

Б. А. Лавров, В. А. Мехеда

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ И ПРОГРАММНЫХ НАГРУЗКАХ

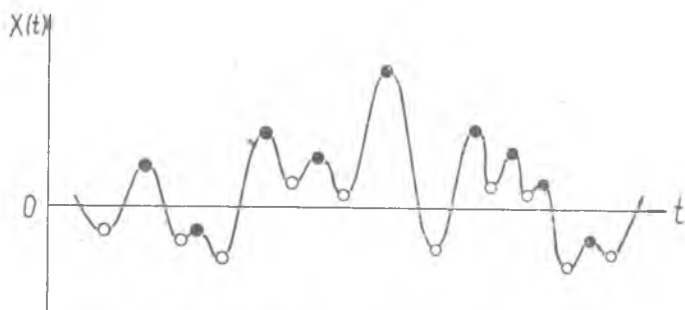
За последнее время широкое распространение получила замена натуральных испытаний конструкций, работающих при динамических нагрузках случайного характера, стендовыми испытаниями при программном нагружении. Однако до настоящего времени нет полной ясности в вопросе о связи между усталостными характеристиками при подобной замене. По этому вопросу имеются некоторые литературные данные [2, 9], но полностью проблема не решена. Настоящая статья также не претендует на исчерпывающее решение вопроса, однако изложенные здесь результаты исследований могут оказаться полезными.

В литературе [4, 10] предлагаются различные методы для статистического представления случайного нагружения. Вопрос о том, какой из этих методов дает наиболее подходящую информацию о случайном процессе, интересует нас здесь не с точки зрения статистики, а с точки зрения усталости. Поэтому важно провести экспериментальные исследования долговечности при программных нагрузках, основанных на обработке записей случайного нагружения различными численными методами и провести сравнение результатов испытаний на случайное и программное нагружения при одинаковых условиях. Решению этого вопроса и посвящена данная работа.

Принципы статистического представления случайного нагружения

Сопоставление усталостных характеристик при случайных и программных нагрузках можно производить, если данные для составления блоков программного нагружения берутся на основании анализа случайных нагрузок. Обычно такую информацию получают

путем статистической обработки записей случайных нагрузок, которая производится подсчетом числа некоторых событий на протяжении реализации процесса. За событие можно принять, например, достижение случайной нагрузкой экстремального (пикового) значения, пересечение кривой случайного нагружения некоторого заданного уровня в положительном или отрицательном направлении, перекрытие определенного интервала (размах) и т. д. Подсче-



Фиг. 1. Метод подсчета пик. (● — max, ○ — min)

тая частоту определенных событий, получают эмпирические распределения случайных величин.

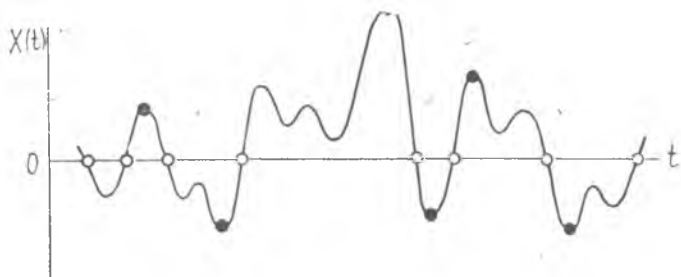
В литературе [4, 9] описываются шесть методов статистической обработки случайных процессов. В данной работе используются только три метода.

1. Метод подсчета пик. Согласно этому методу характеристическими точками являются все максимумы и все минимумы кривой нагружения. Можно ограничиться только подсчетом максимумов выше среднего значения нагрузки и минимумов ниже среднего значения (фиг. 1). При применении этого метода часто пренебрегают малыми изменениями нагрузки (ниже заданной величины). Результаты можно представить в виде функции распределения для максимумов и минимумов раздельно.

2. Метод подсчета максимальных пик на участке между точками пересечения среднего (в частности — нулевого) уровня кривой нагружения. Между двумя последовательными пересечениями кривой нагружения среднего уровня подсчитывается только наибольшее значение нагрузки, положительное или отрицательное (фиг. 2). Поскольку учитываются не все экстремальные значения, то число подсчетов здесь меньше, чем для метода пик.

3. Метод подсчета размахов. Размах определяется как разность между двумя последовательными экстремальными точками кривой нагружения. Считается положительным, когда максимум следует за минимумом и отрицательным — в противоположном случае (фиг. 3).

