

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

Людмила Петровна Фомина, к.т.н., ведущий инженер АО "НПЦ газотурбостроения "Салют"
 Валентин Владимирович Крымов, д.т.н., профессор, Заслуженный машиностроитель РФ

Проведен сравнительный анализ применяемых технологий химико-термической обработки зубчатых колес и других деталей авиационных двигателей по способу упрочнения рабочих поверхностей, определяющих долговечность их работы. Представлен созданный на предприятии участок "Ионно-вакуумная химико-термическая обработка". Показаны перспективы повышения экономичности и качества изготовления зубчатых колес и совершенствование упрочняющих технологий, в том числе путём применения защитных покрытий в качестве предохранения поверхностей от диффузионного насыщения.

A comparative analysis of the technologies of chemical-thermal treatment of gears, and other parts of aircraft engines by the method of hardening the working surfaces, determining the durability of their work. Presented at the enterprise created the plot of "Ion-vacuum chemical-thermal treatment". The prospects of increased efficiency and quality of manufacturing of gear wheels and the improvement of hardening technologies, including through the use of protective coatings as protection of surfaces from diffusion saturation.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование и цементация, вакуумная цементация, диффузионный слой, оборудование, защитное покрытие, технологический маршрут упрочнения.

Keywords: ion-plasma nitriding and carburizing, vacuum carburizing, diffusion layer, equipment, protective coating, a process route of hardening.

Первостепенные задачи в области создания производства современных авиационных двигателей заключаются в повышении эксплуатационных характеристик, экономичности в производстве и надежности в работе. Решение этих задач требует постоянного совершенствования технологических процессов, обеспечивающих высокое качество изготовления деталей двигателя. К числу технологий, требующих постоянного совершенствования, относятся технологии упрочнения зубчатых колес, от работоспособности которых во многом зависит живучесть двигателя и в целом всего летательного аппарата.

Функциональное назначение зубчатых колес в газотурбинных двигателях - высокоскоростная передача крутящего момента различным агрегатам в условиях высокой нагрузки и повышенных рабочих температур. Зубчатые колеса должны отвечать высоким требованиям по контактной выносливости, выносливости зубьев при изгибе, износостойкости профилей зубьев, стойкости к заеданию. Для обеспечения указанных эксплуатационных свойств необходимо применять теплостойкие комплексно-легированные стали электрошлакового переплава типа 16ХЗНВФМБ-Ш (ВКС-5), 20ХЗМВФ-Ш (ЭИ415) [1]. Выбор вида химико-термического упрочнения рабочих поверхностей зависит от конструктивно-технологических особенностей и эксплуатационных характеристик деталей [6]. Для обеспечения контактной выносливости, выносливости зубьев при изгибе, стойкости к заеданию целесообразно применять цементацию, а для обеспечения высокой твердости поверхности, износостойкости и высокой теплостойкости рабочей поверхности - азотирование. Газотурбинный двигатель (ГТД) АЛ-31Ф включает 115 цементуемых деталей, среди которых основными являются зубчатые колеса, включающие 88 типоразмеров. Номенклатура авиационных деталей редукторов и приводов газотурбинных двигателей, упрочняемых азотированием, насчитывает более 200 наименований.

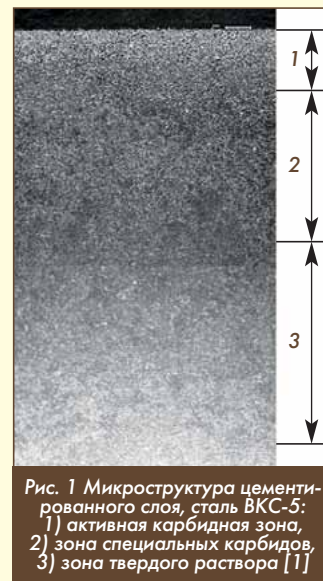
В настоящее время среди современных упрочняющих технологий, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики зубчатых колес, особый интерес представляют ионно-плазменные и вакуумные процессы цементации и азотирования, заменившие собой аналогичные газовые процессы [2].

