

Х. С. ХАЗАНОВ, Б. А. ЛАВРОВ,  
В. И. ИВАНЧЕНКО, М. А. ПЕТРОВИЧЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ СТАЦИОНАРНОЙ СЛУЧАЙНОЙ НАГРУЗКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА Д16АТ И СТАЛИ 30ХГСА

Большинство имеющихся данных по усталостной прочности материалов получено при гармоническом нагружении. Между тем в реальных условиях на конструкцию действуют случайные полигармонические нагрузки. Такие нагрузки могут быть смоделированы или воспроизведены на специальных стендах. При этом возникает естественное желание заменить сложный реальный процесс полигармоническим, в статистическом смысле эквивалентным воспроизводимому процессу и содержащим сравнительно небольшое число гармонических составляющих. Теоретическое обоснование такой замены дано в работе [4], где показано, что при моделировании необходимо выдержать приближение полигармонического процесса к заданному по спектральной плотности и по плотности вероятности пиковых значений амплитуд.

Первая попытка создать установку для моделирования случайных стационарных процессов с помощью полигармонического процесса и применить ее для усталостных испытаний была сделана, очевидно, в работе [3]. На этой установке проведены усталостные испытания плоских образцов из стали 30ХГСА с концентратором в виде небольшого отверстия. Следует отметить, что при испытаниях не был предусмотрен контроль величин моментов распределения задаваемого процесса и отсутствовала возможность корректировки формы спектральной плотности. В связи с этим возникает необходимость создания экспериментальной установки, лишенной указанных недостатков.

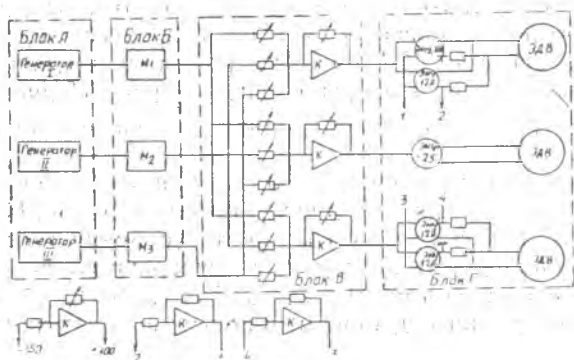
В предлагаемой статье приводится описание такой установки для моделирования случайной низкочастотной нагрузки, даются

результаты исследования усталостной прочности образцов из сплава Д16АТ и стали 30ХГСА, рассмотрено влияние формы спектров на долговечность образцов и произведено сравнение с усталостью при гармоническом нагружении.

### Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для испытаний при случайных низкочастотных нагрузках (до 20 герц) состоит из моделирующей части, исполнительской части и контрольной аппаратуры (фиг. 1).

Моделирующая часть выполнена в виде трех отдельных блоков А, Б и В. Блок А состоит из трех задающих генераторов, которые служат для задания определенных частот. Генераторы выполнены



Фиг. 1.

на усилителях постоянного тока с нелинейной стабилизацией. Сигналы с каждого генератора поступают в блок Б, состоящий из трех потенциометрических модуляторов, осуществляющих амплитудную модуляцию по заданному закону. Применение переменных сопротивлений позволяет легко получать необходимый закон модуляции.

Блок В включает в себя девять операционных усилителей. Из них три предназначены для уменьшения выходного сопротивления модуляторов и имеют коэффициент усиления, равный единице, один служит для получения постоянных напряжений 10 вольт и 100 вольт, используемых для задания коэффициентов усиления, три используются для суммирования сигналов, поступающих с выходов модуляторов, причем величина выходного сигнала регулируется с помощью сопротивлений в цепи обратной связи этих усилителей. Данная схема позволяет получать одинаковую форму спектральной плотности случайных нагрузок для нескольких электромашинных усилителей (ЭМУ) и электродинамических вибраторов (ЭДВ).

