

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ВЕНЦА ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНТУРНОЙ ОБРАБОТКИ

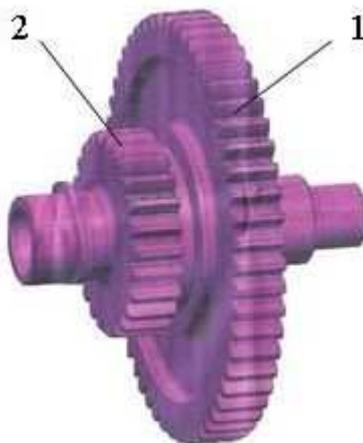
Е.В. Шеховцева

*Разработан способ электроэрозионной обработкой (ЭЭО) закрытого венца цельного блока зубчатых колес газотурбинного двигателя (ГТД). Проведены исследования контактной прочности рабочих поверхностей зубьев, изготовленных ЭЭО с последующим упрочнением.*

*Ключевые слова:* блок зубчатых колес, закрытый венец, электроэрозионная обработка (ЭЭО), контактная прочность.

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) уже несколько десятилетий позволяет решать сложные технологические задачи при изготовлении деталей сложной конфигурации из обрабатываемых материалов. ЭЭО позволяет конструкторам и технологам выбрать оптимальное сочетание конструкции и материала детали с эффективным технологическим процессом.

Электроэрозионная контурная обработка широко применяется для изготовления зубчатых колес с наружными зубчатыми венцами [1–6]. Использование ЭЭО для обработки закрытого венца (рис. 1) блоков зубчатых колес газотурбинных двигателей (ГТД) позволяет соединить производительность с необходимым качеством поверхности и точностью профиля венца с обеспечением норм прочности передачи. При этом увеличивается надежность конструкции блоков колес, снижается влияние качества сборки на пятно контакта с уменьшением элементов в размерной сборочной цепочке приводов ГТД.



**Рис. 1. Блок зубчатых колес: 1 – открытый венец; 2 – закрытый венец**

Целью работы является усовершенствование технологии изготовления цельных блоков зубчатых колес ЭЭО с применением химико-термической обработки (ХТО) для повышения контактной прочности.

Разработанный способ изготовления профильных цилиндрических эвольвентных закрытых венцов цельных блоков зубчатых колес внешнего зацепления [7] заключается в том, что для формообразования зубчатого венца – боковых поверхностей 1, образующие вершин 2 и впадин 3 между зубьев – (рис. 2) на базе 3D-модели детали на станке с ЧПУ задают траекторию перемещений проволочного электрода-инструмента по контуру венца (рис. 3) с обеспечением размеров, указанных на рис. 2.

