УДК 620.179.16:62-135

КОНТРОЛЬ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-МЕТОДОМ

© Елена Алексеевна Мотова, Надежда Евгеньевна Никитина, Юрий Павлович Тарасенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиностроения Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия
motik-1@mail.ru

Аннотация. *Ультразвуковым эхо-методом неразрушающего контроля исследуется структурнре состояние материала рабочих лопаток газотурбинного двигателя после эксплуатации, восстановительного ремонта и повторной эксплуатации. Исследование проводится на основе измерения скорости распространения и затухания импульсов продольных и сдвиговых упругих волн в материале.*

Газотурбинный двигатель (ГТД) типа MS 5142 газоперекачивающего агрегата ГТК-25И служит приводом центробежного нагнетателя природного газа, предназначенного для его сжатия и транспортировки по технологическим и магистральным газопроводам. Рабочие лопатки компрессора являются одними из наиболее ответственных деталей проточной части ГТД. Они работают в весьма сложных условиях повышенных температур (~300^0C), влажности и запыленности, подвергаясь воздействию напряжений изгиба и растяжения. В результате такой эксплуатации материал лопаток испытывает изменения структуры, приводящие, к снижению прочностных характеристик, что ограничивает их дальнейшую работоспособность.

В настоящее время традиционные способы увеличения ресурса работы узлов и деталей машин, например, химико-термическая обработка, часто являются экономически невыгодными, так как требуют использования дорогостоящих и дефицитных элементов (хром, молибден, ванадий, титан, никель и др.) и высоких энергозатрат. Вследствие этого целесообразным является создание на рабочих поверхностях деталей упрочняющих и защитных покрытий с повышенными прочностными и антикоррозионными свойствами.

Специалистами ООО НПЦ «Трибоника» разработаны и успешно применяются восстановительно-ремонтные технологии с применением ионно-плазменных покрытий [1,2] с целью продления срока службы деталей проточной части ГТД. Разработка неразрушающих методов контроля и диагностики материала лопаток как после длительной эксплуатации, так и после ремонта является актуальной задачей.

1. Применение ультразвука для неразрушающего контроля структурного состояния конструкционных материалов.

В настоящее время все большее применение в различных областях промышленности, на различных стадиях изготовления, эксплуатации и ремонта находят акустические методы неразрушающего контроля (НК) и диагностики. Акустический метод исследования заключается, в основном, в измерении важнейших информативных характеристик - затухания и скорости распространения упругих волн в материале и анализе экспериментально полученных зависимостей. Наиболее распространенным в практике ультразвукового (УЗ) контроля изделий различного назначения можно считать эхо-

импульсный метод. Около 90% объектов, контролируемых акустическими методами, проверяют эхо-методом. Применяя различные типы волн, с его помощью решают задачи дефектоскопии поковок, отливок, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхо-метод используют также для измерения размеров изделий. Измеряют время прихода донного сигнала и, зная скорость ультразвука в материале, определяют толщину изделия при одностороннем доступе к нему. Если известна толщина, по донному сигналу измеряют скорость и оценивают затухание ультразвука [3].

Наиболее популярные методы УЗ контроля основаны на оценке затухания ультразвуковых волн в материале. Это обусловлено, в первую очередь, большой чувствительностью указанного параметра к структурным изменениям в материале. Возможность применения ультразвука для изучения структуры металлов была впервые обнаружена С.Я. Соколовым, установившим в конце первой половины прошлого века, что рассеяние УЗ существенно зависит от среднего размера зерна металла.

В лаборатории С.Я. Соколова и под его руководством Л.Г. Меркулов применил УЗ эхо-метод для исследования структуры двух углеродистых конструкционных сталей и инструментальной стали У12 [4]. По результатам исследований образцов стали 15, нагретых до температуры 900^0С и 1200^0С и охлажденных на воздухе, коэффициент затухания продольной волны на частоте 7,2 МГц составил 4 и 14 нп/м (разница более чем в 3 раза). Образцы стали У12 были нагреты до 800^0С (охлаждение в масле и в печи) и при 1100^0С (охлаждение в печи). После нагрева до 800^0С и охлаждения в масле образец стали У12 был подвергнут отпуску при 200^0С. При этом коэффициент затухания УЗ частотой 7,2 МГц составил 2,5, 8 и 23 нп/м (изменение более чем в 3 и почти в 3 раза соответственно).