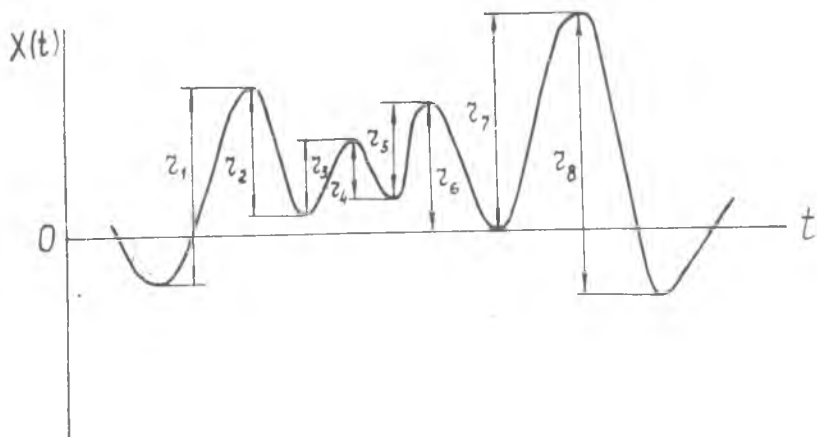
Сравнение численных методов обработки записей процесса можно вести с использованием функций распределения или с использованием вероятностной бумаги. Оказывается, что результаты сравнения зависят от вида случайного процесса. Но почти всегда количество событий по методу пик будет наибольшим. Наименьшее значение дает метод подсчета максимальных пик на участке между точками пересечения среднего уровня кривой нагружения.



Фиг. 2. Метод подсчета максимальных пик (O — точки пересечения, ● — подсчитываемые величины)

При статистической обработке процесса удобно записывать величины в виде точечной корреляционной таблицы [4]. Каждая точка в квадрате обозначает событие, когда вслед за максимумом, попадающим в разряд i , встречается минимум, попадающий в разряд j . Суммированием количества точек по каждому квадрату получается числовая корреляционная таблица.

Вариационные ряды значений максимумов и минимумов определяются суммированием цифр в корреляционной таблице по гори-



Фиг. 3. Метод подсчета размахов ($z_1; z_3; z_5; z_7$ — положительные размахи, $z_2; z_4; z_6; z_8$ — отрицательные размахи)

зонтали и вертикали. Просуммировав те же цифры по диагоналям, получим распределение разностей (размахов) и сумм, а следовательно, и полусумм, т. е. средних значений. Таким образом, имея корреляционную таблицу, легко получить данные для различных численных методов.

Применение численных методов для анализа истории нагружения

С использованием трех методов, рассмотренных в предыдущем параграфе, были обработаны длительные реализации для трех форм спектральных плотностей [8] и составлены корреляционные таблицы, по данным которых построены функции распределения пик, максимальных пик и размахов.

Анализируя эмпирические распределения, необходимо отметить, что все полученные распределения являются усеченными из-за технических возможностей экспериментальной установки. Однако и в реальных процессах величина напряжений изменяется в каком-то конечном интервале.

Распределения максимумов, минимумов и максимальных пик между точками пересечения нулевого уровня усечены с двух сторон. Распределение размахов, так как оно положительно, усечено только справа.

Распределение максимумов смещено в положительную сторону, минимумов — в отрицательную, причем отрицательная часть распределения максимумов примерно равна положительной части распределения минимумов. Взаимное расположение распределений максимумов и минимумов относительно оси ординат близко к симметричному. Все это косвенно свидетельствует о том, что каждому значению максимума соответствует в процессе испытания такое же значение минимума и что количество сложных полуциклов симметрично относительно нулевого уровня нагружения. Поэтому по записи случайной нагрузки можно вести подсчет только одних максимумов или одних минимумов. При подсчете только положительных максимумов увеличивается усечение распределения и среднее значение максимума, но уменьшается дисперсия распределения.

Оценка близости эмпирических распределений к теоретическим производилась графически при помощи построения диаграммы квантилей и с использованием критерия Б. Я. Ястремского [1].

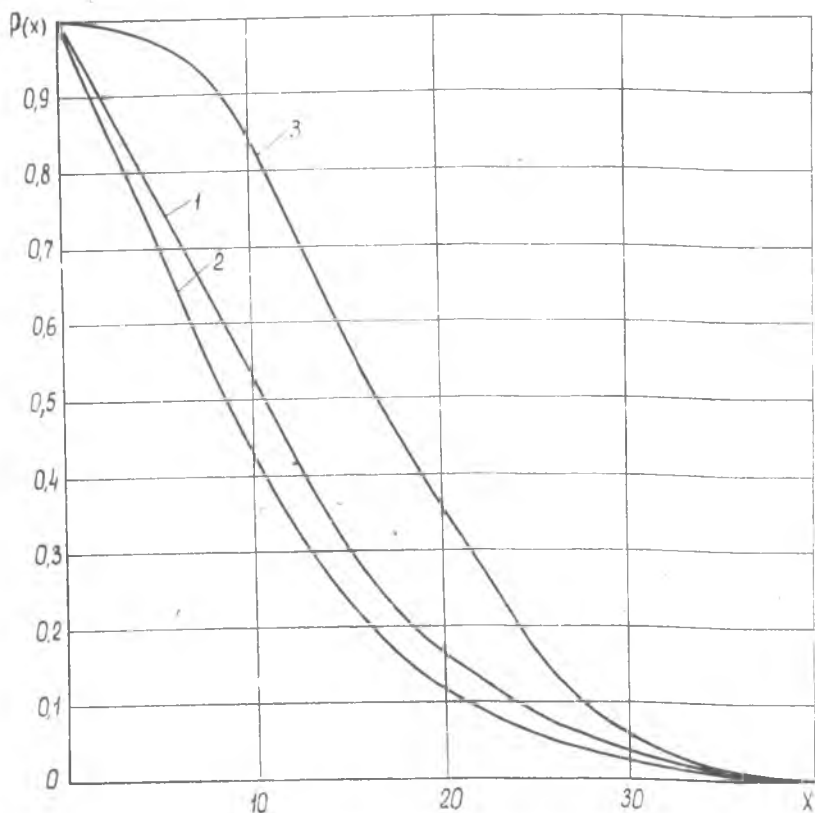
Графические построения на нормально-вероятностной бумаге и критерий Б. Я. Ястремского показали, что распределения максимумов, минимумов и максимальных пик между точками пересечения нулевого уровня несущественно отличаются от нормального. Распределение размахов удовлетворительно описывается распределением Релея.

