

УДК 620.178:621.83

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПУТЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК

© В. Ф. Безъязычный¹, Е. В. Шеховцева²

Статья поступила 17 февраля 2016 г.

Исследованы контактная прочность, шероховатость и микроструктура рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес газотурбинного двигателя (ГТД), изготовленных электроэрозионной обработкой (ЭЭО) с последующей химико-термической обработкой. Выполнен сравнительный анализ материалов деталей, обработанных по разработанной и серийной технологиям. Исследовано качество поверхностного слоя рабочих поверхностей зубьев зубчатых передач ГТД, изготовленных ЭЭО. Установлено, что ЭЭО повышает контактную прочность и уменьшает шероховатость обработанной поверхности. Спектральный анализ поверхностей, изготовленных по предлагаемой технологии, показал отсутствие изменения химического состава.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка (ЭЭО); химико-термическая обработка; контактная прочность; поверхностный слой; шероховатость; микроструктура; химический состав.

Основная цель работы — повышение контактной прочности рабочих поверхностей зубчатых колес в результате усовершенствования технологии изготов-

ления закрытого цилиндрического венца наружного зацепления цельного блока зубчатых колес с применением электроэрозионной и химико-термической обработок.

Цилиндрические эвольвентные закрытые венцы цельных блоков зубчатых колес внешнего зацепления [1] изготавливают на электроэрозионном станке с ЧПУ. Зубчатый венец (рис. 1) включает боковые поверхности 1, образующие вершин 2 и впадин 3 между

¹ Рыбинский государственный авиационный технологический университет им. П. А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия;
e-mail: technology@rsatu.ru

² ПАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск, Россия;
e-mail: evgeniya.shehovtseva@npo-saturn.ru

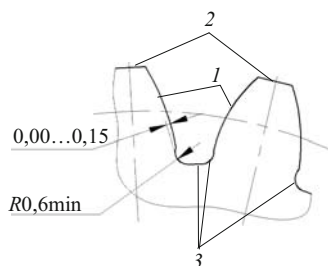


Рис. 1. Эвольвентный зубчатый венец

зубьев. Траекторию перемещения проволоочного электрода-инструмента задают по контуру венца.

Параметры обрабатываемых опытных деталей следующие: модуль $m = 3$; число зубьев $z = 19$, степень точности 5-5-5; коэффициент смещения $x = 0$; угол профиля $\alpha = 25^\circ$. Микротвердость поверхностей образцов из сталей 20Х3МВФ-Ш, (ЭИ415-Ш), 18Х2Н4МА, 12Х2Н4А перед ЭО составила: 60 – 65 HRC, — под нитроцементацию; 33 – 45 HRC, — под ионное азотирование.

Исследовали детали, изготовленные по технологии производства цельных блоков зубчатых колес ГТД [2]. Испытания проводили на роликовой машине и на спроектированной установке на зубчатых колесах [3]. Рабочие поверхности исследуемых образцов из высоколегированных сталей упрочняли с применением нитроцементации и ионного азотирования.

Сначала образцы испытывали на двухпозиционной роликовой машине с нагружающим устройством. Базовое число циклов нагружений принято $N = 5 \cdot 10^7$ циклов. Контактную выносливость оценивали путем визуального осмотра рабочих поверхностей через каждые 10^6 циклов нагружения до появления на поверхности видимых дефектов. Затем были проведены испытания образцов на специальной установке на зубчатых колесах [2].

На рис. 2 представлены значения контактных напряжений, полученные для образцов из стали 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш). Согласно полученным данным контактные напряжения на образцах, изготовленных лезвийной обработкой с последующими шлифованием и нитроцементацией (при глубине упрочняющего слоя 0,6 – 0,85 мм), составили 1845 МПа, а с ионным азотированием (с глубиной слоя 0,28 – 0,37 мм) — 1570 МПа. Для образцов, изготовленных ЭО с нитроцементацией (при глубине диффузионного слоя 0,79 – 1,0 мм), контактные напряжения составили 1975 МПа, а с ионным азотированием (с глубиной слоя 0,3 – 0,4 мм) — 1690 МПа.