Экспериментальные данные показали, что наименьшим затуханием обладает закаленная сталь, а наибольшим – образцы с перегретой структурой, так как перегрев дает значительный рост величины зерна металла. В то же время разница скоростей закаленных и отожженных образцов не превысила 0,5%, что уложилось в пределы погрешности проведенных измерений.

Алюминиевые сплавы подвергают закалке для получения пересыщенного твердого раствора, из которого при последующем старении выпадает мелкодисперсная фаза, упрочняющая сплав. В книге [5] приведены экспериментальные данные по измерению эхо-методом коэффициента затухания УЗ частотой 2 МГц в образцах широко распространенного сплава Д16, закаленных при температурах от 480 до 540^0С (7 образцов с интервалом в 10^0С). Оказалось, что коэффициент затухания в интервале 480-520^0С растет от 0,5 до 1,3 нп/м; затем резко возрастает почти в 3 раза и еще более чем в два раза (до 9,5 нп/м) при достижении температуры 540^0С. Это объясняется возникновением пережога сплава. В то же время изменение скорости ультразвука, соответствующее изменению одной из резонансных частот образца, при увеличении температуры закалки от 520 до 540^0С составило 0,4%.

Способы отслеживания структурных изменений по значениям скоростей упругих волн применяются меньше – в силу того, что скорости эти, определяемые в основном модулями упругости, не склонны к значительным вариациям даже при существенных изменениях структурного состояния материала, в частности, при термообработке. Однако техника акустических измерений к настоящему времени ушла достаточно далеко от той, с помощью которой были проведены пионерские эксперименты С.Я. Соколова и Л.Г. Меркулова.

В работе [6] описано, в частности, исследование изменения скорости ультразвуковых объемных волн в образцах стали 20, выдержанных в течение часа при температуре 900^0С и закаленных в воде комнатной температуры, в зависимости от температуры отпуска (150-600^0С). Показано, что с увеличением температуры отпуска скорость ультразвука в сталях монотонно растет, а ее изменение составляет примерно 0,6%. Наибольший рост скорости распространения ультразвука наблюдался в области максимального распада пересыщенного твердого раствора углерода в альфа-железе (мартенсит), при температурах 150-400^0С.

Книга [7] посвящена экспериментальным исследованиям связи скорости продольных УЗ волн в сталях и сплавах с особенностями их структуры, а именно, с химическим и

фазовым составом, величиной структурных составляющих, наличием внутренних напряжений, пластической деформации и микроповреждений. Влияние структур, получаемых при различных температурах отпуска после закалки шести серий образцов при температурах от 753^{0}С до 953^{0}С (интервал температур 40^{0}С) исследовали, в частности, на стали У8А. При увеличении температуры отпуска от 160 до 550^{0}С (и уменьшении количества остаточного аустенита от 15% до 0) скорость ультразвука возрастала на относительную величину 1,2-1,5%, в зависимости от температуры закалки. В целом авторы книги [7] подтвердили, что скорость ультразвука в сталях и сплавах является структурно-чувствительной характеристикой, которую можно использовать для анализа состояния материала, если иметь в своем распоряжении УЗ аппаратуру, позволяющую оценивать величину изменения скорости упругих волн с чувствительностью по крайней мере 0,1%

Большой информативностью при исследовании состояния твердых тел обладают сдвиговые упругие волны. В частности, при возникновении напряжений или пластической деформации вдоль данного направления скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек этого направления, будут различны. Впервые эта разница была обнаружена в конце первой половины прошлого века в стали холодной прокатки [8]. Оказалось, что скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката, равны 3213 м/с и 3110 м/с соответственно. Нетрудно видеть, что разница скоростей составляет 3,3% - величину, более существенную, чем изменения скорости ультразвука в экспериментах, описанных выше.