Составление программных блоков на основании обработки записей случайных нагрузок различными численными методами

Блоки программной нагрузки формировались только для случайной нагрузки, имеющей первую форму спектральной плотности [8].

Для составления блока программной нагрузки удобно пользоваться кумулятивными функциями распределения. Кумулятивные функции были построены после обработки длительной реализации (105 сек) случайной нагрузки и составления корреляционной таблицы. По данным этой таблицы получены эмпирические распределения положительных максимумов, максимальных пик между точками пересечения нулевого уровня и размахов (фиг. 4).

Задаваясь количеством ступеней в блоке и величиной напряжения каждой ступени, можно по кумулятивной функции распределения (фиг. 4) определить процентное содержание по времени (или



Фиг. 4. Кумулятивные функции распределения (1 — положительные максимумы, 2 — максимальные пики, 3 — размахи)

по циклам) заданной амплитуды напряжения. Имея общую длительность блока, ее можно разбить в соответствии с процентным содержанием. Время действия одного несимметричного восходящего блока составляет 52 секунды. Нами были использованы восьмиступенчатые блоки нагружения. Результаты расчета длительности ступеней несимметричного блока приведены в таблице 1. Из двух таких блоков составлялся симметричный блок. В дальнейшем, для удобства изложения, программные нагрузки, составленные по различным методам, будем обозначать индексами ИП—1, ИП—2, ИП—3 (для симметричных блоков) и ИП—1Н, ИП—2Н, ИП—3Н (для несимметричных блоков), как указано в таблице 1.

Таблица 1

№ ступени блока		1	2	3	4	5	6	7	8
Амплитуда напряжения ступени $\left[\frac{\text{дн}}{\text{мм}^2} \right]$	Д16АТ	3,42	6,84	10,52	13,68	17,1	20,52	23,94	27,36
	30ХГСА	10	20	30	40	50	60	70	80
Длительность ступени в секундах	Метод положительных пик ИП—1Н	12	12	12	7	4	2	1	1
	Метод максимальных пик ИП—2Н	16	13	9	6	3	2	1	1
	Метод размаха без учета среднего ИП—3Н	1	7	13	12	9	6	2	1

Экспериментальные исследования долговечности образцов из 30ХГСА и Д16АТ при программном нагружении

С помощью специального программирующего устройства плоские образцы с концентратором в виде отверстия из 30ХГСА и Д16АТ испытывались при симметричных блоках ИП—1, ИП—2 и ИП—3 и при несимметричных блоках ИП—2Н. Максимальная амплитуда в блоке принималась равной трем среднеквадратичным отклонениям случайной нагрузки.

Было выбрано четыре уровня максимальной амплитуды блока программы. На каждом уровне испытывалось не менее 6 образцов. Статистическая обработка результатов испытаний проводилась по методике, описанной в [5, 6]. Обработка экспериментальных данных производилась как по моменту появления видимой трещины, так и по разрушению.

При построении кривых усталости использовался линейный регрессионный анализ. За независимую переменную принималась вели-

Для $x = \lg \sigma_{\max}$ для образцов из Д16АТ и $x = \lg \left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{-1}}{\sigma_{-1}} \right)$ для образцов из 30ХГСА.

Для сравнения на фиг. 5 и 6 построены кривые усталости для всех программных нагрузок по моменту появления трещины (пунктирные линии) и по разрушению (сплошные линии). Из рассмотрения этих фигур видно, что все программные нагрузки для образцов из Д16АТ дают примерно одинаковую долговечность. Отличие в долговечности различных программ для 30ХГСА более существенно. Наибольшая разница в долговечности получается для образцов из 30ХГСА при программных нагрузках ИП—1 и ИП—2Н (примерно в два раза).

Сравнение кривых усталости при симметричном (ИП—2) и несимметричном блоке нагружения (ИП—2Н) показывает, что форма блока мало влияет на наклон кривой усталости.

Рассеивание долговечности при различных программных нагрузках оказывается одного порядка (доверительные интервалы перекрываются) и растет с увеличением средней долговечности.

