

УДК 621.83:621.9.048:620.178.154

Инновационный технологический процесс изготовления блока зубчатых колес газотурбинного двигателя

Е.В. Шеховцева

Основная цель работы – это усовершенствование технологии изготовления цельных блоков цилиндрических зубчатых колес электроэрозионной обработкой (ЭЭО) рабочих поверхностей зубьев закрытого цилиндрического венца наружного зацепления с применением химико-термической обработки для повышения их контактной прочности.

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. Выполнен химический анализ поверхностей, изготовленных по предлагаемой и серийной технологиям.

Ключевые слова:

цельный блок цилиндрических зубчатых колес; закрытый венец; электроэрозионная обработка

Введение

Зубчатые колеса современных газотурбинных двигателей (ГТД) подвержены высоким силовым, температурным и вибрационным нагрузкам. В конструктивном и технологическом отношении они являются одними из сложных деталей двигателя. Обеспечение качества их изготовления, надежности и ресурса, является актуальной задачей при создании и производстве конкурентоспособных ГТД. Повышение надежности с обеспечением минимальных габаритно-массовых характеристик – один из основных технико-экономических показателей качества зубчатых передач редукторов ГТД, в частности блоков зубчатых колес. В настоящее время повышается необходимость исследования и совершенствования процессов производства блоков зубчатых колес с внедрением новых

методов обработки. Это связано с увеличением их применения и переоснащением современным технологическим оборудованием производства.

Уменьшение габаритов редукторов и коробок приводов ГТД требует применять компактные и ажурные колеса 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 сборными (Елисеев Ю.С., Калашников А.С.) [1, 2]. Каждый зубчатый венец изготавливают отдельно, а затем они собираются либо при помощи штифтов с винтами или сварки, либо сборка осуществляется через шлицы. Каждый из способов имеет свои недостатки. Сборка на штифтах с винтами и сварка создают концентраторы напряжений в местах постановки, как правила, открытого венца. Концентраторы напряжений приводят к разрушению открытого венца по местам установки штифтов или сварочных швах. Сборка на шлицах не обеспечивает требуемой точности работы зубчатых передач и поэтому не рекомендуется для применения в серийном производстве. В связи с вышеизложенным целесообразно изготавливать цельные блоки зубчатых колес. Но при обработке резанием закрытого венца необходимо обеспечить место для выхода инструмента (червячной фрезы и шлифовального круга), что значительно увеличивает размеры блока. Помимо этого при изготовлении зубчатых венцов механической обработкой возникают серьезные проблемы с обработкой сопряжений и малых радиусов, что приводит к созданию приводов и редукторов с повышенным шумом и вибрациям и не соответствует требованиям ГТД.

Таким образом, возникает актуальная задача исследования существующих технологий изготовления рабочих поверхностей зубьев цилиндрического закрытого венца блока зубчатых колес с целью их совершенствования. Для этого автором 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 широко применяется для изготовления зубчатых колес с наружными зубчатыми венцами с использованием проволоки в качестве инструмента на предприятиях судостроения, приборостроения, магистральных нефтепроводов, насосных нефтеперекачивающих станциях, в производстве ответственных зубчатых колес в коробках скоростей для автомобилей и других отраслей машиностроения (Кравченко Д.В., Худобин Л.В., McLaren, Смоленцев Е.В., Бойцов А.Г.) [3–8]. Применение электроэрозионной обработки для изготовления блоков зубчатых колес позволяет

обеспечить высокую производительность с требуемым качеством и точностью поверхности, при этом обеспечиваются нормы по контактной (для тяжело нагруженных и высокоскоростных зубчатых передач) и изгибной (для мало нагруженных зубчатых передач) прочности. При этом повышается надежность конструкции блоков колес, сокращается влияние качества сборки на пятно контакта при уменьшении звеньев в сборочной цепочке редукторов ГТД и обеспечивается расстояние между венцами не более 7 – 8 мм.

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

Новизна работы заключается в установлении закономерности изменения качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес (шероховатость и глубина дефектного слоя) от режимных условий электроэрозионной обработки (ток, частота, энергия и длительность импульса).

Практическая значимость работы выражается в обоснование новой технологии изготовления цельных блоков зубчатых колес с применением электроэрозионной обработки для формообразования рабочих поверхностей зубьев закрытого венца блока зубчатых колес цилиндрического наружного зацепления с оценкой влияния химико-термической обработки на их контактную прочность. Достоверность полученных результатов подтверждается положительным результатом при практическом использовании разработанного технологического процесса изготовления цельных блоков зубчатых колес ГТД в производственных условиях в результате корректного использования теоретических и практических положений технологии изготовления зубчатых колес, метода электроэрозионной обработки, свойств материалов деталей и их сочетаемостью с химико-термической обработкой.

Анализ применяемых методов ЭЭО

В настоящее время при изготовлении зубчатых передач уже применяют электроэрозионную обработку для удаления заусениц и скругления острых кромок зубьев зубчатых колес, изготовления пресс-форм для получения заготовок зубчатых колес, обработки цилиндрических эвольвентных зубчатых колес с наружными зубчатыми венцами с использованием проволоки в качестве инструмента [3–6].