Опираясь на проведенный анализ литературных данных, в своих акустических измерениях мы выбрали для диагностики состояния рабочих лопаток компрессора коэффициент затухания, скорость распространения продольных и сдвиговых волн, а также разницу скоростей сдвиговых волн взаимно перпендикулярной поляризации.

2. Экспериментальные исследования состояния основного металла компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта

Цель данной работы заключается в изучении акустических свойств основного металла компрессорных лопаток для выяснения влияния восстановительной термообработки и нанесенного по технологии PVD (Physical Vapor Deposition) покрытия нитрида титана (*TiN*), а также длительной эксплуатации в составе ГТД на изменение структуры материала лопатки. Влияние самого покрытия на распространение объемных упругих волн очень мало, так как его толщина (~5 мкм) незначительна по сравнению с длиной волны (0,3-0,7 мм в нашем случае).

Ультразвуковой эхо-метод неразрушающего контроля применен нами для контроля состояния материала рабочих лопаток из нержавеющей коррозионно-стойкой стали (отечественный аналог – сталь 12Х13), эксплуатирующихся в ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». На рис. 1 представлены рабочие лопатки пятой ступени компрессора, а именно: до ремонта после пятидесяти тысяч часов эксплуатации (5.1); после восстановления с покрытием нитридом титана *TiN* (5.2) и последующей эксплуатации в течение пятидесяти тысяч часов (5.3). В качестве «неработавшей» лопатки (5.0) использовали лопатку четвертой ступени, подвергающуюся наименьшим нагрузкам при эксплуатации.

Блок-схема акустического стенда для определения затухания и скорости ультразвуковых продольных и сдвиговых волн описана в работах [8,9]. В состав экспериментальной установки входят: серийный прибор измеритель временных интервалов И2-26, состоящий из блока источника временных сдвигов и блока индикатора; блок формирования и усиления импульсов (БФУ) оригинальной конструкции; блок питания БФУ, а также пьезопреобразователи продольных и сдвиговых колебаний оригинальной конструкции.

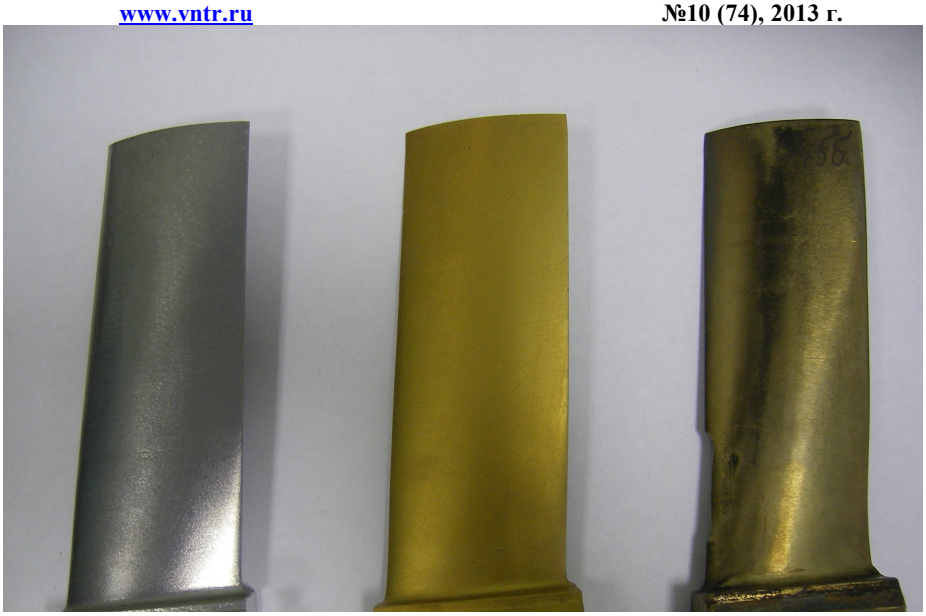


Рис. 1. Рабочие лопатки пятой ступени осевого компрессора газотурбинного двигателя MS 5142 газоперекачивающего агрегата ГТК-25И (5.1, 5.2, 5.3)