Работы по освоению процессов ионной и вакуумной цементации проводились совместно с учеными МГТУ им. Н.Э. Баумана на предприятии "Салют", на участке "Ионно-вакуумная химико-термическая обработка". Базовой единицей участка является трехкамерная печь немецкой фирмы Irsen, предназначенная для проведения процессов как ионной, так и вакуумной цементации

(нитроцементации), которые можно сочетать с непосредственной закалкой. Также на участке находится установка для ионного азотирования "Салют-60М" (с дополнительным подогревом деталей), разработанная совместно с сотрудниками МГТУ.

Главное достоинство ионной [3] и вакуумной [4] цементации заключается в формировании диффузионных слоев, обладающих высокой несущей способностью, без окисления и обезуглероживания поверхности. Эксплуатационные свойства зубчатых колес возрастают по мере увеличения прочности и твердости сердцевины, достигая максимальных значений ($\sigma = 1200$ МПа, HRC 42-43) [1]. Такие свойства обеспечивают стали типа ВКС-5, имеющие структуру малоуглеродистого мартенсита. Особенностью науглероживания этих сталей является повышенная склонность к карбидообразованию. В результате цементации образуются диффузионные слои (рис. 2), состоящие из трех зон: 1) активной карбидной зоны из части легированного цемента, 2) зоны специальных карбидов и 3) зоны твердого раствора. Протяженность активной карбидной зоны должна быть не менее 0,3 мм, т.к. значительная ее часть (0,2 мм) удаляется при шлифовании. Зубошлифование является обязательной операцией для восстановления степени точности зубчатых колес после высокотемпературной химико-термической обработки, в результате которой возникают деформации и коробления. Окончательно готовые детали приобретают твердую цементированную поверхность 60-64 HRC и вязкую сердцевину 38-43 HRC [1].

Технологический маршрут упрочнения зубчатых колес из сталей типа ВКС-5 состоит из предварительной термической обработки, ионной или вакуумной цементации и окончательной термической обработки с промежуточными этапами механической об-



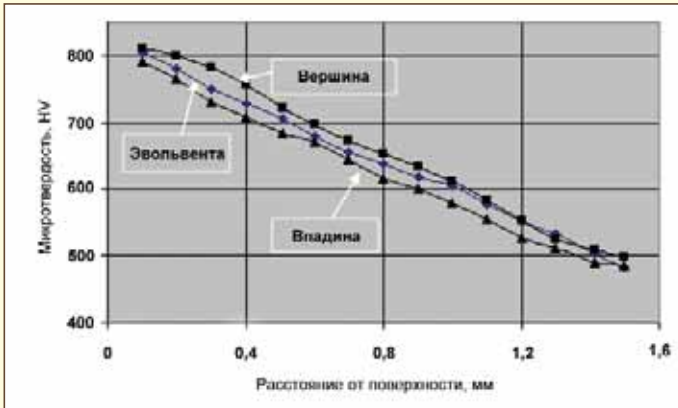


Рис. 2 Распределение микротвердости по глубине цементированного слоя, сталь ВКС-5

работки, предназначенными для снятия припусков металла. С целью повышения экономичности изготовления зубчатых колес, разработаны технологические маршруты вакуумной цементации без промежуточной механической обработки с применением защиты поверхностей от науглероживания.

