

ЛИТЕРАТУРА

1. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1980. 456 с.
2. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука. 1973. 416 с.
3. Стебунов С.А., Биба Н.В. QForm – программа, созданная для технологов // Кузнечно-штамповочное производство. 2004. № 9. С. 38–43.
4. Биба Н.В., Лишний А.И., Стебунов С.А. Эффективность применения моделирования для разработки технологии штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 2001. № 5. С. 39–44.
5. Бубнов М.В., Скляренко В.Г., Арбина В.П. Разработка усовершенствованной технологии изготовления крупногабаритной штамповки диска ГТУ из сплава ЭИ698-ВД методом компьютерного моделирования по программе QForm-2D / Материалы и технологии для авиационно-космической техники – 2005: Тезисы докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов и аспирантов отрасли. М.: ВИАМ. 2005. С. 19–20.
6. Некрасов Б.Р., Бубнов М.В., Скляренко В.Г., Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Арбина В.П. Разработка и оптимизация технологии изготовления штамповки диска из сплава ЭП975-ИД с применением компьютерного моделирования / Молодежь в авиационном материаловедении: Тезисы докл. молодежной науч.-техн. конф. М.: ВИАМ. 2008. С. 25.

*В.И. ГРОМОВ, Н.А. КУРПЯКОВА,
О.В. СЕДОВ, Е.Н. КОРОВОВА*

ВАКУУМНАЯ И ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Совершенствование технологии производства деталей газотурбинных двигателей (ГТД) – одна из важнейших задач современного машиностроения. Актуальность ее решения возрастает в связи с разработкой ГТД нового поколения, для которых характерен значительный рост силовой и тепловой напряженности всех деталей конструкции. Для решения поставленной задачи необходима разработка новых высокоэффективных процессов химико-термической обработки (ХТО). Наиболее перспективными методами ХТО в настоящее время признаны вакуумные и ионно-плазменные способы упрочнения поверхности деталей.

Применение вакуумной термической обработки в машиностроении насчитывает более 80 лет, когда в 1924 году на американском предприятии RCA появилась первая вакуумная печь, применявшаяся для дегазации и отжига ламповых материалов. Интенсивное развитие вакуумных процессов при термической обработке материалов произошло после Второй мировой войны, когда повысились требования к качеству обработки материалов для аэрокосмической техники. Серийное производство вакуумного оборудования началось с середины 60-х годов прошлого века – были созданы первые удачные конструкции вакуумных печей, соответствующие приемлемому для промышленности критерию «цена–качество». С этого момента вакуумная термическая обработка заняла лидирующие позиции не только в «высоких» отраслях промышленности, но и в общем

машиностроении, автомобилестроении, инструментальном производстве, судостроении.

В это же время вакуумные печи начали применяться и для химико-термической обработки как при низких давлениях насыщающей среды (вакуумная ХТО), так и в насыщающей среде, активизированной тлеющим разрядом (ионно-плазменная ХТО).

Преимущество вакуумной и ионно-плазменной химико-термической обработки перед традиционными газовыми процессами ХТО заключается в следующем:

- сокращение продолжительности ХТО благодаря более интенсивному насыщению поверхности деталей;
- отсутствие окисления поверхности деталей и в силу этого исключение операций механической обработки по удалению дефектных оксидных слоев;
- возможность использования закалки в газовой среде взамен закалки в масле с целью снижения коробления деталей;
- уменьшение расхода насыщающих сред от нескольких раз до нескольких десятков раз;
- сокращение затрат на обеспечение экологической безопасности и промышленной санитарии в виду отсутствия опасных промышленных стоков и выбросов;
- применение компьютерной техники для проведения технологических процессов ХТО, что обеспечивает повторяемость результатов обработки;
- легкая встраиваемость технологического оборудования в автоматизированный цикл вплоть до создания «безлюдных» технологий;
- сокращение затрат на доводочные операции механической обработки деталей (хонингование, шлифование) достигаемое за счет уменьшения припусков на коробление деталей.

Ионно-плазменное азотирование деталей ГТД

Азотирование – насыщение поверхности металла азотом – эффективный широко применяемый в промышленности метод повышения долговечности деталей. В машиностроении наиболее широкое распространение получил процесс газового азотирования. Однако этот процесс имеет ряд существенных недостатков: большая продолжительность насыщения, трудности при азотировании легко пассивирующихся материалов, неравномерность толщины азотированного слоя и др. Одним из путей, позволяющих интенсифицировать процесс азотирования и оптимизировать свойства упрочняемой поверхности, – является проведение его в плазме тлеющего разряда (ионно-плазменное азотирование, ионно-вакуумное, ионное азотирование) [1, 2].