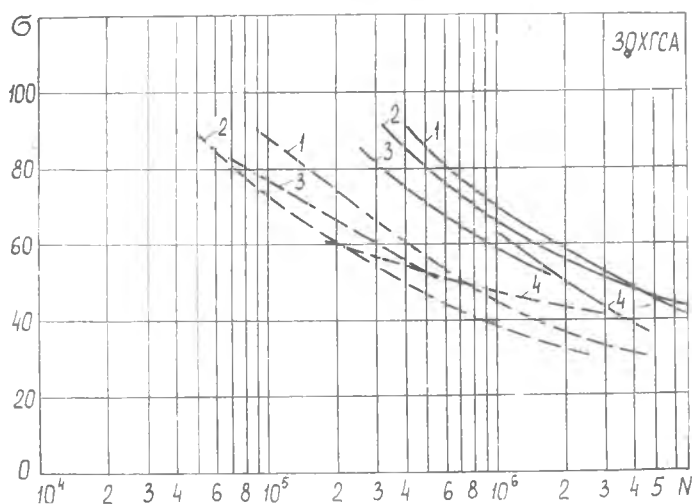
Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что рассеивание характеристик долговечности по моменту появления трещины, как и для случайного нагружения, оказывается больше, чем по разрушению.

Сравнение усталостной прочности при случайных и программных нагрузках

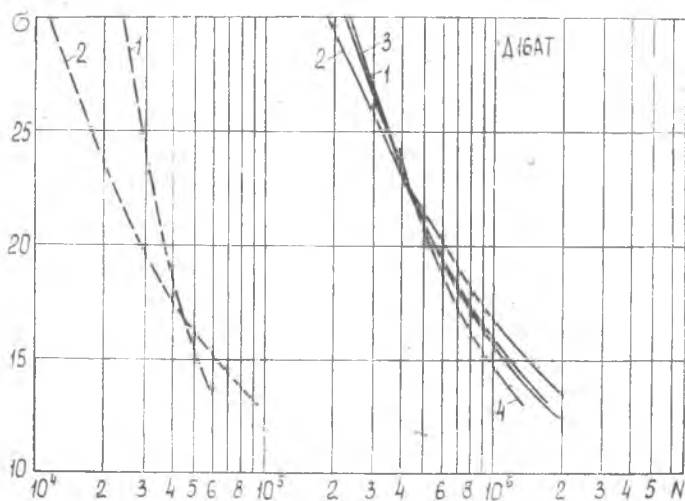
Сравнение программных и случайных нагрузок удобно проводить, если кривые усталости при этих нагрузках размещены на одном графике. На фиг. 7, 8 и 9 даются такие графики для 30ХГСА, а на фиг. 10, 11 и 12 — для Д16АТ (пунктирные линии — момент появления трещины, сплошные — разрушение). Опытные данные при случайной нагрузке взяты из работы [8].

Количество циклов в секунду для случайной нагрузки определялось в соответствии с принятым методом построения программного блока и для первой формы спектральной плотности равно: при методе подсчета положительных максимумов (ИП—1) — 15,07, для метода подсчета максимальных пик (ИП—2) — 12,75 и при методе подсчета размахов (ИП—3) — 17,75.

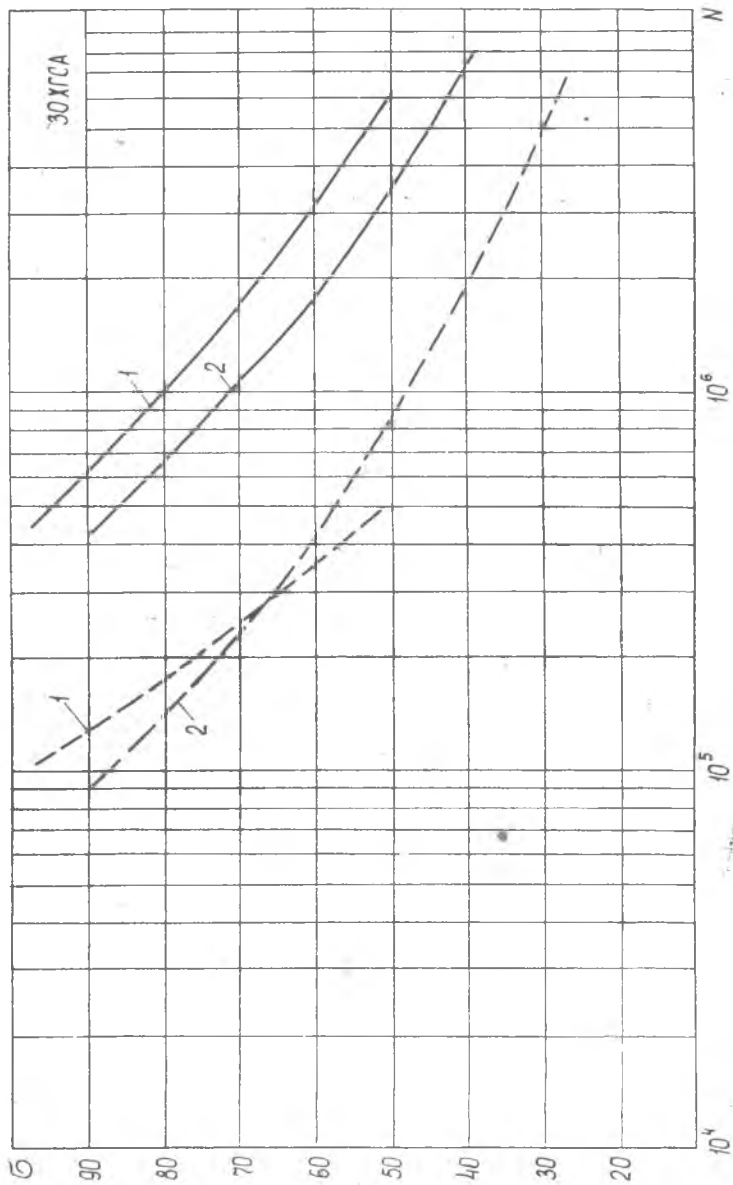
Из рассмотрения приведенных графиков видно, что форма усталостных кривых по разрушению для случайной нагрузки достаточно хорошо воспроизводится программными нагрузками, основанными на методе положительных пик и методе максимальных пик между точками пересечения нулевого уровня. Для образцов из 30ХГСА долговечность при программных нагрузках, основанных на этих методах, примерно в $1,5 \div 2$ раза меньше, чем при случайном нагружении. Долговечность же образцов из Д16АТ при таких же программных нагрузках близка к долговечности при случайном нагружении.



