

Е.А. Мотова, Н.Е. Никитина
Институт проблем машиностроения РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Компрессорные лопатки являются основными рабочими деталями газотурбинного двигателя морского судна. В процессе эксплуатации двигателя лопатки работают при высоких температурах, подвергаются значительным инерционным, знакопеременным и циклическим нагрузкам, а так же агрессивному воздействию морской воды. Указанные факторы могут привести к существенным изменениям их упруго-пластического и структурного состояния материала, вплоть до возникновения микроразрушений. Наиболее существенные из этих изменений можно интегрально оценить на основе акустических методов исследования, которые находят все большее применение на практике [1]. 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.

Важнейшими информативными характеристиками метода являются затухание и скорость распространения ультразвуковых волн в конструкционном материале. При применении сдвиговых волн важной характеристикой является безразмерный параметр - 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 параметр - величина акустической анизотропии материала - может служить количественной характеристикой указанных упруго-пластических изменений в нем. Также этот параметр может в определенной степени показывать наличие текстуры, по-разному расположенных микродефектов, несплошностей и других неоднородностей структуры материала.

Эхо-импульсный метод неразрушающего контроля применен нами для УЗ контроля деталей сложной формы. Объекты исследования - компрессорные лопатки из нержавеющей жаропрочной стали 14X17H2Ш (сплав ЭИ961) после эксплуатации, в течение установленного срока и после восстановления, включающего термическую обработку.

Экспериментальные исследования по изучению влияния термообработки на конструкционный материал выполнены с помощью акустического стенда [2,3], позволяющем реализовать ультразвуковой эхо-метод. Акустический стенд предназначен для прецизионного измерения временных интервалов, характеризующих распространение и искажение импульсов упругих волн в твердых телах, а также для оценки уменьшения амплитуды импульсов УЗ волн при их распространении в материале. В его состав входят пьезоэлектрические преобразователи оригинальной конструкции, для возбуждения и приема импульсов продольных и сдвиговых волн УЗ частоты с плавной огибающей.

Нами исследованы три серии лопаток, отработавших установленный срок, и те же лопатки, подвергшихся восстановительной обработке материала, включающей следующие технологические операции: механическая обработка поверхности; сварочно-наплавочные работы; восстановительная термическая обработка.

Первая серия компрессорных лопаток состоит из трех лопаток шестой ступени после эксплуатации, обозначенных нами 6.1, 6.2, 6.3, и этих же лопаток после восстановительных операций. Вторая серия компрессорных лопаток состоит из трех лопаток

восьмой ступени, обозначенных 8.1, 8.2, 8.3, и этих же лопаток после восстановления. Третья серия состоит из трех лопаток седьмой ступени, обозначенных 7.1, 7.2, 7.3 и их же после восстановления. Всего исследовано 18 экземпляров.

Исследованные лопатки имеют толщину менее 5 мм, что создает дополнительные трудности для применения УЗ эхо-метода ввиду невозможности обеспечить разрешение эхо-импульсов между собой. В результате пробных экспериментов удалось обеспечить только разрешение импульсов сдвиговых волн с основной частотой 9 МГц. Акустические измерения для продольных волн провести не удалось, так как время их распространения вдоль толщины материала почти в два раза меньше, чем у сдвиговых.

Контролю подвергалась средняя часть вблизи основания пера лопатки. Распространение сдвиговых волн - по нормали к поверхности лопатки, поляризация волн вдоль оси лопатки, поляризация волны поперек оси лопатки. Для каждой серии испытуемых деталей проведены следующие акустические измерения: прецизионные измерения задержек импульсов сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации частотой 9 МГц; измерения ослабления амплитуды импульсов сдвиговых волн в материале лопатки.