Указанные значения превышают верхний уровень предела контактной прочности образцов из стали 20Х3МВФ-Ш согласно ГОСТ 21354-87:

1506,5 МПа — для образцов, изготовленных ЭО с применением нитроцементации;

1426 МПа — для образцов, изготовленных лезвийной обработкой с последующими шлифованием и нитроцементацией;

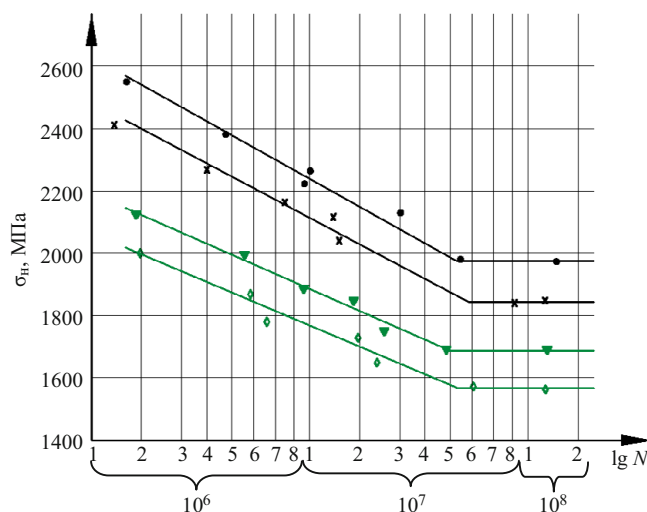


Рис. 2. Экспериментальные значения контактных напряжений для роликов, изготовленных из стали 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш): ● — нитроцементация после электроэрозионной обработки с глубиной диффузионного слоя 0,79 – 1,0 мм; × — нитроцементация после лезвийной обработки и шлифования с глубиной упрочненного слоя 0,6 – 0,85 мм; ▼ — ионное азотирование после электроэрозионной обработки с глубиной диффузионного слоя 0,3 – 0,4 мм; ◇ — ионное азотирование после лезвийной обработки и шлифования с глубиной упрочненного слоя 0,28 – 0,37 мм

1050 МПа — для образцов, изготовленных ЭО с применением ионного азотирования.

На рис. 3 представлены образцы, изготовленные ЭО с нитроцементацией из стали 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш), после испытания на контактную прочность со следами питтинга на рабочих поверхностях. На первом комплекте образцов первые признаки питтинга появились при $3,5 \cdot 10^5$ циклах (мелкие оспинки размером 0,3 – 0,5 мм). В процессе дальнейших испытаний происходило прогрессирующее выкрашивание поверхности образца в виде мелких оспинок в новых областях и крупных язвочек в местах, где были мелкие оспинки. При наработке от $8 \cdot 10^5$ до 10^6 циклов происходит процесс соединения отдельных язвочек и образуется одно большое пятно контактных повреждений. Постепенно это пятно разрастается как в длину — по образующей, так и в ширину — по высоте контакта образцов. При наработке $1,75 \cdot 10^6$ циклов питтинг испытываемой поверхности достигает всей высоты контактируемого образца 1 (см. рис. 3).

Результаты испытаний (наработка) образцов представлены в табл. 1. По характеру разрушения образца 7 (см. рис. 3) видно, что питтинг развивается по всей его поверхности. Следовательно, разрушение поверхности происходит от действующей контактной нагрузки.

При испытании образцов из стали 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш), изготовленных ЭО с применением ионного азотирования и полученных ЭО с нитроцементацией, на контактную прочность образование и развитие выкрашивания в них происходило аналогично. Однако в последнем случае питтинг возникал медлен-

