

А. М. Щипачев, Е. А. Наумкин, И. Р. Кузеев

ИЗМЕНЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ СТАЛИ 09Г2С В МАЛОЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ

На основе данных замеров скорости ультразвуковых продольных волн образцов из стали 09Г2С при различных числах циклов усталостного нагружения в малоциклового области было показано, что по мере циклической наработки происходит явление трансформации нормального закона распределения скорости ультразвуковых волн в степенной, что может свидетельствовать о подчинении поведения металла как сложной системы теории самоорганизованной критичности. *Скорость ультразвуковых волн; статистические законы распределения; циклическое нагружение*

В исходном состоянии металла (до приложения циклических нагрузок) различные его структурные параметры (механические, магнитные характеристики, скорость ультразвуковых волн и др.), характеризующие структуру материала, подчиняются, как правило, нормальному закону распределения. При исследовании циклической повреждаемости металла предполагается, что законы распределения этих параметров остаются неизменными.

Металл детали, работающей в машине, представляет собой *систему* с точки зрения различных подходов.

Во-первых, она является системой с точки зрения наличия иерархических уровней деформирования и разрушения, согласно взглядов акад. В. А. Панина [1].

Во-вторых, наличие неоднородностей локальных макрообъемов, сравнимых с размерами зерна, имеющих различные локальные характеристики прочности, вызывает перераспределение напряжений, деформаций, энергии в объеме металла между этими микрообъемами детали оптимальным образом в соответствии с принципами синергетики.

В-третьих, это система из «основного» металла и металла поверхностного слоя, которые взаимодействуют, осуществляя информационно-энергетический обмен [2].

Если рассматривать металл детали в качестве системы, то логично предположить, что при приближении к предельному состоянию она будет претерпевать определенные изменения. А именно – изменения, характерные для любой сложной системы при приближении ее к критическому состоянию или катастрофе. Можно предположить, что при этом происходит транс-

формация законов распределения параметров, характеризующая достижение предельного состояния металла как сложной системы.

Согласно теории самоорганизованной критичности [3, 4], достижение системой предельного, критического состояния означает изменение законов распределения характерных ее параметров, переход к степенному закону распределения. В нашем случае это может быть трансформация нормального закона распределения структурных параметров макрообъемов металла в степенной.

При статистической обработке данных замеров структурных параметров эта трансформация не учитывается. Априорно предполагается, что закон распределения не меняется как в начальном, так и предельном состояниях материала.

В результате анализа большого массива данных о природных и техногенных катастрофах (землетрясений, наводнений, крупных авариях на промышленных предприятиях и транспорте и т. п.), а также потрясений в экономической, в частности, финансовой областях (биржевые крахи, дефолт, моделирование динамики рынка товаров и т. п.) были определены основные закономерности, присущие этим явлениям, и была создана теория самоорганизованной критичности.

Согласно данной теории, отличительной чертой многих сложных систем являются степенные законы распределения (СЗР) вероятностей при приближении к предельному состоянию (статистическим образом катастрофического поведения) [2]. Степенной закон распределения имеет плотность вероятности вида

$$f(x) = x^{-(1+\alpha)}. \quad (1)$$

Этот закон вытекает из более общего распределения Парето, для которого функция распределения $F(x) = P\{\xi < x\}$, определяющая вероятность того, что соответствующая величина принимает значение, меньшее x , задается соотношением

$$F(x) = \begin{cases} 1 - x^{-\alpha}; & x \geq 1; \\ 0 & x < 1; \end{cases} \quad 0 < \alpha < 1. \quad (2)$$

Нами были проведены исследования трансформации статистических законов распределения скорости ультразвуковых продольных волн при циклической наработке стали 09Г2С в области малоциклового усталости.

Данные исследования и их последующая статистическая обработка проводились с целью:

1. Получить множества однородных данных замеров скорости ультразвуковых волн в рабочей зоне по толщине образца, при определенной циклической наработке.

2. Провести статистическую проверку статистических гипотез по критерию Пирсона о распределении генеральной совокупности как по нормальному закону, так и по степенному.

3. Определить, какие гипотезы о законах распределения (нормальном или степенном) более приемлемы в соответствии с критерием Пирсона (при заданном уровне значимости) при различных значениях циклической наработки образцов.

4. Исследовать, имеет ли место явление трансформации нормального закона распределения скорости ультразвуковых волн в степенной по мере циклической наработки вплоть до разрушения (это докажет, что поведение металла как сложной системы в критическом состоянии, близком к разрушению, может быть описано теорией катастроф).

Исследование усталостной долговечности в малоциклового области выполнялось при циклическом упругопластическом нагружении. Для повышения достоверности получаемых результатов при исследовании использовались образцы толщиной, соотносимой с реальными размерами аппаратов химических производств. Образцы для испытаний на малоциклового усталость изготавливались согласно ГОСТ 25502-79 из сваренных автоматической сваркой под слоем флюса двух пластин листового проката. Направление вырезки образцов вдоль проката выбиралось из условий нагружения изделий и технологии получения материала.