Возбуждая импульсы упругих волн на выпуклой поверхности компрессорной лопатки, принимали импульсы, отраженные противоположной вогнутой поверхностью. На экране осциллографа четко видно три эхо-импульса. Величину коэффициента затухания сдвиговых волн оценивали по уменьшению амплитуды второго и третьего отраженных импульсов относительно первого. Коэффициент затухания в материале детали вычисляли по среднему значению из двух комбинаций трех четко различимых эхо-импульсов. Величина коэффициента затухания для лопаток всех ступеней оказалась около 100 нп/м, что не свойственно затуханию ультразвука в качественных сталях и ранее полученным нами результатам [4].

По-видимому, причина в том, что площадь соприкосновения датчика с выпуклой поверхностью детали мала, что способствует расхождению УЗ пучка, вдобавок к тому отражение импульсов происходит от вогнутой поверхности. Поэтому нам неизвестно, какая часть ослабления амплитуды импульса относится к затуханию ультразвука в материале, а какая обусловлена расхождением УЗ пучка из-за неполного контакта датчика с поверхностью детали и вогнутой отражающей поверхности. По полученным результатам определить коэффициент затухания УЗ непосредственно в материале не удалось.

С помощью калиброванной линии задержки источника временных сдвигов определяли время задержки импульса на двойной, учетверенной (и так далее) толщине образца. Погрешность измерения величины задержки импульса в детали с использованием указанной аппаратуры и пьезоэлектрического преобразователя составила 0,01 мкс. «Видимость» при измерениях времени распространения упругих волн составляла 3–4 эхо-импульса, то есть база измерений задержек, как правило, не превышала 7–9 мкс. По результатам измерений вычислены параметры собственной акустической анизотропии [5] и коэффициенты затухания упругих волн в материале лопаток турбокомпрессора высокого давления.

На рис. 1 представлены результаты определения параметров акустической анизотропии материала лопаток до и после восстановительной термообработки, для лопаток шестой и восьмой ступеней, соответственно. Параметр собственной акустической анизотропии материала после термообработки обычно уменьшается. Существенное уменьшение указанного параметра наблюдается для лопаток шестой и восьмой ступеней.

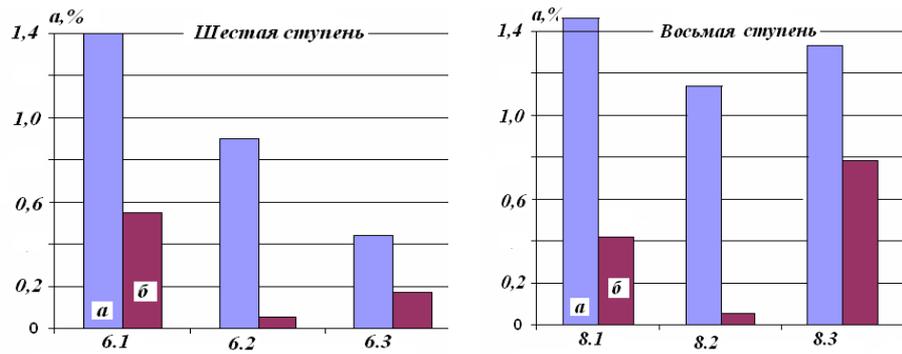


Рис. 1. Параметры акустической анизотропии материала лопаток 6-й и 8-й ступеней: *a* – до термообработки; *б* – после термообработки

В лопатках седьмой ступени акустическая анизотропия после термообработки растет (рис. 2). В исследованиях, проведенных ранее [4], мы не наблюдали роста параметра акустической анизотропии после восстановительной термообработки компрессорных лопаток. Вместе с этим, нами выявлено нестандартное акустическое поведение для лопаток седьмой ступени, по сравнению с лопатками шестой и восьмой ступеней.

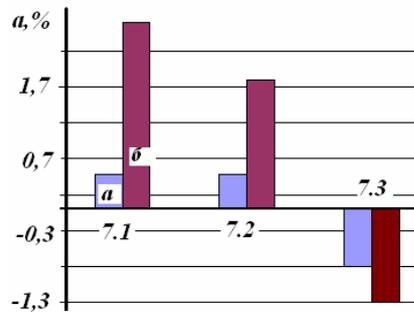


Рис. 2. Параметры акустической анизотропии материала лопаток седьмой ступени: *a* – до термообработки; *б* – после термообработки

Особенности картин эхо-импульсов на экране осциллографа дают дополнительную информацию о распространении акустических импульсов в материале указанных деталей. На рис. 3 для примера приведена картина отраженных импульсов в лопатке восьмой ступени (рис. 3а), обычно наблюдаемая при измерениях.