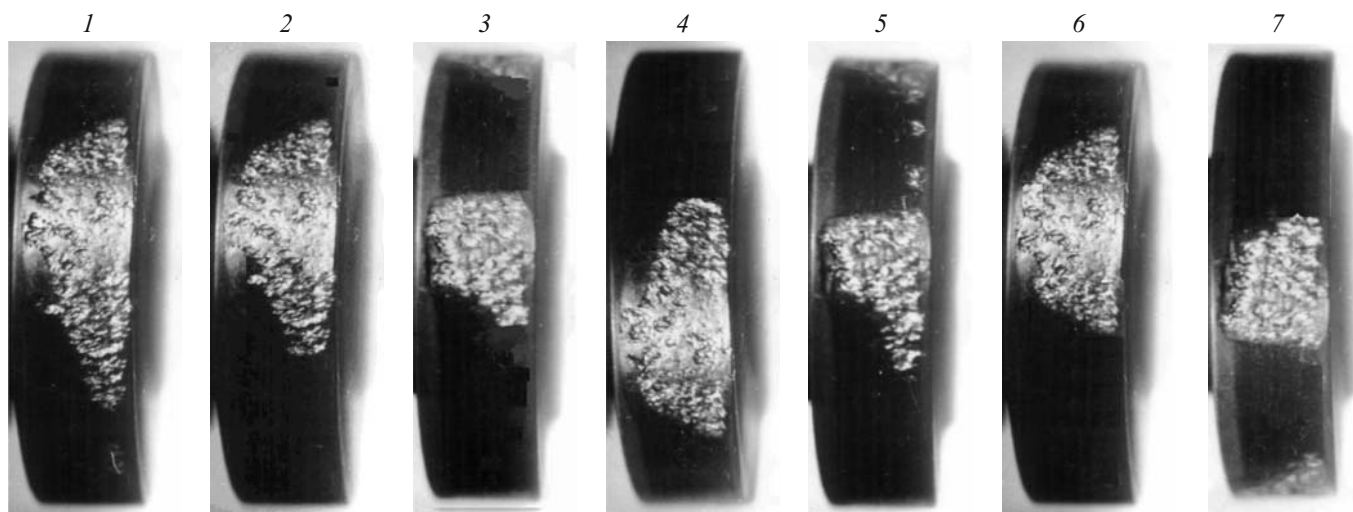


Рис. 3. Экспериментальные образцы, изготовленные из стали 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш) ЭЭО с нитроцементацией, после испытаний: для образцов 1 – 7 σ_n (МПа) и h (мм) соответственно составляют 2550 и 0,81; 2380 и 0,9; 2260 и 0,87; 2220 и 0,79; 2140 и 0,98; 1980 и 0,95; 1970 и 1,0

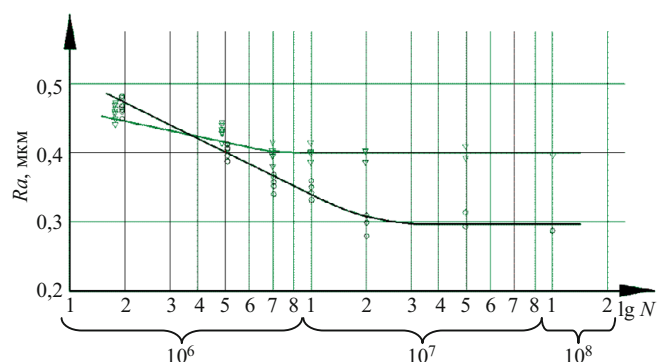


Рис. 4. Изменение шероховатости рабочих поверхностей в процессе эксплуатации образцов, изготовленных из стали 20Х3МВФ-Ш (ЭИ415-Ш) с нитроцементацией: ○ — электроэрозионная обработка; ▽ — лезвийная обработка с последующим шлифованием

нее в результате большей (минимум в 1,35 раз) твердости поверхностного слоя, а его развитие шло быстрее из-за меньшей толщины диффузионного слоя и большего перепада значений твердости между поверхностным слоем и сердцевиной детали.

Исследование взаимосвязи контактных напряжений от числа циклов нагружения показало влияние

Таблица 1. Числа циклов, соответствующие стадиям развития питтинга

Номер образца	Начальное выкрашивание	Развитие дефекта	Разрушение
1	$3,5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5 - 10^6$	$1,75 \cdot 10^6$
2	$8,2 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^6 - 2,95 \cdot 10^6$	$4,76 \cdot 10^6$
3	$5,8 \cdot 10^6$	$6,69 \cdot 10^6 - 8,1 \cdot 10^6$	$9,85 \cdot 10^6$
4	$5,31 \cdot 10^6$	$7,05 \cdot 10^6 - 8,76 \cdot 10^6$	10^7
5	$5,28 \cdot 10^6$	$8,3 \cdot 10^6 - 0,5 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$
6	$6,15 \cdot 10^6$	$9,95 \cdot 10^6 - 1,23 \cdot 10^7$	$5,44 \cdot 10^7$
7	$6,04 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^7 - 8,2 \cdot 10^7$	$1,64 \cdot 10^8$

ЭЭО на параметры надежности зубчатых колес: для нитроцементированных деталей контактная прочность повышается на 5 – 10 %, для азотируемых деталей — на 5 – 8 %.