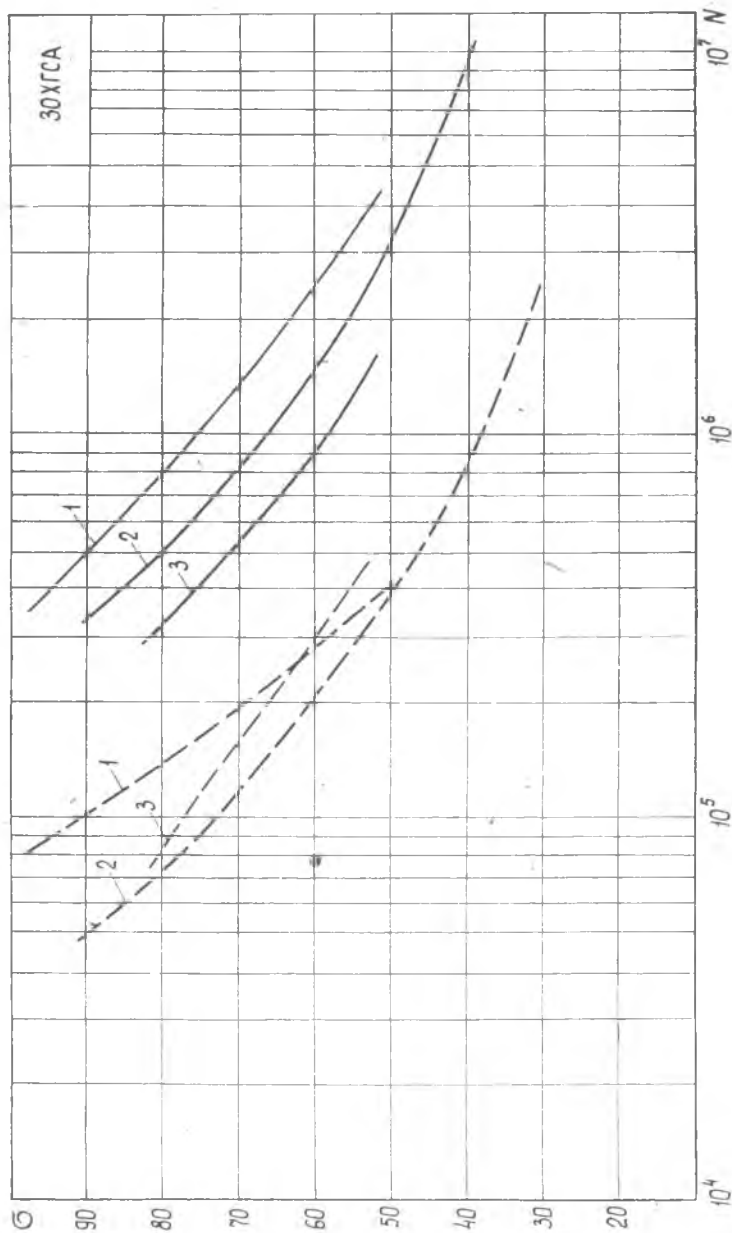
Фиг. 5. Кривые усталости образцов из 30XГСА при программных нагрузках (1—ІПІ; 2—ІП—2; 3—ІП—2Н; 4—ІП—3)



