

Э. Р. Загидуллин, С. М. Гавриленко, Б. С. Семухин,
М. М. Чухланцева

*Научно-исследовательское учреждение Институт физики прочности и
материаловедения СО РАН (НИУ ИФПМ СО РАН)
Россия, 634021, Томск, пр. Академический 2/1
Факс: +7 (3822) 25-95-76, e-mail: ispms@ispms.tomsk.su*

Модернизация метода автоциркуляции импульсов для определения зависимости скорости ультразвука от приложенного напряжения

Получена 10.09.2002, опубликована 14.12.2002

В статье предложен способ существенного повышения точности определения напряжений в металлических конструкциях с помощью модификации метода измерения скорости ультразвука. Вводится новый элемент — счетчик импульсов, позволяющий измерять импульс с максимальной амплитудой и запоминанием его в счетчике. Приводятся экспериментальные данные по измерению скорости в мостовых конструкциях. Показано, что точность определения напряжений в диапазоне 10–100 МПа достигает 2–4%.

Металлические конструкции и детали машин в процессе эксплуатации подвергаются действию переменных во времени механических нагрузок, которые могут быть причиной изменения структуры металла и накопления микродефектов, а следовательно, образования макродефектов, зарождения трещин и разрушения изделия. Используемые методы и приборы дефектоскопии имеют существенные ограничения для обнаружения таких изменений. Ультразвуковые, электромагнитные, вихревые дефектоскопы позволяют только выявить наличие уже образовавшихся достаточно крупных трещин. Однако важнее вовремя обнаружить подготовительный этап процесса, связанный с накоплением повреждаемости в металле, а именно: стадию накопления дефектности — образование микротрещин, которые не обнаруживаются традиционными методами и серийными приборами. Для решения такой задачи можно использовать акустический метод, основанный на изменении скорости звука в металле в зависимости от структуры и накопления микродефектов при эксплуатации под действием циклически меняющихся нагрузок или температуры. При эксплуатации металлических конструкций тяжело нагружаемого оборудования в материале наблюдается неравномерное распределение напряженных областей, что приводит к необратимой деформации и, как следствие, к образованию микротрещин, их росту вплоть до макроразрушения. Контроль состояния металла как при строительстве, так и

в процессе эксплуатации достаточно сложен и трудоемок, а также зачастую, невозможен, так как для лабораторных исследований необходимо вырезать куски металла из работающей конструкции.

Для определения физико-механических свойств металлических конструкций и деталей развиты методики [1–6], позволяющие находить корреляционные зависимости между изменением скорости ультразвука и различными характеристиками объекта исследования, такими как *структура, предел прочности, предел текучести, ударная вязкость* и другие. Относительное изменение скорости ультразвука составляет обычно 0,1...1%. Так как изменение напряжения в металлах на 0,69 МПа приводит к изменению скорости ультразвука всего на величину порядка 10^{-6} , практическое использование этой методики требует измерения изменений времени порядка 1 нс.

Этим требованием удовлетворяет метод автоциркуляции импульсов, который отличается тем, что генератор импульсов, возбуждающий ультразвуковой излучатель, синхронизируется импульсами, прошедшими через анализируемую среду. В такой системе устанавливается частота следования импульсов. Суть метода автоциркуляции заключается в том, что прошедший по образцу ультразвуковой импульс преобразуется в приемном пьезопреобразователе в электрический сигнал, формирующий следующий вводимый в образец импульс. При этом частота следования импульсов зависит от времени пробега импульсом расстояния между пьезопреобразователями, следовательно (при неизменном расстоянии между пьезопреобразователями), от скорости распространения ультразвука в образце.

В работах Муравьева [7–11] показано достаточно успешное использование метода измерения скорости рэлеевских волн для определения ряда характеристик металлических узлов и деталей. Однако для определения таких важных для практического использования величин как напряжения точности данной схемы недостаточно. В некоторых работах [12] говорится о трудности измерения изменения амплитуды рэлеевской волны при приложенных небольших напряжениях.

В работах авторов [13–15] показана принципиальная возможность определения напряжений акустическим методом. Здесь следует оговориться, что напряжения, конечно же, не определяются, а рассчитываются по корреляционным зависимостям.

