ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXXII, № 3, 1979 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н. В. ОЛЕЙНИК, М. Г. СТАКЯН

НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В СВЯЗИ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ВЕРОЯТНОСТЬЮ НЕРАЗРУШЕНИЯ

В тех случаях, когда долговечность конструкций должна быть предопределена с требуемой надежностью, одних только усредненных кривых выносливости недостаточно. Без учета дисперсии долговечности затрудняется и оценка влияний на выносливость различных факторов, поскольку ее средневероятные показатели могут соотноситься между собой иначе, чем показатели при другой вероятности неразрушения. Это различие иногда становится столь заметным, что возникает необходимость в пересмотре сложившихся представлений о значимости отдельных факторов в расчетах ответственных деталей [1].

Ранее было замечено [2, 3], что при тренировке сталей недогрузками роль концентрации напряжений существенно зависит от вероятности неразрушения P. Оказалось, что с увеличением P положительное влияние тренировки по отношению к гладким образцам убывало, а к надрезанным росло, вследствие чего различие в упрочняемости тех и других в конце концов сглаживалось.

Ниже, в развитие работ [2, 3] анализируются распределения накопленного повреждения a (сумм относительных долговечностей до разрушения) для случая программного нагружения. Анализ построен на экспериментальных данных [4, 5], полученных при испытании гладких и надрезанных ($\alpha_\sigma = 1{,}8$) образцов из стали 45 и 40Х, $d = 12$ мм в режиме двухступенчатого симметричного изгиба. Режим программного нагружения: объем блока $n_0 = 960 \div 96000$ циклов; отношение продолжительностей нагружения максимальным σ_1 и минимальным σ_2 напряжениями в блоке $\beta = \frac{n_{01}}{n_{02}} = 0{,}01 \div 100$; отношение напряжений $\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1{,}2 \div 1{,}5$.

Семейство кривых выносливости задано выражением

$$\lg N_i = (\overline{\lg N} + uS) - (\overline{m} + uS_m)(\lg \sigma_i - \overline{\lg \sigma}) \qquad (1)$$

или

$$\lg N_i = C - m \lg \sigma_i , \qquad (2)$$

где $C = m\overline{\lg \sigma} + (\overline{\lg N} + uS)$, $\quad m = \overline{m} + uSm$.

Вычисление сумм относительных долговечностей $a = \sum \frac{n_i}{N_i}$ (n_i — число циклов нагружения напряжением σ_i; N_i — нормальная долговечность при σ_i) производили по приближенной формуле

$$a = \frac{N_{\Pi 1}}{N_1} \cdot \frac{\beta + \left(\frac{1}{\alpha}\right)^m}{\beta + 1} = \frac{N_{\Pi 1}}{N_1} \cdot K, \qquad (3)$$

где $N_{\Pi 1}$, N_1 — соответственно, суммарная долговечность на уровне σ_1 по программной кривой выносливости и долговечность по исходной кривой для требуемой вероятности неразрушения; K — постоянная для данной пары исходной и программной кривых.

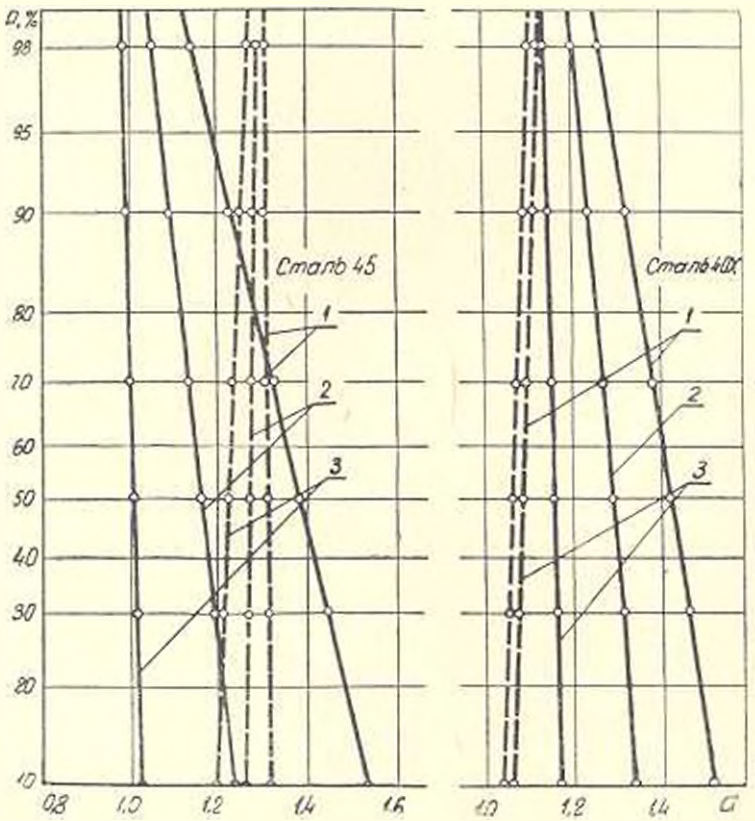

Рис. 1. Зависимости сумм относительных долговечностей от вероятности неразрушения при уровнях перенапряжений: $\frac{\sigma_1}{\sigma_{-1}}$ = 1,1, 1,2 и 1,3 (линии 1, 2, 3). Сплошные линии — гладкие образцы, штриховые — надрезанные образцы:

а) α = 1,2, β = 1, n_0 = 9600 циклов.