Для каждой серии испытуемых деталей проведены акустические измерения, а именно: измерения ослабления в материале амплитуды эхо-импульсов продольных и сдвиговых волн частотой 7 и 9,5 МГц соответственно; прецизионные измерения времени распространения импульсов продольных, а также сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации. Распространение сдвиговых и продольных волны - по нормали к поверхности лопатки. Контролю подвергалась средняя часть вблизи основания пера лопатки. По результатам измерений определены: коэффициент затухания α_3 продольных волн, коэффициенты затухания α_1 сдвиговых волн параллельной оси лопатки поляризации, величины α_2 для волн перпендикулярной поляризации; значения скоростей объемных волн и относительная разница скоростей сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации.

Коэффициентом затухания объемных упругих волн в материале считали среднюю величину из трех возможных комбинаций амплитуд трех первых четко различимых эхо-импульсов, а именно:

$$\alpha_{m-n} = \frac{ln\, A_m / A_n}{2(n-m)\cdot h}, \ldots (m = 1,2; n = 2,3) \qquad (1)$$

где A_m - величина максимальной амплитуды m-го эхо-импульса; A_n - величина максимальной амплитуды n-го эхо-импульса; h - толщина лопатки, в метрах.

Такая процедура была выбрана потому, что на экране осциллографа при проведении измерений не всегда четко наблюдается экспоненциальная зависимость амплитуды эхо-импульса и его номера. На рис. 2 представлены результаты оценки коэффициента затухания α_1 сдвиговой волны параллельной оси лопатки поляризации, величины α_2 для волн перпендикулярной к направлению оси детали поляризации и величины α_3 для продольных волн.

Скорости продольных и сдвиговых волн вычисляются по результатам измерений задержки импульса в материале следующим образом:

$$V_i = \frac{2(n-1)h}{t_i}(i = 1,2,3), \qquad (2)$$

где V_1, V_2 - скорости сдвиговых волн параллельной и перпендикулярной оси лопатки поляризации; V_3 - скорость продольных волн; n - номер последнего из хорошо различимых эхо-импульсов, h - толщина лопатки; t_i - разница показаний линии задержки между выбранными реперными точками в первом и последнем (n-ом) из хорошо различимых эхо-импульсов.

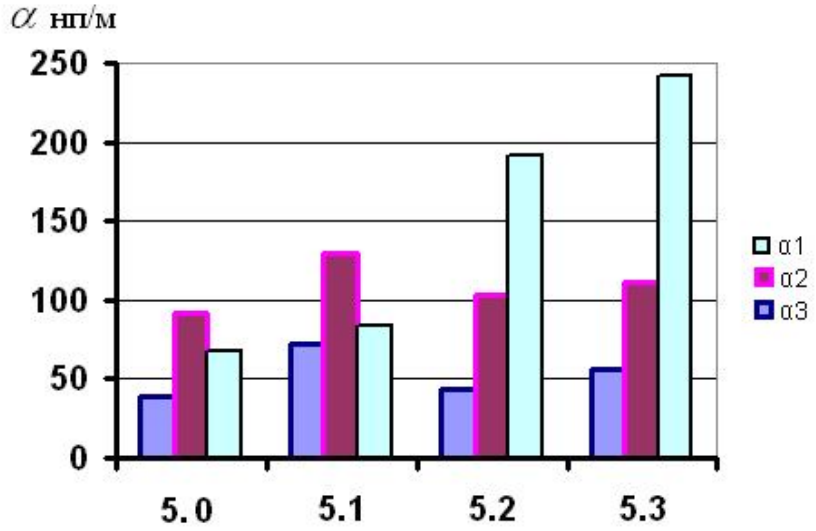


Рис. 2. Коэффициенты затухания продольных и сдвиговых волн в материале лопаток

Ввиду большой неопределенности в определении средней толщины материала в области контроля абсолютные значения скоростей упругих волн вряд ли могут дать информацию об изменении структурного состоянии материала детали. В то же время, относительная разница скоростей сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации, приводящая к разнице времен их распространения, вполне может служить информативным параметром ультразвукового метода неразрушающего контроля. Это показывают и литературные данные, приведенные в начале статьи. По результатам измерения задержек импульсов сдвиговых волн были вычислены параметры акустической анизотропии материала рабочих лопаток компрессора в точке контроля:

$$a_0 = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}} \times 100\%, \qquad (3)$$

где t_1 - задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной вдоль оси лопатки; t_2 - задержка импульса сдвиговой волны, поляризованной поперек оси лопатки.