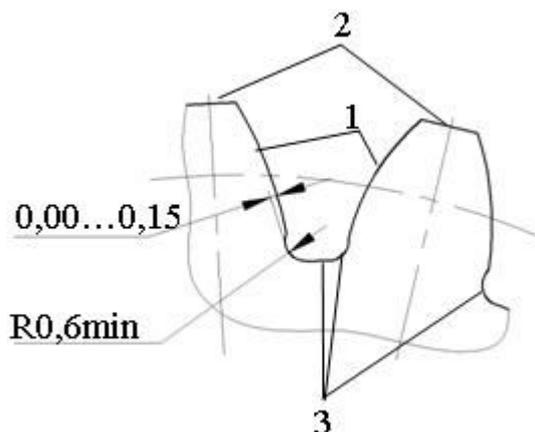


Рис. 2. Профиль зубчатый венец

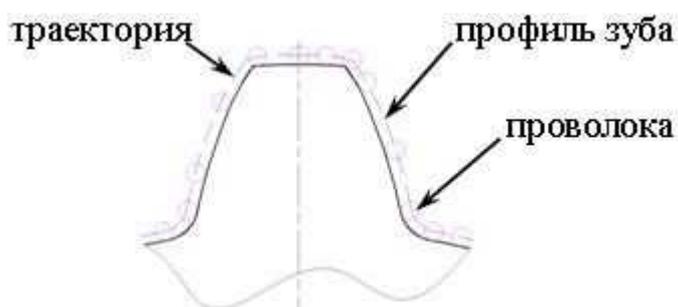
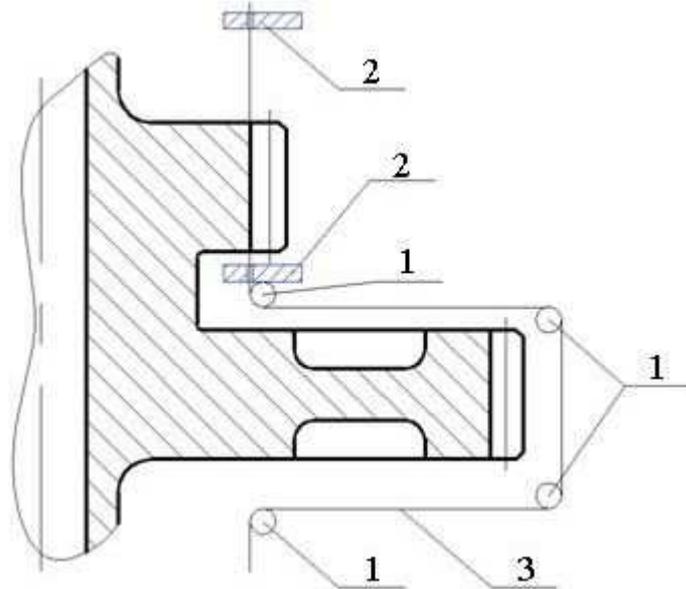


Рис. 3. Схема обработки зубчатого венца

Опытные образцы зубчатых колес изготавливались со следующими параметрами: модуль  $m=3$ , число зубьев  $z=19$ , степень точности 5–5–5, коэффициент смещения  $x=0$ , угол профиля  $\alpha=25^\circ$  – из стали 20Х3МВФ–Ш с применением нитроцементации или ионного азотирования.

Деталь базируется на станке в стандартном приспособлении по оси блока зубчатых колес. Проволочный электрод-инструмент в специальном приспособлении (рис. 4) при помощи алмазных направляющих 2 и роликов 1, огибая открытый венец, подводится к детали.

Обработка осуществляется за несколько циклов по контуру зубчатого закрытого венца цельного блока зубчатых колес при повороте детали вокруг ее оси с обеспечением требуемой степени точности зубчатого венца. Пример режимов ЭЭО в зависимости от количества циклов представлен в таблице.

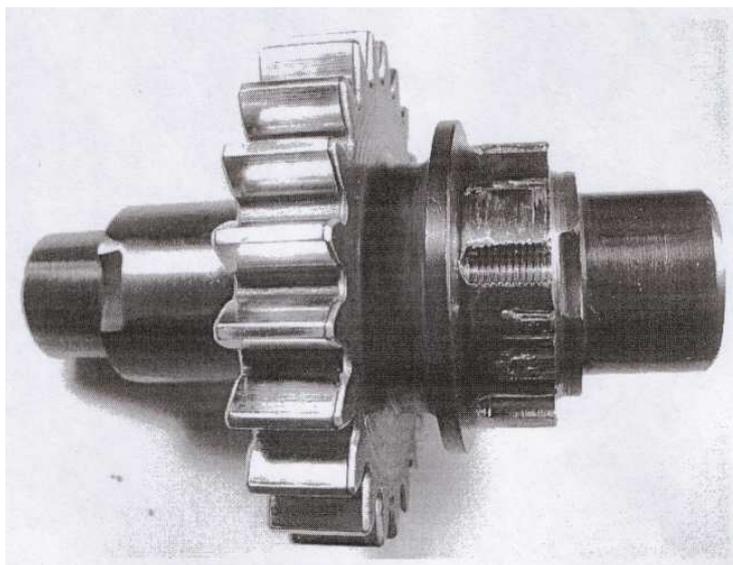


**Рис. 4. Схема ЭЭО закрытого венца цельного блока зубчатого колеса**

**Режимы электроэрозионной обработки**

Наименование параметра	Циклы обработки		
	1	2	3
Длительность импульса, мкс	64	16	8
Рабочая частота тока, кГц	14	125	200
Средняя сила тока, А	32	14	10
Зазор между проволокой и деталью, мм	0,07	0,015	0,005
Среднее рабочее напряжение, В	42	28	25

Были выполнены исследования деталей (рис. 5), изготовленных предложенным способом по технологии, которая изложена в работе [8].



