings // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. №7(49). pp. 30–38.

Рецензент д.т.н. А.Н. Михайлов