Электроэрозионную обработку используют для:

1. удаления заусениц и скругления острых кромок зубьев зубчатых колес методом обкатки без изменения геометрии детали после механической обработки (Смоленцев Е.В.,

Селиванов К.С., Салахутдинов Р.М.) [7, 9]. Метод обкатки для удаления заусениц и скругления острых кромок зубьев зубчатых колес применяется при доводке зубчатых колес. Данный метод позволяет повысить кинематическую точность колес по степени точности на 1–2 квалитета и по степени контакта зубьев до 95–100 %, но как показывает практика, электрохимическая обработка снижает изгибную прочность ножки зуба [7].

2. изготовления пресс-форм для получения заготовок зубчатых колес методом прошивки (Рязанов С.И., Кравченко Д.В., Микеев И.В.) [10];

3. обработки цилиндрических эвольвентных зубчатых колес с наружными зубчатыми венцами с использованием проволоки в качестве инструмента (Кравченко Д.В., Рязанов С.И., Худобин Л.В. и др.) [3, 6, 11–13]. Электроэрозионная проволочная вырезка применяется для обработки только эвольвенты профиля зуба, а не зубчатого венца в целом, причем для неререверсивных малонагруженных зубчатых колес предлагается обрабатывать эвольвенту только рабочей стороны зуба, а эвольвенту нерабочего профиля заменяют на прямую линию.

Известно, что при изготовлении зубчатых венцов механической обработкой возникают серьезные проблемы с обработкой сопряжений и малых радиусов. При этом помимо неприемлемых затрат времени и огромной стоимости, получаются приводы с повышенным шумом и вибрациями, что не соответствует требованиям ГТД.

Долговечность зубчатых колес с подрезом с нешлифованной впадиной зубьев (рис. 1, в) в 2 – 2,5 раза выше, чем колес со шлифованной переходной кривой (рис. 1, а, б). Такое повышение прочности обусловлено наличием у основания зубьев благоприятно действующих остаточных напряжений сжатия, отсутствием структурных концентраторов напряжений, которые могут возникать при шлифовании, а также сохранением высокой твердости поверхностного слоя впадин зубьев.

У колес с нешлифованной впадиной осевые остаточные (нормальные) напряжения сжимающие и составляют 300 – 400 МПа, а со шлифованной впадиной – в большинстве случаев растягивающие, равные 100 – 150 МПа [14]. После электроэрозионной обработки возникают в поверхностном слое сжимающие осевые остаточные напряжения, которые перекрываются растягивающими тангенциальными остаточными напряжениями и их общая сумма составляет 500 – 650 МПа [15]. Возникающие после химико-термической обработки остаточные сжимающие напряжения уменьшают результирующие напряжения на растянутой стороне в опасном сечении ножки зуба под нагрузкой, что увеличивает долговечность зубчатых колес, изготовленных электроэрозионной обработкой [6].