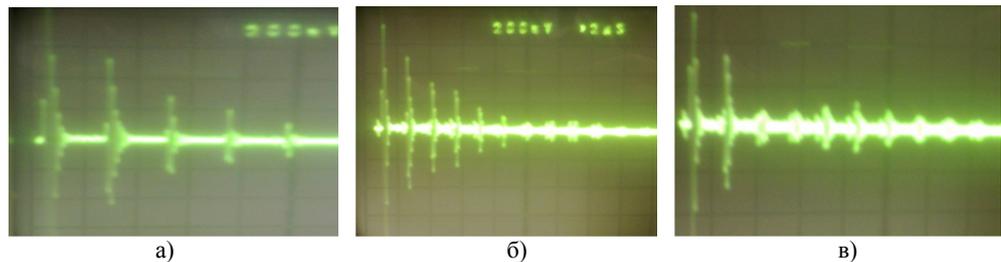


Рис. 3. Эхо-импульсы в лопатках 8.1 (а); 7.1 (б); 7.2 (в).

Картинки эхо-импульсов для лопаток седьмой ступени (рис. 3б, 3в) свидетельствуют о возникновении эффекта интерференции сдвиговых волн, обусловленных либо сильной неоднородностью материала, либо несовпадением направлений осей его

симметрии и осей симметрии детали. Указанные факты говорят о том, что собственная акустическая анизотропия лопаток седьмой ступени обусловлена не столько структурными изменениями в материале, сколько пластической деформацией сдвига или кручения, вплоть до возникновения расслоений. Лопатки седьмой ступени возможно получили повреждения при эксплуатации, поэтому нет смысла их восстанавливать.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Величина коэффициента затухания сдвиговых волн оказалась мало чувствительным акустическим параметром, ввиду того, что в деталях сложной формы ослабление импульсов в самом материале составляет незначительную часть от результирующей величины, определяемой в основном расхождением УЗ пучка.

2. Величина акустической анизотропии может служить в качестве информативного параметра для неразрушающего контроля материала деталей сложной формы после эксплуатации в течение установленного срока и после восстановления, включающего термообработку.

3. Судя по результатам наших экспериментов, лопатки седьмой ступени получили при эксплуатации необратимые повреждения, которые не удастся исправить путем восстановительной обработки. Рекомендовано не проводить восстановительный ремонт этих лопаток.

Список литературы:

- [1] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. - Новосибирск: Наука. 1996. 184 с.
- [2] Монишев 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] Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
- [4] Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. Контроль структурного состояния материала рабочих лопаток компрессора газотурбинного двигателя ультразвуковым эхо-методом. Электронный журнал «Вестник научно-технического развития» www.vntr.ru. Национальная Технологическая группа, 2013, № 10 (74). С. 28–36.
- [5] Никитина Н.Е., Мотова Е.А. Исследование ультразвуковым эхо-методом поведения конструкционных материалов при циклическом нагружении // Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек / Труды 15 международного научно-промышл. форума «Великие реки» (Материалы научно-методической конференции проф-препод. состава, аспирантов, специалистов и студентов). Том 1. Н.Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. С. 374–377.

Н.Е. Никитина

ФГБУН Институт проблем машиностроения РАН

АКУСТОУПРУГОСТЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДВУХОСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ

Высокая эффективность современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС), использующих ЭВМ, не устраняет необходимости применения экспериментов для прямого измерения напряжений (деформаций) в материале конструкции. Расчетные методы определения НДС промышленных конструкций основаны на использовании некоторых допущений, как правило, идеализирующих реальные условия. Несовершенство методов расчета, неполное со-