

Экспериментальное исследование многоциклового усталости и демпфирующих свойств роторной стали P2MA при кручении

А. П. Бовсуновский

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

В результате испытаний образцов из роторной стали P2MA получены кривая многоциклового усталости при симметричном кручении, зависимость предела выносливости от среднего напряжения цикла, а также характеристика демпфирования крутильных колебаний образца.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, демпфирование, кручение, среднее напряжение цикла.

Введение. Одной из основных причин катастрофических разрушений валопроводов паровых турбин и турбогенераторов в настоящее время являются крутильные колебания, возникающие в результате нештатных режимов работы турбогенераторов, например при коротком замыкании или включении генератора в сеть с грубой синхронизацией [1–3]. Учитывая потенциальную опасность таких режимов для всех паровых турбин, находящихся в эксплуатации, необходимо оценить степень усталостного повреждения валопроводов турбоагрегатов, что обусловлено решением ряда проблем. Одна из них – определение характеристик сопротивления усталости материала валопровода турбины при циклическом кручении с учетом влияния эксплуатационных факторов: температуры; асимметрии цикла и масштабного фактора [4]. Кроме того, при расчете колебаний валопровода следует располагать данными о демпфирующих свойствах роторной стали при кручении, которые в настоящее время отсутствуют.

Цель работы заключается в исследовании усталостной прочности роторной стали P2MA и ее демпфирующей способности при циклическом кручении, а также установлении влияния среднего напряжения цикла на предел выносливости стали.

Методика экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования образцов из роторной стали P2MA выполняли на созданной в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины испытательной установке КД-1М [5], предназначенной для определения усталостных и демпфирующих свойств материалов при различных видах деформирования (растяжение–сжатие, изгиб, кручение) в широком диапазоне температур (20...800°С) и асимметрии цикла нагружения.

Установка состоит из колебательной системы, системы возбуждения колебаний и системы измерения. Ее блок-схема приведена на рис. 1.

Для испытаний образцов использовали колебательные системы двух видов: первый – крутильный маятник с одной степенью свободы, состоящий из образца и инерционного диска (рис. 2); второй – крутильный маятник с двумя степенями свободы, включающий образец 1, упругий элемент из низкодемпфирующего титанового сплава ВТ8 и инерционные диски 3 и 4 (рис. 1).

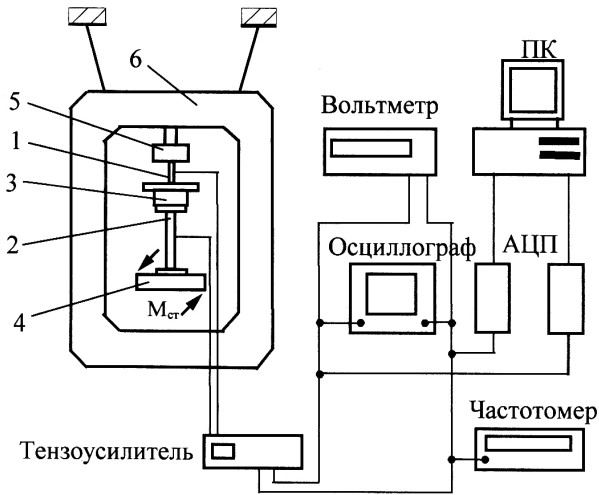


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки КД-1М.

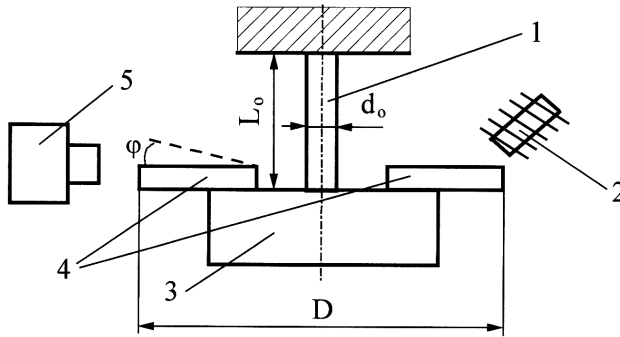


Рис. 2. Колебательная система в виде крутильного маятника с одной степенью свободы: 1 – образец; 2 – электромагнит; 3 – инерционный диск; 4 – ферромагнитные пластины; 5 – микроскоп.

