

УДК 669.183.212.3.017:620.179.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Представлен метод неразрушающего контроля элементов конструкции, к которым нет непосредственного доступа. В методе используются собственные колебания конструкции, возбуждаемые ударами специального бойка в определенных местах. Метод представляет собой некоторый порядок, определяющий расположение точек нанесения ударов и измерения колебаний, распределение частот колебаний по диапазонам и построение ограниченного числом диапазонов спектра частот собственных колебаний. По распределению частот собственных колебаний в спектре определяют состояние контролируемого элемента конструкции. Представлены результаты экспериментальных исследований этим методом внутренней рубашки восьми форсуночных головок.

Ключевые слова: удар, собственные колебания, спектр частот, дефицит энергии, построение диапазонов.

В различных теплонапряженных объектах наряду с огнеупорными материалами используются стальные конструкции, которые нуждаются в охлаждении. К таким конструкциям относятся постоянно действующие камеры сгорания и форсуночные головки (ФГ). В силу своего функционального назначения эти конструкции нуждаются в периодическом неразрушающем контроле. Элементы таких конструкций, непосредственно контактирующие с высокотемпературным факелом, окружены системой охлаждения, которая исключает возможность непосредственного доступа к ним. Поэтому в качестве средства неразрушающего контроля может быть применен метод, использующий определенные собственные колебания (СК) конструкции в целом. С одной стороны, имеется возможность измерять СК на внешней поверхности объекта, с другой стороны, параметры СК зависят от состояния контролируемого элемента.

Применять метод неразрушающего контроля предполагается в промежутки времени, когда агрегат, в состав которого входит ФГ или камера сгорания, не работает. Неразрушающему контролю были подвергнуты 8 ФГ (рис. 1).

Три головки из 8 имели на внутренней рубашке дефекты различной величины. Внутренняя рубашка первой дефектной ФГ имела большой дефект в виде сквозного прогара и множественные следы выгорания металла на внутренней поверхности. Внутренняя рубашка второй дефектной ФГ имела незначительные видимые следы

выгорания металла. Еще одна ФГ не имела видимых дефектов, но наличие дефекта подозревалось ввиду того, что она претерпела газодинамический удар в результате взрыва парогазовой смеси, произошедшего во внутренней полости ФГ. Остальные пять ФГ дефектов не имели.

Наиболее вероятные дефекты на поверхности внутренней рубашки в результате длительной эксплуатации при высоких температурах, температурных градиентах и давлениях вызваны, скорее всего, распадом перлитной составляющей микроструктуры металла, коагуляцией и сфероидизацией карбидов, образованием и накоплением микрповреждений [1–3]. В ФГ в результате воздействия высоких температур на внутреннюю рубашку в первую очередь выгорают границы зе-

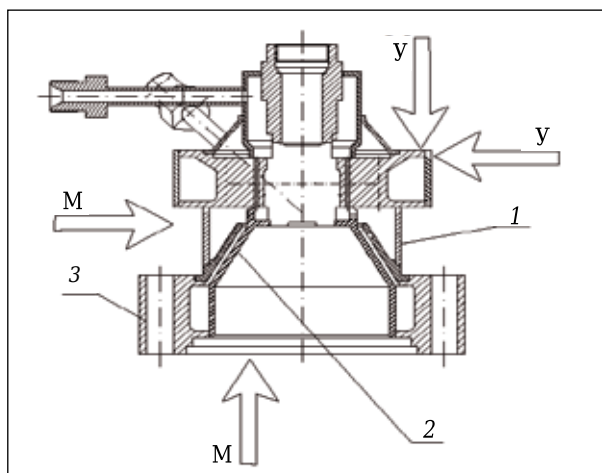


Рис. 1. Форсуночная головка: 1 — внешняя рубашка системы охлаждения; 2 — внутренняя рубашка системы охлаждения, состояние которой является объектом неразрушающего контроля; 3 — фланец, через который ФГ присоединяется к камере сгорания; У — серия легких ударов; М — расположение микрофона



В. И. Кугушев
E-mail: sk@ckb-rubin.ru

рен металла, что приводит к образованию микротрещин с последующим выкрашиванием частиц металла и сгоранием их в высокотемпературной среде. В аустенитных сталях этот процесс усугубляется изменением кристаллической структуры металла под воздействием высокой температуры, в результате размер зерна стали увеличивается, т. е. имеет место коагуляция и сфероидизация [2]. При этом напряжения, возникающие из-за наличия температурных градиентов, по границам зерен возрастают, вероятность возникновения микротрещин повышается [3].