Используемые способы защиты неупрочняемых поверхностей припуском металла [1] при газовой, ионной и вакуумной цементации, а так же гальваническим меднением [2] при газовой цементации имеют ряд недостатков. Например, защита припуском приводит к нерациональному расходу металла, увеличению трудоемкости механической обработки и дополнительному расходу режущего инструмента. К основным недостаткам процесса меднения можно отнести: повышенную трудоемкость операций по нанесению и последующему удалению гальванического покрытия, расход энергоресурсов и цветных металлов, что увеличивает время технологии изготовления детали и приводит к увеличению ее стоимости. В ионно-плазменных процессах цементации используют универсальную технологическую оснастку, к которой относятся защитные экраны [1], предохраняющие поверхности деталей от цементации. Защитные экраны разработаны для небольшой группы зубчатых колес. Из-за многообразия типоразмеров использование защитных экранов является затратным, поэтому, в заводской практике принято изготавливать зубчатые колеса с припуском металла и последующим его удалением механической обработкой.

Совокупность недостатков рассмотренных выше способов предохранения поверхностей изделий от науглероживания привела к поиску новых технологических решений. Одним из таких решений является использование антицементационных покрытий [5]. Достоинство этого метода - простота использования и отсутствие специального оборудования. Защитное покрытие используют взамен припуска металла при вакуумной цементации и взамен гальванического меднения при газовой цементации. Становится ненужной промежуточная механическая операция съема припуска металла с детали после окончательной термообработки. Очевидное сокращение операций механической обработки позволяет экономить время изготовления деталей, количество металлообрабатывающего оборудования и соответственно удешевляет процесс.

В качестве антицементационных покрытий используют пасты европейских производителей: "Ovac", "BC20", "Evin". Технологии нанесения покрытий разработаны с обязательной высокотемпературной сушкой в сушильных шкафах при температуре до 250 °С, что обеспечивает высокое качество защиты поверхностей от науглероживания и качественную цементацию рабочих поверхностей деталей. При этом имеет место снижение трудоемкости обработки деталей и снижение брака благодаря созданию стабильного газонепроницаемого, легкоудаляемого, изолирующего слоя на защищаемой поверхности. Технологический процесс изготовления деталей с использованием антицементационных защитных покрытий не предусматривает введения, а следовательно и удаления припусков, что позволяет повысить коэффици-

ент использования материала заготовки на 15...20 % и снизить трудоемкость механической обработки на 12...15 %.

При ионном азотировании для защиты не упрочняемых поверхностей, взамен металлических экранов, так же можно использовать защитные покрытия. Проведенные исследования качества защитных свойств покрытий и качества диффузионных слоев показали удовлетворительные результаты. Использование защитных покрытий позволяет сократить количество оснастки, что уменьшает уровень затрат при изготовлении деталей.

Ионное азотирование зубчатых колес применяют как процесс, альтернативный процессу цементации, т.к. он относится к малодеформационным способам поверхностного упрочнения деталей. Низкая температура процесса (480...580 °С) и отсутствие фазовых превращений при упрочнении обуславливают значительное снижение деформаций деталей и сохранению геометрических параметров профиля зубьев зубчатых колес. В результате не требуется дальнейшая механическая обработка (шлифование), что коренным образом меняет технологию изготовления деталей, делая ее более эффективной, при этом снижается трудоемкость и себестоимость продукции.

Освоение процесса ионного азотирования на предприятии "Салют" проводилось при активном участии ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана. В результате была создана первая опытно-промышленная установка ионного азотирования мощностью 30 кВт. Совместно с ПНИТИ (г. Пермь) разработана и успешно функционирует по настоящее время установка "Ион-30", предназначенная для упрочнения как деталей основного производства, так и для упрочнения штампового и режущего инструмента. Для ионного азотирования зубчатых колес и других деталей авиационных двигателей сотрудниками предприятия и МГТУ им. Н.Э. Баумана, разработана и изготовлена установка "Салют-60" полезной мощностью 70 кВт. Эта установка работает и сегодня, выпуская продукцию, но параллельно ведется переоснащение химико-термического производства. Заводом приобретены две немецкие ионно-плазменные установки для азотирования с функцией дополнительного подогрева деталей и полной автоматизацией процесса.