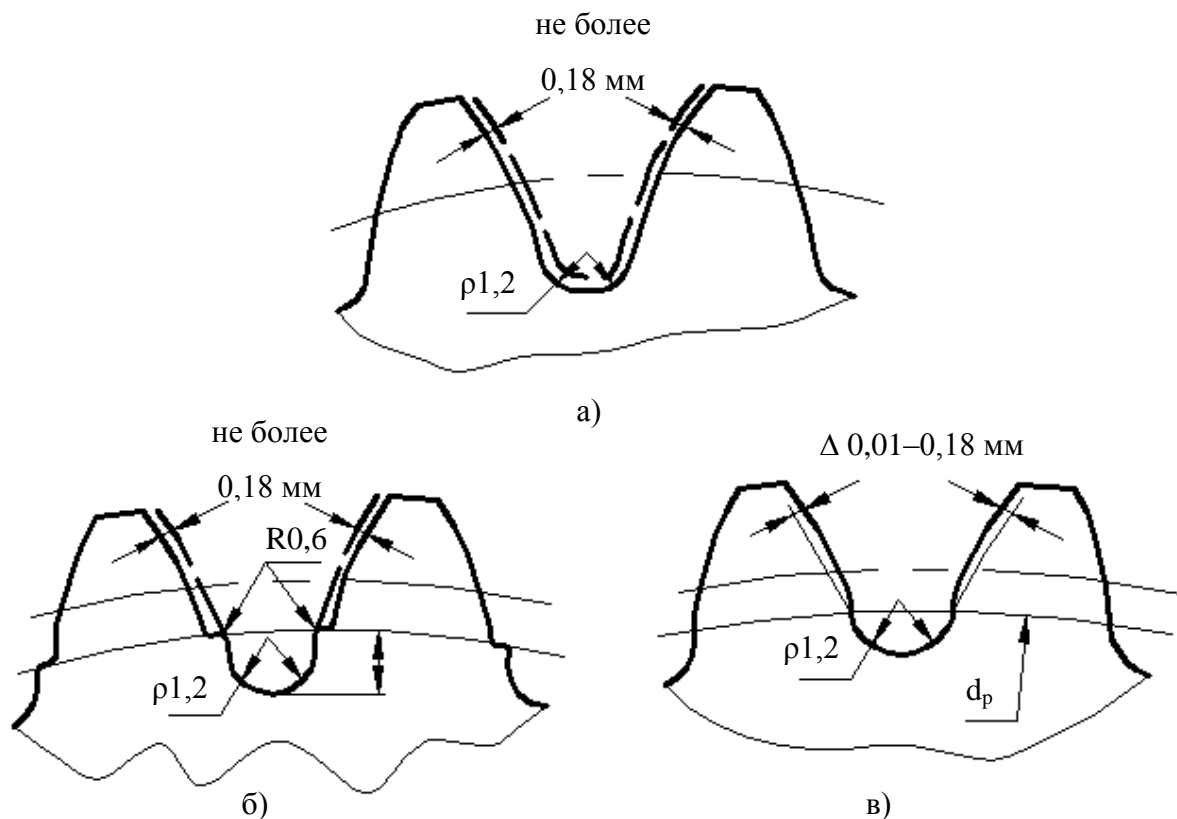


Рис. 1. Форма впадин зубьев колес

У колес со шлифованной впадиной остаточные растягивающие напряжения суммируются с рабочими напряжениями растяжения. В связи с этим результирующие напряжения растяжения в опасном сечении ножки зуба со шлифованной впадиной выше, чем у ножки зуба с нешлифованной впадиной с подрезом или сформированной электроэрозионной обработкой.

Для устранения этих причин ряд промышленных предприятий для изготовления только эвольвенты профиля зуба цилиндрических зубчатых колес с наружными зубчатыми венцами применяют электроэрозионную проволочную обработку с использованием проволоки в качестве инструмента [3, 8, 10]. Ее применяют как для нереверсивных малонагруженных эвольвентных зубчатых колес, так и для ответственных тяжело нагруженных и высокоскоростных зубчатых колес в коробках автомобилей. Электроэрозионная обработка позволяет обеспечить высокую производительность с требуемым качеством и точностью поверхности, при этом обеспечиваются нормы прочности по контактной (для тяжело нагруженных и высокоскоростных зубчатых передач) и изгибной (для малонагруженных зубчатых передач) прочности.

Анализ современных тенденций развития технологии машиностроения свидетельствует о возрастающей роли электроэрозионного зубовырезания на станках с ЧПУ [11] и его конкурентоспособности по отношению к традиционным способам нарезания зубьев лезвийными инструментами по методу обката (зубофрезерованию, зубодолблению) в условиях инструментального, опытного, мелко- и среднесерийного производств на предприятиях судостроения, автомобилестроения, приборостроения, магистральных нефтепроводов, насосных нефтеперекачивающих станциях, в производстве ответственных зубчатых колес в коробках скоростей для гоночных автомобилей, участвующих в соревнованиях «Формула-1» и других отраслей машиностроения [6, 16, 17].

Как и любая технология, технология электроэрозионного зубовырезания на станке с ЧПУ имеет своей конечной целью получение зубчатого колеса заданного качества с максимально возможной производительностью и наименьшими затратами. Одним из важнейших и трудно достижимых показателей качества зубчатого колеса является его точность. Точность зубчатого колеса в значительной мере определяется погрешностью торцового эвольвентного профиля зуба f_{fr} (ГОСТ 1643–81). Эта погрешность напрямую зависит от точности формы эвольвентных боковых поверхностей зубчатого колеса, прямо или косвенно влияет практически на все показатели по нормам кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и во взаимосвязи с отклонением шага зацепления (основного) f_{pbr} , отвечающим за точность взаимного расположения боковых поверхностей зубчатых колес, оказывает существенное влияние на КПД передачи [18, 19].

Эвольвентные боковые поверхности зубьев на современных электроэрозионных вырезных станках с ЧПУ формируются на основании трехмерной модели зубчатого колеса, что обеспечивается перемещением проволочного электрода-инструмента по эвольвенте описывающей профиль зуба либо, что значительно проще, использовать глобусный стол. В этом случае вращается заготовка, а проволочный электрод-инструмент остается на месте.

В связи с повышенными требованиями к усталостной прочности изделий авиадвигателестроения и с целью исключения возможного снижения этого показателя отраслевым стандартом ОСТ 1 0450–82 введены ограничения на применение электроэрозионной обработки для изготовления высоконагруженных деталей ГТД. Применение электроэрозионной обработки разрешено для деталей, у которых глубина зоны термического влияния не более 0,08 мм. Во всех остальных случаях рекомендуется удаление слоя механическим или электрохимическим методами. Это связано с тем, что влияние параметров качества поверхностного слоя после электроэрозионной обработки на

усталостную и длительную прочность материалов, применяемых при изготовлении деталей ГТД, изучено недостаточно [20].

Вместе с тем существуют способы электроэрозионной обработки, позволяющие гарантированно удалить дефектный слой (электроэрозионное шлифование). Остаточные напряжения после электроэрозионной обработки снижаются за счет последующей термической обработки и тем самым обеспечиваются прочностные характеристики авиационных зубчатых колес, в частности для закрытого венца блока колес.

