

УДК 621.9

**ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ****Александр Николаевич Михайлов¹**, д-р техн. наук**Александр Владимирович Анастасьев¹**¹ Донецкий национальный технический университет, ДНР, РоссияТел./Факс: +79493497428; E-mail: anastasyev.av@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрен подход к формированию системы критериев оценки эффективности отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбин газотурбинных двигателей. Для количественной оценки значимости параметров качества поверхностного слоя использован метод анализа иерархий, основанный на парных сравнениях критериев. В качестве основных критериев рассмотрены шероховатость поверхности, остаточные напряжения, глубина модифицированного слоя, микротвёрдость поверхностного слоя и отклонение профиля пера лопатки. Выполнено определение весовых коэффициентов критериев для процессов полирования и поверхностно-пластического деформирования. Полученные результаты позволяют обосновывать выбор параметров комбинированной отделочно-упрочняющей обработки и повышать эффективность технологического обеспечения изготовления и ремонта лопаток турбин газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, лопатка турбины ГТД, метод анализа иерархий, парные сравнения, весовой коэффициент.

**FORMATION OF A SYSTEM OF CRITERIA FOR EVALUATING THE
EFFECTIVENESS OF FINISHING AND HARDENING TREATMENT****Aleksander N. Mikhaylov**, D. Eng.**Aleksander V. Anastasyev**

Abstract. The article considers an approach to the formation of a system of criteria for evaluating the effectiveness of finishing and hardening treatment of turbine blades of gas turbine engines. To quantify the significance of the quality parameters of the surface layer, a hierarchy analysis method based on paired comparisons of criteria was used. Surface roughness, residual stresses, depth of the modified layer, microhardness of the surface layer, and deflection of the blade tip profile are considered as the main criteria. The weighting coefficients of criteria for polishing and surface plastic deformation processes have been determined. The results obtained make it possible to substantiate the choice of parameters for combined finishing and hardening treatment and to increase the efficiency of technological support for the manufacture and repair of turbine blades of gas turbine engines.

Keywords: finishing and hardening treatment, turbine blade of GTD, hierarchy analysis method, paired comparisons, weighting factor.

Введение

Лопатки турбин газотурбинных двигателей относятся к числу наиболее ответственных деталей авиационной техники, работающих в условиях высоких температур, циклических нагрузок и интенсивного воздействия агрессивной среды.

Эксплуатационная надёжность и долговечность лопаток во многом определяются состоянием их поверхностного слоя, который формируется на завершающих этапах технологического процесса изготовления и ремонта. Для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик широко применяются различные методы отделочной и упрочняющей обработки, в том числе полирование и методы поверхностно-пластического деформирования. Указанные технологические воздействия оказывают различное влияние на параметры поверхностного слоя: шероховатость поверхности, микротвёрдость, остаточные напряжения, глубину модифицированного слоя и геометрическую точность профиля пера лопатки. При этом улучшение одних показателей нередко сопровождается ухудшением других, что требует комплексного подхода к оценке эффективности обработки.

1. Основное содержание и результаты работы

Для оценки особенностей комбинированной отделочно-упрочняющей обработки может быть применен метод весовых коэффициентов. Для решения задачи формируется матрица парных сравнений и рассчитываются весовые коэффициенты с учетом конкретных требующихся характеристик (критериев), что позволяет повышать эффективность обработки.

Для определения весовых коэффициентов методом парного сравнения были выбраны следующие критерии:

- k_1 изменение параметра шероховатости (ΔRa);
- k_2 величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$);
- k_3 глубина модифицированного слоя (h);
- k_4 изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV);
- k_5 величина отклонения профиля пера лопатки (Δf).

Для каждого критерия необходимо его сравнение с другими критериями. Для этого применяем шкалу метода анализа иерархий, предложенную Т. Саати для парных сравнений. Данная шкала относительной важности приоритетов включает количественные значения критериев в пределах от 1 до 9, состоящих из 5 основных уровней важности, и 4 промежуточных оценок между двумя соседними суждениями. Квадратную матрицу парного сравнения критериев можно представить в виде таблицы 1 и графа рисунок 1.

