

УДК 534

**СТРУКТУРНАЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА
ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ****© Юрий Павлович Тарасенко, Надежда Евгеньевна Никитина,
Людмила Александровна Кривина, Елена Алексеевна Мотова**
tribonikanpc@mail.ru*Федеральное государственное учреждение науки Институт проблем машиностроения РАН,
г. Н. Новгород*

Аннотация Приведены результаты исследования с применением оптической металлографии и ультразвукового эхо- метода неразрушающего акустического контроля распределения анизотропии карбидной фазы в материале лопаток из нержавеющей жаропрочной стали ЭИ961 шестой и восьмой ступеней ротора турбокомпрессора высокого давления (ТКВД) двигателя ДЖ59Л в постэксплуатационном состоянии и после термической обработки. Выявлена корреляционная связь между параметром акустической анизотропии и коэффициентом металлографической анизотропии включений карбидной фазы материала лопаток. Показана перспективная возможность применения эхо-метода неразрушающего контроля структуры материала на стадии выходного контроля изделия.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, эхо-импульсный метод, рабочие лопатки, турбокомпрессор, оптическая металлография*

**THE STRUCTURAL AND ACOUSTIC ANISOTROPY OF THE MATERIAL HIGH
PRESSURE TURBOCHARGER OF THE BLADES****Yr. P. Tarasenko, N.Ye. Nikitina, L.A. Krivina, Ye.A. Motova***Mechanical Engineering Research Institute of RAS, N. Novgorod, Russia*

Abstract. The results of research of using optical metallographic and ultrasonic echo method for non-destructive acoustic control distribution anisotropy of carbide phase stainless blades material heat-resistant steel EI961 the sixth and the eighth stages high pressure turbocharger rotor (TKVD) engine DG59L in postekspluatacionnom condition and after the thermal treatment. Identified a correlation between the acoustic anisotropy, and metallographic factor anisotropy of carbide phase inclusions of material in the blades. Shows a promising opportunity to use echo-method of non-destructive testing of material structure on the stage output control products.

Key words. *The non-destructive testing, the echo method, works of the blades, the turbocharger, the optical metallographic*

На современном этапе развития машиностроения, когда техника становится все более сложной, выборочный контроль ответственных деталей, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, становится недостаточным, так как в полной мере не может гарантировать высокую работоспособность и надежность. Акустические методы неразрушающего ультразвукового контроля хорошо зарекомендовали себя в диагностике дефектов, нарушающих сплошность конструкционного материала, и практически не используются для исследований неоднородностей микроструктуры конструкционных материалов. Однако, ультразвуковой эхо-импульсный метод неразрушающего контроля может быть весьма перспективным при оценке структурной неоднородности конструкционного материала, особенно на заключительной стадии изготовления ответственных деталей, таких, как рабочие лопатки ТКВД.

Объектами экспериментальных исследований являются рабочие лопатки из нержавеющей жаропрочной стали ЭИ961 (14X17H2Ш) шестой и восьмой ступеней ротора турбокомпрессора ТКВД двигателя ДЖ59Л, в постэксплуатационном состоянии и они же после термического отпуска. Шестая ступень представлена тремя лопатками, которые мы обозначили как: 6.1; 6.2; 6.3. Аналогичные обозначения введены для лопаток восьмой ступени, а именно: 8.1; 8.2; 8.3.

Для проведения исследования микроструктуры материала рабочих лопаток применен метод металлографического анализа с использованием растрового оптического микроскопа «Неофот-32». Для определения коэффициента структурной анизотропии карбидной фазы использовали программное обеспечение GoodGrains. Коэффициент структурной анизотропии находили, используя отношения размеров включений карбидной фазы вдоль их длины и ширины:

$$C = \frac{d_{cp}}{l_{cp}},$$

где l_{cp} - средний продольный размер; d_{cp} – средний поперечный размер карбидной фазы.

Термический отпуск (ТО) проводился в лабораторной электропечи при температуре 600°C с последующим охлаждением испытуемых деталей на воздухе в течение двух часов [1].

Ультразвуковые исследования материала лопаток выполнены эхо-импульсным методом с использованием акустического стенда для прецизионного измерения временных интервалов [2]. Нами использован пьезоэлектрический преобразователь сдвиговых волн частотой 9 МГц.

При применении сдвиговых волн важной характеристикой является относительная разница скоростей сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации. Например, при возникновении напряжений или пластической деформации вдоль определенного направления в материале скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек этого направления, будут различны. Выбранный безразмерный параметр – величина акустической анизотропии материала – может служить количественной характеристикой структурных изменений в нем [3]. Также этот параметр в определенной степени показывает наличие текстуры, по-разному расположенных микродефектов, несплошностей и других неоднородностей.

Для лопаток шестой и восьмой ступеней проведены прецизионные (с погрешностью 0,01 мкс) измерения задержек в материале импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек оси лопатки. Контролю подвергалась зона пера лопатки у галтели, подверженная при эксплуатации наибольшим рабочим нагрузкам. Импульсы распространялись по нормали к поверхности лопатки, несколько раз «прозвучивая» толщину детали. На основании прецизионных измерений задержек импульсов в материале вычислены параметры собственной акустической анизотропии материала лопаток двух рабочих ступеней ротора ТКВД в точке контроля:

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

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%.

