

В. И. МАЛЫЙ, О. М. КОЧИН, Н. С. ГУСЯТИНСКАЯ,  
В. И. КОЗЛОВ, Ю. Н. КОРОБКИН

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ФОРСИРОВАННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ

В работе [1] на основе анализа общей структуры выражения для кривых Велера конструкций, ведущих себя линейно при изменении действующих нагрузок, предлагается определять величину параметра форсирования  $F(N_1, N)$  натуральных ускоренных испытаний конструкций на усталость согласно соотношениям

$$F(N_1, N) = \max_q k_q(N_1, N), \quad k_q(N_1, N) = \frac{\sigma_q^*(N_1)}{\sigma_q^*(N)} \quad (1.1)$$

или

$$F(N_1, N) = \max_{q, P} k_q(N_1, N, P), \quad k_q(N_1, N, P) = \frac{\sigma_q^*(N_1, P)}{\sigma_q^*(N, P)} \quad (1.2)$$

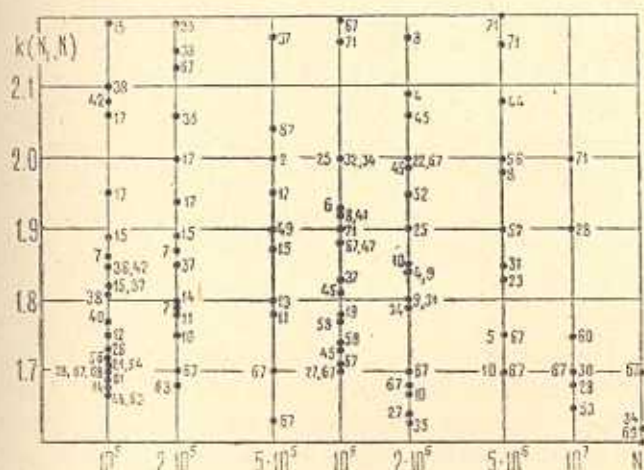
в которых набор кривых Велера  $\sigma_q^*(N)$ ,  $q = 1, 2, \dots$  или набор кривых  $\sigma_q^*(N, P)$ ,  $q = 1, 2, \dots$  равной вероятности разрушения  $P$  должен быть достаточно полным, чтобы описать все ожидаемые случаи усталостного разрушения используемых в конструкции материалов. При этом форсированным испытанием с параметром форсирования  $\bar{f}$  называется усталостное испытание конструкции с увеличенными в  $\bar{f}$  раз по сравнению с нормальным режимом величинами амплитуд внешних нагрузок. Испытуемые конструкции предполагаются линейными в том смысле, что при пропорциональном изменении режима циклического нагружения амплитуды напряжений во всех элементах конструкции должны изменяться пропорционально параметру  $\bar{f}$ , а также простыми в том смысле, что и в нормальном, и в форсированном режимах не возникает других видов разрушения, кроме усталостного. При использовании определений (1.1) или (1.2) можно утверждать [1], что если при испытании в форсированном режиме с параметром форсирования  $\bar{f} = F(N_1, N)$  долговечность конструкции окажется не ниже  $N_1$ , то ее долговечность в нормальном режиме будет не ниже  $N$ , или соответственно, если в форсированном режиме разрушение в какой-либо точке  $r$  конструкции происходит с вероятностью  $P$ , при  $N_1$  циклах, то в нормальном режиме вероятность разрушения  $P$  в точке  $r$  при  $N$  циклах будет меньше  $P$ .

Практически функцию  $F(N_1, N)$  можно достаточно надежно определить, обработав все доступные опубликованные кривые Велера и кривые равной вероятности разрушения для различных конструкционных мате-

риалов в разнообразных состояниях и условиях эксплуатации и определив для них корреляционные отношения  $k_v(N_1, N)$  или  $k_q(N_1, N, P)$ .

Показано [1], что определенные таким образом значения параметра форсирования  $F(N_1, N)$  в общем случае линейных конструкций уже нельзя уменьшить без потери надежности сформулированных выше выводов из результатов форсированных испытаний.

По описанной методике было обработано более 3000 экспериментальных кривых Велера и кривых равной вероятности разрушения из 260 монографий и статей по усталости. Максимальные из полученных значений корреляционных отношений  $k(N_1, N)$  представлены на фиг. 1, 2 и 3, соответственно, для трех значений коэффициента форсирования  $N/N_1 = 10.5$  и 2 и различных  $N$ .