Упругий элемент использован для передачи на образец статического крутящего момента при испытаниях образцов в условиях асимметрии цикла нагружения. Резонансная частота колебаний такой системы составляет 103...105 Гц.

С помощью крутильного маятника с одной степенью свободы определяли характеристики демпфирования колебаний образца, с помощью крутильного маятника с упругим элементом исследовали усталостную прочность стали при циклическом кручении в условиях варьирования среднего напряжения цикла.

В обоих случаях колебательную систему жестко крепили через верхний захват 5 в жесткой массивной раме 6 (рис. 1). Жесткость верхнего захвата на два порядка превышала жесткость образца. Масса рамы приблизительно в 20 раз больше массы колебательной системы, что обеспечивает уравнивание сил инерции колеблющихся масс. Для изоляции от фундамента раму с закрепленной в ней колебательной системой подвешивали на тонких стальных струнах. Инерционные и жесткостные характеристики колебательной

системы подбирали таким образом, чтобы собственные частоты ее колебаний не совпадали с собственными или кратными им частотами колебаний рамы, что важно для корректного определения демпфирующих свойств образцов.

Для исследования многоциклового усталости материала использовали стандартные образцы типа II [6]. Образец представлял собой сплошной цилиндр диаметром $d_0 = 10$ мм и длиной рабочей части $L_0 = 65$ мм.

Упругий элемент выполняли в виде сплошного вала диаметром $d_3 = 25$ мм и длиной $L_3 = 294$ мм из титанового сплава ВТ8 за одно целое с фланцами диаметром 112 мм. В рабочем диапазоне амплитуд напряжений логарифмический декремент колебаний упругого элемента не превышает 0,062%, что практически на порядок ниже уровня характеристики демпфирования конструкционных сталей.

Крепление элементов крутильного маятника между собой осуществляли с помощью фланцевых соединений. Усилие затяжки болтов, при котором практически полностью исключается проскальзывание между фланцевыми соединениями и связанное с ним конструкционное рассеяние энергии, определяли экспериментально. Для этого проводили тесты, цель которых заключалась в установлении взаимосвязи между характеристикой демпфирования колебаний крутильного маятника, состоящего из образца и упругого элемента из титанового сплава ВТ8, и крутящим моментом затяжки болтов. Как видно из рис. 3, с увеличением момента затяжки болтов декремент колебаний вначале интенсивно понижается вследствие уменьшения трения между фланцами, затем постепенно выходит на горизонтальный участок при $M = 60$ Н·м, что свидетельствует о практически полном отсутствии конструкционного рассеяния энергии во фланцевых соединениях. При проведении испытаний образцов из стали Р2МА величину крутящего момента затяжки болтов принимали равной 120 Н·м, что обеспечивает жесткое (без проскальзывания) соединение элементов колебательной системы между собой.

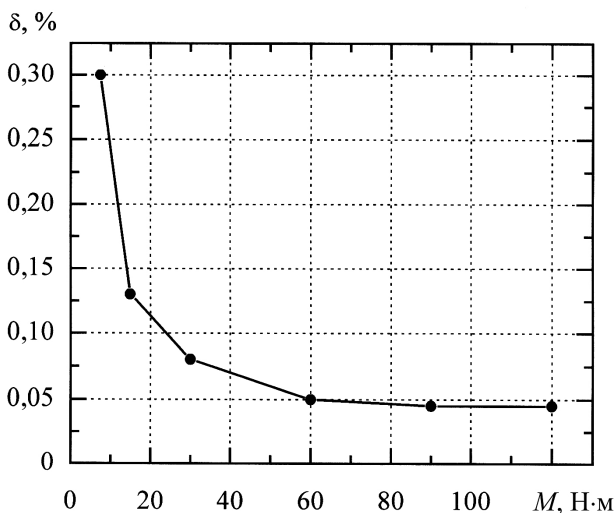


Рис. 3. Зависимость логарифмического декремента крутильных колебаний δ системы образец–упругий элемент от величины момента M затяжки болтов фланцевых соединений колебательной системы при $\tau = 200$ МПа.