Ионное азотирование является одним из основных методов повышения износостойкости деталей ПД. Технология этого процесса основана на применении высокопрочных сталей мартенситного класса типа ВКС-5, ВКС-7 и др. Важная особенность таких сталей заключается в способности сохранять прочность и твердость сердцевины при нагреве до температур 500...530 °С.

Технологический маршрут упрочнения серийных деталей ПД состоит из нескольких этапов [1]. На первом этапе штамповка проходит предварительную термическую обработку, затем деталь идет на 1-й и 2-й этапы механической обработки. В термическом цеху готовую деталь подвергают окончательной термообработке, далее выполняют шлифование (3-й и 4-й этапы механической обработки), после которого деталь отправляют на участок ионного азотирования. Детали сложной конфигурации перед ионным азотированием подвергают стабилизирующему отпуску. Затем, на поверхности, не подвергающиеся азотированию, наносится защитное покрытие. Ионный процесс обеспечивает равномерное распределение диффузионного слоя по профилю шлиц (рис. 3), высокий уровень твердости вблизи поверхности и плав-

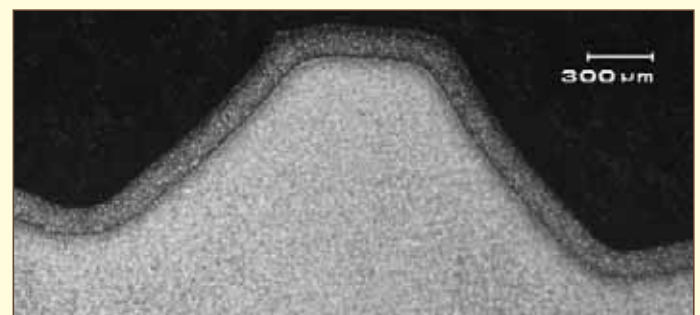


Рис. 3 Распределение азотированного слоя по профилю шлиц, сталь ВКС-5

ное снижение по толщине слоя (рис. 4). Микроструктура азотированного слоя состоит из тонкого нитридного слоя (менее 5 мкм) (светлая зона на поверхности) и расположенной под ним диффузионной зоны (насыщенный азотом α -твердый раствор с избыточными выделениями высокодисперсных нитридов легирующих элементов). Азотированный слой обеспечивает более высокую твердость на поверхности (по сравнению с цементацией), обладает высокой теплостойкостью, износостойкостью и высоким сопротивлением заеданию. Благодаря перечисленным достоинствам азотированные зубчатые колеса способны работать в условиях высоких окружных скоростей, но при ограниченных контактных

нагрузках из-за малой толщины слоя (не более 0,5 мм).

В настоящее время ведутся исследования по разработке режимов ионного азотирования сталей 15X16K5H2MBФАБ-Ш, 30X2HВФА, 20X3MВФА-Ш. Результаты исследований показали, что после упрочнения на указанных сталях формируются диффузионные слои, структурное состояние и характеристики которых обеспечивают высокую твердость азотированного слоя ($> 87 \text{ HRN}_{15}$), высокую прочность сердцевины ($> 1250 \text{ МПа}$), равномерное распределение нитридных фаз по объему зерна. Благодаря совокупности факторов, таких как состав стали, технология предварительной обработки и температурно-временные режимы ионного азотирования, структурное состояние азотированного слоя повышается износостойкость поверхностей.

В результате создание участка "Ионно-вакуумная химико-термическая обработка", внедрение новых ионно-плазменных и вакуумных процессов упрочнения взамен газовых процессов, разработки режимов вакуумной цементации и ионного азотирования с использованием защитных покрытий для предохранения поверхностей от диффузионного насыщения кардинальным образом изменило технологический процесс изготовления большого числа деталей авиадвигателей. Настоящие изменения позволили разрабатывать максимально рациональные технологии упрочнения, что снижает трудоемкость и производственные затраты. Именно поэтому сегодня особенно важно создавать подобные участки и на других авиационных предприятиях, использовать усовершенствованные технологии и современное оборудование.