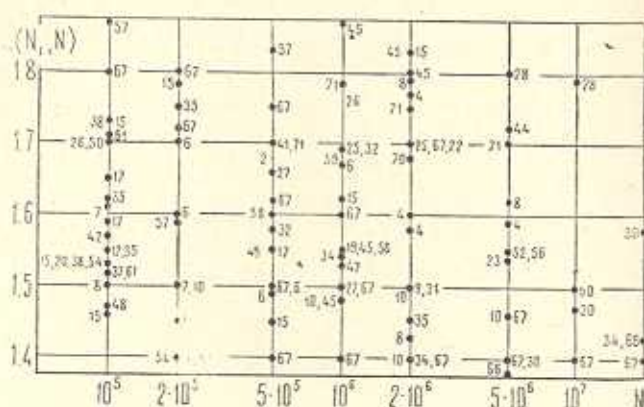
Фиг. 1. Максимальные значения корреляционных отношений  $k(N_1, N)$  кривых Велера при  $N/N_1 = 10$ .

Цифры рядом с точками на фигурах указывают порядковый номер источника в списке литературы [2—71], где описана экспериментальная кривая усталости, для которой получено данное значение корреляционного отношения.

Необходимо отметить, что данных о кривых равной вероятности усталостного разрушения  $\sigma^*(N, P)$  опубликовано значительно меньше, чем данных о кривых Велера  $\sigma^*(N)$ . Однако, имеющиеся данные говорят о том, что кривые  $\sigma^*(N, P)$  при различных  $P$  и кривая Велера всегда близки по форме и характеризуются близкими значениями корреляционных отношений.

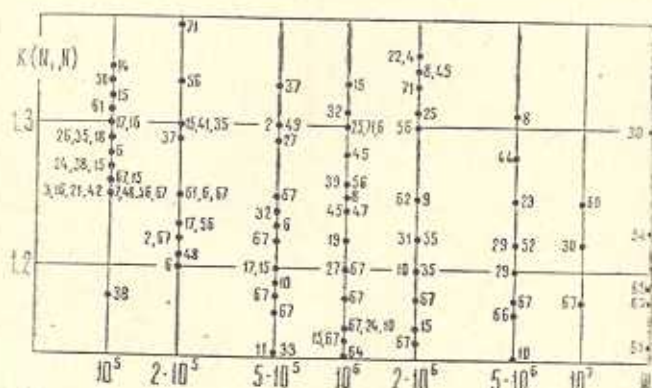
Поэтому два определения (1.1) и (1.2) параметра форсирования  $F(N_1, N)$ , практически, оказались эквивалентными. Например, даже при таком большом различии кривых  $\sigma^*(N, P)$  для различных  $P$ , как это наблюдалось при испытаниях стыковых соединений из алюминиевого сплава при пульсирующем растяжении [67], значения корреляционных отношений  $k(N_1, N, P)$  не зависят от  $P$  и совпадают с  $k(N_1, N)$  для соответствующей кривой Велера.

Корреляционные отношения  $k(N_i, N)$ , грубо говоря, характеризуют наклон кривой усталости, и поэтому точность их определения во многих типичных для усталостных экспериментов случаях оказывается довольно низкой. Так бывает, например, когда кривая Велера построена по малому числу точек, когда особенно велик разброс экспериментальных точек, когда



Фиг. 2. Максимальные значения корреляционных отношений  $k(N_i, N)$  кривых Велера при  $N/N_i = 5$ .

$N_i$  или  $N$  находятся на краю интервала чисел циклов, для которых построена кривая усталости. Использование таких кривых усталости может привести к неоправданному завышению величины  $F(N_i, N)$ . Поэтому, в частности, кривые усталости, построенные всего лишь по двум экспериментальным точкам, при обработке не учитывались.



Фиг. 3. Максимальные значения корреляционных отношений  $k(N_i, N)$  кривых Велера при  $N/N_i = 2$ .

Анализ полученных данных показал, что:

- 1) для гладких образцов корреляционные отношения  $k(N_i, N)$ , как правило, имеют низкие значения (например, около  $1.1 \div 1.5$  при  $N = 10 N_i$ );

2) для образцов с сильными концентраторами, для образцов большого размера, для хромированных, никелированных образцов и образцов с другими покрытиями в условиях фреттинга при наличии сварных швов (особенно с неповарами) в случаях натуральных испытаний конструкций и их узлов  $k(N_1, N)$  достигают более высоких значений (например, до  $1.7 \div 2.2$  при  $N = 10 N_1$ );

3) при воздействии коррозионных сред и высоких температур встречаются и более высокие значения  $k(N_1, N)$ , однако они на фигурах не приводятся, так как эти специфические условия испытания в данной работе не рассматривались.