Колебания возбуждали с помощью электромагнитной системы, которая состоит из звукового генератора сигналов ГЗ-34, усилителя мощности ТУ-5-4 и электромагнита (рис. 2). Для бесконтактной передачи усилия от электромагнитов к колебательной системе применяли ферромагнитную пластинку, закрепленную к инерционному диску (рис. 2). Использовали резонансный принцип возбуждения колебаний, при котором частоту вынуждающей силы задавали равной собственной частоте колебаний крутильного маятника. Это позволяет возбуждать колебания образца со значительной амплитудой и минимальной энергией, а также фиксировать с высокой точностью связанное с усталостным повреждением образца изменение резонансной частоты его колебаний.

Система измерения состоит из тензорезисторов КФ5-200-А, четырехканального тензоусилителя Mikrotechna 1101, цифрового вольтметра В7-39, двухканального осциллографа С1-83, частотомера Ф551А, счетчика импульсов Ф588, аналого-цифровых преобразователей Ф7077/1 и персонального компьютера. Тензорезисторы наклеивали на образцы и на упругий элемент под углом 45° к их оси.

Тарировку напряжений выполняли по рассчитанному размаху колебаний ферромагнитной пластинки, который в эксперименте измеряли оптическим микроскопом МБС-10.

При расчете размаха колебаний образца необходимо учитывать влияние галтелей сопряжения рабочей части образца с головками крепления диаметром 17 мм на его жесткость. В предположении, что диаметр рабочей части образца по его длине не изменяется, угол закручивания (рис. 2) определяется следующей формулой:

$$\varphi = \frac{\tau_o W_{po} L_o}{G_o I_{po}}, \quad (1)$$

где τ_o – максимальные касательные напряжения в образце; W_{po} – полярный момент сопротивления поперечного сечения образца; L_o – длина рабочей части образца; G_o – модуль упругости материала образца при сдвиге; I_{po} – полярный момент инерции поперечного сечения образца.

Тогда формула для вычисления размаха колебаний внешнего торца ферромагнитной пластины имеет вид

$$\Delta = \frac{2DL_o}{d_o} \frac{\tau_o}{G_o}, \quad (2)$$

где D – измеряемое значение диаметра (рис. 2).

С учетом значений диаметра и длины рабочей части образца формулу (2) запишем так:

$$\Delta = 13D \frac{\tau_o}{G_o}. \quad (3)$$

Формула (3) не учитывает влияние галтелей сопряжения рабочей части образца с головками на его жесткость. Изменение диаметра галтели вдоль образца можно представить степенным полиномом третьей степени:

$$d_r(x) = 10 + 0,0861x + 0,04552x^2 + 0,00803x^3. \quad (4)$$

Податливость рабочей части образца с галтелями определяли как сумму интегралов по трем его участкам:

$$\gamma = \frac{32}{\pi G_o} \left(2 \int_{l_1}^{l_2} \frac{dx}{d_r^4(x)} + \int_{l_2}^{l_3} \frac{dx}{d_o^4} \right), \quad (5)$$

где $l_1 = 0$; $l_2 = 7,7$ мм; $l_3 = 49,6$ мм – экспериментально определенные участки рабочей части образца разного диаметра.

С учетом численного интегрирования по (5) уточненная формула для определения размаха колебаний внешнего торца ферромагнитной пластины принимает вид

$$\Delta = 11,7 D \frac{\tau_o}{G_o}. \quad (6)$$

Таким образом, пренебрежение влиянием галтелей на жесткость образца приводит к погрешности тарировки на 11%. При тарировке напряжений в образце использовали формулу (6).