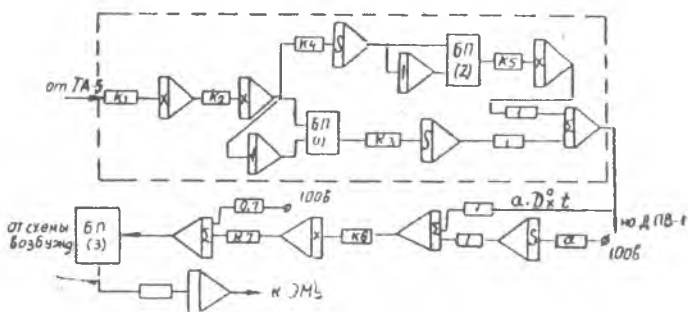
Блок Г является исполнительской частью и состоит из пяти ЭМУ и трех ЭДВ. Два усилителя из блока В используются для уравнивания токов ЭМУ при их параллельном включении. Сигнал с

ЭМУ подается на подвижную катушку ЭДВ, к которой прикрепляются испытуемые образцы.

Как известно, для стационарного случайного процесса, обладающего эргодическим свойством, моменты распределения первого и второго порядков не должны зависеть от времени. Поэтому при испытаниях образцов важно контролировать и сохранять постоянными эти простейшие характеристики случайного процесса.

Аппаратура контроля включает в себя тензометрический преобразователь ТА-5, шлейфовый осциллограф Н-700, моделирующую машину МН-7, блок нелинейности НБН-1, осциллоскоп И-5 и двойной пиковый вольтметр ДПВ-1. В качестве чувствительных элементов используются тензодатчики, наклеенные на специальную балочку и испытуемые объекты. Сигналы с тензодатчиков через тензометрический преобразователь ТА-5 подаются на осциллограф Н-700, с помощью которого производится запись процесса на фотобумаге. Кроме того, сигнал с ТА-5 подается на моделирующую машину МН-7 для вычисления и регулировки дисперсии. Структурная схема вычисления и регулировки центрированной дисперсии  $D_x^0$  показана на фиг. 2.

Задача сохранения постоянного значения дисперсии решается путем сравнения измеряемой дисперсии с эталонной. Сигнал ошибки служит для изменения коэффициента усиления в схеме возбуждения ЭМУ. Модель для вычисления дисперсии включается на повторный режим с периодом 40 секунд. Для удобства наблюдения модель МН-7 соединена с двойным пиковым вольтметром ДПВ-1, по

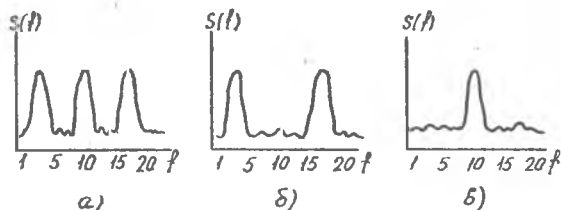


Фиг. 2.

которому можно определять максимальную величину дисперсии, и осциллоскопом И-5. Результаты эксперимента показывают, что данное устройство позволяет поддерживать моменты первого и второго порядков постоянными в течение эксперимента.

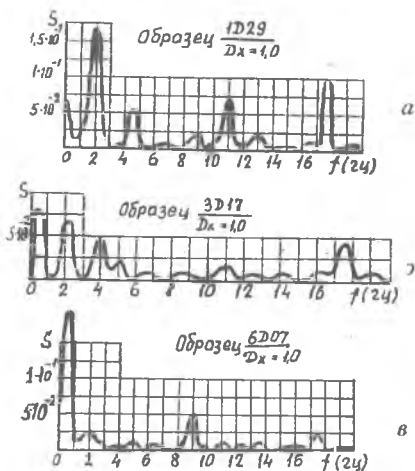
Помимо визуальных наблюдений по осциллоскопу И-5 регулярно велась запись процесса с последующей обработкой на ЭЦВМ. Результаты обработки показали, что закон распределения пиковых значений амплитуд весьма близок к нормальному.

