

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАКРЫТОГО ВЕНЦА БЛОКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГТД

В.Ф. Безъязычный, Е.В. Шеховцева

Усовершенствована технология изготовления цельных блоков цилиндрических зубчатых колес с применением ЭЭО рабочих поверхностей зубьев закрытого цилиндрического венца наружного зацепления. Исследовано качество поверхностного слоя рабочих поверхностей зубьев зубчатых передач ГТД, изготовленных ЭЭО. Установлено влияние режимов ЭЭО на качество рабочих поверхностей и их взаимосвязь с шероховатостью.

Ключевые слова: цельный блок цилиндрических зубчатых колес; закрытый венец; электроэрозионная обработка

Развитие коробок приводов и редукторов ГТД характеризуется ростом КПД зубчатых передач, уменьшением их массы и увеличением нагрузок. Решение этих задач невозможно без повышения качества и надежности с обеспечением минимальных габаритно-массовых характеристик блоков зубчатых колес. Однако на зубчатых колесах этого типа обнаруживаются различные дефекты изготовления и сборки. Таким образом, повышается необходимость исследования и совершенствования производства блоков зубчатых колес с внедрением новых методов обработки и переоснащением производства.

Уменьшение габаритов редукторов и коробок приводов ГТД требует применения компактных и ажурных колес без снижения требований к их прочностным характеристикам. Этот факт привел к широкому применению на силовых и агрегатных ветках редукторов блоков зубчатых колес, где закрытый венец – цилиндрическое зубчатое колесо внешнего зацепления. Для уменьшения габаритов при проектировании блоки колес делают сборочными. Каждый зубчатый венец изготавливают отдельно, затем их собирают либо при помощи штифтов с винтами или сварки, либо сборка осуществляется через шлицы. Все это приводит либо к созданию концентраторов напряжений, либо к уменьшению точности работы зубчатых передач. Устранение отмеченных недостатков технологии производства зубчатых колес достигается изготовлением цельных блоков зубчатых колес. Но при обработке резанием закрытого венца для обеспечения выхода инструмента значительно увеличиваются размеры блока, а также возникают серьезные проблемы с обработкой переходной поверхности.

Для этого авторами предлагается применять электроэрозионную обработку (ЭЭО) для формирования профиля рабочих поверхностей зубьев и химико-термическую обработку (нитроцементация и ионное азотирование) для повышения контактной прочности рабочих поверхностей зубьев.

Электроэрозионная проволочная вырезка применяется для изготовления цилиндрических зубчатых колес наружного зацепления на предприятиях судостроения, приборостроения, магистральных нефтепроводов, насосных нефтеперекачивающих станциях, в производстве ответственных зубчатых колес в коробках скоростей для автомобилей и других отраслей машиностроения [1-6]. Применение ЭЭО позволяет обеспечить высокую производительность с обеспечением качества и точности поверхности, норм по контактной и изгибной прочности.

Таким образом, целью данной работы являются исследование и совершенствование технологии изготовления цельных блоков зубчатых колес электроэрозионной обработкой с применением химико-термической обработки (ХТО) для повышения контактной прочности.

Новизна работы заключается в усовершенствовании технологии обработки цельного блока зубчатых колес и установлении закономерности изменения качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес (шероховатость и глубина дефектного слоя) в зависимости от режимов ЭЭО (сила тока, частота, энергия и длительность импульса).

Анализ современных тенденций развития технологии авиа- и машиностроения свидетельствует о возрастающей роли электроэрозионного зубовырезания на станках с ЧПУ [1-6] и его конкурентоспособности по отношению к традиционным способам нарезания зубьев лезвийными инструментами по методу обката в любых условиях производства на предприятиях судостроения, автомобилестроения [4] и приборостроения, нефтяной промышленности и в других отраслях. С целью исключения снижения усталостной прочности изделий авиастроения по ОСТ 1 0450–82 уточняется, что для изготовления высоконагруженных деталей ГТД с применением ЭЭО глубина зоны термического влияния не более 0,08 мм. Это вызвано тем, что недостаточно изучено влияние параметров качества поверхностного слоя после ЭЭО на усталостную и длительную прочность материалов, применяемых при изготовлении деталей ГТД.

Изготовление закрытого венца цельного блока зубчатых колес. Особенность предлагаемого метода заключается в том, что с целью повышения производительности и надежности конструкции блока зубчатых колес для электроэрозионного зубчатого венца задают траекторию перемещения проволочного электрода-инструмента управляющей программой по контуру закрытого венца цельного блока зубчатых колес по трем осям на электроэрозионном станке с ЧПУ при обеспечении радиуса впадины не менее 1 мм с утопанием не более 0,15 мм при шероховатости рабочего профиля $Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм (рис. 1).