Размеры усталостных трещин измеряли с помощью оптического микроскопа МБС-10. Для лучшего наблюдения за трещиной поверхность рабочей части образцов перед испытанием подвергали механическому полированию.

Критерием разрушения образцов при определении пределов выносливости и построении кривой усталости служило уменьшение резонансной частоты их колебаний на 1%. Относительная погрешность в определении резонансной частоты на установке КД-1М обусловлена уровнем потерь энергии в колебательной системе, точностью частотомера и не превышала $-2,2 \pm 0,3\%$ [7].

Методика задания среднего напряжения цикла колебаний образца основывалась на использовании крутильного маятника с упругим элементом, заземленным через инерционный диск 4 (рис. 1) в двух симметрично расположенных винтовых парах, с помощью которых диск поворачивался на заданный угол. Тем самым создавался статический крутящий момент $M_{ст}$, который через упругий элемент передавался на образец (рис. 1).

Статическую тарировку касательных напряжений осуществляли по угловому перемещению конца ферромагнитной пластины (рис. 2), измеряемому микроскопом. Перемещение вычисляли по формуле, которая непосредственно следует из (6) для динамической тарировки:

$$\Delta_{ст} = 5,85 D \frac{\tau_m}{G_o}, \quad (7)$$

где τ_m – касательные напряжения, возникающие в образце от действия статического крутящего момента. При крутильных колебаниях образца эти напряжения являются средними напряжениями цикла.

При статическом нагружении отношение между касательными напряжениями в образце и упругом элементе будет

$$\frac{\tau_0}{\tau_3} = \left(\frac{d_3}{d_0} \right)^3 = 15,6, \quad (8)$$

где τ_3 – максимальные касательные напряжения в упругом элементе.

При колебаниях крутильного маятника с упругим элементом по второй форме (такой вид нагружения использовали при испытаниях образцов на усталость) такое соотношение напряжений определяли следующим образом [5]:

$$\frac{\tau_0}{\tau_3} = \frac{L_3 G_0 d_0}{L_0 G_3 d_3} \left[\left(1 - 4\pi^2 f^2 \frac{I_4 L_3}{G_3 I_{p3}} \right)^{-1} - 1 \right]^{-1}, \quad (9)$$

где f – собственная частота колебаний крутильного маятника по второй форме; I_{p3} – полярный момент инерции поперечного сечения упругого элемента; L_3 – длина упругого элемента; I_4 – момент инерции массы инерционного диска 4 (рис. 1).

При частоте колебаний крутильного маятника $f = 104$ Гц соотношение между касательными напряжениями в образце τ_0 и упругом элементе τ_3 составляет 3,0. Таким образом, при колебаниях, как и в случае статического нагружения, напряженность упругого элемента значительно ниже, чем образца, что обеспечивает относительно низкий уровень напряжений в упругом элементе в процессе длительного циклического нагружения образцов.

Методика испытаний образцов при различной асимметрии цикла заключается в следующем. Вначале с помощью винтовых пар в образце задавали определенный уровень статических касательных напряжений τ_m . Для их тарировки, которая в этом случае является статической, использовали формулу (7). Затем возбуждали резонансные колебания системы и выполняли динамическую тарировку амплитудных значений касательных напряжений τ_0 в образце по формуле (6). После статической и динамической тарировок проводили циклические испытания образца в соответствии с программой. В процессе испытаний периодически определяли амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний образца.

В области напряжений, представляющей интерес для инженерной практики, характеристики демпфирования колебаний конструкционных материалов являются амплитудно-зависимыми. Зависимости характеристики демпфирования колебаний от амплитуды определяли методом свободных затухающих колебаний с помощью автоматизированной системы измерения и разработанного программного обеспечения [8].

В качестве характеристики демпфирования использовали логарифмический декремент колебаний [8]. Относительная погрешность его определения не превышает 10%.