Способ изготовления закрытого венца цельного блока зубчатых колес

С целью повышения нагрузочной способности рабочих поверхностей зубьев закрытого венца и надежности конструкции блока колес предлагается применение электроэрозионной обработки для изготовления цельных блочных зубчатых колес, то есть обработка закрытого венца будет производиться в блоке. Разработанный способ изготовления сложнопрофильных контуров, в частности эвольвенты рабочих поверхностей цилиндрических закрытых венцов цельных блоков зубчатых колес внешнего зацепления

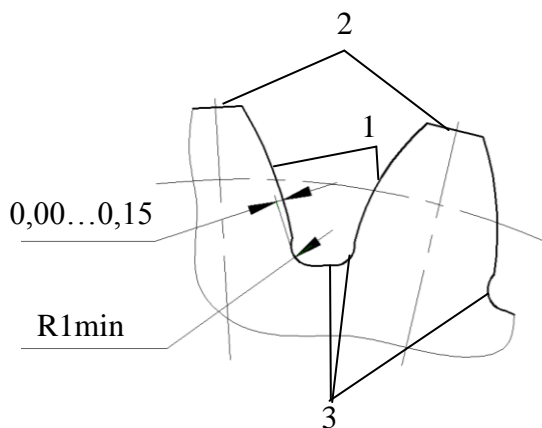


Рис. 2. Цилиндрическое эвольвентное дисковое зубчатое колесо

заклучается в следующем. Для формирования зубчатого венца (боковых поверхностей 1, образующих вершин 2 и впадин зубьев 3) (рис. 2) по управляющей программе на основе трехмерной математической модели детали в устройстве ЧПУ электроэрозионного станка задают траекторию координатных перемещений проволочного электрода-

инструмента по контуру венца. Способ позволяет повысить производительность обработки и надежность конструкции блока зубчатых колес (качество сборки повышается за счет уменьшения звеньев сборочной цепи) с обеспечением тенденции к уменьшению габаритно-массовых характеристик.

Известен аналогичный способ электроэрозионной обработки зубчатых колес, в котором цилиндрический эвольвентный зубчатый венец формируется на электроэрозионном вырезном станке с ЧПУ за счет согласованных координатных перемещений проволочного электрода-инструмента в осях X и Y (обработка по контуру) по траектории, задаваемой от

управляющей программе [3], где одна из боковых поверхностей зуба заменяется прямой линией, следовательно требования к точности формы значительно мягче, а число формообразующих точек профиля (соответственно число опорных точек траектории электрода-инструмента) этой боковой поверхности задано наименьшим их количеством, то есть эвольвента заменяется прямой линией (нерабочий профиль).

Он имеет ряд недостатков:

1. Обрабатывается прямая линия, которой заменяется эвольвента нерабочей стороны зуба;
2. Образующая вершин и впадин между зубьями не обрабатываются электроэрозионной обработкой, применяется лезвийная обработка с последующим шлифованием, то есть возникают прижоги на поверхностях и увеличивается габаритный (длинновой) размер блока колес (число опорных точек траектории перемещения проволочного электрода-инструмента на электроэрозионное образование зубчатого венца не достаточно).

Наиболее близкий способом того же назначения – это способ электроэрозионной обработки зубчатых колес, в котором обрабатывается эвольвента рабочего профиля венца цилиндрического колеса на электроэрозионном вырезном станке с ЧПУ по траектории перемещения проволочного электрода-инструмента в осях X и Y на основе управляющей программы [4]. Его недостатком является то, что образующая вершин и впадин между зубьями также не обрабатываются электроэрозионной обработкой.

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 осям X, Y, Z на электроэрозионном станке с ЧПУ при обеспечении радиуса впадины не меньше 1 мм с утопанием не более 0,15 мм при шероховатости рабочего профиля $Ra = 0,2 - 0,4$ мкм (рис. 2).

Также отпадает необходимость последующей сборки венцов блоков зубчатых колес, то есть устраняются концентраторы напряжения в местах постановки открытого венца (что приводит к разрушению открытого венца) и обеспечивает требуемую точность работы зубчатой передачи. При этом обеспечивается требуемый зазор между венцами и повышается качество сборки за счет уменьшения звеньев сборочной цепи, а также помогает избежать недостатков, которые возникают при зубошлифовании (прижоги, некачественная обработка).

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

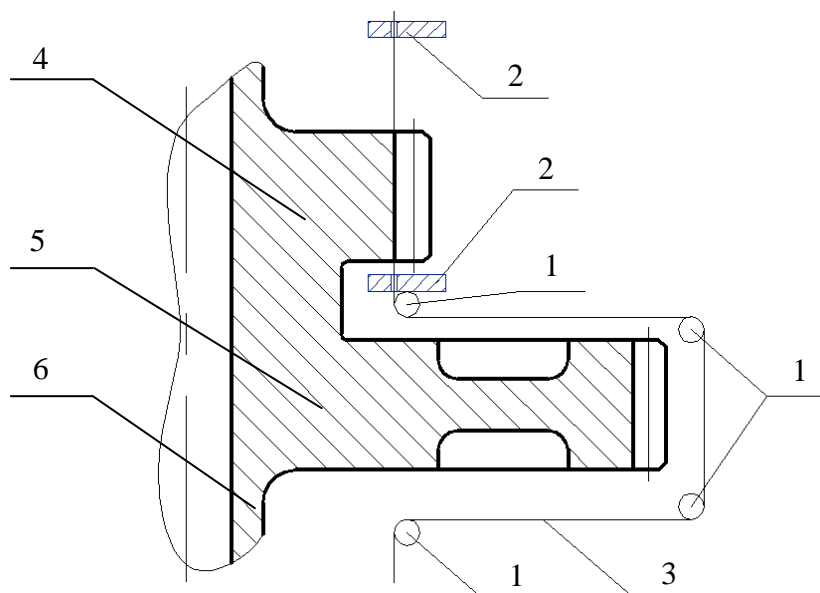


Рис. 3. Схема ЭЭО цилиндрического эвольвентного закрытого венца цельного блока зубчатого колеса: 1 – ролики; 2 – алмазная направляющая; 3 – проволока; 4 – закрытый венец; 5 – открытый венец; 6 – цельный блок зубчатых колес