Таблица 1. Квадратная матрица парного сравнения критериев

Критерий	(ΔRa)	($\sigma_{ост}$)	(h)	(ΔHV)	(Δf)
(ΔRa)	1	k_{12}	k_{13}	k_{14}	k_{15}
($\sigma_{ост}$)	k_{21}	1	k_{23}	k_{24}	k_{25}
(h)	k_{31}	k_{32}	1	k_{34}	k_{35}
(ΔHV)	k_{41}	k_{42}	k_{43}	1	k_{45}
(Δf)	k_{51}	k_{52}	k_{53}	k_{54}	1

Расчет весовых коэффициентов методом парного сравнения ведём для двух случаев – зависимости параметров поверхностного слоя лопатки турбины ГТД от технологических воздействий, возникающих при полировании, и от воздействий, возникающих в процессе упрочнения методами поверхностно-пластического упрочнения.

Назначим сравнительные значения для выбранных критериев, основываясь на экспертных оценках [1 – 8]:

1. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$): ΔRa более важна, чем $\sigma_{ост}$ (оценка 7), обозначим как k_{12} .

2. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и глубина модифицированного слоя (h): ΔRa более важна, чем h (оценка 3), обозначим как k_{13} .

3. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): ΔRa более важна, чем Δf (оценка 5), обозначим как k_{15} .

4. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$) и глубина модифицированного слоя (h): $\sigma_{ост}$ одинаково важна, как и h (оценка 1), обозначим как k_{23} .

5. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): $\sigma_{ост}$ одинаково важна, как и ΔHV (оценка 1), обозначим как k_{24} .

6. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): $\sigma_{ост}$ более важна, чем Δf (оценка 3), обозначим как k_{25} .

7. Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV) и изменение параметра шероховатости (ΔRa): ΔHV более важна, чем ΔRa (оценка 3), обозначим как k_{41} .

8. Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV) и глубина модифицированного слоя (h): ΔHV более важна, чем h (оценка 4), обозначим как k_{43} .

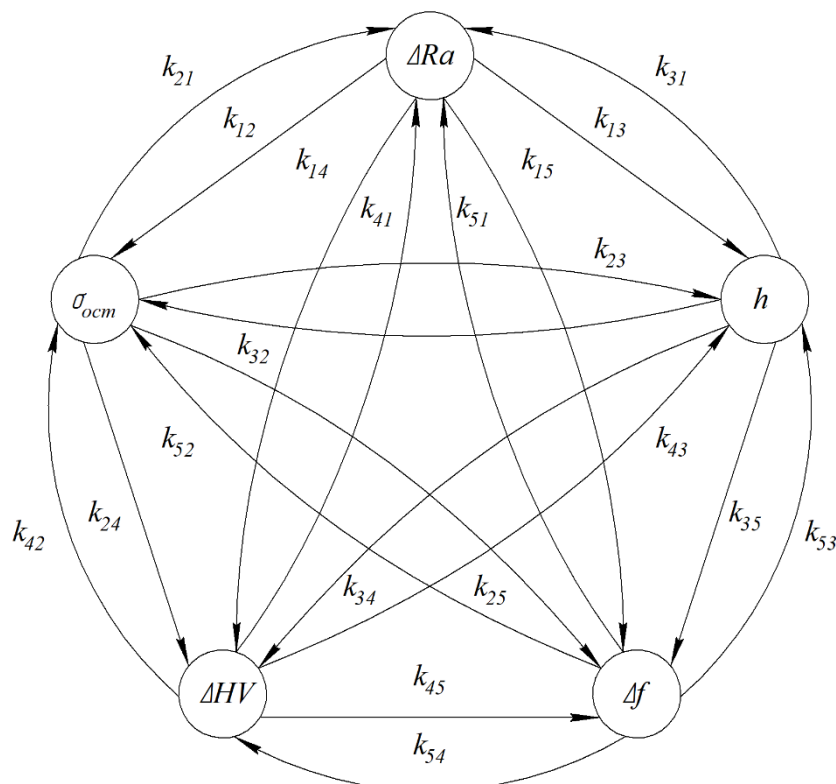


Рисунок 1. Граф критериев парного сравнения

9. Величина отклонения профиля пера лопатки (Δf) и глубина модифицированного слоя (h): Δf более важна, чем h (оценка 4), обозначим как k_{53} .