Испытания показали, что используемая колебательная система обладает высокой добротностью: нижний зафиксированный уровень логарифмическо-

го декремента колебаний системы достигает 0,02%. Это означает, что можно проводить испытания роторной стали Р2МА при амплитудах крутильных колебаний, значительно превышающих ее предел выносливости, и, таким образом, исследовать многоцикловую усталость в широком диапазоне амплитуд напряжений, асимметрии цикла колебаний, а также определять характеристику демпфирования стали при тех же условиях нагружения.

Для определения зависимости логарифмического декремента крутильных колебаний образцов из стали Р2МА от амплитуды касательных напряжений использовали колебательную систему в виде крутильного маятника с одной степенью свободы (рис. 2). Методика проведения испытаний следующая: после динамической тарировки системы измерения на заданный уровень напряжений (для этого возбуждались резонансные колебания крутильного маятника) система возбуждения колебаний выключалась, после чего автоматически осуществлялись регистрация затухающего колебательного процесса и его обработка, в результате чего получали амплитудную зависимость логарифмического декремента колебаний образца.

При определении предела выносливости материала использовали ускоренный метод, основанный на характерной особенности амплитудной зависимости логарифмического декремента колебаний образца, получаемой в широком диапазоне амплитуд напряжений [9]. В основе метода лежит установленный экспериментально факт резкого увеличения рассеиваемой в образце за цикл колебаний энергии, когда амплитуда напряжений при колебаниях образца превышает предел выносливости материала. Это явление связывают с необратимым поглощением энергии колебаний в результате повреждения материала. В таком случае амплитудная зависимость логарифмического декремента колебаний образца, построенная в логарифмических координатах, имеет ярко выраженный перелом. Амплитуда напряжений, соответствующая точке этого перелома, близка к величине предела выносливости материала, найденного традиционным способом.

Таким образом, располагая демпфирующими свойствами образца при заданном виде колебаний, определяемыми по результатам краткосрочных испытаний, можно с достаточной для практических целей точностью найти предел выносливости материала. Колебательная система в виде крутильного маятника с образцом и упругим элементом позволяет проводить такие испытания при различных средних напряжениях цикла.

Результаты испытаний. Демпфирующие свойства стали Р2МА исследовали при трех начальных уровнях амплитуды напряжений: $\tau_{\max} = 50, 100$ и 150 МПа (рис. 4). Как видно, логарифмический декремент крутильных колебаний данной стали существенно зависит от амплитуды колебаний, изменяясь от 0,037 до почти 2% в исследованном диапазоне напряжений, т.е. более чем в 50 раз. Начальная амплитуда напряжений в исследованном диапазоне практически не влияет на амплитудную зависимость декремента колебаний образца.

Представленную на рис. 4 амплитудную зависимость декремента колебаний образца аппроксимировали степенной функцией вида

$$\delta = B\tau_a^n, \quad (10)$$

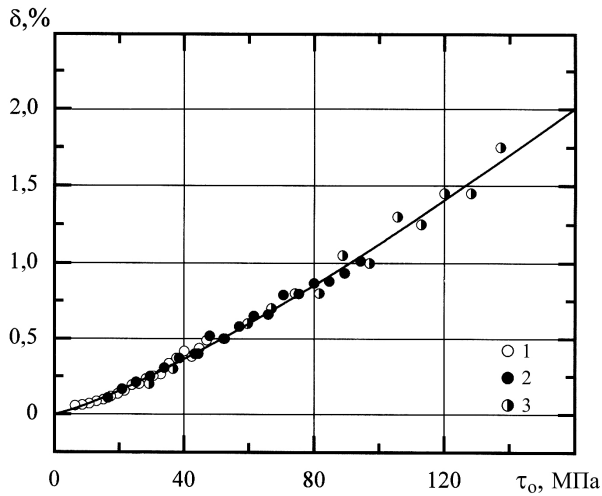


Рис. 4. Амплитудная зависимость логарифмического декремента крутильных колебаний образца из стали P2MA: 1 – $\tau_{\max} = 50$ МПа; 2 – $\tau_{\max} = 100$ МПа; 3 – $\tau_{\max} = 150$ МПа.

где $B = 3,9 \cdot 10^{-5}$; $n = 1,23$. (Необходимо отметить, что декремент колебаний определяется в относительных единицах, а не в процентах.)