Для стационарного случайного процесса формы спектральной плотности бесконечно многообразны и охватывают очень широкий диапазон частот. Можно показать [1], что любые формы спектральной плотности заключены между формами, соответствующими «чисто» случайному процессу и «чисто» детерминированному периодическому процессу. Простейшая форма спектральной плотности стационарной случайной нагрузки будет иметь вид узкополосного спектра (фиг. 3в) с максимумом на преобладающей частоте. Более сложные формы показаны на фиг. 3а и 3б.



Фиг. 3.

Для того, чтобы получить на моделирующей установке формы спектральной плотности, подобные показанным на фиг. 3, выбираем несущие частоты, задаем закон и период модулирующего сигнала. После расчета спектральной плотности по записям процесса устанавливаем ширину спектра каждой модулированной несущей частоты. Изменяя период и закон модулирующего сигнала, изменяем и ширину спектра. Затем определяем уровни сигналов на несущих частотах для выбранных форм спектральной плотности с учетом амплитудно-частотной характеристики системы.



Фиг. 4.

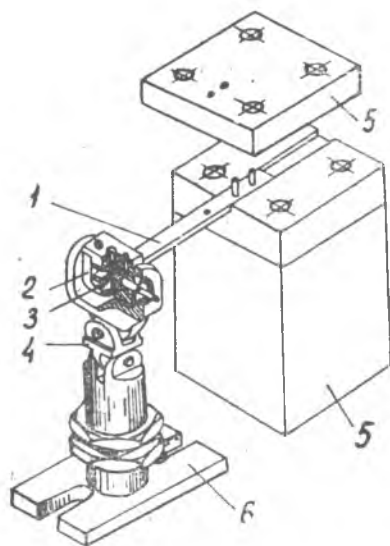
На фиг. 4 показаны формы спектральной плотности, полученные на экспериментальной установке и использованные для усталостных испытаний образцов.

### Влияние формы спектральной плотности случайной нагрузки на усталостную прочность образцов из сплава Д16АТ и стали 30ХГСА

Экспериментальное исследование влияния формы спектральной плотности на усталостную прочность образцов из сплава Д16АТ и стали 30ХГСА преследовало следующие цели: а) выявить влияние формы спектров нагружения на усталостную прочность образцов,

б) определить гармонические нагрузки, эквивалентные случайным динамическим нагрузкам.

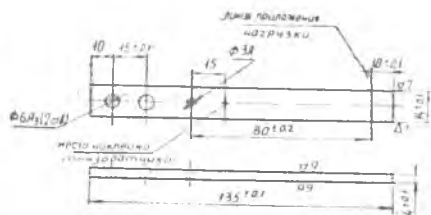
Все исследования проводились на предложенной выше установке. На столе, прикрепленном к подвижной катушке ЭДВ, устанавливается узел передачи нагрузки. Перемещения стола через этот узел передаются на образец. Узел состоит из регулируемого основания, 6, которое с помощью кардана 4 соединяется с подвижной головкой (фиг. 5). Между призмами 3 этой головки закрепляется свободный



Фиг. 5.

конец образца 1. Другой конец образца жестко закрепляется в неподвижном приспособлении 5. Такая конструкция узла передачи нагрузки не вызывает дополнительных напряжений в местах зажима образца и не влияет на распределение изгибных напряжений.

Общий вид образца приведен на фиг. 6. Там же показаны его размеры и место наклейки тензодатчика.



Фиг. 6.

Испытания при случайном нагружении проводились при нескольких (4—6) значениях дисперсии для каждой формы спектральной плотности.