Физический процесс, лежащий в основе предлагаемого метода, заключается в следующем. При возбуждении собственных колебаний ФГ наличие микротрещин во внутренней рубашке будет способствовать в процессе деформации переходу свободной энергии колебаний во внутреннюю энергию — тепловую. Переход происходит в результате действия двух факторов. При сдвинутых краях трещины ее стенки будут тереться друг о друга, а также будет происходить процесс пластического течения металла в углах трещины. При раскрытии трещины в результате деформации процесс пластического течения металла будет способствовать существенному повышению внутренней энергии.

Известно исходя из принципа роста энтропии в необратимых процессах, что любое тело стремится к минимуму внутренней энергии [4, 5]. Поэтому при наличии микротрещин некоторые формы собственных колебаний ФГ, которые в процессе деформации способствуют повышению внутренней энергии, будут демпфироваться. Свободная энергия, полученная телом в результате возбуждения СК, будет перераспределяться на другие формы собственных колебаний ФГ, деформация которых в наименьшей степени охватывает микротрещины. Таким образом, будет происходить изменение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) собственных колебаний ФГ. В результате этих изменений некоторые формы СК станут доминирующими и по ним можно определить состояние внутренней рубашки ФГ. Ниже будет объяснено, как проявляют себя доминирующие формы СК. Вышеизложенный процесс демпфирования и выявления доминирующих форм СК будет эффективным, если создать ситуацию «дефицита» свободной энергии при возбуждении СК.

Практически реализация данного метода состоит в снятии АЧХ собственных колебаний нормальной ФГ и дальнейшем контроле ее изменений. Просто и эффективно возбуждать собственные колебания ФГ можно, нанося серию легких ударов специальным ударником. При этом следует измерять только колебания, соответствующие некоторой установленной полосе частот (диапазону) СК. Возбудить колебания всего спектра СК одной серией ударов с последующим построением АЧХ

разложением полученного сигнала в ряд Фурье и обеспечить при этом повторяемость измерений практически невозможно ввиду сложности конструкции ФГ. Спектр частот собственных колебаний нормальной ФГ характеризуется большой «плотностью» частот. Это означает, что на микрофон прибора измерителя частоты собственных колебаний (ИЧСК), например, одновременно приходится множество волн разной частоты, амплитуды которых соизмеримы. В результате прибор ИЧСК не может устойчиво измерять какую-либо одну частоту. Происходит разброс значений частот при повторных измерениях или на индикаторе прибора ИЧСК регистрируются случайные значения частоты.

Именно поэтому необходимо для каждого объекта контроля экспериментально устанавливать ряд центральных частот и соответствующие им размеры полос частот (диапазонов) фильтра ИЧСК, в которых можно было бы устойчиво измерять некоторую частоту собственных колебаний (ЧСК). По сути, этот подход осуществляет построение ограниченного числом диапазонов конечного ряда Фурье.

Особенно необходимо определить требования к материалу, из которого должен быть сделан ударник. В работе [6] представлено теоретическое обоснование характеристики удара с оптимальными параметрами ударного воздействия (ОПУВ). Удар с ОПУВ позволяет возбудить только те СК, которые имеют в точке удара пучность, т. е. максимальную амплитуду колебаний. Это обеспечивает стабильность измерения ЧСК, так как сокращается число волн, поступающих на микрофон прибора. Если ударник сделан, например, из стали, удар получается слишком жестким и не соответствует требованиям ОПУВ. Экспериментально установлено, что наилучшим образом требованиям ОПУВ соответствует ударник, изготовленный из красной (мягкой) меди или свинца. В этом случае благоприятно соотношение массы ударника и пластичности металлов [6]. Единственный недостаток заключается в том, что ударник из свинца быстро изнашивается, поэтому рекомендуется изготавливать ударник из меди. Оптимальная форма ударника — цилиндр длиной 60–80 мм с закругленным торцом диаметром 10–15 мм.