Базовой характеристикой прочности материала при циклических нагрузках является кривая усталости при симметричном цикле нагружения и нормальной температуре. Такая кривая для образцов из стали P2MA получена по результатам испытаний 15 образцов (рис. 5). Предел выносливости материала τ_{-1} на базе 10^7 цикл равен 230 МПа.

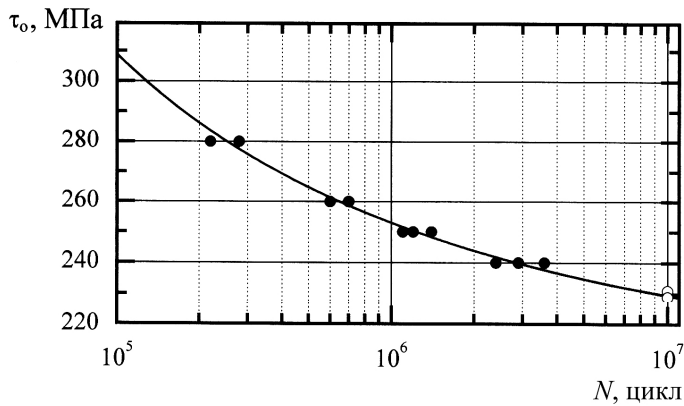


Рис. 5. Кривая многоциклового усталости образцов из стали P2MA при симметричном цикле нагружения: темные точки – разрушенные образцы, светлые – неразрушившиеся.

Кривую усталости (рис. 5) аппроксимировали затухающей экспонентой вида

$$\tau_a = \eta_0 + \eta_p(N)^c + \eta_u(N)^b, \quad (11)$$

где η_0 , η_p и η_u – коэффициенты функции; N – число циклов до разрушения образца; c и b – показатели степени.

Параметры уравнения (11) для стали Р2МА при циклическом симметричном кручении при температуре испытаний 20°С следующие: $\eta_0 = 208,3$; $\eta_p = 3176,229$; $\eta_u = 185966,681$; $c = -0,3114$; $b = -0,8348$.

Для определения предела выносливости стали Р2МА использовали также ускоренный метод, основанный на особенностях амплитудной зависимости характеристики демпфирования колебаний образцов (см. методику экспериментальных исследований). На рис. 6 приведена амплитудная зависимость логарифмического декремента крутильных колебаний образцов, предназначенных для ускоренного определения предела выносливости стали, построенная в двойных логарифмических координатах. В соответствии с ускоренным методом абсцисса перелома амплитудной зависимости указывает на предел выносливости материала τ_{-1} (для данных образцов он составляет 235 МПа). Для повышения точности его определения таким же способом испытывали еще два образца. Их предел выносливости равен 226 и 232 МПа. Среднее значение τ_{-1} по результатам испытаний трех образцов составляет 231 МПа, что практически совпадает с пределом выносливости данной стали, определенным традиционным способом ($\tau_{-1} = 230$ МПа).

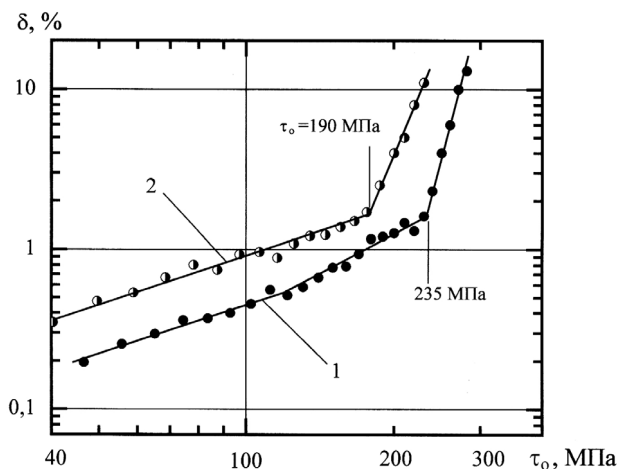


Рис. 6. Амплитудная зависимость логарифмического декремента крутильных колебаний образцов из стали Р2МА при различных средних напряжениях цикла: 1 – $\tau_m = 0$; 2 – $\tau_m = 240$ МПа.