10. Величина отклонения профиля пера лопатки (Δf) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): Δf более важна, чем ΔHV (оценка 2), обозначим как k_{54} .

На основании этих сравнений строим матрицу парных сравнений критериев технологических воздействий при полировании (таблица 2).

Таблица 2. Квадратная матрица парного сравнения критериев технологических воздействий при полировании

Критерий	(ΔRa)	($\sigma_{\text{ост}}$)	(h)	(ΔHV)	(Δf)
(ΔRa)	1	7	3	1/3	5
($\sigma_{\text{ост}}$)	1/7	1	1	1	3
(h)	1/3	1	1	1/4	1/4
(ΔHV)	3	1	4	1	1/2
(Δf)	1/5	1/3	4	2	1

Проводим подсчет уровней важности критериев k_i для каждого критерия:

$$k_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$.

$$k_1 = 1 + 7 + 3 + \frac{1}{3} + 5 = 16,33;$$

$$k_2 = \frac{1}{7} + 1 + 1 + 1 + 3 = 6,1;$$

$$k_3 = \frac{1}{3} + 1 + 1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 2,83;$$

$$k_4 = 3 + 1 + 4 + 1 + \frac{1}{2} = 9,5;$$

$$k_5 = \frac{1}{5} + \frac{1}{3} + 4 + 2 + 1 = 7,53.$$

Определяем суммарный уровень важности всех рассмотренных критериев k_c

$$k_c = \sum_{i=1}^n k_i \quad (2)$$

$$k_c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 16,33 + 6,14 + 2,83 + 9,5 + 7,53 = 42,33$$

Весовые коэффициенты a_i определим по формуле:

$$a_i = \frac{k_i}{k_c} \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, n$.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{k_1}{k_c} = \frac{16,33}{42,33} = 0,3857; \\
 a_2 &= \frac{k_2}{k_c} = \frac{6,14}{42,33} = 0,1451; \\
 a_3 &= \frac{k_3}{k_c} = \frac{2,83}{42,33} = 0,0669; \\
 a_4 &= \frac{k_4}{k_c} = \frac{9,5}{42,33} = 0,2244; \\
 a_5 &= \frac{k_5}{k_c} = \frac{7,53}{42,33} = 0,1779.
 \end{aligned}$$

Сумма всех полученных весовых коэффициентов должна равняться единице. Проводим проверку:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (4)$$

$$a_i = 0,3857 + 0,1451 + 0,0669 + 0,2244 + 0,1779 = 1.$$

Для расчета весовых коэффициентов, возникающих в процессе упрочнения методами поверхностно-пластического упрочнения, назначаем сравнительные значения для выбранных критериев, основываясь на экспертных оценках [7 – 15]:

1. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$): ΔRa также важна, как и $\sigma_{ост}$ (оценка 1), обозначим как k_{12} .

2. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и глубина модифицированного слоя (h): ΔRa более важна, чем h (оценка 2), обозначим как k_{13} .

3. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): ΔRa более важна, чем ΔHV (оценка 3), обозначим как k_{14} .

4. Изменение параметров шероховатости (ΔRa) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): ΔRa также важна, как и Δf (оценка 1), обозначим как k_{15} .

5. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$) и глубина модифицированного слоя (h): $\sigma_{ост}$ более важна, чем h (оценка 8), обозначим как k_{23} .

6. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): $\sigma_{ост}$ более важна, чем ΔHV (оценка 8), обозначим как k_{24} .

7. Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): $\sigma_{ост}$ более важна, чем Δf (оценка 9), обозначим как k_{25} .

8. Глубина модифицированного слоя (h) и изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV): h более важна, чем ΔHV (оценка 4), обозначим как k_{34} .

9. Глубина модифицированного слоя (h) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): h более важна, чем Δf (оценка 5), обозначим как k_{35} .

10. Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV) и величина отклонения профиля пера лопатки (Δf): ΔHV более важна, чем Δf (оценка 3), обозначим как k_{55} .

На основании этих сравнений строим матрицу парных сравнений критериев технологических воздействий при упрочнении (таблица 3).