Суть предлагаемого метода состоит в том, чтобы подбор ряда центральных частот и ширины каждой частотной полосы фильтра обеспечивал выполнение следующего условия: каждая частота СК нормальной ФГ должна присутствовать не более чем в двух частотных полосах (диапазонах) фильтра. Этого можно добиться, если имеется дефицит свободной энергии колебаний в ФГ и «конкуренция» различных форм СК в распределении этой энергии. Как было отмечено выше, при наличии трещин одни частоты демпфируются, другие, наоборот, усиливаются за счет перераспределения свободной энергии. Экспериментально

установлено, что это приводит к существенному уменьшению плотности частот спектра ФГ. В результате оставшиеся усиленные СК становятся доминирующими. Они имеют большую амплитуду, чем у других СК, и определяют величину частоты волнового воздействия на приемную часть прибора. Следовательно, они измеряются стабильно, с хорошей повторяемостью измерений. Это приводит к тому, что частота доминирующих колебаний выходит за рамки положенных двух частотных полос фильтра прибора ИЧСК и измеряется также в соседних полосах (диапазонах). Это определяет их как доминирующие, что является браковочным признаком в данном методе. Другими словами, если частота некоторых СК, возбуждаемых внешним воздействием, стабильно измеряется более чем в двух диапазонах фильтра прибора ИЧСК, то это является признаком наличия дефектов или микротрещин. При этом экспериментальные исследования показали, что нет прямой зависимости между количеством разрушений внутренней рубашки и количеством форм СК, которые проявляют себя как доминирующие.

Еще раз следует обратить внимание на необходимость искусственного создания «дефицита» свободной энергии при нанесении серии ударов. Частота доминирующих СК должна стабильно измеряться при нанесении ударов по всем трем направлениям. Если хотя бы в одном из направлений нанесения ударов измеряется другая частота в количестве диапазонов больше двух, то такие СК не являются доминирующими.

На первом этапе исследовали отдельно взятые ФГ, которые размещали горизонтально на пенопластовой подложке. Серию легких ударов — число ударов от 3 до 5 в течение 2 с — наносили вдоль и поперек оси ФГ (см. рис. 1). Удары наносили также по штуцеру ФГ в окружном направлении. Таким образом в каждом диапазоне частот тремя сериями ударов возбуждали условно продольные, изгибные и крутильные СК. Частоту собственных колебаний измеряли прибором ИЧСК-1 производства НПП «Интерприбор» с использованием микрофона, расположенного снаружи в области внешней рубашки и внутри ФГ в направлении внутренней рубашки (см. рис. 1).

Настройки параметров измерения прибора ИЧСК были следующие:

- время измерения ЧСК — 14 мс;
- время задержки начала измерения ЧСК — 3 мс;
- добротность фильтра — 5.

Центральные частоты и диапазоны фильтра прибора ИЧСК были подобраны для проведения контроля, когда ФГ подсоединена к камере сгорания (рис. 2, 3).

Масса отдельно взятой ФГ небольшая, и поэтому при нанесении серии ударов не возникает дефицит свободной энергии. По этой причине некоторые формы СК на всех отдельно взятых ФГ проявляли себя как доминирующие. Добиться этого

результата необходимо, чтобы убедиться, что выбор центральных частот и их диапазонов не блокирует измерение частот доминирующих СК, а также что эффект их подавления состоит исключительно в «конкуренции», которая возникает при дефиците свободной энергии со стороны множества других форм СК, имеющих место в нормальных ФГ.