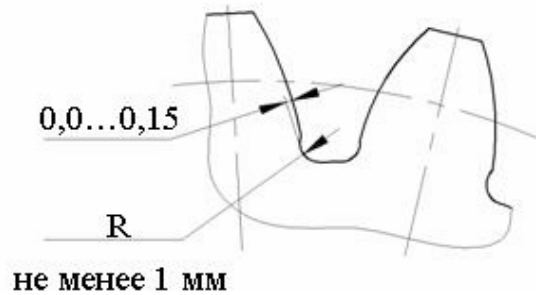


Рис. 1. Цилиндрическое эвольвентное зубчатое колесо

Также отпадает необходимость последующей сборки венцов блоков зубчатых колес, то есть устраняются концентраторы напряжения в местах постановки открытого венца и обеспечивается требуемая точность работы зубчатой передачи. При этом обеспечивается повышение качества сборки за счет уменьшения звеньев сборочной цепи, а также возможно избежать недостатков, которые возникают при зубошлифовании.

Для лучшей производительности и получения требуемого качества поверхности съём металла производят сначала импульсами большой энергии, которые удаляют основную массу металла, подлежащую съёму. Затем постепенным снижением энергии импульсов осуществляются сглаживание и окончательная обработка поверхности.

Обработка закрытого венца 4 представлена на рис. 2.

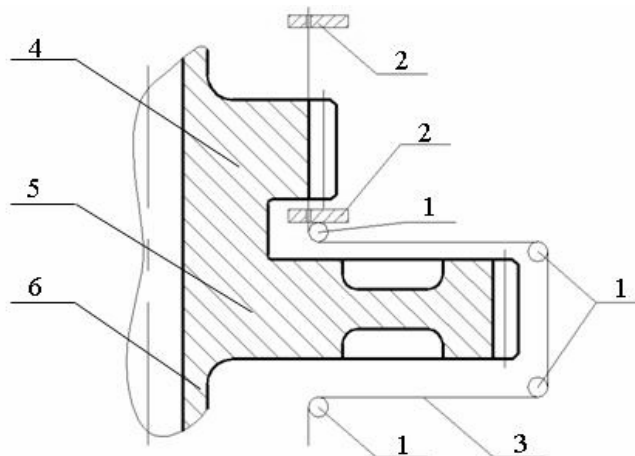


Рис. 2. Схема ЭЭО цилиндрического эвольвентного закрытого венца цельного блока зубчатого колеса:

**1 – ролики; 2 – алмазная направляющая; 3 – проволока;
4 – закрытый венец; 5 – открытый венец;
6 – цельный блок зубчатых колес**

Обработка ведется проволочным электродом-инструментом 3 в специальном приспособлении при помощи дополнительных алмазных направляющих 2 и роликов 1 с огибанием открытого венца 5. Обработка

осуществляется за 3-4 цикла по контуру закрытого зубчатого венца (рис. 3) цельного блока зубчатых колес 6 при повороте детали вокруг оси с обеспечением требуемой степени точности зубчатого венца [7].

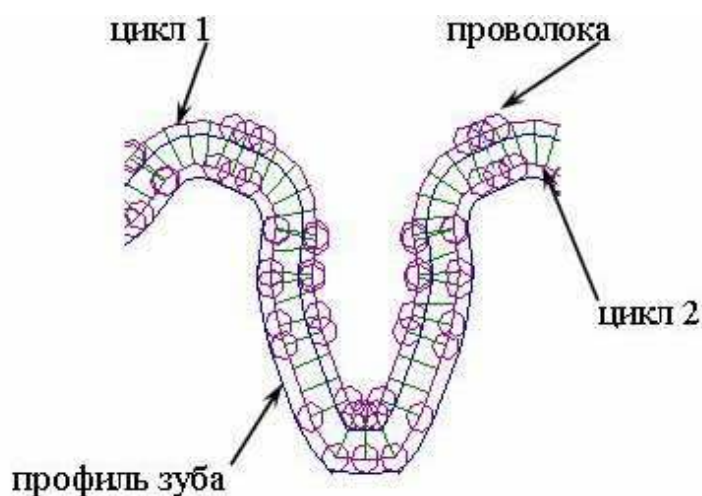


Рис. 3. Циклы обработки зубчатого венца на примере двух циклов

Технология изготовления и его результаты. Разработаны и исследованы технологические процессы с различными видами ХТО рабочих поверхностей зубьев, изготовленных ЭЭО. В качестве ХТО применены ионное азотирование и нитроцементация. Ниже приведен укрупненный технологический процесс изготовления цельного блока зубчатых колес ГТД с нитроцементацией рабочих поверхностей зубьев:

- черновая обработка заготовки;
- нормализация и высокий отпуск;
- обработка базовых поверхностей под нарезание зубьев;
- предварительная ЭЭО зубьев закрытого венца;
- зубофрезерование открытого венца;
- ХТО – нитроцементация;
- обработка нецементируемых поверхностей;
- закалка, обработка холодом и отпуск;
- восстановление баз под окончательную обработку;
- окончательная обработка посадочных поверхностей;
- окончательная ЭЭО зубьев закрытого венца;
- зубошлифование открытого венца.

Конструкцией зубчатых колес предусматривается нитроцементация не только зубчатых венцов, но и посадочных мест под подшипники, а остальные поверхности колеса необходимо защитить от нитроцементации. Зубья, изготовленные по предлагаемой технологии, имеют равномерное науглераживание по поверхности и в глубь детали. При этом увеличивается твердость поверхностного слоя на 5–10 единиц по Викерсу в результате

применения ЭЭО по сравнению с серийной технологией. Это повышает ресурс и надежность передачи, в частности контактную прочность.

Параметры процесса нитроцементации – глубина упрочняемого слоя 0,6...1,2 мм, твердость поверхностного слоя не менее 59 HRC и сердцевины – 33...45 HRC. Материал объектов исследования – 20X3МВФ–Ш, 18X2Н4ВА, 12X2Н4А и другие. Режимы ЭЭО закрытого зубчатого венца приведены ниже. Параметры обрабатываемой детали: модуль $m = 3$, число зубьев $z = 19$, степень точности 5–5–5, коэффициент смещения $\chi = 0$, угол профиля $\alpha = 25^\circ$, характеристика поверхностей перед ЭЭО (табл. 1).

Таблица 1

Материал и микротвердость образцов

Марка стали	Микротвердость контактируемых поверхностей	
	Для нитроцементации	Для ионного азотирования
20X3МВФ-Ш	HRC _Э 60...65	HRC _Э 33...45
18X2Н4МА		
12X2Н4А		

Материал электрода–инструмента – латунная проволока $\varnothing 0,2$ мм. Рекомендуются следующие режимы ЭЭО для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя: длительность импульса $\tau_{и} = 8$ мкс, рабочая частота тока $f = 200$ кГц, средняя сила тока $I = 10$ А, зазор между проволокой и деталью – 0,005 мм, среднее рабочее напряжение – 25 В, форма импульсов – гребенчатая, рабочая среда – масло, шероховатость поверхности после ЭЭО $Ra = 0,2...0,4$ мкм.

Исследование взаимосвязи шероховатости рабочих поверхностей высоколегированных сталей на примере материала 20X3МВФ–Ш от параметров ЭЭО с обеспечением требуемого качества поверхностного слоя (рис. 4) и изучение микроструктуры образцов материала 20X3МВФ–Ш (рис. 5, 6) позволили сделать вывод о том, что ЭЭО обеспечивает требования к контактной прочности изделий двигателестроения, так как дефектный слой на поверхности после окончательной ЭЭО отсутствует (рис. 4, в) и, следовательно, глубина зоны термического влияния не превышает допустимых норм.

Нитроцементированный слой образцов, изготовленных и лезвийной обработкой с последующим шлифованием, и ЭЭО на примере стали 20X3МВФ–Ш, является удовлетворительным (рис. 5, 6, а). По интенсивности насыщения, карбидной сетке и по наличию структурно-свободного феррита (см. рис. 5, 6, б) структура допустимая, состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов, распределенных равномерно.