Таблица 3. Квадратная матрица парного сравнения критериев технологических воздействий при упрочнении

Критерий	(ΔRa)	$(\sigma_{\text{ост}})$	(h)	(ΔHV)	(Δf)
(ΔRa)	1	1	2	3	1
$(\sigma_{\text{ост}})$	1	1	8	8	9
(h)	1/2	1/8	1	4	5
(ΔHV)	1/3	1/8	1/4	1	3
(Δf)	1	1/9	1/5	1/3	1

Подсчет уровней важности критериев по формуле (1):

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 1 + 1 + 2 + 3 + 1 = 8; \\
 k_2 &= 1 + 1 + 8 + 8 + 9 = 27; \\
 k_3 &= \frac{1}{2} + \frac{1}{8} + 1 + 4 + 5 = 10,63; \\
 k_4 &= \frac{1}{3} + \frac{1}{8} + \frac{1}{4} + 1 + \frac{1}{3} = 4,71; \\
 k_5 &= 1 + \frac{1}{9} + \frac{1}{5} + \frac{1}{3} + 1 = 2,64.
 \end{aligned}$$

Суммарный уровень важности всех рассмотренных критериев (2):

$$k_c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 8 + 27 + 10,63 + 4,71 + 2,64 = 52,98$$

Весовые коэффициенты определяем по формуле (3):

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{k_1}{k_c} = \frac{8}{52,98} = 0,1511; \\
 a_2 &= \frac{k_2}{k_c} = \frac{27}{52,98} = 0,5096; \\
 a_3 &= \frac{k_3}{k_c} = \frac{10,63}{52,98} = 0,2006; \\
 a_4 &= \frac{k_4}{k_c} = \frac{4,71}{52,98} = 0,0889; \\
 a_5 &= \frac{k_5}{k_c} = \frac{2,64}{52,98} = 0,0498.
 \end{aligned}$$

Сумма всех полученных весовых коэффициентов должна равняться единице. Проводим проверку:

$$a_i = 0,1511 + 0,5096 + 0,2006 + 0,0889 + 0,0498 = 1.$$

После того, как получили показатели весовых коэффициентов, сводим их в таблицу 4 для сравнения и строим иерархическую схему, с учетом полученных весовых коэффициентов (рисунок 2).

Таблица 4. Весовой коэффициент по преобладающему параметру

Критерий	Весовой коэффициент (технологические воздействия, возникающие при полировании)	Весовой коэффициент (технологические воздействия, возникающие при упрочнении)
Изменение параметров шероховатости (ΔRa)	0,3857	0,1511
Величина остаточных напряжений в поверхностном слое ($\sigma_{ост}$)	0,1451	0,5096
Глубина модифицированного слоя (h)	0,0669	0,2006
Изменение микротвердости поверхностного слоя (ΔHV)	0,2244	0,0889
Величина отклонения профиля пера лопатки (Δf)	0,1779	0,0498

Проведённый анализ показал, что применение метода парных сравнений на основе шкалы Т. Саати позволяет формализовать и количественно оценить различия в приоритетности критериев качества поверхностного слоя лопаток турбины ГТД в зависимости от характера технологических воздействий – полирования и упрочняющей обработки методами поверхностно-пластического деформирования. Установлено, что при полировании доминирующее значение имеет критерий изменения параметра шероховатости поверхности, весовой коэффициент которого составляет 0,3857. Это свидетельствует о том, что полирование в первую очередь ориентировано на формирование благоприятной микрогеометрии поверхности и снижение концентрации напряжений, тогда как упрочняющий эффект выражен вторично. Существенную роль также играют изменение микротвёрдости поверхностного слоя (весовой коэффициент 0,2244) и величина отклонения профиля пера лопатки (весовой коэффициент 0,1779), что указывает на необходимость поиска компромисса между качеством поверхности и сохранением геометрической точности тонкостенного профиля. В то же время глубина модифицированного слоя при полировании характеризуется минимальной значимостью (весовой коэффициент 0,0669), что подтверждает ограниченность влияния данного процесса на объёмное упрочнение материала. В отличие от этого, при упрочняющей обработке методами поверхностно-пластического деформирования определяющим критерием является величина остаточных напряжений в поверхностном слое, весовой коэффициент которой достигает 0,5096. Данный результат отражает ключевую функциональную роль ППД в формировании сжимающих остаточных напряжений, непосредственно влияющих на усталостную прочность и ресурс лопаток турбины. Существенную значимость также имеет глубина модифицированного слоя (весовой коэффициент 0,2006), что указывает на важность обеспечения достаточной толщины упрочнённой зоны для стабильности эксплуатационных свойств. При этом изменение микротвёрдости поверхностного слоя (весовой коэффициент 0,0889) и величина отклонения профиля пера (весовой коэффициент 0,0498)

выступают как вторичные критерии и технологические ограничения, а не как целевые показатели процесса.