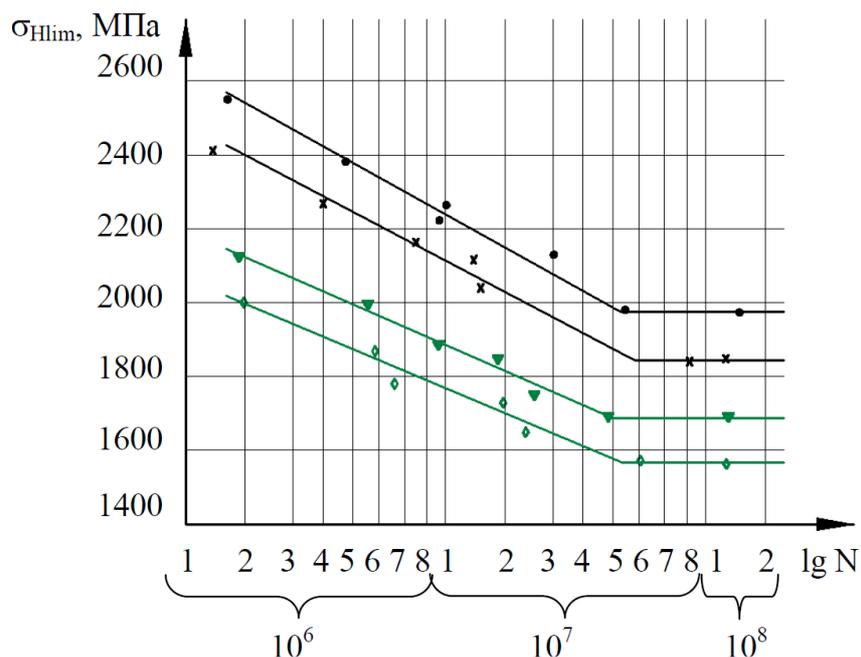
**Рис. 5. Опытный образец**

Исследования проводились на роликовой машине и на спроектированной установке на зубчатых колесах. Исследовались образцы из высоколегированной стали с применением нитроцементации и ионного азотирования.

Основными технологическими и конструкторскими характеристиками зубчатых колес являются: степень точности – 5–5–5, шероховатость поверхности –  $Ra=0,2-0,4$  мкм, термическая обработка – при ионном азотировании глубина слоя 0,2...0,4 мм, твердость поверхностного слоя не менее 80 HRC и сердцевины – 321...388 HB (36,5...42,5 HRC); при нитроцементации глубина слоя 0,6...1,2 мм, твердость поверхностного слоя не менее 59 HRC и сердцевины – 33...45 HRC.

Испытания образцов на контактную прочность проводились в соответствии с рекомендациями Р50–54–30–87 (Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость). На основании рекомендаций необходимо иметь не менее 7–8 одинаковых образцов. При этом каждый образец испытывают только при одной величине напряжений до разрушения или до заданного (базового) числа циклов.

На рис. 6 представлены значения контактных напряжений исследуемых образцов из материала 20Х3МВФ–Ш (ЭИ415–Ш).



**Рис. 6. Экспериментальные значения контактных напряжений образцов, изготовленных из 20Х3МВФ–Ш (ЭИ415–Ш):**

- - нитроцементация после электроэрозионной обработки с глубиной диффузионного слоя 0,79...1,0 мм; x - 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

Согласно полученным данным, значения контактных напряжений на образцах с нитроцементацией (при глубине упрочняющего слоя 0,6...0,85 мм), изготовленных лезвийной обработкой с последующим шлифованием составили 1845 МПа, а при ионном азотировании с глубиной слоя 0,28...0,37 мм – 1570 МПа. Для образцов, изготовленных ЭЭО с нитроцементацией при глубине диффузионного слоя 0,79...1,0 мм, значения контактных напряжений составили 1975 МПа, а при ионном азотировании с глубиной слоя 0,3...0,4 мм – 1690 МПа.