Таким образом, процессы нитроцементации и ионного азотирования совместно с ЭЭО повышают эксплуатационные свойства зубчатых колес ГТД. Экспериментально определенный предел выносливости образцов, изготовленных ЭЭО, выше, чем предел выносливости образцов, подвергнутых лезвийной обработке и шлифованию. Из рис. 2 видно, что контактная выносливость образцов с нитроцементацией выше, чем с ионным азотированием.

Критерием оценки микрогеометрии поверхности (ГОСТ 2789–73) контактируемых поверхностей в процессе работы было принято среднесафметическое отклонение профиля Ra . На рис. 4 представлено изменение шероховатости поверхностей зубьев в процессе эксплуатации при различных видах обработки рабочих поверхностей для образцов из стали 20Х3МВФ-Ш.

При изготовлении образцов лезвийной обработкой с последующим шлифованием шероховатость $Ra = 0,4$ мкм достигается приблизительно при $7 \cdot 10^6$ циклах, а при изготовлении их ЭЭО шероховатость $Ra = 0,3$ мкм — при $2 \cdot 10^6$ циклах, т.е. позже.

Установлено, что микротвердость образцов, изготовленных лезвийной обработкой с последующим шлифованием, ниже (не более чем на 3 %) микротвердости образцов, изготовленных ЭЭО.

После испытаний рабочих поверхностей образцов исследовали микроструктуру контактируемых поверхностей. На рис. 5, а, б представлена микроструктура образца из стали 20Х3МВФ-Ш, полученного лезвийной обработкой и шлифованием с применением нитроцементации. Микротвердость поверхностного слоя составила 647 HV, твердость сердцевины — 400 HV,