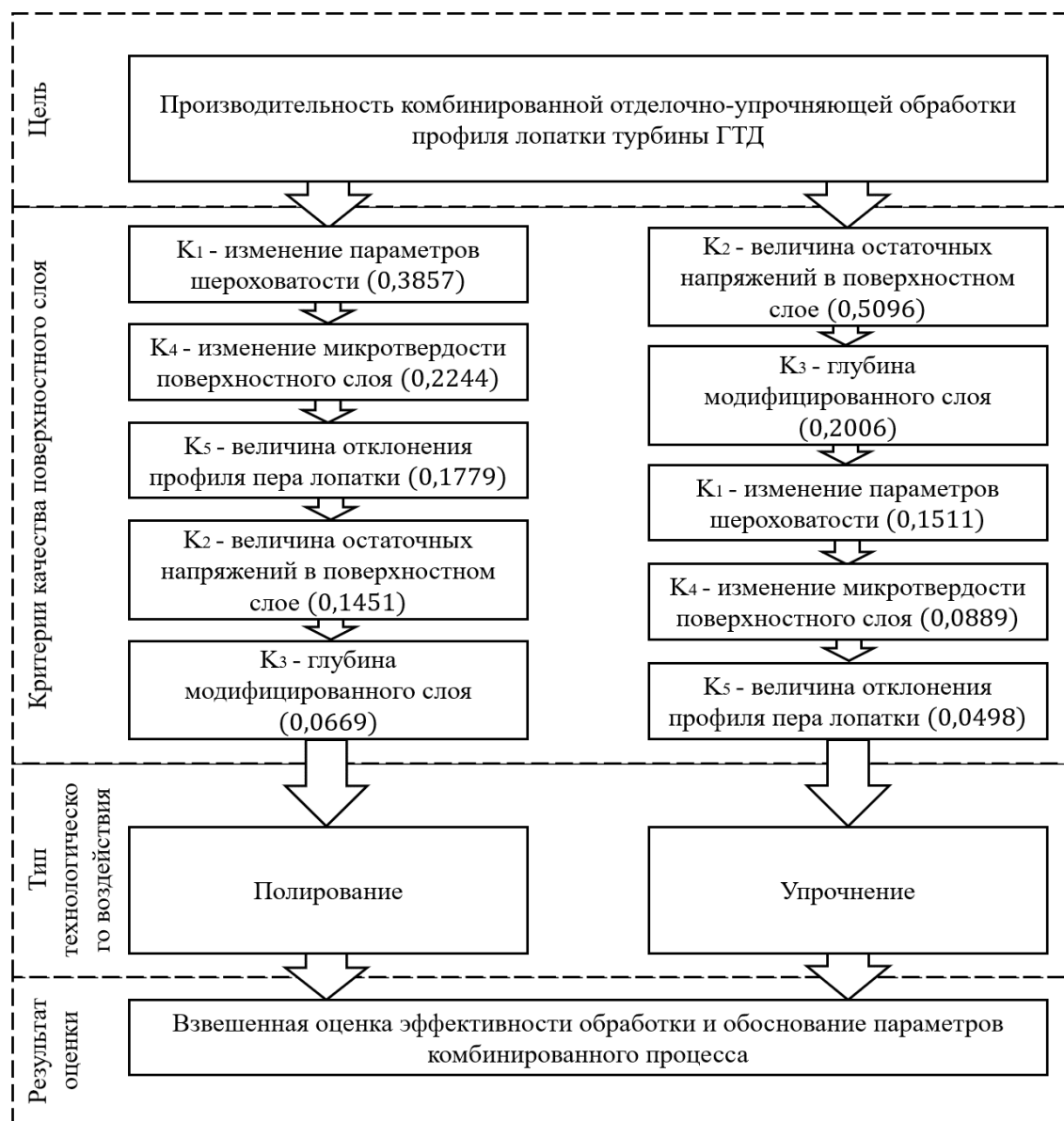


Рисунок 2. Иерархическая схема с учётом весовых коэффициентов критериев

Заключение

Сопоставление полученных весовых коэффициентов для двух видов технологических воздействий наглядно демонстрирует принципиальное различие физической сущности полирования и ППД. Полирование ориентировано преимущественно на качество поверхности и точность профиля, тогда как ППД – на формирование упрочнённого поверхностного слоя с заданным напряжённо-деформированным состоянием. Это подтверждает целесообразность раздельного определения весовых коэффициентов критериев для данных процессов и обосновывает необходимость их комбинированного применения при обработке профиля лопаток турбины ГТД.

Таким образом, использование метода парных сравнений позволяет не только количественно оценить приоритетность критериев, но и служит инструментом

обоснования рациональной последовательности и параметров комбинированной отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающей требуемое сочетание эксплуатационных и геометрических характеристик лопаток турбины.

Полученные весовые коэффициенты позволяют целенаправленно выбирать и комбинировать параметры полирования и ППД в зависимости от приоритетных требований к поверхностному слою лопаток турбины ГТД. Это обеспечивает повышение эффективности комбинированной обработки при сохранении геометрической точности профиля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:

1. Бабичев, А. П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов "Конструкт.-технол. обеспечение машиностроит. пр-в" / М-во образования Рос. Федерации, Дон. гос. техн. ун-т; [А. П. Бабичев и др.] ; под ред. А. П. Бабичева. – Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2003. – 429 с.
2. Богуслаев, В. А. Финишные технологии обработки деталей ГТД / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой – Вестник двигателестроения. – 2009. – №1. – С. 71–78.
3. Макаров, В. Ф. Оптимизация процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. Ф. Макаров, Е. Н. Бычина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4–3(288). – С. 41–47.
4. Макаров, В. Ф. Повышение надежности и качества изделий на основе снижения влияния локальных технологических концентраторов напряжений в обрабатываемых деталях / В. Ф. Макаров, С. П. Никитин, М. В. Песин, А. С. Горбунов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2017. – Т. 2. – С. 216–221.