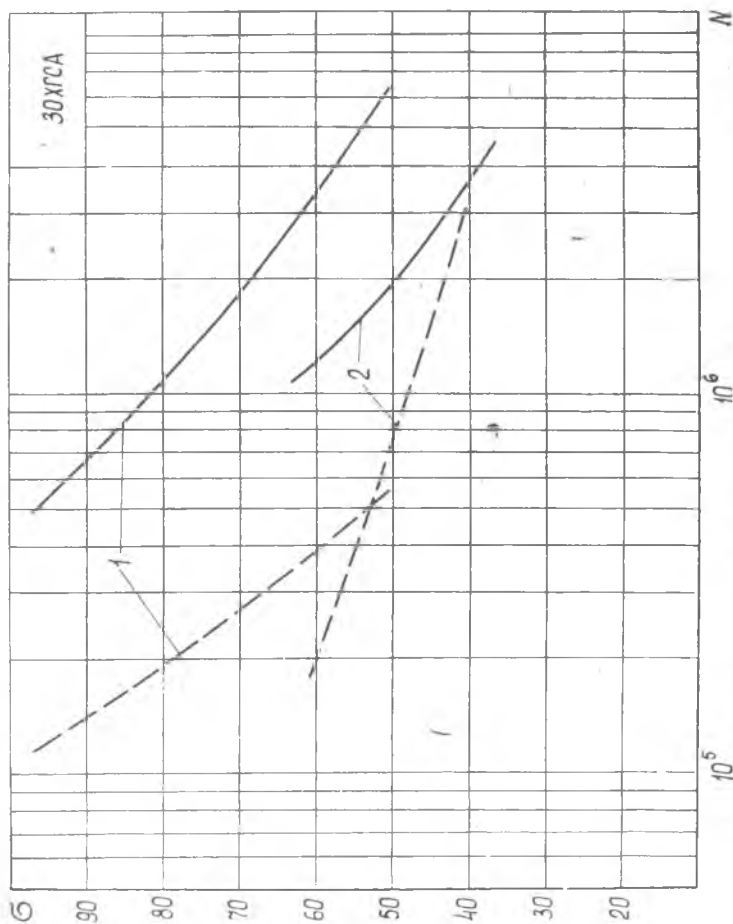
Фиг. 6 Кривые усталости образцов из Д16АТ при программных нагрузках (1—ІПІ; 2—ІП—2; 3—ІП—2Н; 4—ІП—3)



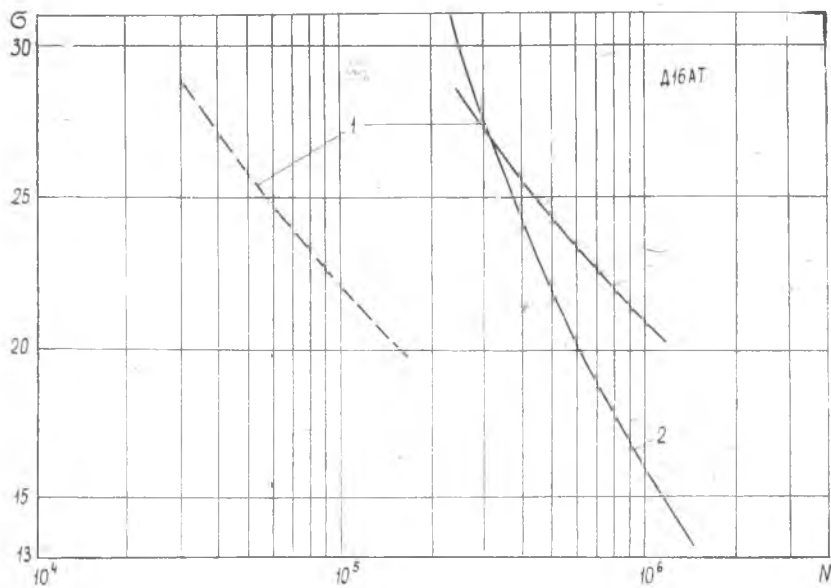
Фиг. 7. Кривые усталости образцов из 30ХГСА при программной (2-ПП-1) и случайной (1) нагрузках