Нагружение образцов осуществлялось на установке для испытаний на усталость по схеме чистого симметричного изгиба. Контроль величины прогиба производился с помощью

специального устройства с индикатором часового типа.

Измерения скорости распространения ультразвуковых продольных волн выполнялись с помощью ультразвукового толщиномера 36 DL Plus фирмы Panametrics с раздельно-совместным преобразователем марки D 709 при каждом заданном уровне накопления усталостных повреждений. Предварительно на каждом образце наносилась сетка размером 6×5 мм, и в каждой ее ячейке был произведен замер толщины микрометром.

Методика статистической обработки состояла из следующих этапов.

1. Множество однородных данных замеров скорости ультразвуковых волн преобразовывалось в вариационный ряд.

Вариационный ряд необходим для построения эмпирического распределения. Величины интервалов выбирались таким образом, чтобы общее число интервалов было не менее 7–8. Интервалы выбирались равной величины.

Далее все расчеты велись в программной оболочке Microsoft Excel.

2. Определялась средняя арифметическая вариационного ряда

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i n_i}{n}, \quad (3)$$

где n – общее число данных замеров, n_i – число замеров, попавших в интервал, m – число интервалов.

3. Определялась дисперсия вариационного ряда (несмещенная)

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^m n_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (4)$$

и среднее квадратическое отклонение

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (5)$$

4. По найденным параметрам вариационного ряда \bar{x} и s определялось аналитическое выражение для нормального закона распределения (закона Гаусса)

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}}. \quad (6)$$

5. Находились теоретические вероятности p_i попадания случайной величины x (данных замеров) в i -й интервал (равные теоретическим частотам интервалов n_i / n) из выражения (6) в предположении нормального закона распределения

ления. Затем находились соответствующие теоретические частоты интервалов np_i .

6. Рассчитывалось значение критерия Пирсона (критерия «Хи-квадрат») по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}. \quad (7)$$

Для выбранного уровня значимости α , который был принят равным 0,05 и числа степеней свободы

$$k = m - r - 1,$$

где r – число параметров, определяющих распределение (для нормального распределения $r = 2$), определялось критическое значение критерия $\chi_{\alpha;k}^2$.

7. Сравнивались значения эмпирически найденной величины критерия χ^2 и соответствующего критического значения его $\chi_{\alpha;k}^2$. Если $\chi^2 \leq \chi_{\alpha;k}^2$ или $\chi_{\alpha;k}^2 - \chi^2 \geq 0$, гипотеза о нормальном распределении не противоречит опытным данным (т.е. принимается), если же $\chi^2 > \chi_{\alpha;k}^2$ или $\chi_{\alpha;k}^2 - \chi^2 < 0$, то гипотеза отвергается (не принимается) при заданном уровне значимости α или надежности $\gamma = 1 - \alpha$.

Разность $\chi_{\alpha;k}^2 - \chi^2$ может служить показателем близости эмпирического распределения случайной величины рассматриваемому теоретическому распределению. Чем больше значение этой разности, тем близость эмпирического распределения рассматриваемому теоретическому больше и наоборот.

8. Определялась приемлемость степенного закона распределения

$$f(x) = Cx^\alpha, \quad (8)$$

где α и C – параметры, $x > 0$, для эмпирического вариационного ряда или, другими словами, можно ли принять гипотезу о распределении случайных величин (данных замеров) по степенному закону.

Поскольку степенное распределение симметрично относительно среднего (средней арифметической вариационного ряда \bar{x}), то можно исследовать только половину, например, область, лежащую правее \bar{x} . При этом предполагается, что правомерно перенести значения x_i , лежащие левее \bar{x} , в область значений, лежащих правее \bar{x} , симметрично относительно \bar{x} . Т. е. если $x_i < \bar{x}$, то новое, «исправленное» значение x'_i будет равно $x'_i = 2\bar{x} - x_i$. Либо, что более удобно, можно просто объединить интервалы, лежащие на одинаковом расстоянии от \bar{x} , и суммировать соответствующие эмпирические

частоты этих интервалов. Эта операция объединения была проведена для всех найденных вариационных рядов.

9. Были построены точечные диаграммы эмпирических частот на основе «объединенных» вариационных рядов. Далее, на каждой диаграмме строилась кривая – линия тренда, соответствующая степенной аппроксимации, и находились параметры α и C этой степенной кривой, которые соответствуют параметрам соответствующего уравнения регрессии. На рис. 1 для примера показана зависимость эмпирических частот от скорости ультразвуковых продольных волн образцов в исходном состоянии – аппроксимация по степенному закону распределения (СЗР).

10. По зависимости (8) при подстановке соответствующих найденных параметров α и C определялись теоретические частоты в каждом интервале.

11. Рассчитывалось значение критерия Пирсона (критерия «Хи-квадрат») по формуле (7). При этом уровень значимости α также был принят равным 0,05 и параметр r при расчете числа степеней свободы был принят равным 2, так как степенное распределение также имеет два параметра.