5. Михайлов А. Н. Обеспечение постоянства контактной нагрузки при полировании сложного профиля пера лопатки турбины ГТД / А. Н. Михайлов, А. В. Анастасьев, Н. С. Пичко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2023. – № 2(81). – С. 26–34.
6. Мубаракшин, Р. М. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток / Р. М. Мубаракшин, М. Д. Дическул, Н. Н. Николаев [и др.] // Авиационные двигатели. – 2021. – № 4(13). – С. 51–62. – DOI 10.54349/26586061_2021_4_51.
7. Сергеев, С. В. Анализ способов отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей ГТД свободным абразивом / С. В. Сергеев, Т. В. Лоза, А. П. Петренко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2013. – №4(76). – С. 80–88.
8. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. / А. Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 2000. – 320 с.
9. Качан, А. Я. Критерии оценки выходных параметров процессов обработки деталей ГТД / А. Я. Качан, С. А. Уланов // Вестник двигателестроения. – 2016. – № 2. – С. 181–184.
10. Качан, А. Я. Определение оптимальной глубины пластически деформированного слоя при ППД деталей / А. Я. Качан, С. А. Уланов // Теоретические и прикладные проблемы создания авиационных двигателей и энергетических установок: тез. докл. междунар. научно-техн. конф., 16-17 октября 2014 г., г. Запорожье / АО «Мотор Сич». – Запорожье, 2014. – С. 64–66.

11. Качан, А. Я. Технологическое обеспечение несущей способности деталей ГТД пластическим деформированием / А. Я. Качан, С. А. Уланов, Е. К. Березовский // Обработка металлов давлением. – 2015. – № 2 (41). – С. 141–146.
12. Кравченко, И. Б. Современные методы упрочнения и их влияние на усталостные характеристики деталей газотурбинных двигателей / И. Б. Кравченко, В. Н. Курицин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 1-2. – С. 385–388.
13. Кротинов, Н. Б. Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей. / Н. Б. Кротинов // Вестник СГТУ. – 2014. – №3(76). – С. 68–71.
14. Скубачевский, Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Г. С. Скубачевский. – Москва : «Машиностроение», 1974. – 520 с.
15. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – Москва : Машиностроение, 2002. – 300 с.