Рассмотрим структурную схему прибора по измерению скорости ультразвука методом автоциркуляции импульсов (рис. 1). В такой структурной схеме особое место следует уделить компаратору, так как именно модификация данного узла позволила авторам настоящей статьи увеличить точность схемы измерения. Уровень сравнения компаратора должен быть, очевидно, близок к «нулю», так как скорость нарастания импульса максимальна именно в «нуле». Однако при этом есть опасность, что амплитуда шумов может быть сравнима с амплитудой напряжения смещения подаваемого на второй вывод компаратора. Скорость нарастания (изменения) импульса с наибольшей амплитудой, очевидно, максимальна. Поэтому целесообразно вести отсчет не по первому импульсу с небольшим изменением скорости нарастания, а по импульсу с максимальной амплитудой. Для этого реализована схема прибора-

измерителя частоты автоциркуляции с новым элементом — счетчиком импульсов. При настройке прибора на требуемый диапазон частот, то есть на определенный металл или сплав автоматически определяется номер импульса с максимальной амплитудой и запоминается в счетчике (на схеме это «код предустановки счетчика»). Схема циркуляции замыкается не по первому импульсу, а по n -му. Это приведет к небольшой ошибке в определении абсолютного значения скорости ультразвука для данного материала. Однако, как показано в работах авторов и в аттестованной методике по определению напряжений акустическим методом [16, 17], нет необходимости в измерении абсолютных значений скорости. Для построения корреляционной зависимости можно выбрать приращение скорости ультразвука от напряжений. Поэтому, выбрав импульс с максимальной амплитудой, мы можем уверенно его фиксировать и затем по изменению скорости определять напряжения.

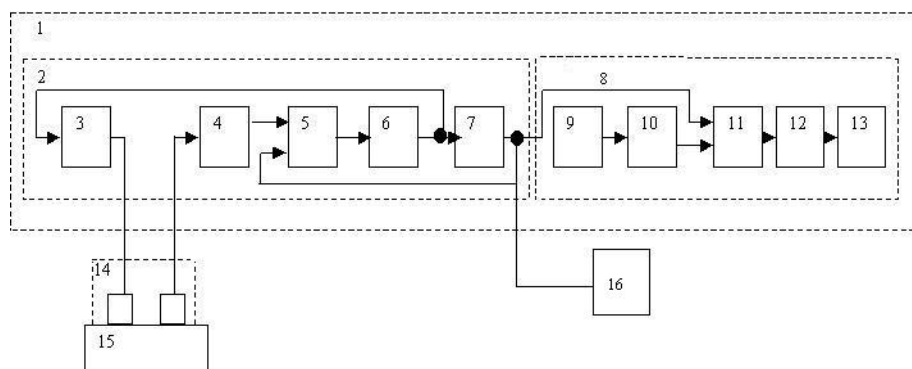


Рис. 1. Общий вид измерителя частоты автоциркуляции

1 – электронно-измерительный блок (ЭИБ), 2 – узел автоциркуляции, 3 – формирователь импульсов, 4 – импульсный усилитель, 5 – компаратор, 6 – счётчик, 7 – одновибратор, 8 – частотомер, 9 – задающий генератор, 10 – делитель, 11 – счётчик, 12 – дешифратор, 13 – индикатор, 14 – ультразвуковой датчик, 15 – контролируемое изделие, 16 – персональный компьютер

Для построения корреляционной зависимости $v = f(\sigma_1 + \sigma_2)$ проводили, например, измерения скорости ультразвука на различных объектах из стали марки 15ХСНД: сварное тавровое соединение, сварное стыковое соединение и образец стали, непосредственно вырезанный из конструкции коммунального моста через реку Томь, г. Томск.

Анализ результатов акустических измерений, выполненных на образцах из стали позволил установить между значением напряжений и частотой автоциркуляции импульсов линейную корреляционную связь, которая выражается уравнением

$$Y = aX + b, \quad R,$$

где Y — внутреннее упругое напряжение ($\sigma_1 + \sigma_2$), МПа; $X = v - v_0$ — изменение частоты автоциркуляции при прохождении ультразвука в исследуемом объекте по отношению к «ненагруженному» образцу (v_0), Гц; a, b — константы (размерные коэффициенты); R — коэффициент корреляции.

Для стали 15ХСНД такое уравнение принимает следующий вид:

$$y = 0,56X - 0,77;$$

$$R = 0,9.$$

На основании полученной корреляционной зависимости строится градуировочная зависимость (ГЗ) для определения значений приложенных напряжений по акустическим измерениям.

Данный метод является неразрушающим, поэтому измерения (с использованием ГЗ), как правило, проводятся на готовых изделиях или полуфабрикатах без изготовления специальных образцов и дополнительной подготовки, т. е. на реальных объектах. Образцы используются только для эталонов или при решении специальных задач.

Ниже приведена зависимость характеристик СКО погрешности напряжений от изменения скорости ультразвука, полученная таким методом для мостовой стали 15ХСНД.