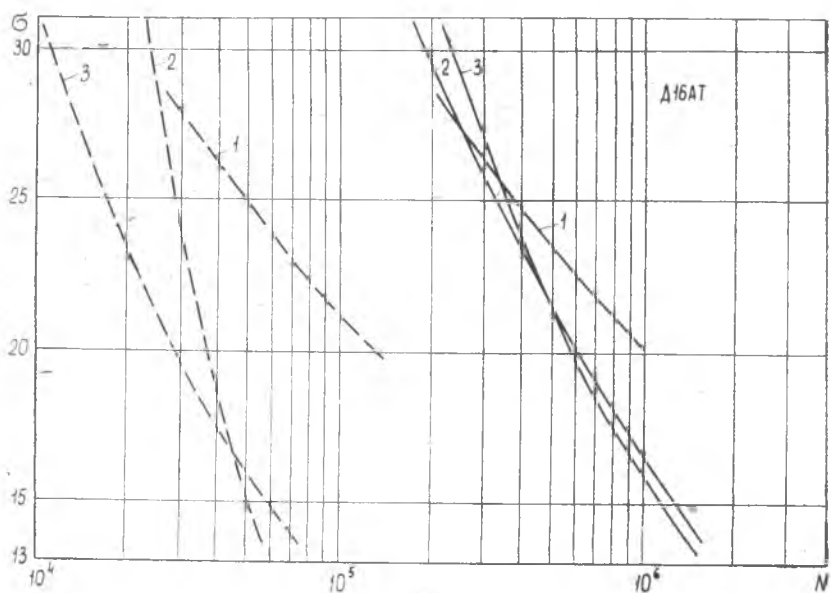
Фиг. 8. Кривые усталости образцов из 30ХГСА при программных (2-IP-2; 3-IP-2Н) и случайной (1) нагрузках



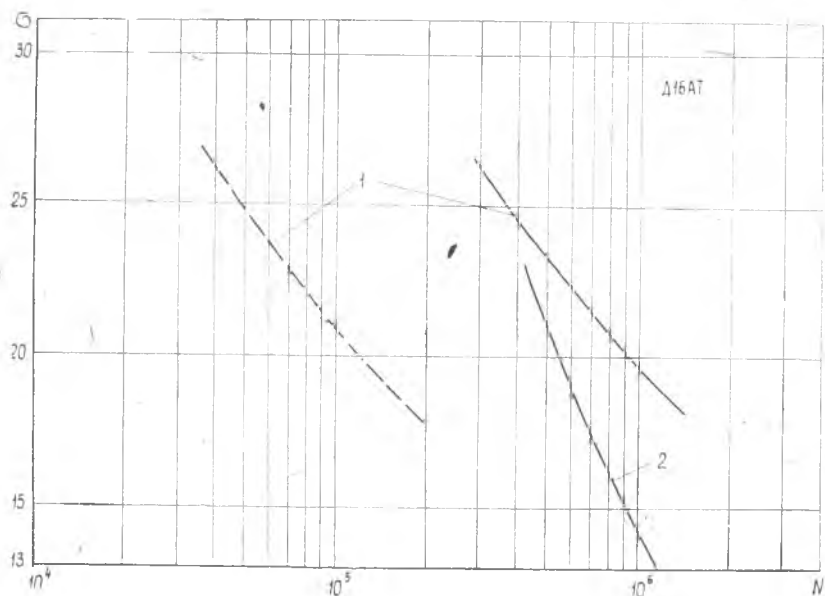
Фиг. 9. Кривые усталости образцов из 30ХГСА при программной (2-ПП-3) и случайной (1) нагрузках



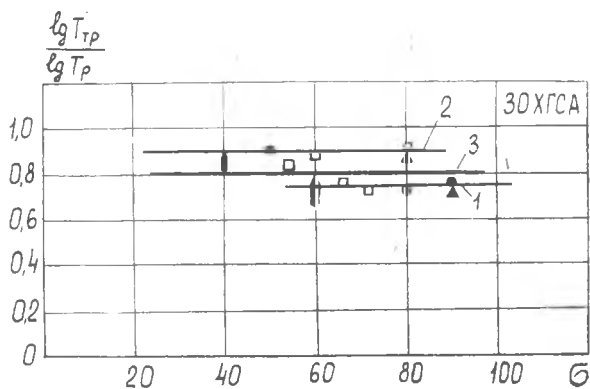
Фиг. 10. Кривые усталости образцов из Д16АТ при программной (2-ІП-1) и случайной (1) нагрузках



Фиг. 11. Кривые усталости образцов из Д16АТ при программных (2-ІП-2; 3-ІП-2Н) и случайной (1) нагрузках



Фиг. 12. Кривые усталости образцов из Д16АТ при программной (2-ІП-3), и случайной (1) нагрузках

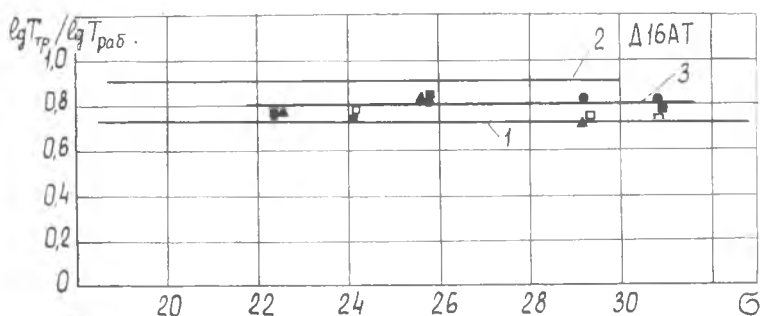


Фиг. 13. Зависимость отношения среднего значения логарифма времени до появления трещины к среднему значению логарифма среднего времени до разрушения $\frac{\lg \bar{T}_{тр}}{\lg \bar{T}_p}$

от напряжения для образцов из 30ХГСА (1 — случайная нагрузка, 2 — гармоническая нагрузка, 3 — программная нагрузка: ▲ — ІП-1; ● — ІП-2; ■ — ІП-3; □ — ІП-2Н)

Усталостные кривые при случайной и программной нагрузке, полученной по методу размахов без учета среднего значения, существенно отличаются друг от друга. То же отмечается и в работах [2, 9]. Поэтому программные нагрузки, полученные по методу размахов без учета среднего значения, не могут быть использованы для моделирования случайных нагрузок.