Указанные значения превышают верхний уровень предела контактной прочности образцов из стали 20Х3МВФ–Ш, определенный ГОСТ 21354–87:

1506,5 МПа – для образцов, изготовленных ЭЭО с применением нитроцементации;

1426 МПа – для образцов, изготовленных лезвийной обработкой с последующим шлифованием с применением нитроцементации;

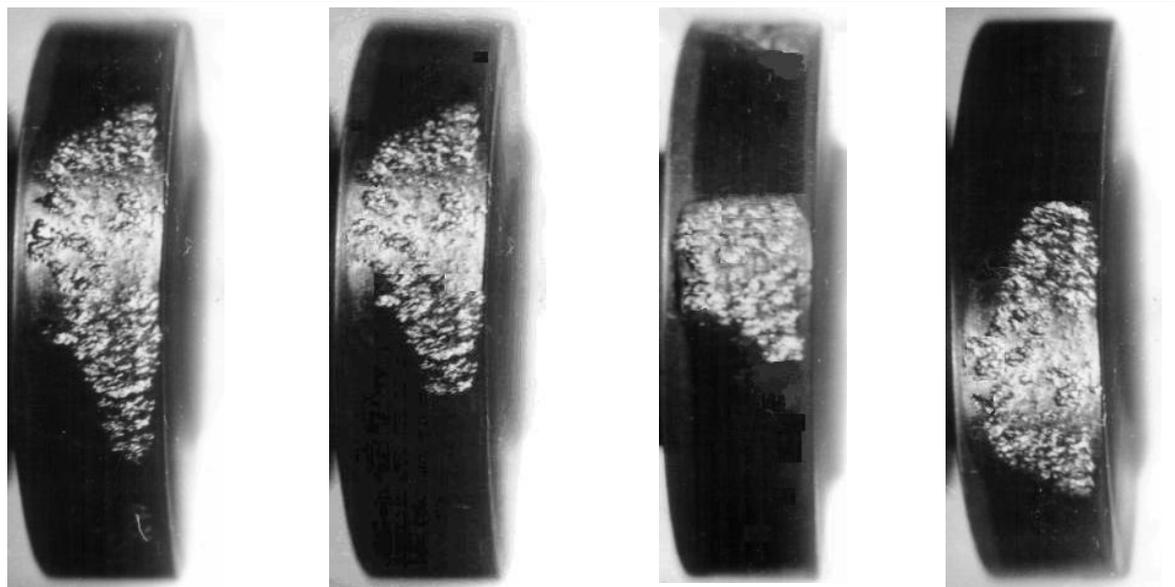
1050 МПа – для образцов, изготовленных с применением ионного азотирования.

На рис. 7 представлены результаты исследований образцов, изготовленных ЭЭО с нитроцементацией из 20Х3МВФ–Ш (ЭИ415–Ш), на контактную прочность со следами питтинга на рабочих поверхностях.

На первом комплекте образцов первые признаки питтинга появились при  $(3,5 \cdot 10^5)$  циклов (мелкие оспинки 0,3...0,5 мм). В процессе дальнейших испытаний происходило прогрессирующее выкрашивание поверхности образца в виде мелких оспинок в новых местах 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 (рис. 7, а).

При испытании второго комплекта образцов первые признаки питтинга появились при  $(8,2 \cdot 10^5)$  циклов. Происходит процесс соединения отдельных язвочек и образуется одно большое пятно контактных повреждений при наработке от  $(1,52 \cdot 10^6)$  до  $(2,95 \cdot 10^6)$  циклов. При наработке  $(4,76 \cdot 10^6)$  циклов происходит разрушение поверхности образца под действием контактной нагрузки (рис. 7, б).

При испытании третьего комплекта образцов появились первые признаки питтинга при  $(5,8 \cdot 10^6)$  циклов. При наработке от  $(6,69 \cdot 10^6)$  до  $(8,1 \cdot 10^6)$  циклов происходит процесс соединения отдельных язвочек и образуется одно большое пятно контактных повреждений. При наработке  $10^7$  циклов происходит разрушение поверхности образца под действием контактной нагрузки (рис. 7, в).