Принцип ионно-плазменного азотирования заключается в следующем: в разреженной азотсодержащей атмосфере предварительно вакуумированной газоразрядной камеры установки между катодом (деталью) и анодом (стенками камеры) возбуждается тлеющий разряд. Процесс проводится в азотоводородных газовых средах при температурах 470–600°C, давлении газовой среды 133–1300 Па, рабочем напряжении – от 400 до 1100 В. Продолжительность процесса составляет от нескольких десятков минут до нескольких десятков часов и определяется требуемой толщиной азотированных слоев.

После зажигания тлеющего разряда происходит лавинообразный процесс ионизации газовой среды – плазмы тлеющего газового разряда, т.е. образовавшиеся электроны и ионы азота и водорода в результате столкновений с нейтральными частицами газа вызывают появление новых пар заряженных частиц. Ионы азота и водорода с большой кинетической энергией бомбардируют поверхность катода (детали) вызывают ее разогрев до температуры диффузионного насыщения (рис. 1).

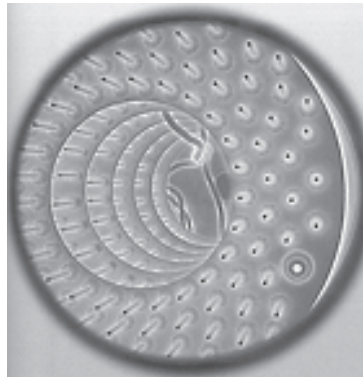


Рис. 1. Садка деталей, подвергаемых ионному азотированию, охваченная свечением плазмы тлеющего разряда

Общепризнанная теория ионного азотирования до сих пор не создана. В научной литературе в равной мере используются две схемы образования диффузионных слоев при ионном азотировании (рис. 2).

Суть схемы ионного азотирования, разработанной специалистами немецкой фирмы «Клекнер», заключается в предварительном образовании нитридов в плазме тлеющего разряда, их осаждении на поверхность азотированной детали, распаде нитридов с образованием ионов азота и диффузии ионов азота с образованием зоны твердого раствора (диффузионной зоны азотирования) (см. рис. 2, а) [3].

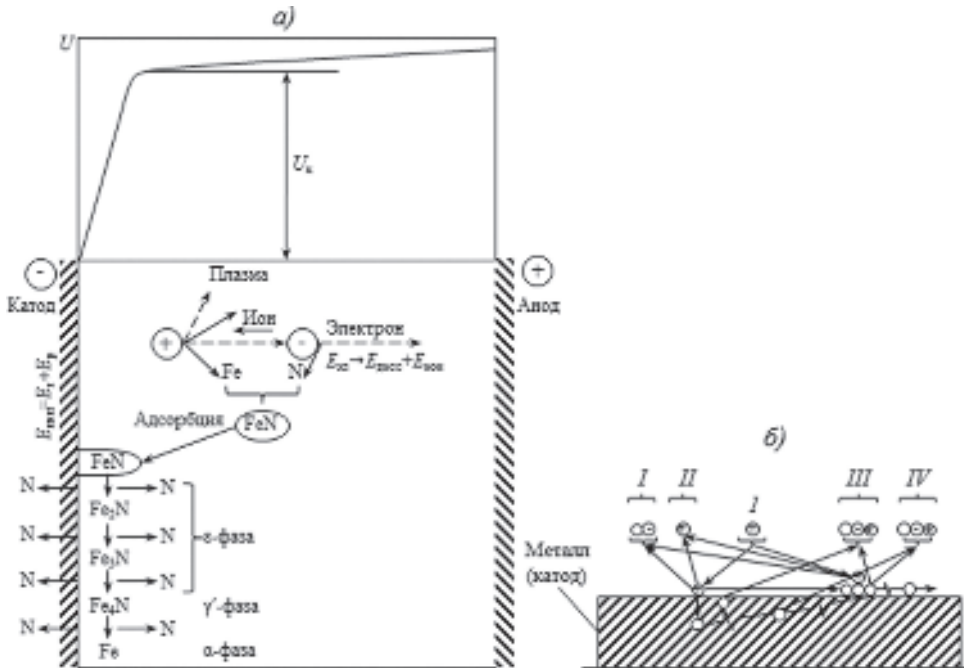


Рис. 2. Схемы Кельбеля (а) и Б.Н. Арзамасова (б) взаимодействия плазмы с поверхностью катода (I – бомбардирующий ион) при ионно-плазменном азотировании. Процессы: рассеяния частиц (I), эмиссии электронов (II), катодного распыления (III) и термической эмиссии (IV)