Таким образом, ускоренный метод определения предела выносливости образцов из стали Р2МА при циклическом кручении позволяет достаточно точно оценить характеристику циклической прочности материала.

Отметим, что интенсивность рассеяния энергии при кручении, когда реализуется плоское напряженное состояние, соответствующее чистому сдвигу, существенно выше, чем при растяжении–сжатии, что подтверждают выводы, сделанные в [10]. Поэтому при ускоренном определении предела выносливости образцов из стали Р2МА при кручении возникают некоторые трудности, связанные с необходимостью генерации значительной мощности в системе возбуждения колебаний из-за высокого уровня рассеяния энергии колебаний при амплитудах напряжений, превышающих предел выносливости материала (максимальный уровень логарифмического декремента колебаний при испытаниях образцов достигает 15%).

Исследования влияния среднего напряжения цикла на предел выносливости образцов из стали Р2МА при циклическом кручении выполняли ускоренным методом с использованием колебательной системы с упругим элементом, через который осуществлялась статическая подгрузка образца.

Максимальная амплитуда напряжений при испытаниях не превышала 280 МПа и снижалась по мере увеличения среднего напряжения цикла. Амплитудные зависимости логарифмического декремента колебаний определяли при четырех уровнях среднего напряжения цикла: $\tau_m = 0, 80, 160$ и 240 МПа.

В качестве примера на рис. 6 показаны также амплитудные зависимости логарифмического декремента крутильных колебаний образца при двух уровнях среднего напряжения цикла. Видно, что абсцисса перелома амплитудных зависимостей смещается влево по мере увеличения среднего напряжения цикла. Это означает, что предел выносливости стали Р2МА при этом снижается: при симметричном цикле нагружения $\tau_{-1} = 235$ МПа, при среднем напряжении цикла $\tau_m = 240$ МПа величина $\tau_R = 190$ МПа (τ_R – предел выносливости при несимметричном цикле нагружения).

Диаграмма предельных амплитуд, построенная по результатам испытаний трех образцов из стали Р2МА, показана на рис. 7. Уравнение, описывающее кривую предельных амплитуд, имеет вид

$$\tau_0 = \sqrt{\tau_{-1}^2 - \kappa^2 \psi_\tau^2 \tau_m^2}, \quad (12)$$

где $\tau_{-1} = 230$ МПа; $\kappa = \tau_{-1}/\sigma_{-1} = 0,922$; $\psi_\tau = 0,505$. Величина коэффициента κ указывает, что соотношение механических свойств исследуемой стали при растяжении–сжатии (изгибе) и кручении наилучшим образом описываются второй теорией прочности.

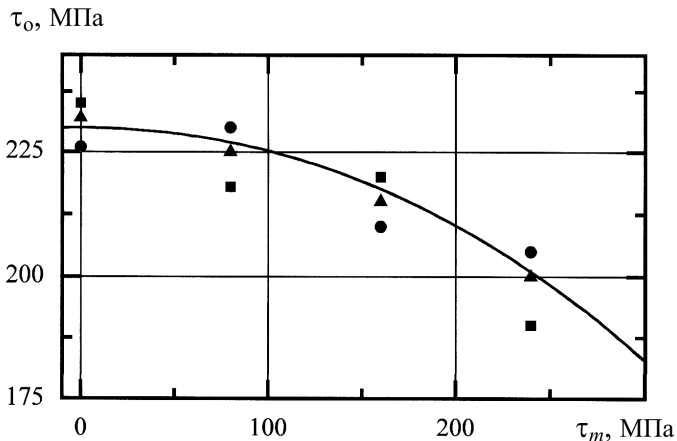


Рис. 7. Диаграмма предельных амплитуд стали Р2МА при циклическом кручении, построенная по результатам испытаний трех образцов: ■, ●, ▲ – соответственно первый, второй и третий образцы.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что в процессе длительного циклического нагружения образцов характеристика демпфирования их колебаний монотонно снижается. Наиболее интенсивно неупругие свойства мате-

риала уменьшаются (до шести раз) в течение первой половины циклических испытаний, затем этот процесс существенно замедляется. Снижение характеристики демпфирования колебаний наблюдается до момента возникновения макротрещины в образце, что сопровождается ее монотонным увеличением вследствие подрастания трещины.