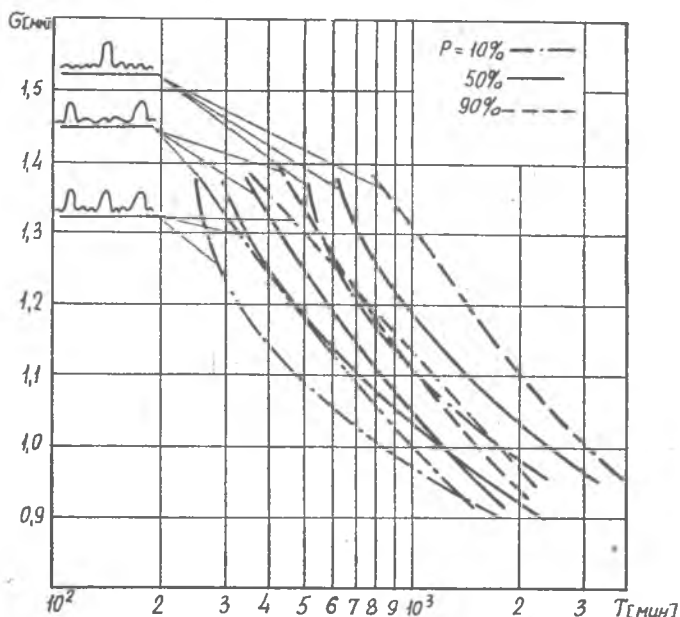
Результаты испытаний статистически обработаны, исходя из логарифмически нормального закона распределения долговечности. Построены диаграммы зависимости вероятности разрушения  $P$  от времени  $T$  для каждого значения дисперсии. Оценка вероятности разрушения образца определялась по формуле

$$P = \frac{m - 0,5}{n},$$

где  $m$  — число образцов, разрушившихся при  $T \leq T_m$ ;  $n$  — число образцов, испытанных при данном значении дисперсии.

По диаграммам  $P-T$  строились полные вероятностные диаграммы усталости. На фиг. 7 представлена диаграмма для образцов Д16АТ, которая показывает зависимость среднеквадратичного

значения напряжения  $\sigma$  от времени испытания до разрушения  $T$ . Из этого графика видно, что форма спектральной плотности влияет на долговечность. Если рассмотреть значения долговечности при  $p=50\%$  для всех трех форм спектральной плотности, то можно видеть, что наименьшая долговечность соответствует первой форме (фиг. 4а). Долговечность для третьей формы (фиг. 4в) будет при-



Фиг. 7.

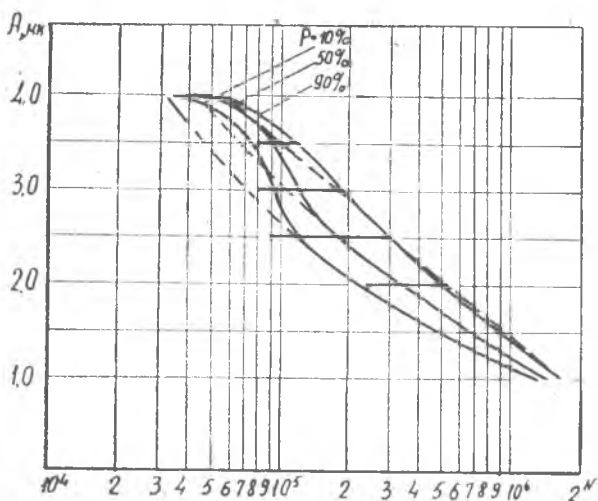
мерно в два раза больше. Отчасти это можно объяснить тем, что для этих форм спектральной плотности количество, так называемых, условных циклов в единицу времени различное. Количество условных циклов определялось по записи процесса и принималось равным половине числа пересечений линии нулевого уровня. Так, например, для первой формы количество условных циклов колеблется в пределах 14—17 циклов в секунду, а для третьей—10—14 циклов в секунду.

Усталостные испытания образцов из стали 30ХГСА были проведены только для первой формы спектральной плотности. По результатам эксперимента построены диаграммы  $P-T$  и кривая усталости  $\sigma-T$ .