Проведенные советскими учеными исследования состава плазмы тлеющего разряда не выявили наличия в ней нитридов [4], имели место лишь ионы и атомы азота и железа. Это позволило создать альтернативную теорию взаимодействия плазмы тлеющего разряда с поверхностью металлов (см. рис. 2, б). Суть предложенной схемы заключается в многоступенчатом протекании процесса ионного азотирования. Необходимо отметить, что, согласно приведенной схеме, процессы взаимодействия частиц плазмы с металлом происходят исключительно на поверхности металла.

Ионно-плазменное азотирование – многофакторный процесс. На результат обработки влияют как состав газовой среды (соотношение азота и водорода в газовой среде), температура, продолжительность процесса азотирования, давление газовой среды, так и электрические характеристики (напряжение на катоде, сила разрядного тока). В последнее время широкое распространение получил процесс импульсного ионно-плазменного азотирования, при котором разрядный ток подается импульсно, причем время длительности импульса и паузы между импульсами могут варьироваться в широких пределах, в зависимости от требований технологического процесса ионно-плазменного азотирования.

Большое значение имеет также режим предварительной термической обработки азотируемых деталей. Во избежание разупрочнения деталей (снижения механических свойств сердцевины деталей) температура азотирования не должна превышать температуру последнего нагрева перед азотированием деталей. Обычно этим нагревом является нагрев под высокий отпуск (термическое улучшение сталей).

В настоящее время рынок по производству оборудования и разработке технологий ионно-плазменной ХТО весьма обширен – лидирующие позиции занимают немецкие, французские, итальянские, английские, польские, болгарские фирмы. В России усилиями отраслевой и вузовской науки, предприятий аэрокосмической отрасли также накоплен значительный научно-технический задел в области вакуумной и ионно-плазменной ХТО. Установки ионно-плазменного азотирования оснаще-

ны компьютерной техникой, что обеспечивает высокую повторяемость получаемых результатов, тем самым гарантируется стабильно высокое качество упрочняемых деталей. Внешний вид установки ионно-плазменного азотирования немецкой фирмы «ELTRO» приведен на рис. 3.

Для сокращения продолжительности разогрева деталей в последнее время применяют установки ионно-плазменного азотирования, имеющие в своем составе блоки радиационного нагрева садки. На таких установках предусмотрены специальные нагреватели, расположенные снаружи металлической футерованной газоразрядной камеры. Стенки



Рис. 3. Установка ионно-плазменного азотирования фирмы «ELTRO»

газоразрядной камеры, получая тепло от нагревателей, отдают его деталям, ускоряя тем самым процесс нагрева садки (рис. 4).

Варьируя параметры ионно-плазменного азотирования, можно целенаправленно влиять на структуру, толщину и твердость азотированного слоя, определяя тем самым служебные характеристики деталей.

Микроструктура диффузионных слоев, образующихся при ионном азотировании, зависит от класса стали (перлитный, аустенитный, мартенситный), однако все диффузионные слои имеют общие черты: хорошо связанную основную диффузионную зону, протяженность которой напрямую зависит от температуры и продолжительности обработки, а также нитридный слой, толщина которого зависит как от температурно-временных характеристик процесса, так и от химического состава обрабатываемых сталей (рис. 5). В настоящее время азотированию подвергают мелко модульные шестерни, валики, вставки, втулки, рессоры, шлицевые детали ГТД, изготовленные из термически улучшен-

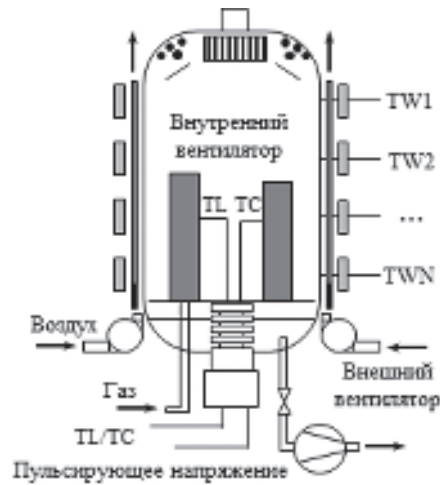


Рис. 4. Схема установки ионно-плазменного азотирования с радиационным нагревом садки деталей