Для больших  $N > 10^7$  циклов использованные литературные данные явно менее полны в смысле охвата разнообразных условий эксплуатации конструкционных материалов, и здесь необходимы дальнейшие исследования.

При  $N \leq 10^7$  циклов полученные результаты позволяют рекомендовать использовать независимо от  $N$  для параметра форсирования  $F(N_1, N)$  ускоренных испытаний значения 2.2, 1.87 и 1.35, соответственно для значений коэффициента форсирования  $N/N_1 = 10, 5$  и 2.

При проведении форсированных испытаний для  $N/N_1$ , отличных от этих значений, можно пользоваться интерполяционной формулой

$$F(N_1, N) = 1 + 1.21 \lg \frac{N}{N_1}$$

которая при  $N/N_1 = 10, 5$  и 2 дает значения  $F(N_1, N) = 2.2, 1.84$  и 1.36, соответственно, которые несущественно отличаются от полученных выше.

Отметим в заключение, что в общем случае линейной простой конструкции, то есть без привлечения какой-либо дополнительной информации о конкретной испытываемой конструкции, нельзя использовать более низкие значения параметра форсирования  $F(N_1, N)$ , чем значения, установленные в данной работе на основе соотношений (1.1) и (1.2). В противном случае будут существовать конкретные примеры конструкций [1], для которых погрешность ускоренного определения долговечности будет идти не в запас прочности.

Всесоюзный научно-исследовательский институт  
 физико-технических и радио-технических  
 измерений

Поступила 12 XII 1977

Վ. Բ. ՄԱԴԻ, Ս. Մ. ԿՈՉԻՆ, Ե. Ս. ԳՈՐԵՏՍԱՏԻՍՎՈՅՑԱ,  
 Վ. Բ. ԿՈՉԻՈՎ, ՅԱ. Ե. ԿՈՌՈՐԿԻՆ

ԿՈՆՍՏՐԱԿՏԻԱՆԵՐԻ ԱՐԿՊՈՅՎԱԾ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ  
 ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ: ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՊՐՈՔԼԵՄՆԵՐ

Ա մ ֆ ո ֆ ո ս մ

Մշակվել են 3000-ից ավելի վեկերի կորերը և շահագործման տարրեր պայ-  
 մաններում տարրեր կոնստրուկցիոն նյութերի բայրալման հաճախար հաճա-

նականոթյունը նկարագրող կորերը: Որոշվել են կորելյացիոն հարաբերությունները, որոնցով բնորոշվում են հոգնածության կորերի թերությունները ցիկլերի թվի փոփոխության տարբեր միջակայքերի վրա:

Ստացվել է կոնստրուկցիաների արագացված հոգնածային փորձարկումների պարամետրերի որոշման համար արտահայտությունը այնպիսի մեթոդով, որը թույլ է տալիս ներքևից փտահանել ձևով զնահատել բնոթարված լայնույթների զնայրում կոնստրուկցիայի հարատևությունը:

## ON DETERMINATION OF PARAMETERS FOR FORCED FATIGUE TESTS OF CONSTRUCTIONS

V. I. MALY, O. M. KOCHIN, N. S. GUSIATINSKAYA,  
V. I. KOZLOV, Y. N. KOROBKIN

### S u m m a r y

More than 3000 Veler curves for various constructional materials have been analyzed under varying operating conditions. The dependence of the slope of fatigue curves on the number of cycles has been established. A relation to determine parameters for the forcing of accelerated fatigue construction tests has been obtained.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Малы́й В. И. Об ускоренных усталостных испытаниях конструкций. Изв. АН Арм. ССР, Механика, 1978, т. XXXI, № 5.
2. Баранова Н. Б. О связи прочности материалов и детали при действии статических, циклических и ударных нагрузок. В кн. «Усталость металлов». М., Изд. АН СССР, 1960.
3. Баранова Н. Б. Применимость новых критериев усталости для построения кривых выносливости. В кн. «Прочность металлов при переменных нагрузках». Материалы III-го совещания по усталости металлов, 5—9 марта 1962. М., Изд. АН СССР, 1963.
4. Белкин М. Я. Об упрощении формы образцов для испытаний металлов на усталость. Заводская лаборатория, 1959, № 11.
5. Беляев Г. С. Повышение выносливости соединения втулка-вал с клеевой пленкой. Вестник машиностроения, 1971, № 5.
6. Бернштейн М. А., Жадом В. Т., Хенстер К. Э. Влияние высокотемпературной термо-механической обработки на циклическую прочность рессорной стали 50ХГА. Проблемы прочности, 1973, № 12.
7. Бойцов Б. В. Статистический анализ точности метода ускоренных испытаний. Заводская лаборатория, 1972, № 9.
8. Быков В. А. Исследование усталости стали при плоском чистом изгибе. В кн. «Некоторые вопросы усталостной прочности стали». Под. ред. Н. Н. Давидикова. М.—Л., Машгиз, 1953.
9. Быков В. А., Всеволодов Г. Н. Выносливость и пластичность металлов. В кн. «Прочность металлов при переменных нагрузках». Материалы III-го совещания по усталости металлов, 5—9 марта 1962. М., Изд. АН СССР, 1963.
10. Вацапов Р. Д. К общей теории и к методике оценки масштабного эффекта при циклическом нагружении. Заводская лаборатория, 1960, № 9.

11. *Вологов Р. Д.* Статистические и детерминистские закономерности усталости и возможность их моделирования. В кн. «Вопросы механической усталости». Под ред. С. В. Серенсена. М., Машиностроение, 1964.
12. *Вологов Р. Д., Фридман Я. Б.* О влиянии типа нагружения на усталостную прочность. Заводская лаборатория, 1961, № 2.
13. *Виволодов Т. И.* О распространении усталостных трещин в образцах судостроительной стали. Заводская лаборатория, 1959, № 6.
14. *Всеволодов Г. Н.* О развитии трещин усталости. В кн. «Циклическая прочность металлов». Материалы II-го совещания по усталости металлов, 24—27 мая 1960. М., Изд. АН СССР, 1962.
15. *Гаррис У. Дж.* Влияние на усталость стандартной технологии самолетостроения. В кн. «Усталость и выносливость металлов». Под ред. Г. В. Ужика. М., ИЛ, 1963.
16. *Гаррис У. Дж.* Влияние частоты циклов нагружения на прочность металлов. В кн. «Усталость и выносливость металлов». Под ред. Г. В. Ужика. М., ИЛ, 1963.
17. *Гаррис У. Дж.* Развитие трещин усталости. В кн. «Усталость и выносливость металлов». Под ред. Г. В. Ужика. М., ИЛ, 1963.
18. *Грязнов Б. А., Каплинский А. А.* Исследование влияния температуры, асимметричного цикла и концентрации напряжений на усталостную прочность стали ЭИ 726(1X14H18B2Br1). Проблемы прочности, 1971, № 9.
19. *Гуревич Б. Г.* Повышение несущей способности борированной стали и азотированного титанового сплава обкаткой роликом. Вестник машиностроения, 1972, № 1.
20. *Гуревич С. Е.* Влияние упрочнения поверхностного слоя концентратора напряжений на циклическую прочность. В кн. «Прочность металлов при циклических нагрузках». Материалы IV совещания по усталости металлов, 14—17 марта 1966. М., Наука, 1967.
21. *Гуревич С. Е., Елидович А. Д.* Структурная повреждаемость стали в процессе усталости. В кн. «Прочность металлов при циклических нагрузках». М., Материалы IV совещания по усталости металлов, 14—17 марта 1966. М., Наука, 1967.
22. *Гурьев А. В., Гохберн Я. А., Поляков В. Н.* Упрочнение биметаллических деталей поверхностным пластическим деформированием. Вестник машиностроения, 1973, № 2.
23. *Дмитриченко С. С., Хазанов Х. И., Филатов Э. Я., Давыдов А. П., Черкашин А. С.* Стендовые испытания сварных рам на усталость. Вестник машиностроения, 1973, № 2.
24. *Екименков А. Н.* К исследованию закономерностей процесса усталостного разрушения алюминиевых сплавов в связи с частотой нагружения. Заводская лаборатория, 1970, № 10.
25. *Ефимов А. С., Морозов Б. А.* О применении ускоренных методов к определению пределов выносливости крупных деталей. Заводская лаборатория, 1969, № 7.
26. *Иванова В. С.* Усталостное разрушение металлов. М., Металлургиядат, 1963.
27. *Иванова В. С., Гуревич С. Е.* Экспериментальная проверка ускоренного метода определения предела усталости. В кн. «Циклическая прочность металлов». Материалы II-го совещания по усталости металлов, 24—27 мая 1960. М., Изд. АН СССР, 1962.
28. *Иванова В. С., Дерягин Г. А., Терентьев В. Ф.* Повышение циклической прочности сплава Д16Т при ступенчатой пластической деформации. В кн. «Прочность металлов при циклических нагрузках». Материалы IV совещания по усталости металлов, 14—17 марта 1966. М., Наука, 1967.
29. *Каленция Т. А.* О методике сопоставления эффективности упрочнения деталей машины с результатами испытаний на образцах. Заводская лаборатория, 1966, № 6.
30. *Клячко Ю. А., Бабей Ю. И., Старчук В. Г., Нехороших В. Г.* Влияние некоторых видов поверхностного упрочнения на сопротивление стали наводороживанию. Вестник машиностроения, 1973, № 3.
31. *Кобрия М. М.* Прочность прессовых соединений при повторно-переменной нагрузке. М., Машиза, 1954.