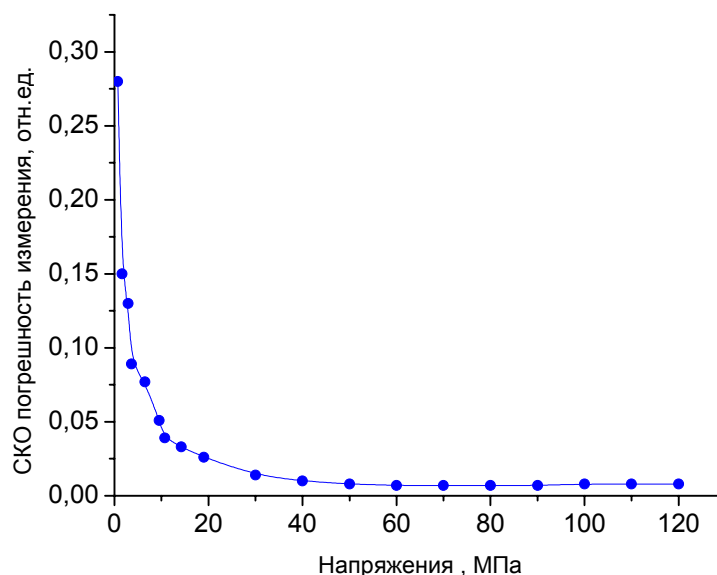


Рис. 2. Значение характеристик СКО погрешности при доверительной вероятности $P=0,95$

Видно, что наибольшая ошибка в определении напряжений лежит в диапазоне напряжений 1–10 МПа. Данный диапазон редко реализуется на практике, так как даже после прокатки в листовом материале (стали) наблюдаются остаточные напряжения в десятки МПа.

Таким образом, реализована схема высокоточного измерения скорости ультразвука в металле оборудования или конструкций и получена корреляционная зависимость между действующими напряжениями и частотой автоциркуляции для определения последних неразрушающим методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алерс Дж. Изменение очень малых изменений скорости звука и их применение для изучения твердого тела. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона, т. 4, ч. А. М.: Мир, 1969, с. 322–344.
2. Бобренко В. М. Ультразвуковые методы и устройства для контроля качества механических напряжений. Дефектоскопия, 1983, №12, с. 8–11.
3. Бобренко В. М., Вагнели М. С., Куценко А. Н. Акустическая тензометрия. Кишинев: Изд-во «Штиинца», 1991, 204 с.
4. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение. 1983, 79 с.
5. Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. В 2-х томах. Киев: Наук. Думка, 1986, т. 1, 376 с., т. 2, 538 с.
6. Авербух И. И., Бобренко В. М., Кукшулей Л. М. Зависимость скорости волн Рэлея от напряженного состояния твердого тела. В сб. Проблемы неразрушающего контроля. Кишинев: Изд-во «Штиинца», 1973, с. 222–228.
7. Муравьев В. В. Закономерности изменения скорости распространения ультразвука при термической обработке сталей и алюминиевых сплавов. Дисс. ... док. техн. наук, Томск, 1993, 362 с.
8. Муравьев В. В., Ермолаева З. И., Васильев А. Г. О разделении влияния напряжений I и II рода на скорость ультразвука в сталях. В сб. Проблемы безопасности труда, экологии и чрезвычайных ситуаций на ж.-д. транспорте. Новосибирск: Сиб. гос. акад. путей сообщ., 1995, с. 141.
9. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Ермолаева З. И. Влияние внутренних напряжений на скорость ультразвука в сталях. В сб. Акустические проблемы прочности. Новгород: Новгород. гос. ун-т, 1994, ч. 1, с. 39.
10. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1996, 184 с.
11. Муравьев В. В., Комаров К. Л. Ультразвуковой индикатор структурных превращений ИСП-12. Новосибирск: ЦНТИ, 1993, №181-93.
12. Буденков Г. А., Зинченко Р. В., Зинченко В. А., Недзвецкая О. В., Полянкин Г. А. Оценка напряженного состояния изделий из серого чугуна акустическим методом, Дефектоскопия, 1998, №1, с. 3–7.
13. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Бушмелева К. И. Зависимость скорости ультразвука от действующего напряжения при пластическом течении поликристалла. ЖТФ, 1999, т. 69, вып. 12, с. 100–101.

14. Zuev L. B., Poletika I. M., Semukhin B. S. et al. The Ultrasound Velocity and Mechanical Properties of Metals and Alloys. Metallwissenschaft und Technik, 1999, №9, pp. 324–327.
15. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Бушмелева К. И. Акустические свойства металлов и сплавов и стадийность пластического течения. Металлофизика и новейшие технологии, 2000, т. 22, № 10, с. 67–70.
16. Катцын П. А., Семухин Б. С., Акимов Б. Г. и др. Применение ультразвуковых методов для оценки напряженного состояния мостовых конструкций. Вестник ТГАСУ, 2000, №2, с. 257–262.
17. Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ), Томский центр стандартизации, метрологии и сертификации (ТЦСМ), С В И Д Е Л Ь С Т В О об аттестации МВИ № 001/2002 Методика выполнения измерений механических напряжений в области упругих деформаций металлических конструкций мостов и сооружений, изготовленных из стали 15ХСНД, ультразвуковым методом, разработанная Научно-внедренческим и ремонтно-строительным предприятием «РЕМО» и регламентированная в МВИ №001/2002 «НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ МОСТОВ И СООРУЖЕНИЙ. Методика выполнения измерений ультразвуковым методом» аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563–96.