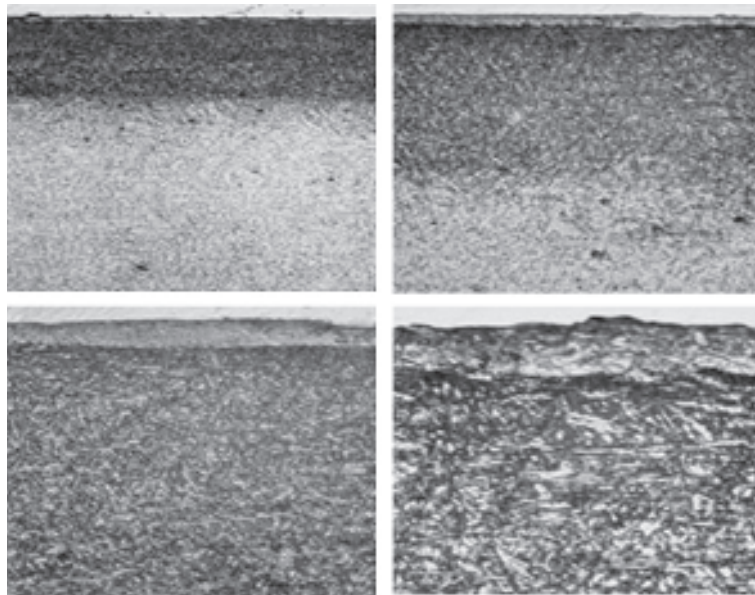


Рис. 5. Типичные структуры азотированных слоев сталей различных классов после ионного азотирования

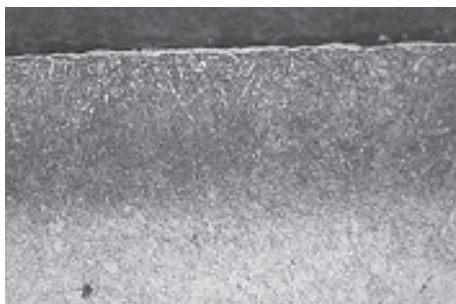


Рис. 6. Микроструктура азотированного слоя стали мартенситного класса после ионно-плазменного азотирования

ных сталей переходного и мартенситного класса.

В ВИАМ разработаны процессы, позволяющие варьировать толщину диффузионных слоев от 0,1 до 0,8 мм, достигать твердости азотированной поверхности до 1000 HV и получать на различных поверхностях деталей (если того требует их конструкция) различные по толщине азотированные слои.

На рис. 6 представлено типичное строение азотированного слоя стали мартенситного класса после ионного азотирования. Микроструктура азо-

тированного слоя представляет собой твердый раствор азота в железе (азотистый сорбит с ориентацией по мартенситу). На поверхности присутствует сплошной тонкий нитридный слой толщиной 10–12 мкм.

Коробление деталей при ионно-плазменном азотировании незначительно, потому детали, подвергаемые ионно-плазменному азотированию, являются окончательно изготовленными и имеют минимальные припуски под доводочную механическую обработку (тонкое шлифование, хонингование).

Вакуумная цементация и нитроцементация деталей ГТД

Цементация – наиболее распространенный вид упрочняющей ХТО, которой отдают предпочтение при производстве тяжело нагруженных деталей, в частности крупномодульных зубчатых колес ГТД. Процесс цементации представляет собой диффузионное насыщение поверхности металла углеродом при высоких температурах в различных углеродсодержащих технологических средах с последующей упрочняющей термической обработкой.

Обеспечение требуемых характеристик цементованного слоя зависит от способа и режимов цементации. Определяющими являются два основных фактора – эффективность технологической атмосферы и технологического оборудования. При цементации применяются два типа технологической атмосферы: с контролируемым углеродным потенциалом и с контролируемым расходом технологических газов.

Атмосфера с контролируемым углеродным потенциалом представляет собой искусственную газовую среду, в которой насыщающая способность задается углеродным потенциалом. Науглероживание в ней характеризуется хорошей повторяемостью и стабильностью характеристик слоя только при насыщении твердого раствора – аустенита. Образование в аустените карбидных соединений нарушает равновесие атмосферы с поверхностью металла, в связи с чем такая науглероживающая атмосфера малопригодна для комплексно-легированных сталей, в частности для теплостойких сталей мартенситного класса, цементованный слой которых должен иметь значительную долю избыточных карбидов.