Как принято в неразрушающем контроле, величина задержки отсчитывалась от первого отраженного импульса. Погрешность определения величины a_0 по результатам измерения временного интервала между первым и третьим эхо-импульсами составила 0,3%.

В таблице приведены результаты определения скоростей V_3, V_2, V_1 в исследованной стали, а также параметры акустической анизотропии, на разных стадиях эксплуатации и ремонта.

Таблица

Параметры распространения объемных упругих волн в материале лопаток

№ образца	5.0	5.1	5.2	5.3
$h, мм$	6,95	6,25	6,25	6,00

$V_3, м/сек$	6043	6035	6075	6045
$V_2, м/сек$	3296	3300	3365	3299
$V_1, м/сек$	3388	3381	3387	3377
$\alpha_0, \%$	1,3	2,4	0,7	2,3

Поскольку обе поверхности лопатки неплоские, мы приняли погрешность измерения толщины равной 0,05 мм, то есть 0,8% для самой тонкой лопатки. Погрешность измерения задержки импульсов упругих волн в материале составляет 0,01 мкс, при базе измерения 4-8 мкс (видно 2-3 эхо-импульса) относительная погрешность составит 0,2-0,3% - гораздо меньшую величину. Таким образом, точность определения скорости упругих волн определяется в основном погрешностью измерения толщины материала и может быть принята равной 1%, то есть для сдвиговых волн 35 м/с, а для продольных волн 60 м/с. Таблица показывает, что все значения скоростей волн фактически находятся в пределах погрешности акустических измерений. В то же время параметры акустической анизотропии материала исследованных лопаток отличаются более существенно.

3. Сравнение результатов акустических и металлографических исследований структурного состояния компрессорных лопаток

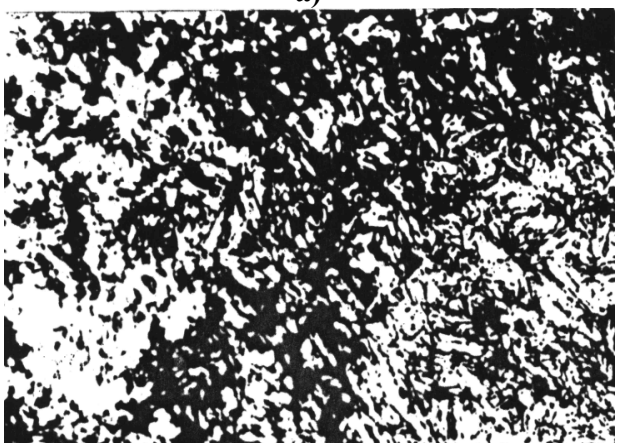
Для исследования микроструктуры материала сотрудниками ООО НПЦ «Трибоника» использован метод металлографического анализа (после травления электроимпульсной обработкой на установке ЭИП-1 в течение 5 минут) на световом микроскопе «Неофот-32». Основной структурной составляющей материала лопаток является перлит. Установлено, что после пятидесяти тысяч часов эксплуатации в материале лопатки (рис. 3,а) наблюдается коагуляция карбидной фазы, которая приводит к образованию гетерогенной структуры.

Образец 5.2 прошел восстановительную термообработку в защитной атмосфере (в аргоне) при температуре 700ºС в течение четырех часов, после которой на него нанесено покрытие нитрида титана. В результате восстановительной термообработки на микрофотографии (рис. 3,б) наблюдается измельчение карбидной фазы и ее перераспределение по объему.