Обработка закрытого венца 4 (рис. 3) ведется проволочным электродом-инструментом 3 (рис. 3) в специальном приспособлении при помощи дополнительных алмазных направляющих 2 и роликов 1 с огибанием открытого венца 5 (рис. 3). Обработка осуществляется за 3-4 цикла по контуру закрытого зубчатого венца цельного блока зубчатых колес 6 (рис. 3) при повороте детали вокруг оси с обеспечением требуемой степени точности зубчатого венца.

Технологический процесс изготовления и его результаты

Разработаны и исследованы технологические процессы с различными видами химико-термической обработки рабочих поверхностей зубьев, изготовленных электроэрозионной обработкой. Применены в качестве химико-термической обработки такие методы как ионное азотирование и нитроцементация. Ниже представлены упрощенные технологические процессы изготовления закрытого венца цельного блока зубчатых колес ГТД:

Вариант 1 – с применением ионного азотирования.

Предлагаемый технологический процесс изготовления зубчатых колес при формировании рабочих поверхностей зубьев электроэрозионной обработкой с применением ионного азотирования состоит из следующих основных операций:

- ✓ черновая обработка заготовки;
- ✓ нормализация и высокий отпуск;
- ✓ закалка с высоким отпуском для обеспечения твердости сердцевины;
- ✓ чистовая обработка детали;
- ✓ обработка баз под электроэрозионную обработку зубьев;
- ✓ электроэрозионная обработка зубьев закрытого венца;
- ✓ зубофрезерование зубьев открытого венца;
- ✓ термостабилизирующий отпуск;
- ✓ восстановление баз;
- ✓ окончательная электроэрозионная обработка зубьев закрытого венца;
- ✓ зубошлифование зубьев открытого венца;
- ✓ ионное азотирование одновременно зубьев открытого и закрытого венца;
- ✓ доводка посадочных мест под подшипники.

Зубчатый венец, изготовленный по данной технологии, имеет относительно мягкую сердцевину при достаточно высокой твердости поверхностного слоя после ЭЭО и ионного азотирования. Его твердость выше твердости поверхностного слоя, изготовленного по серийной технологии, на 7–10 единиц по Викерсу. Это не окажет негативного влияния на контактную прочность при перегрузках. В работе данная технология была применена для изготовления объектов исследования.

Микроструктура поверхностного слоя для деталей характеризуется высокой степенью дисперсности, равномерным распределением нитридов и отсутствием на поверхности хрупкого слоя.

Параметры ионного азотирования – глубина упрочняемого слоя 0,2-0,4 мм, твердость поверхностного слоя не менее 80 HRC и сердцевины – 321...388 HB (36,5...42,5 HRC).

Вариант 2 – с применением нитроцементации.

Предлагаемый технологический процесс изготовления зубчатых колес с применением нитроцементации рабочих поверхностей зубьев сформированных электроэрозионной обработкой включает в себя следующие основные операции:

- ✓ черновая обработка заготовки;
- ✓ нормализация и высокий отпуск (для снятия внутренних напряжений в

заготовке и улучшения структуры материала);

- ✓ предварительная обработка поверхностей, обрабатываемых окончательно после химико-термического упрочнения;
- ✓ обработка базовых поверхностей под нарезание зубьев;
- ✓ предварительная электроэрозионная обработка зубьев закрытого венца;
- ✓ зубофрезерование открытого венца;
- ✓ нитроцементация одновременно открытого и закрытого венца;
- ✓ обработка нецементируемых поверхностей, снятие напусков с поверхностей, не требующих химико-термического упрочнения;
- ✓ закалка, обработка холодом и отпуск;
- ✓ восстановление баз под окончательную обработку;
- ✓ окончательная обработка посадочных поверхностей;
- ✓ окончательная электроэрозионная обработка 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 передачи, а в частности контактную прочность. Предлагаемая технология была применена при изготовлении объектов испытаний.

Параметры нитроцементации – глубина упрочняемого слоя 0,6-1,2 мм, твердость поверхностного слоя не менее 59 HRC и сердцевины – 33...45 HRC.

Материал деталей – 20Х3МВФ–Ш, 18Х2Н4ВА, 12Х2Н4А и другие.

Режимы электроэрозионной обработки закрытого зубчатого венца приведены ниже.

Параметры обрабатываемой детали:

- 1) модуль $m = 3$;
- 2) число зубьев $z = 19$;
- 3) степень точности 5–5–5;
- 4) коэффициент смещения $x = 0$;
- 5) угол профиля $\alpha = 25^\circ$;
- 6) характеристика поверхностей образцов перед ЭЭО (таблица 1).