Для цементации комплексно-легированных сталей применяют способы науглероживания в атмосфере, получаемой в результате пиролиза богатых углеводородами жидкостей (пиробензол, синтин, керосин). Науглероживающая способность получаемой атмосферы контролируется расходом. Насыщающая способность такой атмосферы выше, чем у атмосферы с контролируемым углеродным потенциалом, но надежно контролировать концентрацию углерода в слое в этом случае не представляется возможным. В результате на поверхности обрабатываемых деталей происходит образование сажи или пироуглерода, что приводит к «пятнистой» цементации, кроме того, при охлаждении садки происходит контакт нагретых деталей с воздухом и, как следствие, окисление и обезуглероживание цементованного слоя, что нежелательно – особенно для нешлифуемых частей деталей, например оснований зубьев шестерен.

Основным дефектом слоев при газовой цементации является обезуглероживание поверхности деталей, так как кислород неизбежно присутствует в атмосфере печи (рис. 7), что приводит к снижению усталостной и контактной долговечности деталей [5].

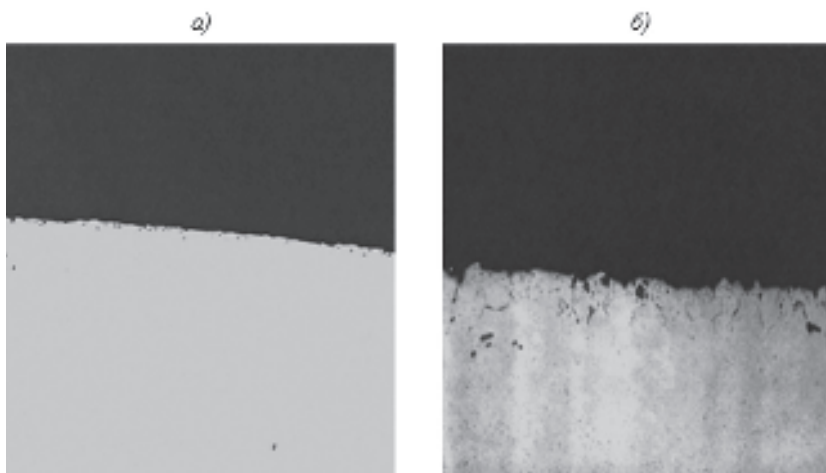


Рис. 7. Внешний вид ($\times 100$) поверхности стальных образцов после вакуумной (а) и газовой (б) цементации (нетравленный шлиф)

Указанные недостатки газовых процессов ХТО устраняются с помощью процессов с использованием вакуумных технологий.

Цементация при низком давлении (вакуумная цементация) с применением газообразных углеводородов позволила перевести процесс на качественно новый уровень: избавиться от окисления и обезуглероживания приповерхностной части цементованного слоя, исключить сажеобразование, обеспечить равномерное насыщение упрочняемой поверхности, регулировать концентрацию углерода в слое. Компьютерное оснащение установок дало возможность при помощи специальных программ регулировать технологические параметры, использовать больше способов насыщения – например, широко стал применяться способ циклического насыщения, при котором формирование цемента-



Рис. 8. Установка вакуумной цементации фирмы «SECO/WARWICK»

ванного слоя происходит по механизму реакционной диффузии путем образования карбидов на активной стадии цикла и частичного растворения их на пассивной стадии (при подаче углеводорода в рабочую камеру). Применение цементации при низком давлении позволило расширить номенклатуру цементуемых сталей. Использование современного оборудования позволяет получать качественные диффузионные слои

даже на тех материалах, которые другими способами насыщать не удавалось.

Процесс вакуумной цементации реализуют в специализированных установках (рис. 8). Основными технологическими факторами процесса вакуумной цементации являются: температура цементации, вид и расход насыщающей газовой среды, давление газовой среды, длительность и соотношение стадии подачи насыщающей газовой среды и стадии диффузионного рассасывания. Вакуумную цементацию деталей из сталей переходного и мартенситного класса обычно проводят при температурах 900–1050°C, в газовой среде ацетилена (иногда с добавками других газообразных углеводородов), общая продолжительность цементации определяется получением необходимой толщины цементованного слоя. Газовая среда подается в рабочую камеру установки циклически, что связано с особенностями поведения ацетилена при науглероживании поверхностей деталей.