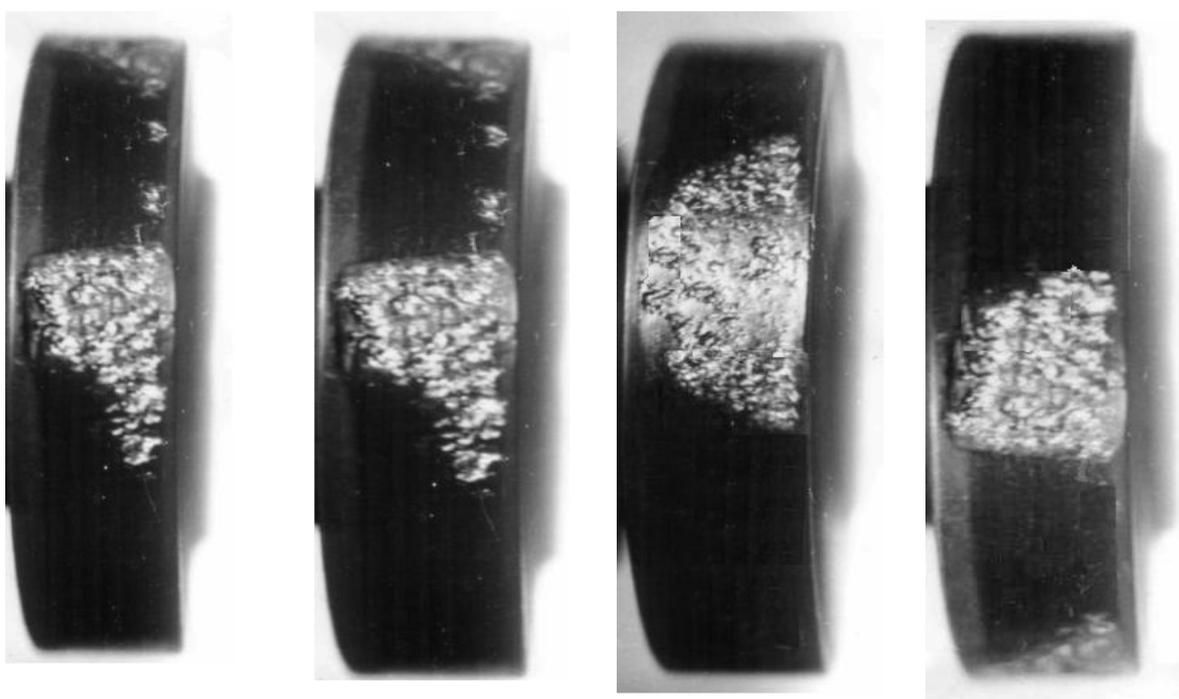


**а**  
 $N_{ц} = (1,75 \cdot 10^6)$ ,  
 $\sigma_H = 2550 \text{ МПа}$ ,  $h = 0,81 \text{ мм}$

**б**  
 $N_{ц} = (4,76 \cdot 10^6)$ ,  
 $\sigma_H = 2380 \text{ МПа}$ ,  $h = 0,9 \text{ мм}$

**в**  
 $N_{ц} = 10^7$ ,  $\sigma_H = 2260 \text{ МПа}$ ,  $h = 0,87 \text{ мм}$

**г**  
 $N_{ц} = (9,5 \cdot 10^6)$ ,  
 $\sigma_H = 2220 \text{ МПа}$ ,  
 $h = 0,79 \text{ мм}$



**д**  
 $N_{ц} = (3,05 \cdot 10^7)$ ,  $\sigma_H = 2140 \text{ МПа}$ ,  
 $h = 0,98 \text{ мм}$

**е**  
 $N_{ц} = (5,44 \cdot 10^7)$ ,  
 $\sigma_H = 1980 \text{ МПа}$ ,  
 $h = 0,95 \text{ мм}$

**ж**  
 $N_{ц} = (1,64 \cdot 10^8)$ ,  
 $\sigma_H = 1970 \text{ МПа}$ ,  
 $h = 1,0 \text{ мм}$

**Рис. 7. Экспериментальные образцы, изготовленные ЭЭО из 20Х3МВФ–Ш (ЭИ415–Ш) с нитроцементацией, после испытаний**

Испытания четвертого комплекта образцов прошли почти аналогично третьему комплекту (рис. 7, г).

Первые признаки питтинга при испытании пятого комплекта образцов появились при  $(5,28 \cdot 10^6)$  циклов. В дальнейшем процесс развития питтинга происходил подобно предыдущим комплектам, но только медленнее. Так при  $(3 \cdot 10^7)$  циклов достигается необходимый признак усталостного разрушения испытываемой поверхности образца (рис. 7, д).

При испытании шестого комплекта образцов первые признаки питтинга появились при  $(6,15 \cdot 10^6)$  циклов. Дальнейшее развитие питтинга происходило аналогично предыдущим комплектам, но медленнее. Необходимый признак усталостного разрушения испытываемой поверхности образца достигается при  $(5,44 \cdot 10^7)$  циклов (рис. 7, е).