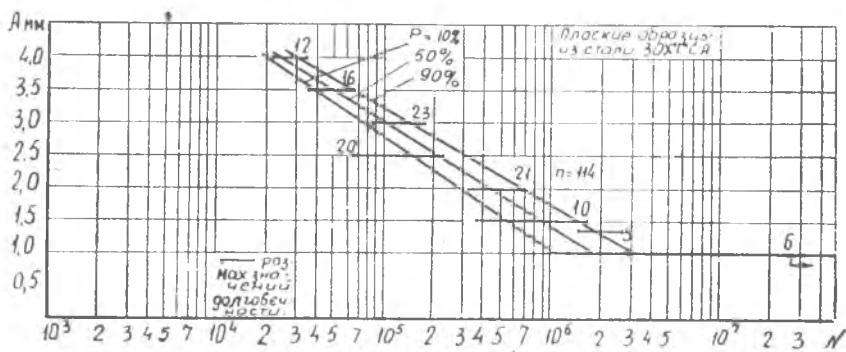
### Сравнение результатов усталостных испытаний

Результаты испытаний образцов при случайном нагружении сравнивались с данными испытаний при гармоническом нагружении.

Испытания при гармоническом нагружении проводились с частотой 10 гц на той же экспериментальной установке, что и при случайном нагружении. Статистическая обработка результатов испытаний проводилась по методике, изложенной в работах [2] и [5]



Фиг. 8.

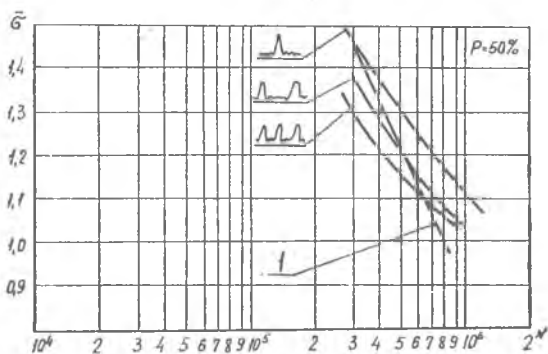


Фиг. 9.

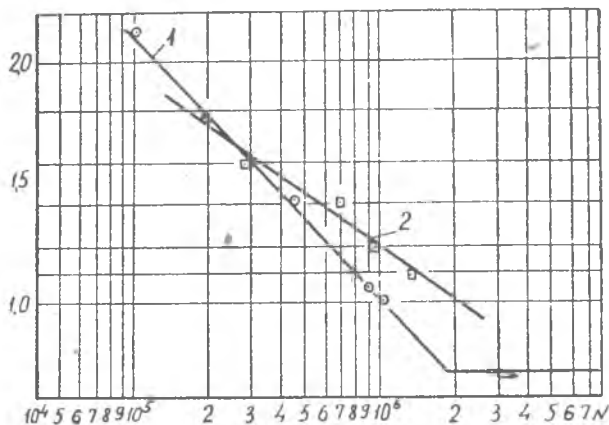
Были построены вероятностные диаграммы усталости, они приведены на фиг. 8 и 9.

Для сравнения результатов испытаний вводят условную связь между случайной и гармонической нагрузками [3]. Эта связь устанавливает соотношение между количеством циклов гармонического нагружения образца до разрушения и числом условных циклов, необходимых для разрушения образца при случайном нагружении.

Если количество циклов гармонической нагрузки и количество условных циклов случайной равны, то гармоническая нагрузка эквивалентна случайной. Используя понятие эквивалентной гармонической нагрузки, можно определить коэффициент эквивалентности как отношение, при одинаковом числе циклов, среднеквадратично-



Фиг. 10.



Фиг. 11.

го отклонения гармонической нагрузки  $\bar{\sigma}_r$  (1) к среднеквадратичному отклонению  $\bar{\sigma}_c$  случайного нагружения (2).

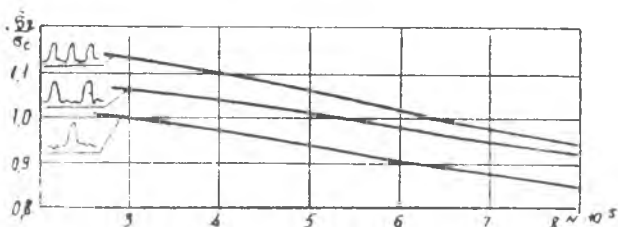
$$k = \frac{\bar{\sigma}_r}{\bar{\sigma}_c}$$

Для определения этого коэффициента удобно усталостные кривые для гармонической и случайной нагрузок совместить, построив их в координатах  $\bar{\sigma}-N$  (фиг. 10 и 11).