На втором этапе исследовали ФГ, присоединенные к камере сгорания. Фланец ФГ присоединяли к фланцу камеры сгорания шпильками через прокладку. Это соединение способствовало дополнительному демпфированию собственных колебаний ФГ. Увеличение демпфирования и массы конструкции в целом создавало дефицит свободной энергии колебаний. Так же, как на первом этапе исследований, удары наносили в тех же точках, в трех направлениях. Частоту СК измеряли микрофоном в области внешней рубашки (см. рис. 1).

На рис. 2 представлены графики результатов исследования четырех нормальных ФГ. Такие результаты характерны для всех ФГ, не имеющих дефектов. На графиках представлены три ломаные линии — результаты ударов по трем направлениям. В случаях, когда линия обрывается, не удавалось получить устойчивые результаты измерений. Это означало большую конкуренцию форм СК между собой, что является признаком отсутствия трещин. Конкуренция эта увеличивается с ростом частоты диапазона в связи с ростом количества гармоник и уменьшением их амплитуды.

Только на одном графике (см. рис. 2, г) все три линии одновременно имеют одинаковую частоту в двух соседних диапазонах — 1,5–1,8 и 2,3–2,6 кГц. Но и в этом случае ФГ считается не имеющей дефектов.

На рис. 3 представлены графики исследования ФГ, имевших дефекты. На рис. 3, а видны два участка, на которых все три линии имеют одинаковую частоту в трех соседних диапазонах — 1,2–1,5–1,8 и 4–4,5–5 кГц. На графике второй ФГ также имеются два участка, где все три линии имеют одинаковую частоту в трех соседних диапазонах — 1,2–1,5–1,8 и 2,3–2,6–3,0 кГц. Согласно вышеизложенному это является признаком наличия трещин.

Исследование представленным методом не указанной здесь бездефектной ФГ показали такой же результат, как на рис. 2, т. е. отсутствие доминирующих СК. Исследование другой ФГ, с подозрением на наличие дефектов после взрыва парогазовой смеси, также не выявило доминирующих СК.

Полученные результаты экспериментальных исследований ФГ показали, что нет прямой зависимости между количеством и величиной дефектов внутренней рубашки и числом диапазонов, занятых доминирующими СК. Следовательно, физический процесс образования доминирующих СК весьма сложный, в результате чего некоторые дефекты могут быть не выявлены.