32. Кобрин М. М., Соколовский П. Н. Особенности разрушения стали при циклически нагруженных в связи с анизотропией ее строения. В кн. «Циклическая прочность металлов». Материалы II-го совещания по усталости металлов, 24—27 мая 1960. М., Изд. АН СССР, 1962.
33. Коновалов А. В. Методика испытания на усталостную изгибную прочность стали для определения пусков под нагрузкой и периодического отдыха. Заводская лаборатория, 1961, № 4.
34. Крекнин А. Т., Шаврин О. И. Многообразная установка для испытаний на контактную усталостную прочность. Заводская лаборатория, 1969, № 6.
35. Кудрявцев П. И. Метод исследования кинетики развития усталостных трещин. Заводская лаборатория, 1968, № 1.
36. Кудрявцев И. В., Колодезный А. А., Топоров Г. В., Бурмистрова А. Н. Эффективность упрочнения наклепом сталей при ударно-циклическом нагружении в условиях низких температур. Проблемы прочности, 1972, № 1.
37. Кудрявцев И. В., Чудновский А. Д., Сосновский А. А. О пересекающихся кривых усталости. Заводская лаборатория, 1968, № 4.
38. Куллама Х. А. О влиянии частоты нагружения на усталостную прочность сталей при перегрузках. Заводская лаборатория, 1957, № 5.
39. Кульбацкий П. Ф. Влияние частоты нагружения и направленной анизотропии на усталостную прочность листового алюминиевого сплава АМг65М. Проблемы прочности, 1972, № 6.
40. Леви Дж. С. Метод расчета долговечности в связи с накоплением повреждения при перегрузках. В кн. «Усталость и выносливость металлов». Под ред. Г. В. Ушкина. М., ИЛ, 1963.
41. Долгинский М. Г., Натанзон Е. И., Темьянко В. Г. Исследование контактной усталостной прочности трехслойной стали У7-30-У7. В кн. «Прочность металлов при циклических нагрузках». М., Изд. АН СССР, «Наука», 1967.
42. Макивили А. Дж., Илл У. Метод определения скорости распространения трещин усталости. В кн. «Усталость и выносливость металлов». Под ред. Г. В. Ушкина. М., ИЛ, 1963.
43. Марковец М. П. Об уравнении диаграммы усталости. Заводская лаборатория, 1962, № 1.
44. Масол В. А., Кудрявцев И. В., Белкин М. Я., Тарасова В. Н., Саввина Н. М. Усталостная прочность материала полых и сплошных крупных валов. Проблемы прочности, 1971, № 3.
45. Мустаев Р. Х. Повышение выносливости резьбовых соединений с натягами. Вестник машиностроения, 1971, № 3.
46. Нахалов В. А., Шрон Р. Э., Барас Р. Х., Балашова Р. К. Учет формы сечения концов труб при расчете на малоцикловую усталость. Проблемы прочности, 1973, № 10.
47. Николаев Г. А., Румянцев С. В. Влияние дефектов сварки на механические свойства сварных соединений. В кн. «Вопросы прочности материалов и конструкций». Под ред. Д. Н. Решетова. М., Изд. АН СССР, 1959.
48. Нистратов А. Ф., Горфинкель Х. М. Динамическая прочность кольцевых пружин. Вестник машиностроения, 1971, № 10.
49. Одиш Н. А., Гуревич С. Е. Циклическая прочность и чувствительность к концентрации некоторых сортов высокопрочной стали. В кн. «Прочность металлов при переменных нагрузках». Материалы III-го совещания по усталости металлов, 5—9 марта 1962. М., Изд. АН СССР, 1963.
50. Одиш Н. А., Гуревич С. Е. Чувствительность к надрезу высокопрочных сталей при циклических нагрузках. В кн. «Циклическая прочность металлов». Материалы II-го совещания по усталости металлов, 24—27 мая 1960. М., Изд. АН СССР, 1962.