Результаты всех испытаний с программными нагрузками показывают, что наклон кривых усталости по появлению трещины отличается от наклона соответствующих кривых случайного нагружения. Однако при программных нагрузках, как и при случайных, трещина появляется на ранней стадии ($0,1 \div 0,3 N$ раз). Отношение $\frac{\lg T_{тр}}{\lg T_{раб}}$ (фиг. 13 и 14) не зависит от вида программного



Фиг. 14. Зависимость $\frac{\lg T_{тр}}{\lg T_{раб}}$ от напряжения для образцов из Д16АТ

(1 — случайная нагрузка, 2 — гармоническая нагрузка, 3 — программная нагрузка: $\blacktriangle$ — 1П-1; $\bullet$ — 1П-2; $\blacksquare$ — 1П-3; $\square$ — 1П-2Н).

блока, материала, и несколько больше, чем для случайного нагружения, но меньше, чем для гармонической нагрузки. Для образцов из Д16АТ это отношение меняется в более узких пределах (0,72—0,8), чем для образцов из 30ХГСА (0,72—0,84).

ВЫВОДЫ

1. Анализ историй нагружения для трех форм спектральных плотностей показал, что распределения максимумов, минимумов и максимальных пик между точками пересечения нулевого уровня существенно отличаются от нормального. Распределение размахов удовлетворительно описывается распределением Релея.

2. Рассеивание долговечности при различных программных нагрузках оказывается одного порядка (доверительные интервалы перекрываются) и несколько растет с увеличением средней долговечности.

3. Сравнение кривых усталости при симметричном (IP—2) и несимметричном (IP—2H) блоках нагружения показывает, что форма блока мало влияет на долговечность и наклон кривой усталости.

4. Программные нагрузки, основанные на методах подсчета положительных пик и максимальных пик между точками пересечения нулевого уровня, достаточно хорошо воспроизводят случайное нагружение и могут быть рекомендованы для испытаний. Испытания при подобных программных нагрузках дают в этом случае запас по долговечности порядка $1,5 \div 2$.

5. Программные нагрузки, основанные на методе подсчета размахов без учета среднего значения, не могут быть использованы для моделирования случайных нагрузок.

6. Отношение $\frac{\lg \bar{T}_{TP}}{\lg \bar{T}_P}$ не зависит от вида программного блока, максимальной амплитуды напряжения и материала. В наших экспериментах эта величина при программных нагрузках несколько больше, чем при случайных, но меньше, чем при гармонических.

Для образцов из Д16АТ величина $\frac{\lg \bar{T}_{TP}}{\lg \bar{T}_P}$ меняется в более узких пределах ($0,72 \div 0,8$), чем для образцов из 30ХГСА ($0,72 \div 0,84$).

7. Рассеивание долговечности при случайных и программных нагрузках оказывается одного порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Венецкий, Г. С. Кильдишев. Основы математической статистики. Госстатиздат, Москва, 1963.

2. Дж. Ковалевский. О соотношении между усталостной долговечностью при повторных нагрузках со случайным чередованием амплитуд и при соответствующих программных нагрузках. Сб. «Усталостная прочность и долговечность самолетных конструкций», под ред. И. И. Эскина, Москва, 1965.

3. В. С. Пугачев. Теория случайных функций. Физматгиз, 1962.

4. С. В. Серенсен, Е. Г. Буглов, М. Э. Гарф, Л. А. Козлов, Н. И. Корсакевич, О. Ю. Крамаренко, О. Б. Слуцкая. Прочность при нестационарных режимах нагрузки. Изд. АН УССР, 1961.

5. М. Н. Степнов, Е. В. Гиацинтов, В. П. Когаев. Статистическая обработка результатов усталостных испытаний на основе линейного регрессионного анализа. «Проблемы прочности в машиностроении», вып. 3, АН СССР, 1959.

6. М. Н. Степнов. Линейный регрессионный анализ результатов усталостных испытаний. Труды МАТИ, № 61, 1964.

7. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд. «Сов. радио», 1962.

8. 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 30ХГСА. Труды КуАИ № 29, 1967.

9. H. A. Leybold and E. C. Naumann. A study of fatigue life under random loading. «Proc. amer. soc. test and mater.», 63, 1963.

10. J. Schejve. The analysis of random load—time histories with relation to fatigue tests and life calculations. Proc. of the simposium held in Paris 16÷18-th May 1961. Pergamon Press, 1963.