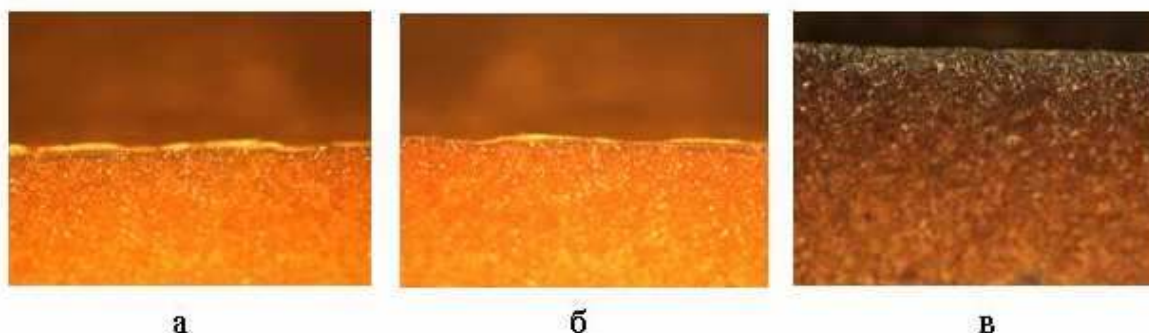


Рис. 4. Взаимосвязь толщины дефектного слоя и шероховатости Ra стали 20X3MBФ-Ш (ЭИ415-Ш) с нитроцементацией, $\times 500$:
а – $Ra = 3,2$ мкм, $t = 0,2$ мм, $Q = 7$ Дж, $f = 14$ кГц, $I = 32$ А, $\tau_{II} = 64$ мкс;
б – $Ra = 1,6$ мкм, $t = 0,01$ мм, $Q = 0,6$ Дж, $f = 125$ кГц, $I = 14$ А, $\tau_{II} = 16$ мкс;
в – $Ra = 0,3$ мкм, $Q = 0,0027$ Дж, $f = 200$ кГц, $I = 10$ А, $\tau_{II} = 8$ мкс

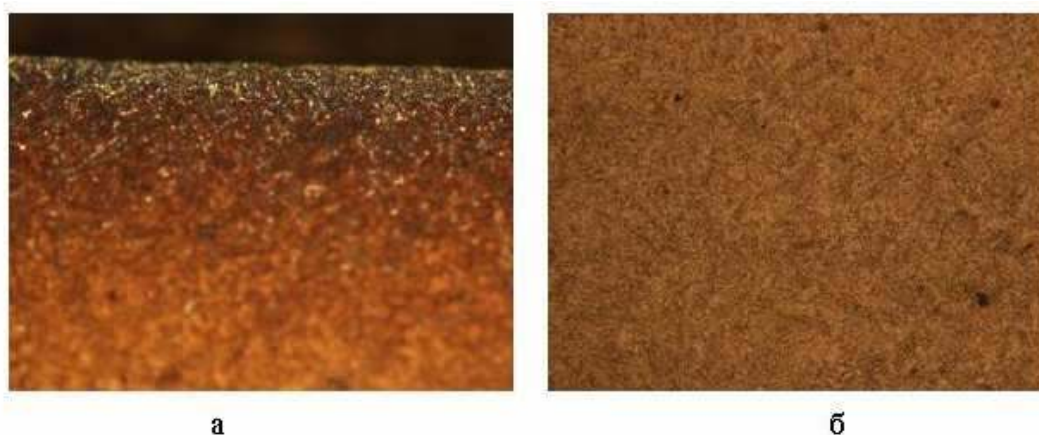


Рис. 5. Микроструктура образца из материала 20X3MBФ-Ш, изготовленного ЭЭО с нитроцементацией, $\times 500$:
а – микроструктура поверхностного слоя; **б** – структура сердцевины

Микроструктуры в поверхностном слое и сердцевине образцов, изготовленных ЭЭО, отличаются от образцов, обработанных точением и шлифованием, тем, что уменьшается количество остаточного аустенита с 20 до 15 %. Для структуры упрочненного слоя образцов, обработанных ЭЭО, характерно то, что иглы мартенсита мельче и происходит дробление карбидной сетки.

Для микроструктуры образцов, изготовленных ЭЭО из разных материалов с применением нитроцементации, характерно мелкозернистое строение без ярко выраженных границ зерен. Таким образом, микроструктура образцов, изготовленных ЭЭО, предпочтительней, так как уменьшается количество остаточного аустенита и улучшается структура упрочненного слоя.



**Рис. 6. Микроструктура образца из материала 20Х3МВФ-Ш, изготовленного лезвийной обработкой, шлифованием с применением нитроцементации, x500:
а – микроструктура поверхностного слоя; б – структура сердцевины**

Проведенный сравнительный спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, нарушений химического состава не выявил (табл. 2).

**Таблица 2
Спектральный анализ химического состава образцов из 20Х3МВФ-Ш**

Метод обработки и ХТО	Химические элементы, %							
	Железо, Fe	Углерод, С	Кремний, Si	Магний, Mn	Хром, Cr	Молибден, Mo	Ванадий, V	Вольфрам, W
ЭЭО 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	0,28	2,96	0,47	0,72	0,41
ЭЭО 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

Полученные экспериментальные данные (см. табл. 2) отвечают требованиям для стали 20Х3МВФ (ЭИ1415-Ш) по ГОСТ 20072-74, где содержание вредных примесей серы не более 0,025 %, фосфора не более

0,030 %; содержание других элементов: никеля не более 0,030 %, меди не более 0,20 %.