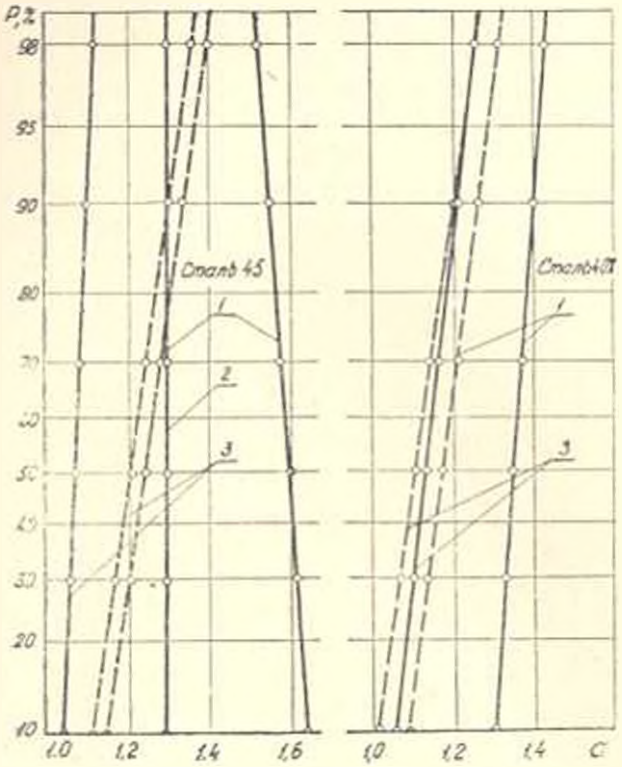

Рис. 1. б) $\alpha = 1{,}5$ (сталь 45) и 1,2 (сталь 40Х), $\bar{p} = 1$, $n_б = 960$ циклов.

Зависимости сумм относительных долговечностей для наиболее характерных режимов нагружения и при разных уровнях перенапряжений $\frac{\sigma_1}{\sigma_{-1}}$ нанесены на нормальную вероятностную бумагу и представлены на рис. 1. Как видно, распределения суммы a гладких и надрезанных образцов удовлетворительно следуют нормальному закону (в меньшей степени это свойственно конечным относительным долговечностям и суммам a для тренированных образцов [2, 3]) и могут быть подчинены уравнению:

$$a = us - \bar{a}, \tag{4}$$

где $\bar{a} = \frac{1}{k}\sum_{1}^{k} a_i$ и $s = \left[\frac{1}{k-1}\sum_{1}^{k}(a_i - \bar{a})^2\right]^{0.5}$ — среднее значение и среднеквадратичное отклонение расчетных сумм относительных долговечностей; u — квантиль нормального распределения; k — число вычислений.

Углы наклона зависимостей, характеризуемые величинами s, у надрезанных образцов обычно меньше, чем у гладких, хотя различия между ними не столь велики, как после тренировки недогрузками или перегруз-

ками. Первое, если принять во внимание взаимное расположение кривых на рис. 1, согласуется с уже известным из работ [2, 3] выводом о том, что в области высоких вероятностей неразрушения способность металла к упрочнению мало зависит от формы образца или детали. Второе