31. Пиковский В. А., Кустов В. Г., Леонов Е. В., Шашкин В. В., Зиновьев И. В. Исследование работоспособности высокоскоростных радиальных подшипников с полыми роликами. Проблемы прочности, 1971, № 10.
32. Писаренко Г. С., Самсонов Г. В., Верлотуров А. Д., Белькорнов А. И., Акиенко Б. А., Ришин В. В., Шеметан Ю. М. Прочностные характеристики слоев, полученные электронно-лучевым легированием сталей тугоплавкими металлами. Проблемы прочности, 1973, № 2.
33. Писаренко Г. С., Черненко А. Д., Грязнов Б. А. Сопротивление усталости осевой стали в зоне прессовых посадок при низкой температуре. Заводская лаборатория, 1965, № 7.
34. Притусевич Р. М., Решетов Д. Н., Литвак А. С. Ударно-усталостная прочность закаленных зубчатых колес. Вестник машиностроения, 1971, № 10.
35. Раскин Р. М., Букалова Л. В. Усталостная прочность втулочно-роликовых цепей. В кн. «Усталость металлов». М., Изд. АН СССР, 1960.
36. Ратнер С. И. Разрушение при повторных нагрузках. М., Оборонгиз, 1959.
37. Раднев В. Д., Топоров Г. В. Влияние гальванического хромирования на сопротивление разрушению при циклическом и ударноциклическом нагружении. В кн. «Усталость металлов при ударных циклических нагрузках и исследование машин ударного действия». Сб. научных трудов XV. Томский инж.-строит. ин-т, 1969.
38. Рябченков А. В. Коррозионно-усталостная прочность стали. М., Mashiz, 1953.
39. Сосновский А. А., Разивеский В. Н., Лоуцманов С. Н., Арсенова И. Н., Рымарь В. И. Методика испытаний на усталость паянных соединений. Заводская лаборатория, 1972, № 12.
40. Сосновский А. А., Минков Я. А., Чурай А. И. Повышение прочности и долговечности коренных валов тяжелых газовых компрессоров. Вестник машиностроения, 1972, № 1.
41. Топоров Г. В., Тетерин Н. А. О чувствительности к надрезу стали 45 при ударном и при плавном циклических нагружениях. В кн. «Усталость металлов при ударных циклических нагрузках и исследование машин ударного действия». Сб. научных трудов XV. Томский инж.-строит. ин-т, 1969.
42. Турбило В. М., Немцов М. С., Меркушев А. А. Повышение коррозионно-усталостной прочности стали 35ХН1М после алмазного выглаживания. Вестник машиностроения, 1971, № 6.
43. Усталостная прочность и долговечность самолетных конструкций. М., Оборонгиз, 1965.
44. Усталостная прочность и остаточные напряжения в стали и чугунах. М., Наука, 1955.
45. Усталость металлов и сплавов. М., Наука, 1971.
46. Филатов Э. Я., Дмитриченко С. С., Белокурова В. Н., Борисов Ю. С. Программные испытания сварных образцов на усталость. Проблемы прочности, 1972, № 3.
47. Форрест П. Усталость металлов. М., Машиностроение, 1968.
48. Хардрат Г. Ф., Наумом Ю. С. Испытания образцов Al-сплава на усталость при варьировании амплитуды нагрузки. В кн. «Усталость и выносливость металлов». Под ред. Г. В. Ужика. М., ИЛ, 1963.
49. Шаврин О. И., Крехнин А. Т. Повышение износостойкости и контактной прочности сталей 9Х и ШХ15 термомеханической обработкой. Вестник машиностроения, 1971, № 6.
50. Школьник А. М., Стеуско Е. Г., Шахов В. И. Пути повышения эффективности поверхностного упрочнения тепловозных коленчатых валов. Вестник машиностроения, 1972, № 1.
51. Дерягин Г. А. Исследование влияния пластической деформации на усталостные свойства алюминиевого сплава марки АВТ. В кн. «Прочность металлов при циклических нагрузках». М., Изд. АН СССР, 1967.