Технологическую атмосферу ацетилена считают идеальной средой для науглероживания. Причиной тому – свойство его молекул адсорбироваться на насыщаемой поверхности и диссоциировать при относительно невысоких температурах. Как показывают результаты исследований вакуумной цементации сталей мартенситного класса, на активной стадии цикла молекулы ацетилена диссоциируют непосредственно на поверхности детали. Скорость диссоциации высокая; поверхность полностью и практически мгновенно заполняется атомами углерода, что вызывает образование на поверхности почти сплошного слоя карбидов. На пассивной стадии цикла часть карбидов растворяется, поставляя атомы углерода в твердый раствор. В результате насыщение происходит под тонким слоем карбидной фазы, концентрация углерода в которой (~7%) определяет углеродный потенциал газовой среды. Поддерживая высокую концентрацию углерода на поверхности, карбидная фаза ускоряет формирование слоя. При этом циклический режим подачи ацетилена способствует образованию частиц карбидной фазы под поверхностью и более плавному распределению концентрации углерода по толщине слоя. Карбиды, расположенные на насыщаемой поверхности, не обладают каталитической активностью. Ацетилен перестает диссоциировать и поставлять углерод к той части поверхности, которая закрыта карбидной фазой. В результате процесс науглероживания идет в режиме саморегулирования, что является несомненным преимуществом вакуумной цементации перед другими способами.

Основными преимуществами вакуумной цементации перед газовой являются: высокая скорость насыщения поверхности углеродом и отсутствие окисления цементованных поверхностей деталей, что обеспечивает их высокие эксплуатационные свойства.

Особенностью технологического процесса упрочнения деталей с использованием вакуумной цементации является возможность проведения закалки деталей в вакуумных печах в газовой среде. В качестве закалочной среды в этом случае применяют газообразный азот (реже аргон или гелий) при давлении в закалочной вакуумной печи до 1,5 МПа и более.

Конструкция вакуумной печи позволяет осуществлять равномерный тепловод от закаливаемых деталей, снижая тем самым величину их коробления (по сравнению с закалкой в масле). Использование закалки в газовой среде предпочтительно в случае сложной геометрической формы закаливаемых деталей. Немаловажно и то, что закалка в газовой среде является «сухой» и не требует промывки деталей от загрязнений после масляной закалки.

В ВИАМ разработаны процессы, позволяющие получать толщину диффузионных слоев при вакуумной цементации деталей ГТД – от 0,9 до 2,5 мм, достигая значений твердости цементованной поверхности >60 HRC. Микроструктура цементованного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации и полного цикла упрочняющей обработки (высокий отпуск, закалка, обработка холодом, низкий отпуск) представляет собой мартенсит и карбиды (рис. 9).

В настоящее время специалисты в области вакуумной химико-термической обработки много внимания уделяют разработке процессов вакуумной нитроцементации. Использование вакуумной техники для проведения процессов нитроцементации при низком давлении (вакуумной нитроцементации) позволило исключить обезуглероживание и внутреннее окисление легирующих элементов в слое, что, в свою очередь, снимает ограничение на толщину диффузионного слоя и допустимую концентрацию азота ($\leq 0,4\%$ – при газовых процессах). Кроме того, так как среда насыщения не содержит кислорода, то в диффузионном слое при вакуумной нитроцементации «темная составляющая» не наблюдается. Необходимо отметить, что процессы вакуумной нитроцементации находятся в процессе разработки и серийно не используются.

Ионно-плазменные и вакуумные технологические процессы химико-термической обработки являются эффективными способами упрочнения ответственных деталей ГТД.

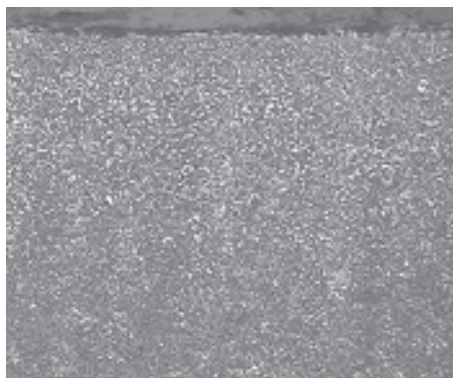
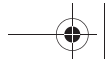


Рис. 9. Микроструктура ($\times 200$) цементованного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации и упрочняющей обработки



ЛИТЕРАТУРА

1. *Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение. 1979. 224 с.
2. *Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия. 1985. 256 с.
3. Азотирование и карбонитрация: Пер. с нем. М.: Металлургия. 1990. 280 с.
4. *Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С.* и др. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1999. 400 с.
5. *Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурич И.П., Новиков В.С., Рыжов Н.М.* Производство зубчатых колес. М.: Высшая школа. 2001. 494 с.