12. Аналогично описанному в п. 7 было проведено сравнение значений эмпирически найденной величины критерия χ^2 и соответствующего критического значения его $\chi_{\alpha;k}^2$.

Для каждого множества однородных данных замеров на одной грани образца после определенной циклической наработки были найдены разности $\chi_{\alpha;k}^2 - \chi^2$ для проверки гипотез о нормальном и степенном законах распределения.

На рис. 2 видно, что разность $\chi_{\alpha;k}^2 - \chi^2$ при сравнении с НЗР уменьшается, а при сравнении с СЗР увеличивается.

Это говорит о том, что по мере циклической наработки НЗР становится менее адекватен эмпирическому распределению, а СЗР – более. Область прямой выше оси абсцисс диаграммы означает, что гипотеза о законе распределения (НЗР или СЗР – см кривую) принимается, ниже – отвергается.

На основе анализа полученных данных и литературных источников [2, 3] можно также сделать вывод о том, что мы наблюдаем частный случай СЗР – мультипликативный процесс, который характеризуется значениями показателя степени α , намного превышающими 2 (а природные и техногенные катастрофы имеют значение $\alpha \leq 2$).

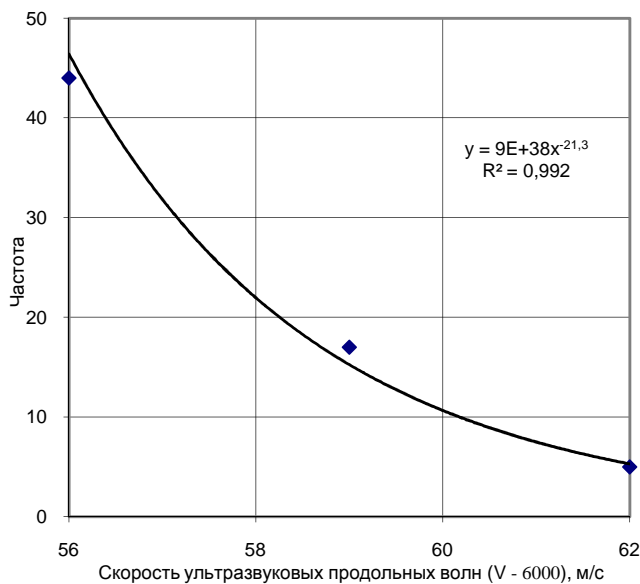


Рис. 1. Степенная аппроксимация эмпирических частот от скорости ультразвуковых продольных волн образцов в исходном состоянии

Средняя разность $X_{кр}$ и $X_{расч}$ в зав. от числа циклов

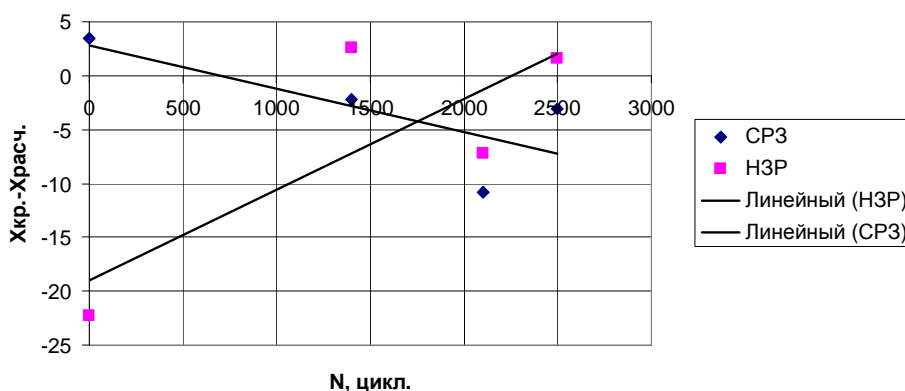


Рис. 2. Средняя разность $\chi_{\alpha;k}^2 - \chi^2$ – (H3P и CP3) в зависимости от степени поврежденности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поверхность и поверхностные явления / И. Р. Кузеев [и др.]. Уфа: Нефтегазовое дело, 2008. 144 с.
2. Панин В. А., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1990. 240 с.
3. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. М.: Наука, 2000. 431 с.
4. Малинецкий Г. Г., Подлазов А. В., Кузнецов И. В. Синергетика и прогноз бедствий и катастроф // Прикладная синергетика-II: Сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ, 2004. Т. 1. С. 73–104.

ОБ АВТОРАХ

Щипачев Андрей Михайлович, проф. каф. технологии машиностроения. Д-р техн наук по материаловедению в машиностроении (ИПСМ РАН, 2000). Иссл. в обл. прогнозирования характеристик усталостной прочности с учетом технологии обработки.

Наумкин Евгений Анатольевич, доцент каф. технологическ. машин и оборудования Уфимск. гос. нефт. ун-та. Д-р. техн. наук в области материаловедения в машиностроении.

Кузеев Искандер Рустемович, зав. той же каф. Д-р. техн. наук в области материаловедения в машиностроении.