Параметры электрода–инструмента:

- 1) материал: латунная проволока;
- 2) размер: $\varnothing 0,2$ мм.

Таблица 1

Материал и микротвердость образцов

Марка стали	Микротвердость контактируемых поверхностей для	
	нитроцементации	ионного азотирования
20X3MBФ-Ш	HRC _Э 60...65	HRC _Э 33...45
18X2H4МА		
12X2H4А		

Для деталей из высоколегированной стали рекомендуются следующие режимы для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя:

- 1) длительность импульса $\tau_{и} = 8$ мкс;
- 2) рабочая частота тока $f = 200$ кГц;
- 3) средняя сила тока $I = 10$ А;
- 4) зазор между проволокой и деталью – 0,005 мм;
- 5) среднее рабочее напряжение – 25 В;
- 6) среднее напряжение холостого хода – 120 В;
- 7) форма импульсов – гребенчатая;
- 8) полярность – прямая;
- 9) рабочая среда – масло;
- 10) шероховатость поверхности после ЭЭО $Ra = 0,2-0,4$ мкм.

Поверхностный слой материала обрабатываемой детали подвергается локализованному и кратковременному, но весьма интенсивному термическому воздействию. Большая часть расплавленного материала и его паров удаляется из зоны разряда, но некоторая часть остается в лунке. При охлаждении на поверхности лунки образуется слой, по свойствам иногда сильно отличающийся от основного материала (рис. 4, а, б).

Глубина измененного слоя зависит от энергии импульсов, их длительности и теплофизических свойств обрабатываемого металла. При длительных импульсах тока

большой энергии глубина измененного слоя измеряется десятыми долями миллиметра, а при коротких импульсах малой энергии – сотыми долями миллиметра и микрометрами.

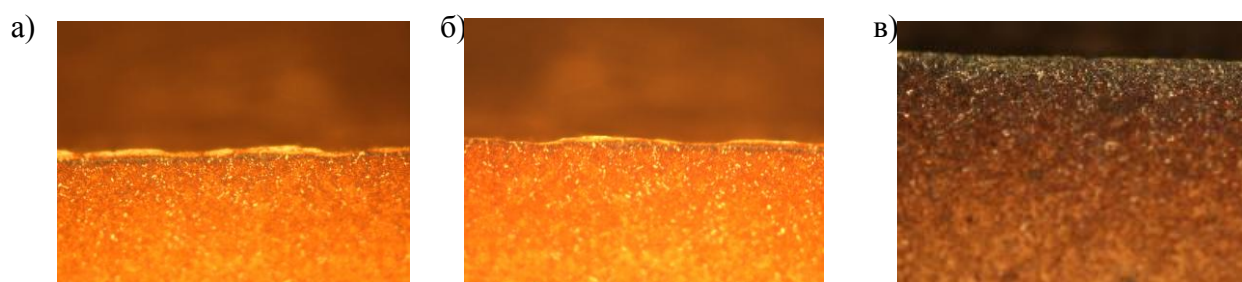


Рис. 4. Взаимосвязь толщины оплавленного слоя и шероховатости Ra стали 20X3MBF-III (ЭИ415-III) с нитроцементацией, $\times 500$:

а) $Ra = 3,2$ мкм, $t = 0,2$ мм, $Q = 7$ Дж, $f = 14$ кГц, $I = 32$ А, $\tau_{\text{и}} = 64$ мкс;

б) $Ra = 1,6$ мкм, $t = 0,01$ мм, $Q = 0,6$ Дж, $f = 125$ кГц, $I = 14$ А, $\tau_{\text{и}} = 16$ мкс;

в) $Ra = 0,3$ мкм, $Q = 0,0027$ Дж, $f = 200$ кГц, $I = 10$ А, $\tau_{\text{и}} = 8$ мкс

Вследствие хрупкости и неравномерной плотности поверхностный слой является дефектным. Он снижает прочностные свойства металла, так как при механических нагрузках, особенно знакопеременных, в нем легко возникают трещины, которые могут распространиться вглубь детали. Глубина измененного слоя практически не зависит от длительности обработки.

Проведенное исследование взаимосвязи шероховатости рабочих поверхностей высоколегированных сталей на примере материала 20X3MBF-III от параметров ЭЭО с обеспечением требуемого качества поверхностного слоя (рис. 4) и изучение микроструктуры образцов материала 20X3MBF-III (рис. 5 и 6) позволило 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.

Причем нитроцементованный слой образцов, изготовленных и лезвийной обработкой с последующим шлифованием, и ЭЭО из разных материалов, является удовлетворительным (рис. 5–6, а). По интенсивности насыщения, карбидной сетке структура допустимая и соответствует 12 баллу, а по распределению структурных составляющих – 1 баллу согласно эталонным микроструктурам [21]. Структура состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов, распределенных равномерно. Микроструктура сердцевины нитроцементируемых слоев (рис. 5–6, б) по наличию структурно-свободного феррита является допустимой и

относится к 4 баллам [21]. 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 как нитроцементации характерно мелкозернистое строение без ярко выраженных границ зерен.