Связь с автором: fominalp@yandex.ru

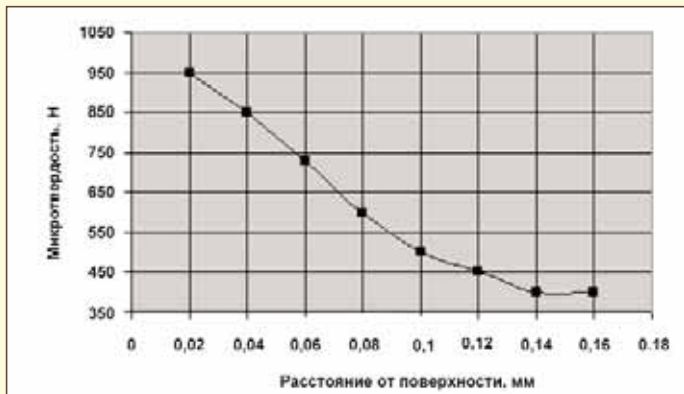


Рис. 4 Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя, сталь ВКС-5

Литература

1. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др. - М.: Высшая школа, 2001. - 493 с.
2. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. - М.: Металлургия, 1985. - 256 с.
3. Технология ионной химико-термической обработки деталей ГТД / Крымов В.В., Фомина Л.П. // Авиационная промышленность. - 2014. - № 4. - С 19-22.
4. Вакуумная цементация - эффективный способ упрочнения зубчатых колес газотурбинного двигателя / Л.П. Фомина, Н.М. Рыжов, Р.С. Фахуртдинов и др. // Авиация и космонавтика - 2008: Тез. докл. 7-й междунар. конф. - М., 2008. - С. 79.
5. Повышение качества защиты поверхности от науглероживания деталей газотурбинных двигателей / Фомина Л.П., Крымов В.В. // Авиационная промышленность. - 2015. - № 4. - С. 46-51.
6. Влияние химико-термической обработки на долговечность деталей ГТД / Фомина Л.П. // Двигатель - 2013. - № 6. - С. 8-10.



12-й МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ – ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

проводится в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 апреля 2014 г. № 541-р

17-19 мая '2016
Москва Павильон
ВДНХ №69



ОРГАНИЗАТОР

Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) и Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт)

СОДЕЙСТВИЕ

Правительство Российской Федерации
Торгово-промышленная палата Российской Федерации

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПАРТНЕРЫ

The International Bureau of Weight and Measures (BIPM)
International Organization of Legal Metrology (OIML)
Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions (CDOMET)

С ЭКСПОЗИЦИОННЫМ УЧАСТИЕМ

Минпромторг России, Росстандарт, Ростехнадзор, МВД России, ГК «Ростатом», ГК «Ростехологик», ОАО «Росатом», ОАО «РЖД», АО «КРЭТ»

КОНКУРСНАЯ КОМИССИЯ

ФБУ «Ростест-Москва»



УСТРОИТЕЛЬ И ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР

Компания «Вэстстрой Экспо»

ПРОГРАММА ФОРУМА

- 12-я выставка средств измерений и метрологического обеспечения «METROEXPO-2016»
- 5-я выставка промышленного оборудования и приборов для технической диагностики и экспертизы «CONTROL&DIAGNOSTIC-2016»
- 5-я выставка технологического и коммерческого учета энергоресурсов «RESMETERING-2016»
- 4-я выставка аналитических приборов и лабораторного оборудования промышленного и научного назначения «LABTEST-2016»
- 4-я выставка программного обеспечения и оборудования для промышленной автоматизации «PROMAUTOMATIC-2016»
- Первый Всероссийский Съезд метрологов и приборостроителей
- Всероссийская выставочно-конкурсная программа «ЗА ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ»

ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА
129223, Москва, а/я 35. ул. Искры, д. 31
Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)
E-mail: metrol@expoprom.ru • www.metrol.expoprom.ru