На рис. 1 представлена микроструктура материала первой части лопатки шестой ступени вблизи галтели в состоянии после эксплуатации.

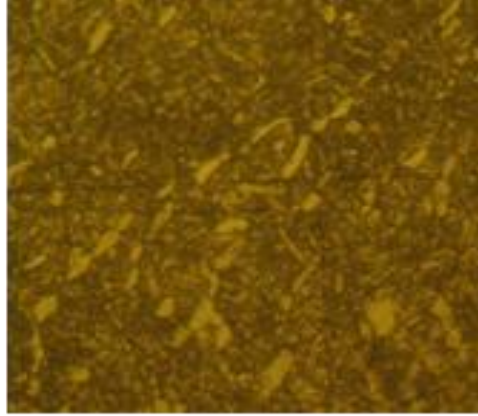


Рис.1. Микроструктура материала лопатки после эксплуатации. (x500)

Структура, приведенная на рис. 1, идентична для лопаток шестой и восьмой ступеней. По всей длине пера лопатки наблюдается наличие строчной карбидной фазы (игл), вытянутой в поперечном направлении. Длина игл варьируется от 4 до 10 мкм, а ширина - от 0,5 до 2 мкм для лопаток шестой ступени, для лопаток восьмой ступени соответственно 2,5 - 4,5 мкм и 0,8 - 1,2 мкм. Можно предположить, что в процессе эксплуатации в результате длительного воздействия рабочих напряжений и повышенных температур произошла структурная деградация материала, так как в материале замковой части лопатки «игольчатой» карбидной фазы не наблюдается.

На рисунке 2 показана характерная микроструктура материала лопаток шестой ступени после термообработки.

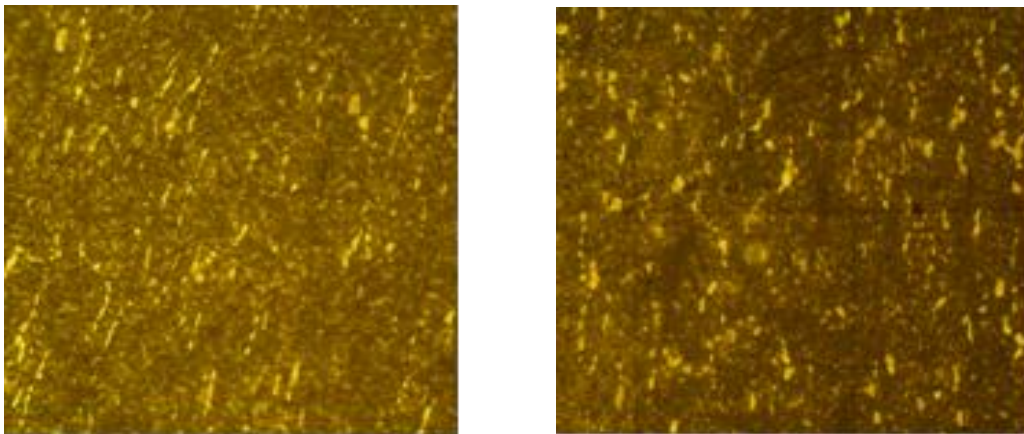


Рис. 2. Микроструктура материала лопатки после термообработки (x500):
а) лопатка 6.1; б) лопатка 6.2.

В микроструктуре стали ЭИ961 после термического отпуска карбидные включения приобрели более округлую форму, но следы игольчатой карбидной фазы сохранились во всех исследуемых образцах. При этом длина «иголок» уменьшилась в среднем в 2,5 раза для лопаток шестой ступени и в 1,2 раза – для восьмой ступени.

В таблице приведены результаты определения параметра акустической анизотропии и размеров карбидной фазы в материале лопаток двух ступеней. После термообработки в лопатках шестой и восьмой ступеней наблюдается снижение величины a_0 , что может быть связано с изменением формы включений карбидной фазы.

В лопатках 6.1, 8.2, для которых размер карбидной фазы после ТО наименьший, уровень акустической анизотропии самый низкий.

Таблица

Параметр акустической анизотропии и размеры карбидной фазы в материале лопаток в постэксплуатационном состоянии и после ТО

№ образца лопатки	$a_0, \%$, в постэксплуатационном состоянии	$a_0, \%$, после ТО	Размеры карбидной фазы, после ТО	
			длина, мкм	ширина, мкм
6.1	0,90	0,05	1,0 – 3,0	0,5 – 1,0
6.2	0,44	0,17	2,2 – 4,0	1,0 - 2,2
6.3	1,4	0,55	2,0 – 4,0	2,0 – 3,0
8.1	1,65	0,44	2,0 – 4,0	1,0 - 2,5
8.2	1,13	0,05	1,8 – 3,0	0,2 – 1,0
8.3	1,3	0,96	2,5 – 3,0	1,8 – 2,2

На рисунках 3, 4 приведены гистограммы параметра структурной анизотропии, определенной по размерам карбидной фазы, и параметра акустической анизотропии в материале лопаток 6 и 8 ступеней, после ТО.