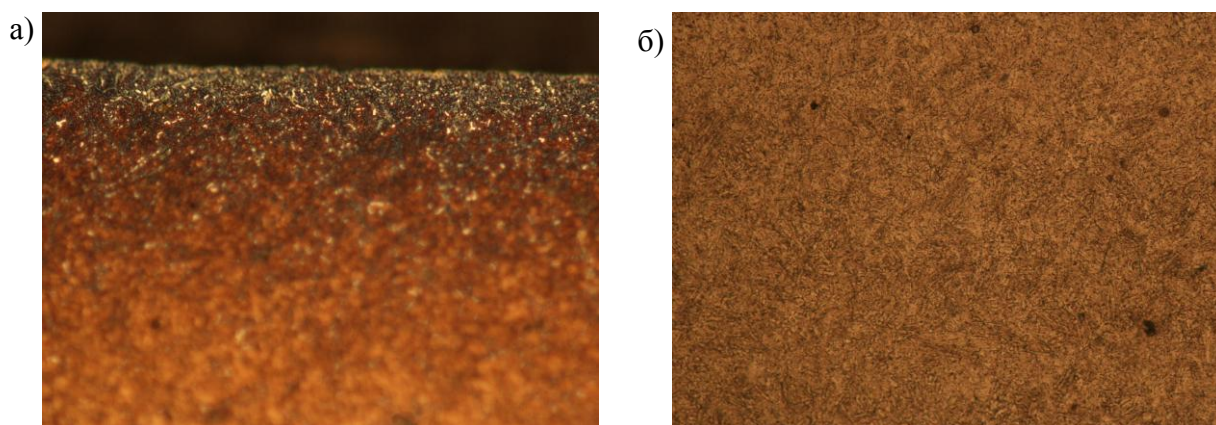


Рис. 5. Микроструктура образца из материала 20X3MVФ-III, изготовленного ЭЭО с нитроцементацией, x500: а) микроструктура поверхностного слоя; б) структура сердцевины

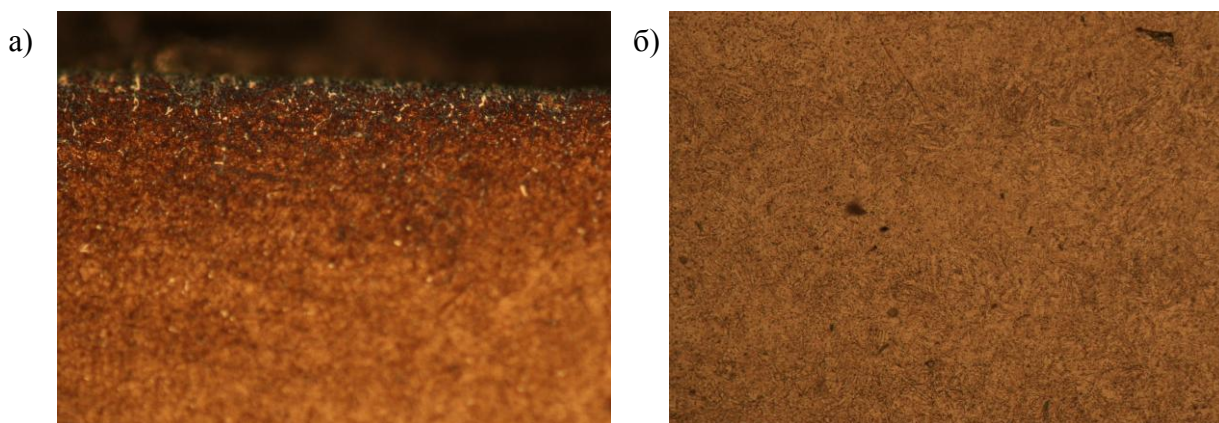


Рис. 6. Микроструктура образца из материала 20X3MVФ-III, изготовленного лезвийной обработкой, шлифованием с применением нитроцементации, x500: а) микроструктура поверхностного слоя; б) структура сердцевины

Таким образом, микроструктура образцов, изготовленных ЭЭО, предпочтительней, так как уменьшается количество остаточного аустенита и улучшается структура упрочненного слоя.

Проведенный сравнительный спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, нарушений химического состава не выявил. Результаты по каждому из материалов, соответствующей ХТО и видом окончательной обработки приведены в таблице 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	0,29	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 (таблица 2) отвечают требованиям по ГОСТ 20072-74 для материала 20Х3МВФ (ЭИ1415-Ш), 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 %.

Проведенный сравнительный спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, наглядно показал, что в результате ЭЭО частицы материала электрода-инструмента не насыщают поверхностный слой детали, то есть нарушений химического состава не происходит, показатели химических элементов находятся в пределах нормы.

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

3. Проведенное исследование взаимосвязи шероховатости рабочих поверхностей легированных сталей на примере материала 20Х3МВФ–Ш от параметров электроэрозионной обработки с обеспечением требуемого качества поверхностного слоя и изучение микроструктуры образцов материала 20Х3МВФ–Ш 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. Проведенный сравнительный спектральный анализ химического состава материалов деталей, обработанных по серийной и предлагаемой технологиям, наглядно показал, что в результате электроэрозионной обработки частицы материала электрода–инструмента не насыщают поверхностный слой детали, то есть нарушений физико-механических свойств не происходит, показатели химических элементов находятся в пределах нормы.