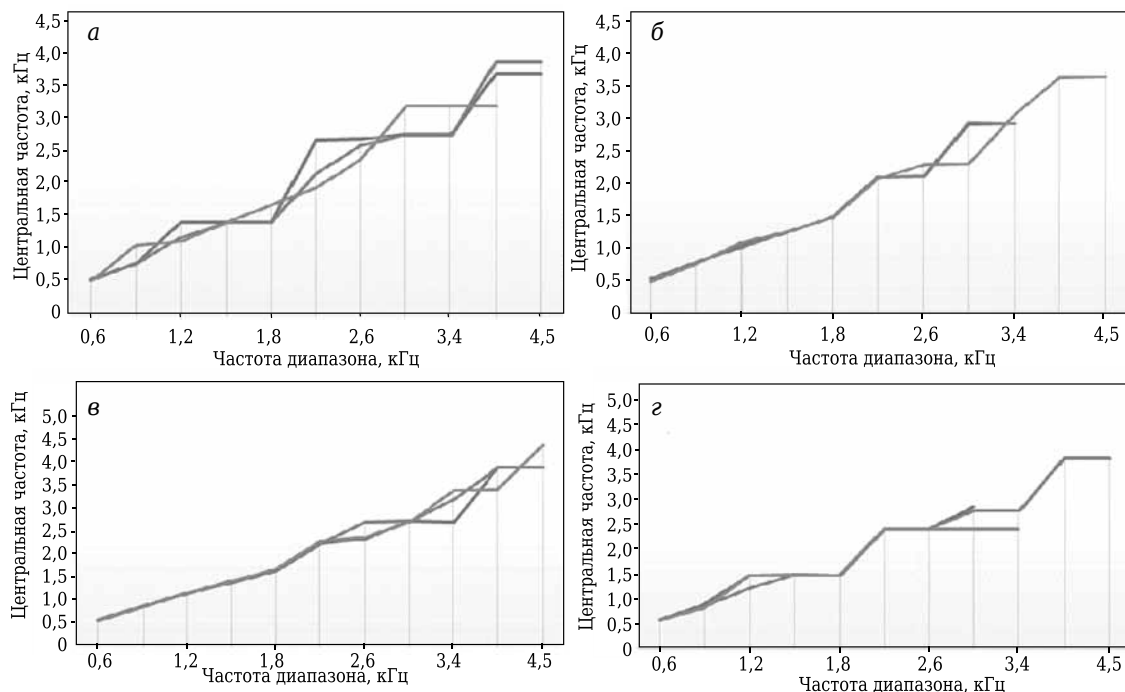


Рис. 2. Результаты исследования четырех (а–г) нормальных ФГ

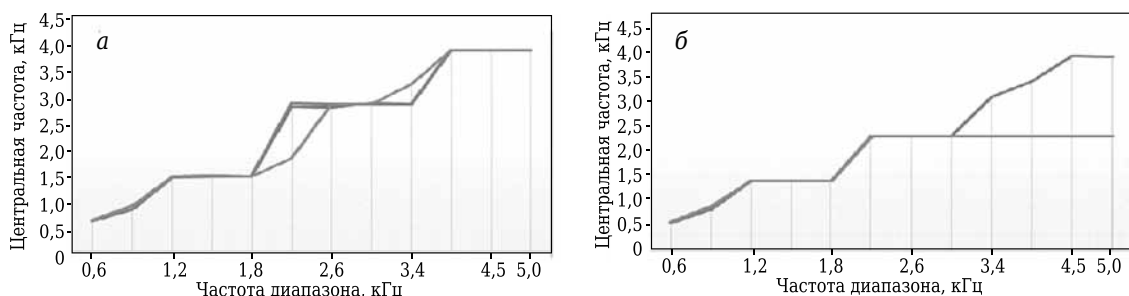


Рис. 3. Результаты исследования двух (а, б) ФГ, имевших дефекты

Ранее этот метод был опробован при проведении дефектоскопии железнодорожных колес [7]. Выборка составляла 100 колес. Результаты показали, что в одних случаях чувствительность метода была высокой, в других — полностью отсутствовала, особенно если трещины были несквозными. Но при этом экспериментальные исследования этим методом показывали, что при

наличии доминирующих частот обязательно имеется трещина.

В связи с изложенным рекомендуется использовать такие преимущества этого метода, как оперативность и простота применения. Это позволяет применять его регулярно и многократно, что в конце концов на каком-то этапе контроля выявит наличие трещины.

Библиографический список

1. Лопухов, Г. А. Толковый металлургический словарь. Основные термины / Г. А. Лопухов, В. А. Цирюльников, В. И. Куманин [и др.] ; под ред. В. И. Куманина. — М. : Русский язык, 1989. — 446 с.
2. Микляев, П. Г. Кинетика разрушения / П. Г. Микляев, Г. С. Нешпор, В. Г. Кудряшов. — М. : Металлургия, 1979. — 279 с.
3. Хажинский, Г. М. Модели деформирования и разрушения металлов / Г. М. Хажинский. — М. : Научный мир, 2011. — 231 с.
4. Гольденблат, И. И. Нелинейные проблемы теории упругости / И. И. Гольденблат. — М. : Наука, 1969. — 336 с.

5. Трофимова, Т. И. Основы физики. Молекулярная физика. Термодинамика : уч. пособие / Т. И. Трофимова. — М. : КНОРУС, 2011. — 192 с.

6. Глаговский, Б. А. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении / Б. А. Глаговский, И. Б. Москоуленко. — Л. : Машиностроение, 1977. — 205 с.
7. Кугушев, В. И. Метод экспресс-контроля железнодорожных колес / В. И. Кугушев // Дефектоскопия. — 2012. — № 6. — С. 22–29. ■

Получено 07.06.16

© А. М. Коновалов, В. И. Кугушев,
А. Ю. Яковлев, 2016 г.