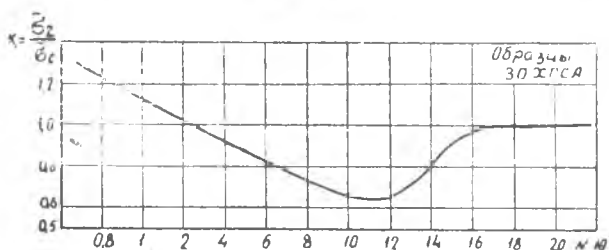


Зависимость коэффициента  $k$  от числа циклов  $N$  для испытанных образцов показана на фиг. 12 и 13.

Как видно из фиг. 12, коэффициент эквивалентности зависит от формы спектральной плотности. Величина  $k$  изменяется от 1,15 до 0,85 при изменении числа циклов от  $3 \cdot 10^5$  до  $8 \cdot 10^5$  и зависит от  $\bar{\sigma}_c$  случайного нагружения. С ростом  $\bar{\sigma}_c$  коэффициент  $k$  увеличивается.



Фиг. 12.



Фиг. 13.

Это объясняется тем, что при больших значениях дисперсии случайной нагрузки высокие уровни нагружения вызывают большие повреждения, чем при гармонической нагрузке с той же дисперсией. Следующие за ними нагрузки более низких уровней также приводят к накоплению повреждений. При малых дисперсиях уменьшается число уровней случайной нагрузки, вызывающих накопление повреждений.

Для образцов из стали 30ХГСА коэффициент  $k$  с ростом  $N$  сначала падает, а затем растет, приближаясь к единице (см. фиг. 13). Такой характер изменения  $k$  обусловлен наличием предела выносливости и подтверждает вывод, сделанный в работе [3].

В процессе эксперимента непрерывно велось наблюдение за образованием и развитием усталостных трещин. Для обнаружения усталостных трещин был применен метод проникающих красок. Размеры трещины определялись через микроскоп типа «МИР». Было обнаружено что видимая усталостная трещина при случайном нагружении появляется на ранней стадии испытаний (в пределах 0,1 — 0,3 общего времени до разрушения). Относительное

время появления усталостной трещины не зависело от материала образца. При гармоническом нагружении видимая трещина появлялась на более поздней стадии (в пределах 0,3—0,65 общего времени до разрушения) и развивалась быстрее.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментальная установка позволяет моделировать стационарные случайные низкочастотные процессы с заданным спектром, которые могут быть использованы для усталостных испытаний образцов и деталей и для проверки оборудования летательных аппаратов.

2. Форма спектральной плотности случайной нагрузки влияет на усталостную прочность образцов и на коэффициент эквивалентности.

3. При больших значениях дисперсии долговечность при случайной нагрузке меньше, чем при гармоническом нагружении. При малых значениях дисперсии — наоборот.

4. Развитие усталостной трещины при случайном и гармоническом нагружении имеет различный характер. При действии гармонической нагрузки подготовительный период или период «разрыхления» имеет большую продолжительность. При случайном нагружении трещина появляется раньше, но развивается медленнее.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Болотин. Статистические методы в строительной механике, Москва, 1965.
  2. В. Вейбулл. Усталостные испытания и анализ их результатов, «Машиностроение», 1964.
  3. А. С. Исаев. Экспериментальные исследования усталости при случайном нагружении, труды МАТИ, вып. 61, 1964.
  4. М. З. Коловский. О замене случайного вибрационного воздействия полигармоническим процессом. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, № 2, 1963.
  5. М. Н. Степнов, Е. В. Гиацинтов, В. П. Когоев. Статистическая обработка результатов усталостных испытаний на основе линейного регрессионного анализа. Проблемы прочности в машиностроении, вып. 3, АН СССР, 1959.
-