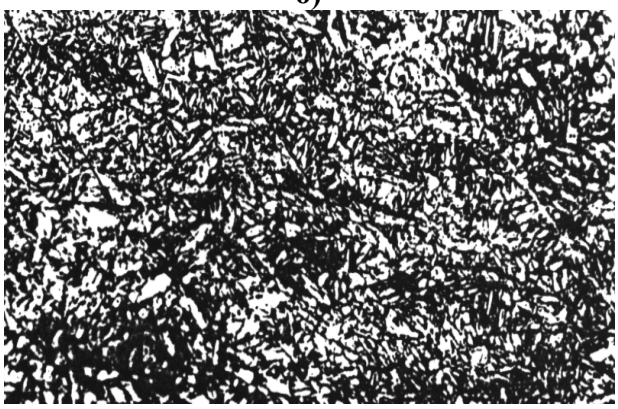
Проведем некоторые сравнения результатов металлографических и акустических исследований структурного состояния исследуемой стали на разных стадиях эксплуатации и ремонта. При этом будем иметь в виду, что упругие волны мегагерцового диапазона частот (миллиметровые волны), конечно, не позволят нам «рассмотреть» особенности структуры материала, выявляемые с использованием более коротких волн (рентгеновское или световое излучение). Однако с помощью ультразвука можно определять, в том числе в металлах и сплавах, усредненные по объему УЗ пучка, то есть интегральные характеристики структуры, которые фактически невозможно получить, комбинируя данные различных микроструктурных исследований с той или иной степенью их соединения.

Для упругих волн среда их распространения может быть охарактеризована двумя основными свойствами [11]: наличие масштабных параметров, связанных с размерами кристаллитов, зерен, включений и других особенностей структуры; наличие и «резкость» границ между составляющими структуры.

а)



б)



в)

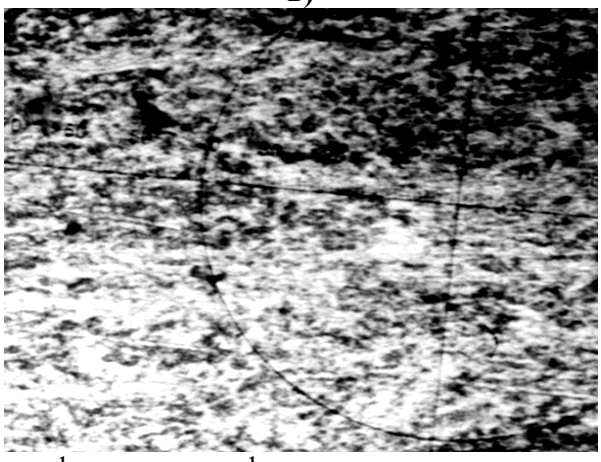


Рис. 3. Фотографии микрошлифов материала компрессорных лопаток:
а) 5.1, после 50 000 часов эксплуатации;
б) 5.2, после восстановительной термообработки;
в) 5.3, после восстановления с покрытием *TiN* и повторной эксплуатации (Х400).

По сравнению с размерами структурных составляющих металлов и сплавов УЗ волны довольно «длинные». Существование в среде размерного параметра, много меньшего длины волны, приведет к слабой высокочастотной дисперсии волн и к их рассеянию преимущественно релеевского типа. На скорость и затухание волн также повлияет количество и «качество» существующих в материале внутренних границ. Сдвиговые волны

должны быть более чувствительны к величине размерного параметра в направлении поляризации волны и к наличию границ, перпендикулярных этому направлению.

Таким образом, увеличение размерного параметра в случае коагуляции карбидной фазы, его уменьшение и увеличение количества внутренних границ в случае ее размельчения могут повлиять на акустические характеристики материала. Что же произошло с материалом компрессорной лопатки после первичной эксплуатации, с точки зрения распространения волн? Увеличился характерный размерный параметр структуры, что действительно привело к увеличению коэффициента затухания всех типов волн (рис. 2).