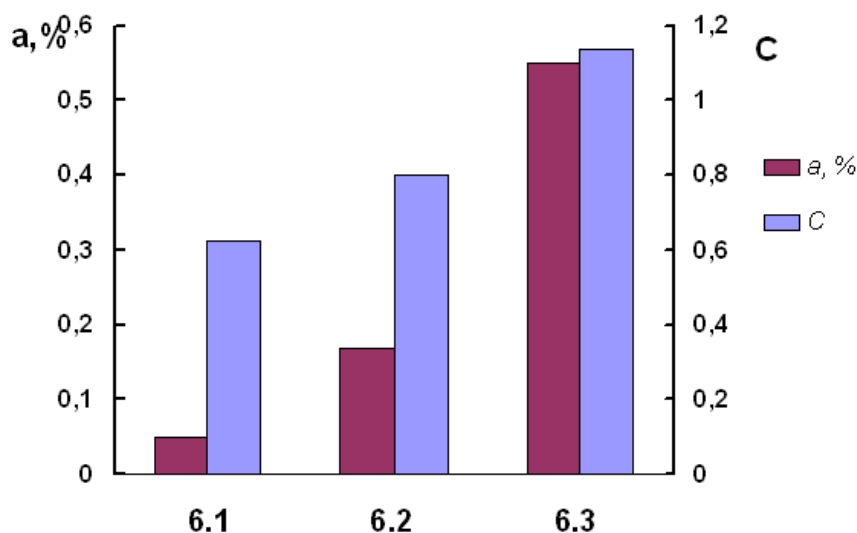


Рис. 3. Коэффициент анизотропии размеров карбидной фазы и параметр акустической анизотропии для лопаток шестой ступени после термообработки

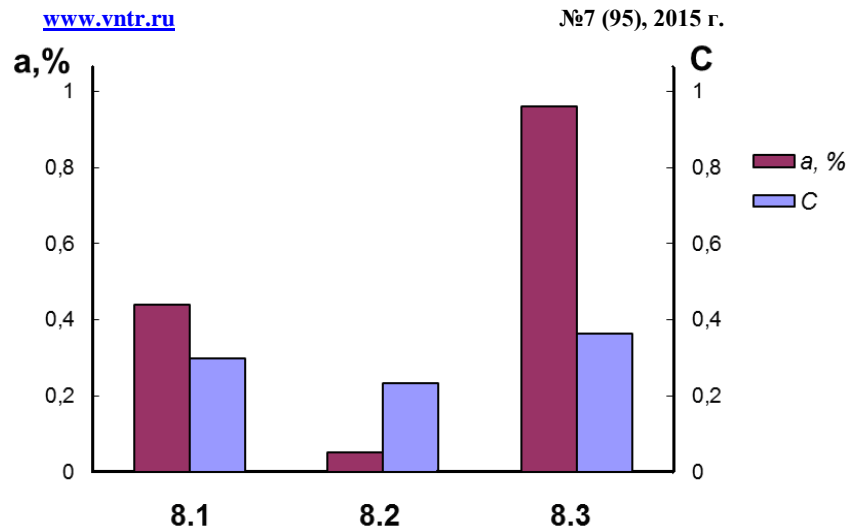


Рис. 4. Коэффициент анизотропии размеров карбидной фазы и параметр акустической анизотропии для лопаток восьмой ступени после термообработки

Следует отметить, что величина акустической анизотропии является интегральным параметром, в который вносят вклад разные структурно-фазовые составляющие. По результатам наших экспериментов обнаружена корреляция между параметром акустической анизотропии и коэффициентом анизотропии карбидной фазы, определенным методом оптической металлографии, для лопаток после термообработки (рисунок 3, 4).

На основе проведенных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы: методом оптической металлографии установлено, что в материале перовой части лопаток в постэксплуатационном состоянии присутствует карбидная фаза игольчатой формы с высокой степенью анизотропии, являющаяся признаком деградации микроструктуры; выявлена корреляционная связь между параметром акустической анизотропии и коэффициентом анизотропии включений карбидной фазы материала лопаток. Найденная связь позволяет прогнозировать положительное влияние термического отпуска на структуру материала рабочих ступеней лопаток ротора ТКВД; выявлены перспективные возможности применения ультразвукового эхо-импульсного метода в качестве неразрушающего метода контроля структуры материала непосредственно на изделии, как на стадии выходного контроля при изготовлении и ремонте лопаток, так и в состоянии после эксплуатации.

Список литературы

1. Царева И.Н., Бердник О.Б., Кривина Л.А., Фель Я.А. Оценка технического состояния рабочих лопаток компрессора из сплава ЭИ961 энергетической установки ГТЭ-45-3 // Прикладная механика и технологии машиностроения / Сборник научных трудов. Н.Новгород: Изд-во "Интелсервис", 2013. № 1(22). С. 37-42.
2. 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.
3. Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. О возможности диагностики компрессорных лопаток по параметрам затухания и скорости ультразвука // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013, № 4. С. 88-95.