Такой характер изменения характеристики демпфирования крутильных колебаний образцов из стали Р2МА в процессе циклического нагружения позволяет заключить, что данная сталь относится к классу циклически упрочняющихся [10].

Выводы

1. Разработана методика и создана на ее основе экспериментальная установка, что позволяет проводить испытания сплошных цилиндрических образцов из роторной стали Р2МА с определением предела выносливости и характеристики демпфирования колебаний при циклическом кручении.

2. Предел выносливости стали Р2МА при симметричном циклическом кручении, определенный в результате испытаний образцов при комнатной температуре традиционным способом и по перелому амплитудной зависимости логарифмического декремента крутильных колебаний образцов, равен 230 МПа.

3. Получены кривая усталости роторной стали при симметричном кручении и зависимость предела выносливости материала от среднего напряжения цикла. В исследованном диапазоне средних напряжений цикла снижение предела выносливости стали Р2МА составляет порядка 15%.

4. Логарифмический декремент крутильных колебаний образцов из стали Р2МА существенно зависит от амплитуды колебаний и в исследованном диапазоне амплитуд касательных напряжений достигает 2%. Выявленный характер изменения характеристики демпфирования крутильных колебаний образцов в процессе циклического нагружения, а именно ее монотонное снижение, позволяет заключить, что данная сталь относится к классу циклически упрочняющихся.

Резюме

У результаті випробувань зразків із роторної сталі Р2МА отримано криву багатоциклової втоми сталі при симетричному крученні, залежність границі витривалості від середнього напруження циклу та характеристику демпфирования крутильних коливань зразка.

1. *Загретдинов И. Ш., Костюк А. Г., Трухний А. Д., Должанский П. Р.* Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и выводы // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 5 – 15.
2. *Dorfman L. S. and Trubelja M.* Torsional monitoring of turbine-generators for incipient failure detection // Proc. of the Sixth EPRI Steam Turbine/Generator Workshop (Missouri, Aug. 17–20, 1999). – 1999. – P. 1 – 6.

3. *Joyce J. S., Kulig T., and Lambrecht D.* Torsional fatigue of turbine-generator shafts caused by different electrical system faults and switching operations // IEEE Trans. PAS-97, Sept.–Oct., 1978. – P. 965 – 977.
4. *Бовсуновский А. П., Черноусенко О. Ю., Штефан Е. В., Баица Д. А.* Усталостное повреждение и разрушение роторов паровых турбин в результате крутильных колебаний // Пробл. прочности. – 2010. – № 1. – С. 144 – 151.
5. *Матвеев В. В., Бовсуновский А. П.* Методика экспериментального исследования демпфирующей способности материалов при бигармоническом деформировании в условиях однородного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1986. – № 10. – С. 118 – 122.
6. *ГОСТ 25.502-79.* Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
7. *Бовсуновский А. П.* К вопросу об определении собственной частоты поперечных и продольных колебаний стержня с трещиной. Сообщ. 2. Результаты эксперимента и расчета // Пробл. прочности. – 1999. – № 3. – С. 45 – 53.
8. *Басков А. Г., Кратко А. Г., Бовсуновский А. П. и др.* Автоматическая система измерения характеристики демпфирования колебаний механических систем на основе микроЭВМ // Там же. – 1990. – № 1. – С. 110 – 112.
9. *Трощенко В. Т.* Критерии усталостной прочности металлов и сплавов, основанные на учете рассеяния энергии // Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. – Киев: Наук. думка, 1966. – С. 168 – 177.
10. *Трощенко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.

Поступила 15. 02. 2010