Выводы

1. Изготовление цельных блоков зубчатых колес ГТД с применением электроэрозионной обработки позволяет уменьшить величину погрешности изготовления (погрешность базирования и обработки детали) и повысить качество сборки за счет уменьшения звеньев сборочной цепи.

2. Предложенная схема ЭЭО закрытого венца позволяет обработать его с огибанием открытого венца блока зубчатых колес для изготовления цельных блоков зубчатых колес. Применение ЭЭО позволяет обеспечить шероховатость $Ra \approx 0,2 \dots 0,4$ мкм за 3-4 прохода при точности изготовления с отклонениями профиля продольного сечения $1 \dots 2$ мкм на 100 мм и круглости $1 \dots 1,5$ мкм, что гарантированно обеспечивает требования чертежа – отклонения профиля продольного сечения и круглости не менее 3 мкм.

3. Проведенное изучение микроструктуры образцов материала 20Х3МВФ–Ш и исследование взаимосвязи шероховатости рабочих поверхностей легированных сталей с параметрами электроэрозионной обработки позволило сделать вывод о том, что электроэрозионная обработка обеспечивает требования к контактной прочности изделий авиадвигателестроения, так как дефектный слой на поверхности после окончательной электроэрозионной обработки отсутствует и, следовательно, глубина зоны термического влияния не превышает допустимых 0,08 мм.

4. Спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, показал, что в результате ЭЭО не происходит насыщения поверхностного слоя детали частицами материала электрода, то есть физико-механические свойства не нарушаются и химический состав остается в норме.

5. Исследования микроструктуры поверхностного слоя и сердцевины нитроцементированных слоев зубьев зубчатых колес, изготовленных ЭЭО, показали, что уменьшается количество остаточного аустенита в 1,33 раза, улучшается структура упрочненного слоя (иглы мартенсита мельче, происходит дробление карбидной сетки), что свидетельствует о высоком качестве упрочненного слоя.

Список литературы

1. Пат 2212317 РФ Способ электроэрозионной обработки зубчатых колес. Оpubл. 20.09.03. Бюл. № 35. 5 с.
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. 1994. Vol. 67. № 4. P. 132.

4. McLaren changes Glar with Wire EDM // McLaren: Metalwork Production, 1995. Vol. 139. № 1. P. 41.

5. Пат. 2183150 РФ. Способ электроэрозионно-химической доводки зубчатых колес. Оpubл. 10.06.02. Бюл. № 23. 4 с.

6. F1 team spurred on by EDM Success // Machine and Production Engineering. 1995. Vol. 153. № 3885. P. 41.

7. Пат. 2403132 РФ. Способ электроэрозионной обработки закрытого венца цельного блока зубчатых колес. Оpubл. 10.11.2010. Бюл. № 31. 6 с.

Безъязычный Вячеслав Феокистович, д-р техн. наук, зав. кафедрой, technology@rgata.ru, Россия, Рыбинск, РГАТУ имени П.А. Соловьева,

Шеховцева Евгения Владимировна, канд. техн. наук, вед. инженер-конструктор, janevsh@mail.ru, Россия, Рыбинск, ОАО «НПО «Сатурн»

*TECHNOLOGICAL PROSEE OF MANUFACTURING OF CLOSED WREATH OF
BLOCK OF GEAR TEETH IN A GAS TURBINE ENGINE*

V.F. Bezyazichny, E.V. Shehovtseva

The technological process of manufacturing of integral cylindrical gears cluster by EDM of working surfaces of teeth the closed cylindrical gear of external gearing has been improvement. The quality of the surface layer of teeth working surfaces of gears in a gas turbine engine using EDM has been investigated. The influence of modes EDM on the quality of working surfaces and their interconnection with roughness has been established.

Key words: integral cylindrical gears cluster; closed ring gear; electro-erosion processing.

Bezjazychny Vyacheslav Feoktistovich, doctor of technical sciences, head of chair, technology@rgata.ru, Russia, Rybinsk, RGATU named Solovyeva,

Shekhovtsev Evgenia Vladimirovna, candidate of technical sciences, leading design engineer, janevsh@mail.ru, Russia, Rybinsk, JSC «NPO» Saturn