Первые признаки питтинга (в виде мелких оспинок) на седьмом комплекте испытываемого образца появились при  $(6,04 \cdot 10^6)$  циклов. В процессе дальнейших испытаний происходило прогрессирующее выкрашивание поверхности образца в виде мелких оспинок в новых местах и крупных язвочек в местах, где были мелкие оспинки. При наработке от  $(7 \cdot 10^7)$  до  $(8,2 \cdot 10^7)$  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  $(1,64 \cdot 10^8)$  циклов питтинг испытываемой поверхности достигает всей высоты контактируемого образца. Следовательно, происходит разрушение поверхности образца от действующей контактной нагрузки (рис. 7, ж).

При испытании образцов, изготовленных ЭЭО с применением ионного азотирования из 20ХЗМВФ–Ш (ЭИ415–Ш), на контактную прочность образование и развитие выкрашивания происходило аналогично образцам, изготовленным ЭЭО с применением нитроцементации, но образование питтинга происходило медленнее в результате большей твердости поверхностного слоя (твердость выше минимум в 1,35 раз), а его развитие быстрее из-за меньшей толщины диффузионного слоя и большего перепада значений твердости между поверхностным слоем и сердцевиной детали.

Результаты испытаний показали, что предел контактной выносливости повышается с увеличением глубины нитроцементированного слоя, с обеспечением требуемой глубины азотируемого слоя и с уменьшением градиента концентрации углерода (и азота). Наибольшей контактной прочностью обладают нитроцементированные слои, для которых концентрация углерода (азота) имеет протяженную площадку в приповерхностной области.

Проведенное исследование взаимосвязи контактных напряжений от числа циклов нагружения установило влияние ЭЭО на параметры надежности зубчатых колес и показало, что контактная прочность увеличивается для нитроцементированных деталей на 5...10 %, для азотируемых деталей

на 5...8 %. Экспериментально определенный предел выносливости образцов, изготовленных ЭЭО, выше, чем предел выносливости образцов, обработанных лезвийной обработкой и шлифованием.

### Список литературы

1. Патент 2212317 РФ. Способ электроэрозионной обработки зубчатых колес / Д.В. Кравченко, С.И. Рязанов, Е.В. Брехов. Оpubл. 20.09.03. Бюл. № 35.
2. Худобин Л.В., Рязанов С.И., Кравченко Д.В. Контурное электроэрозионное вырезание – альтернативный способ формирования зубчатых колес // Вестник машиностроения. 1998. № 3. С. 19–21.
3. Illinois Manufacturer stays on target with EDM // Model machine shop. V. 67. № 4. 1994. P. 132.
4. McLaren changes Glar with Wire EDM // Metalwork Production. V. 139. № 1.1995. P. 41.
5. Патент 2183150 РФ. Способ электроэрозионно-химической доводки зубчатых колес / Е.В. Смоленцев. Оpubл. 10.06.02. Бюл. № 23.
6. А.Г. Бойцов Технологические возможности электроэрозионного фрезерования // Полет. № 6. 2006. С. 50–54.
7. Патент 2403132 РФ. Способ электроэрозионной обработки закрытого венца цельного блока зубчатых колес / В.Ф. Безязычный, Е.В. Шеховцева. Оpubл. 10.11.2010. Бюл. № 31.
8. Шеховцева Е.В. Инновационный технологический процесс изготовления блока зубчатых колес газотурбинного двигателя // Журнал «Труды МАИ»: сетевой журнал. 2010. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25536> (дата обращения 27.02.2016).

*Шеховцева Евгения Владимировна, канд. техн. наук, эксперт по приводам, [janevsh@mail.ru](mailto:janevsh@mail.ru), Россия, Рыбинск, ПАО «НПО «Сатурн»*

#### *PRODUCTION PROFILE OF THE WREATH OF GEAR TEETH IN A GAS TURBINE ENGINE USING CONTOURING*

*E.V. Shehovtseva*

*The method EMD of the closed wreath of the integral block of gears in a gas turbine engine has been developed. Research of contact strength of working surfaces of gear teeth in a gas turbine engine using EDM with the following hardening has been carried out.*

*Key words: spurs gears cluster, closed ring gear, electro-erosive machining (EDM), contact strength.*

*Shehovtseva Evgeniay Vladimirovna, candidate of technical sciences, expert on drives, [janevsh@mail.ru](mailto:janevsh@mail.ru), Russia, Rybinsk, Public corporation «Scientifically a production association «Saturn»*