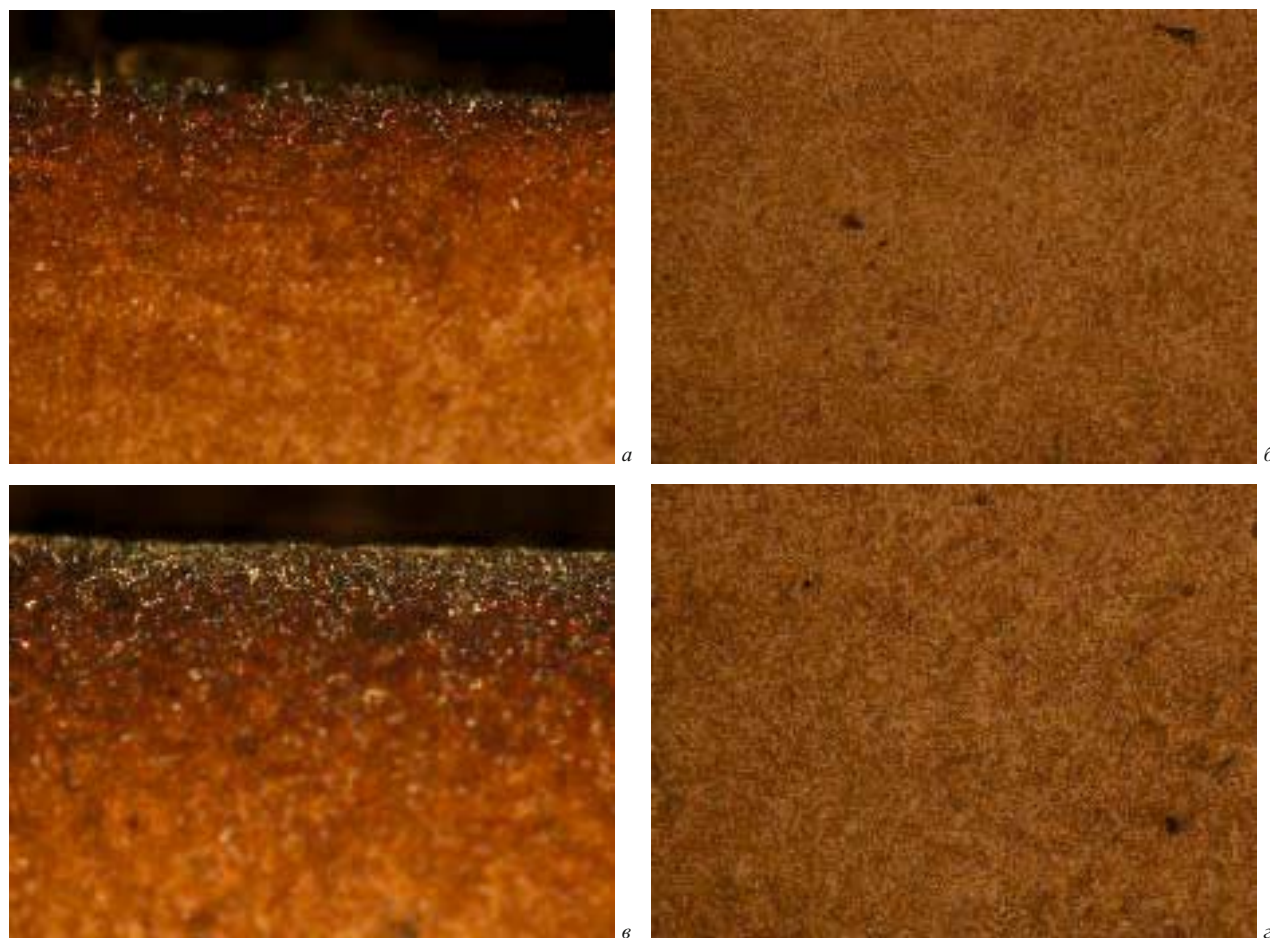


Рис. 5. Микроструктура образца из стали 20X3MBФ-Ш, изготовленного лезвийной обработкой, с последующим шлифованием нитроцементацией (а, б) и ЭЭО с нитроцементацией (в, г), $\times 500$: а, в — поверхностный слой; б, г — сердцевина

глубина нитроцементного слоя — 1,0 мм, число циклов нагружения — $1,3 \cdot 10^8$. На рис. 5, в, г показана микроструктура образца из этой же стали, изготовленного ЭЭО с нитроцементацией. Микротвердость поверхностного слоя — 645 HV, твердость сердцевины — 412 HV, глубина диффузионного слоя — 0,95 мм, число циклов нагружения — $1,64 \cdot 10^8$.

Нитроцементированный слой образцов (см. рис. 5, а, в) оказался удовлетворительным. По интенсивности насыщения и карбидной сетке его структура соответствует 10-му баллу, а по распределению структурных составляющих — 1-му баллу (ГОСТ 5639–82). Структура состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов, распределенных равномерно. Микроструктура сердцевины нитроцементируемых слоев образцов (см. рис. 5, б, г) по наличию структурно-свободного феррита является допустимой и относится к 4-му баллу по ГОСТ 5639–82. Микроструктуры поверхностного слоя и сердцевины образцов, изготовленных ЭЭО и лезвийной обработкой с шлифованием, отличаются количеством остаточного аустенита — 15 и 20 % соответственно. Кроме того, в структуре упрочненного слоя образцов, изготовленных ЭЭО, иглы мартенсита мельче и карбидная сетка раздроблена.

Для микроструктуры образцов из разных материалов, изготовленных ЭЭО, характерно мелкозернистое строение без ярко выраженных границ зерен. Такая микроструктура предпочтительней в связи с уменьшением количества остаточного аустенита и повышением качества структуры упрочненного слоя.

Сравнительный спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, нарушений химического состава не выявил. Результаты химического анализа образцов из материала 20X3MBФ-Ш приведены в табл. 2.