И наоборот, в результате измельчения карбидной фазы и образования более однородной структуры после восстановительной термообработки наблюдается уменьшение коэффициента затухания сдвиговых волн перпендикулярной оси лопатки поляризации α_2 и коэффициента затухания продольных волн α_3. Однако этого нет в случае сдвиговых волн параллельной оси лопатки поляризации, наоборот, величина α_1 существенно возрастает. По-видимому, на этот параметр влияет усложнение картины внутренних границ между составляющими структуры. После термообработки обычно преимущественная ориентация структурных составляющих становится менее заметной. Действительно, акустическая анизотропия образца 5.2, прошедшего термообработку, уменьшилась более чем в два раза (см. таблицу).

Проведем сравнение микроструктур материала деталей 5.2 и 5.3, проработавшей после ремонта еще 50 000 часов. В микроструктуре лопатки 5.3 (рис. 3,в) снова наблюдается коагуляция карбидной фазы, аналогичная той, что наблюдалась в образце 5.1 (лопатка, проработавшая до ремонта 50 000 часов). На микрофотографии появляется более заметная преимущественная ориентация структурных составляющих. Опять увеличился характерный размерный параметр структуры, однако это слабо повлияло на коэффициенты затухания α_2 и α_3. В то же время коэффициент затухания α_1 волн параллельной оси лопатки поляризации увеличился еще на четверть, то есть более чем в 3 раза по сравнению с неработавшей лопаткой или даже с проработавшей первый срок (рис. 2).

Наблюдается также возрастание параметра акустической анизотропии до величины, свойственной образцу 5.1 (таблица). Можно предположить, что возрастание анизотропии связано с эксплуатацией компрессорной лопатки, с циклическими и статическими нагрузками (может быть, даже пластической деформацией под действием центробежных сил).

Отличие поведения акустического параметра α_1 от тех же самых параметров других типов волн может свидетельствовать о зарождении множества новых границ, расположенных перпендикулярно оси лопатки (могут возникнуть предпосылки появления микротрещин, ориентированных в указанной плоскости).

Основные выводы по работе

1. Коэффициент затухания сдвиговых волн, поляризованных параллельно оси лопатки, может быть использован в качестве структурно-чувствительного параметра при неразрушающем контроле структурного состояния материала лопаток в процессе их эксплуатации и восстановления.

2. Уменьшение параметра акустической анизотропии материала рабочих лопаток при восстановительной термообработке указывает на то, что структура стали становится более однородной. После эксплуатации указанный акустический параметр увеличивается.

3. В результате экспериментов выявлены перспективные возможности применения неразрушающего ультразвукового контроля изменения структурного состояния материала компрессорных лопаток газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации и восстановительного ремонта с нанесением износостойкого покрытия нитрида титана.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-08-01108) и Министерства промышленности и науки Нижегородской области, профинансировавшего свою часть проекта РФФИ 11-02-97024-р_поволжье_а.

Список литературы

1. Царева И.Н., Федорова Е.А., Тарасенко Ю.П. Исследование физико-химических и коррозионных свойств ионно-плазменных покрытий нитрида титана // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 4. С. 42-45.
2. Царева И.Н., Бердник О.Б., Разов Е.Н. Разработка технологии продления ресурса турбинных лопаток из сплава ХН65ВМТЮ // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27). Часть 2. С. 240-247.
3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
4. Меркулов Л.Г. Применение ультразвука для исследования структуры сталей // ЖТФ. 1957. Т. XXVII. № 6. С. 1386-1391.
5. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1983. 80 с.
6. Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки // Дефектоскопия. 1989. № 2. С. 66-68.
7. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: «Наука», 1996. 184 с.
8. Firestone F.A., Frederic J.R. Refinements in supersonic reflectoscopy. Polarized sound // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1946. V. 18. No 1. P. 200-201.
9. Моничев С.А., Никитина Н.Е. Ультразвуковой эхо-метод исследования упругих свойств твердых тел. / Препринт № 24-04-03/ Нф ИМАШ РАН. Н. Новгород, 2004. 22 с.
10. Мотова Е.А., Никитина Н.Е. О возможности ультразвукового контроля компрессорных лопаток после эксплуатации и ремонта // Вестник СГАУ. 2011. Вып. 3(27). Часть 2. С. 52-56.
11. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.