REFERENCES

1. Babichev, A. P. Physical and technological foundations of processing methods : a textbook for university students studying in the field of preparation. diploma of specialists "Construct.-technol. mechanical engineering software. pr-v" / Ministry of Education of the Russian Federation. Federation, Don. gos. tech. University ; [A. P. Babichev et al.] ; edited by A. P. Babichev. Rostov-on-Don : Publishing House of the DSTU Center, 2003. 429 p.
2. Boguslaev, V. A. Finishing technologies for processing GTD parts / V. A. Boguslaev, A. Ya. Kachan, V. F. Mozgovoy – Bulletin of Engine Engineering. - 2009. – No. 1. – pp. 71-78.
3. Makarov, V. F. Optimization of the polishing process of blades of gas turbine engines made of titanium alloys / V. F. Makarov, E. N. Bychina // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2011. – № 4-3(288). – Pp. 41-47.
4. Makarov, V. F. Improving the reliability and quality of products based on reducing the influence of local technological stress concentrators in machined parts / V. F. Makarov, S. P. Nikitin, M. V. Pesin, A. S. Gorbunov // Proceedings of the International the symposium "Reliability and Quality". – 2017. – Vol. 2. – pp. 216-221.
5. Mikhailov A. N., Anastasiev A.V., Pichko N. S. Ensuring the constancy of the contact load when polishing the complex profile of the turbine blade tip / A. N. Mikhailov, Anastasiev A.V., Pichko N. S. // Progressive technologies and systems of mechanical engineering. – 2023. – № 2(81). – Pp. 26-34.
6. Mubarakshin, R. M. Robotic adaptive dimensional polishing of compressor and turbine blades / R. M. Mubarakshin, M. D. Dichul, N. N. Nikolaev [et al.] // Aircraft engines. – 2021. – № 4(13). – Pp. 51-62. – DOI 10.54349/26586061_2021_4_51.
7. Sergeev S. V., Loza T. V., Petrenko A. P. Analysis of methods of finishing and hardening processing of the surface of GTD parts with a free abrasive / S. V. Sergeev, Loza T. V., Petrenko A. P. // Issues of designing and manufacturing aircraft structures. – 2013. – №4(76). – Pp. 80-88.
8. Suslov, A. G. The quality of the surface layer of machine parts. / A. G. Suslov. Moscow : Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p.
9. Kachan, A. Ya. Criteria for evaluating the output parameters of the processing processes of GTD parts / A. Ya. Kachan, S. A. Ulanov // Bulletin of Engine Engineering. - 2016. – No. 2. – pp. 181-184.
10. Kachan, A. Ya. Determination of the optimal depth of the plastically deformed layer during the PPD of parts / A. Ya. Kachan, S. A. Ulanov // Theoretical and applied problems of creating

aircraft engines and power plants: thesis. dokl. international scientific and technical Conference, October 16-17, 2014, Zaporizhia / JSC "Motor Sich". Zaporozhye, 2014. pp. 64-66.

11. Kachan, A. Ya. Technological support of the bearing capacity of gas turbine engine parts by plastic deformation / A. Ya. Kachan, S. A. Ulanov, E. K. Berezovsky // Metalworking by pressure. – 2015. – № 2 (41). – Pp. 141-146.

12. Kravchenko, I. B. Modern hardening methods and their influence on the fatigue characteristics of gas turbine engine parts / I. B. Kravchenko, V. N. Kuritsin // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2010. – Vol. 12. – № 1-2. – pp. 385-388.

13. Krotinov, N. B. Surface plastic hardening of blades of gas turbine engines. / N. B. Krotinov // Bulletin of SSTU. – 2014. – №3(76). – Pp. 68-71.

14. Skubachevsky, G. S. Aviation gas turbine engines. Construction and calculation of parts / G. S. Skubachevsky. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1974. 520 p.

15. Smelyansky, V. M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation / V. M. Smelyansky. Moscow : Mashinostroenie Publ., 2002, 300 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 27.02.2026

The article was submitted February 5, 2026; approved after reviewing February 17, 2026; accepted for publication February 27, 2026.