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

Библиографический список

1. Калашников, А.С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] / А.С. Калашников. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
2. Елисеев, Ю.С. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей [Текст]: произв.-практ. издание/ Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин [и др.]; под ред. Ю.С. Елисеев. – М.: Высш. шк., 2001. – 493 с.
3. Пат 2212317 Российская Федерация, МПК7 В 23 Н1/00, В 23 Н7/02. Способ электроэрозионной обработки зубчатых колес [Текст] / Кравченко Д.В., Рязанов С.И., Брехов Е.В.; заявитель и патентообладатель: Ульяновский государственный технический университет. – № 2002121078/02; заявл. 08.02.02; опубл. 20.09.03, Бюл. № 35. – 10 с.
4. Худобин, Л.В. Контурное электроэрозионное вырезание – альтернативный способ формирования зубчатых колес [Текст] / Л.В. Худобин, С.И. Рязанов, Д.В. Кравченко // Вестник машиностроения. – 1998. – № 3. – С. 19–21.
5. Illinois Manufacturer stays on target with EDM [Текст] / Illinois // Model machine shop. – 1994. – V. 67. – N 4. – P. 132.
6. McLaren changes Glar with Wire EDM [Текст] / McLaren // Metalwork Production. – 1995. – V. 139. – N 1. – P. 41.
7. Пат 2183150 Российская Федерация, МПК7 В 23 Н5/02. Способ электроэрозионно-химической доводки зубчатых колес [Текст] / Смоленцев Е.В.; заявитель и патентообладатель: Воронежский государственный технический университет – № 2000104212/02; заявл. 18.12.00; опубл. 10.06.02, Бюл. № 23 – 4 с.
8. Бойцов, А.Г. Технологические возможности электроэрозионного фрезерования [Текст] / А.Г. Бойцов // Полет. – 2006. – № 6. – С. 50–54.
9. Пат 2151033 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 Н1/00, В 23 Н9/02, В 23 Н1/04. Электрод-инструмент для электроэрозионной обработки зубчатых колес [Текст] / Селиванов К.С., Салахутдинов Р.М.; заявитель и патентообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет. – № 97113388/02; заявл. 1997.07.22; опубл. 2000.06.20, Бюл. № 13. – 6 с.

10. Пат 2147497 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 Н1/00, В 23 Н7/02. Способ электроэрозионной обработки матриц для изготовления цилиндрических зубчатых колес [Текст] / Рязанов С.И., Кравченко Д.В., Микеев И.В.; заявитель и патентообладатель: Ульяновский государственный технический университет. – № 98122525/02; заявл. 1998.12.12; опубл. 2000.04.20, Бюл. № 23. – 12 с.
11. Smolenzev, E.V. Improving quality of a linkage of cogwheels [Текст] / E.V. Smolenzev, V.P. Smolenzev // TWW-97, Konin. – 1997. – P. 135–140.
12. Кравченко, Д.В. Влияние качества управляющих программ на точность цилиндрических зубчатых изделий с наружными зубчатыми венцами, полученных электроэрозионным вырезанием на станках с ЧПУ [Текст] / Д.В. Кравченко // Вестник УлГТУ. Серия Машиностроение, строительство. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – вып. 2. – С. 88–97.
13. Рязанов, С.И. Челночная электроэрозионная обработка зубчатых колес проволочным инструментом [Текст] / С.И. Рязанов, Д.В. Кравченко, И.В. Микеев // Прогрессивные технологические процессы в механообрабатывающем и сборочном производстве: материалы науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 1992. – С. 35–36.
14. Фотеев, Н.К. Перенос материала электрода-инструмента на поверхность детали в процессе размерной электроэрозионной обработки [Текст] / Н.К. Фотеев, А.А. Капырин // Электронная обработка материалов. – 1986. – №2. – С. 23–25.
15. Генкин, М.Д. Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач [Текст] / М.Д. Генкин, М.А. Рыжов, Н.М. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
16. Худобин, Л.В. Новая технология электроэрозионной обработки зубчатых изделий проволочным электродом-инструментом [Текст] / Л.В. Худобин, С.И. Рязанов // Международный юбилейный симпозиум по электроэрозионной обработке. Под ред. Б.Н. Золотых. – М.: НПО «ТЕХНОМАШ», 1993. – С. 26–27.
17. F1 team spurred on by EDM Success [Текст] // Machine and Production Engineering. – 1995. – V. 153. – N 3885. – P. 41.
18. Калашников, С.Н. Производство зубчатых колес [Текст]: справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган [и др.] Под общ. ред. Б.А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
19. Братухин, А.Г. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей [Текст] / А.Г. Братухин, Г.К. Язов, Б.Е. Карасев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1997. – 412 с.

20. Сарилов, М.Ю. Фрактальная размерность как параметр управления электроэрозионной обработкой [Текст] / М.Ю. Сарилов, М.А. Покотило // Металлообработка. – 2007. – № 4. – С. 16–20.

21. Белинский А.Л. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей [Текст]: справочник / А.Л. Белинский, В.А. Булгаков, В.В. Горюшкин [и др.]; под общ. ред. В.Д. Кальнера – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.

Сведения об авторах

Шеховцева Евгения Владимировна, инженер-конструктор 1 категории, ОАО «НПО «Сатурн», к.т н;

тел:(4855) 296-459; e- mail:shev-2005@mail.ru.