Полученные экспериментальные данные (см табл. 2) отвечают требованиям ГОСТ 20072–74 для материала 20X3MBФ-Ш (ЭИ1415-Ш). Содержание вредных примесей в стали 20X3MBФ-Ш (ЭИ1415-Ш) согласно ГОСТ 20072–74 и полученное экспериментально, %: $\leq 0,025$ S, $\leq 0,030$ P; $\leq 0,030$ Ni, $\leq 0,20$ Cu.

Спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, показал, что в результате ЭЭО частицы материала электрода-инструмента не насыщают поверхностный слой детали. Следовательно, нарушений химического состава не происходит, содер-

Таблица 2. Результаты спектрального анализа химического состава образцов из 20Х3МВФ-Ш

Метод обработки и химико-термической обработки	Химические элементы, %							
	Fe	C	Si	Mg	Cr	Mo	V	W
ЭЗО и ионное азотирование	94,99	0,19	0,17	0,28	2,83	0,46	0,67	0,41
Лезвийная обработка, шлифование и ионное азотирование	94,79	0,19	0,17	0,29	2,96	0,47	0,72	0,41
ЭЗО и нитроцементация	94,97	0,19	0,17	0,28	2,85	0,46	0,68	0,40
Лезвийная обработка, шлифование и нитроцементация	94,92	0,19	0,17	0,27	2,88	0,46	0,70	0,41

жание химических элементов находится в пределах нормы.

Полученные результаты работы имеют практическую значимость в плане обеспечения эксплуатационного качества деталей авиационных двигателей.

Таким образом, исследование показателей нагрузочной способности зубчатых колес на установке замкнутого типа позволило заключить, что в результате применения разработанной ЭЗО контактная прочность для нитроцементированных поверхностных слоев деталей увеличивается на 5–10 %, для азотируемых слоев — на 5–8 %, шероховатость рабочих поверхностей уменьшается на 25 % по сравнению с рабочими поверхностями, изготовленными лезвийной обработкой.

Электроэрозионная обработка позволяет увеличить твердость нитроцементируемых и азотируемых поверхностей. Относительный прирост твердости при глубине диффузионного слоя более 0,79 мм составляет 3 %.

На основе экспериментальных исследований выявлено влияние ЭЗО на микроструктуру поверхностного слоя и сердцевины зубьев: при нитроцементации деталей уменьшается количество остаточного аустенита в 1,33 раза, улучшается структура упрочненного слоя (иглы мартенсита становятся мельче, происходит дробление карбидной сетки), что свидетельствует о его высоком качестве.

Спектральный анализ материалов деталей, обработанных по предлагаемой технологии, показал, что изменений химического состава не происходит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2403132 РФ, МПК⁷ В 23 Н9/00. Способ электроэрозионной обработки закрытого венца цельного блока зубчатых колес / Безъязычный В. Ф., Шеховцева Е. В.; заявитель и патентообладатель: Рыбинская государственная технологическая академия имени П. А. Соловьева. — № 2009106885/02; заявл. 26.02.2009; опубл. 10.11.2010. Бюл. № 31.
2. Шеховцева Е. В., Шеховцева Т. В. Использование электроэрозионной обработки для обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических зубчатых колес ГТД / Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 11. С. 14–16.
3. Шеховцева Е. В. Методика определения контактной усталости цилиндрических зубчатых колес ГТД / Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева: сб. науч. тр. 2008. № 1(13). С. 127–131.

REFERENCES

1. RF Pat. 2403132, MPK⁷ B 23 H9/00. Method EDM for closed wreath of integral block of gear teeth / Bez'yazychnyi V. F., Shekhovtseva E. V.; applicant and owner: P. A. Solovyev Rybinsk state technological academy. — N 2009106885/02; appl. 26.02.2009; publ. 10.11.2010. Byull. Otkryt. Izobret. N 31 [in Russian].
2. Shekhovtseva E. V., Shekhovtseva T. V. Application EDM for assurance performances of spur gears of gas turbine engines / Sbornik Mashinostr. Priborostr. 2007. N 11. P. 14–16 [in Russian].
3. Shekhovtseva E. V. The method for determination of contact weariness of spur gears of gas turbine engines / Vestnik Rybinsk. Gos. Aviats. Tekhnol. Akad. im. P. A. Solov'eva: sb. Nauch. Tr. 2008. N 1(13). P. 127–131 [in Russian].