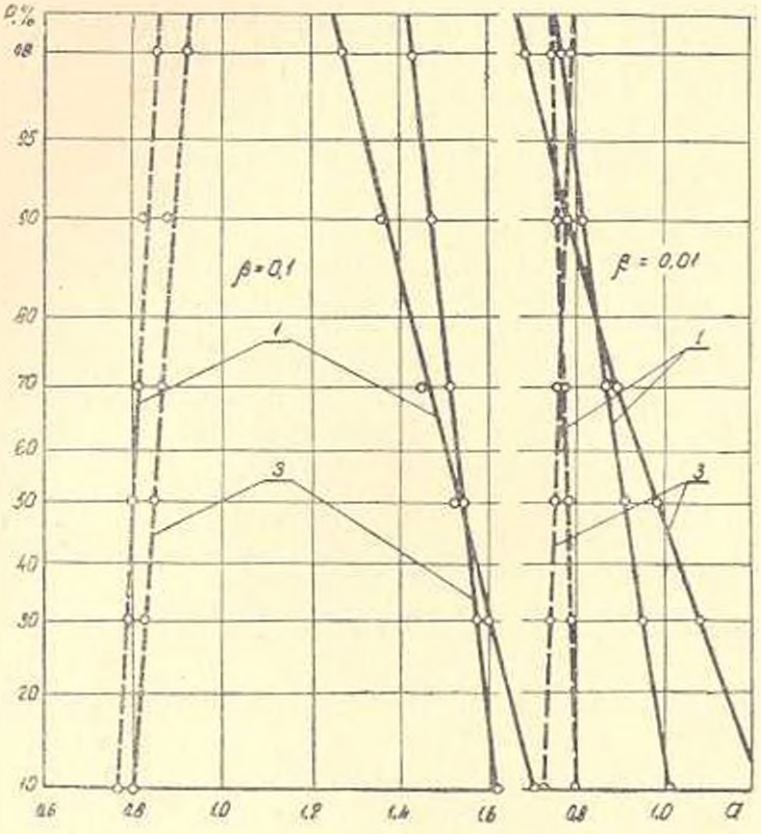

Рис. 1. в) $\alpha = 1{,}5$, $n_б \approx 5000$ (сталь 45).

свидетельствует о меньшей интенсивности изменения a при программном нагружении в сравнении с однократной сменой нагрузки. Сами суммы при программном нагружении близки к единице, а пересечение линий $a = f(P)$ для гладких и надрезанных образцов происходит при a, отличающемся от единицы на 20—30, изредка на 50%. Такие отклонения можно считать небольшими, учитывая, что величина a определяется отношением двух случайных величин, а расположение линий $a = f(P$ связано со случайным протеканием двух опытов, и потому они подвержены заметным колебаниям. Тем существеннее должны быть колебания координат точек пересечения этих кривых. Поэтому обсуждаемые результаты важны, в первую очередь, не с точки зрения абсолютных значений сумм a или координат точек пересечения зависимостей $a=f(P)$, а из общих тенденций поведения металла при наличии надрезов и без них в связи с режимом нагружения и вероятностью неразрушения. Ана-

лиз других экспериментальных данных, выходящих за рамки работ [4, 5], подтверждает сформулированную выше закономерность, т. е. показывает, что независимо от режима нагружения и материала надрезанные образцы в области высоких вероятностей неразрушения не уступают по показателям повреждения гладким.

Характер зависимостей $a=f(P)$ обусловлен изменением рассеяния долговечности при переходе от стационарного нагружения к программному. У гладких образцов эти изменения менее устойчивы и могут выражаться как в увеличении, так и уменьшении рассеяния (кривые распределения иногда составляют острый угол с осью a—рис. 1б). У надрезанных образцов они стабильны и, как правило, ведут к уменьшению рассеяния, вследствие чего зависимости $a=f(P)$ надрезанных образцов наклонены вправо и зачастую значительно, чем такие же линии гладких образцов. Очевидно, что сближение или расхождение сумм a у гладких надрезанных образцов с ростом вероятности неразрушения не определяется взаимным расположением функций распределения абсолютных долговечностей при том или ином виде нагружения.

Наличие семейств кривых выносливости позволяет изучить не только распределения относительных долговечностей и их сумм по параметру напряжения, но и распределения напряжений, а значит и эффективных коэффициентов концентрации напряжений K_σ по параметру долговечности, которые также являются случайными величинами [6]. Опыты [4, 5] подтвердили положение об инвариантности K_σ от режима нагружения, о чем свидетельствуют представленные в таблице значения K_σ, отнесенные к длительным (база $N_б = N_0$) и ограниченным средневероятным пределам выносливости (базы $N_б = 10^5$ и 5.10^5 циклов). Из таблицы следует, что несмотря на варьирование режимов нагружения в широких пределах, отклонения K_σ при программном нагружении от его значения при стационарном нагружении для обеих сталей невелико (наибольшие отклонения не превышают нескольких процентов). Как видно из рис. 2, функции распределения коэффициентов K_σ для рассмотренных режимов нагружения также подчиняются нормальному закону. Для остальных режимов они аналогичны, т. е. характеризуются малыми отклонениями в одну или другую сторону от вертикали. Следовательно, коэффициент K_σ незначительно меняется с изменением вероятности неразрушения. Отклонения его от средневероятных значений обычно не более 10% (при циклических испытаниях соединений типа «вал—ступица» эти отклонения могут достичь до 15—20% [6]). Это означает, что в приближенных расчетах коэффициент K_σ можно принимать постоянным, не зависящим от вероятности неразрушения.

Таблица

Режим нагружения		Сталь 45			Сталь 40Х		
α	β	$N_6=N_0$	$N_6=5\cdot10^5$	$N_6=10^5$	$N_6=N_0$	$N_6=5\cdot10^5$	$N_6=10^5$
Стационарное нагружение		1,58	1,46	1,25	1,77	1,6	1,4
1,2	100	1,58	1,46	1,25	—	—	—
	10	1,57	1,48	1,26	1,78	1,64	1,41
	1	1,55	1,42	1,21	1,76	1,61	1,39
	0,1	1,53	1,43	1,24	1,78	1,62	1,39
	0,01	1,58	1,42	1,2	1,79	1,66	1,4
1,5	10	1,57	1,44	1,24			
	1	1,54	1,38	1,16	—	—	—
	0,1	1,55	1,41	1,19			
	0,01	1,56	1,47	1,27			

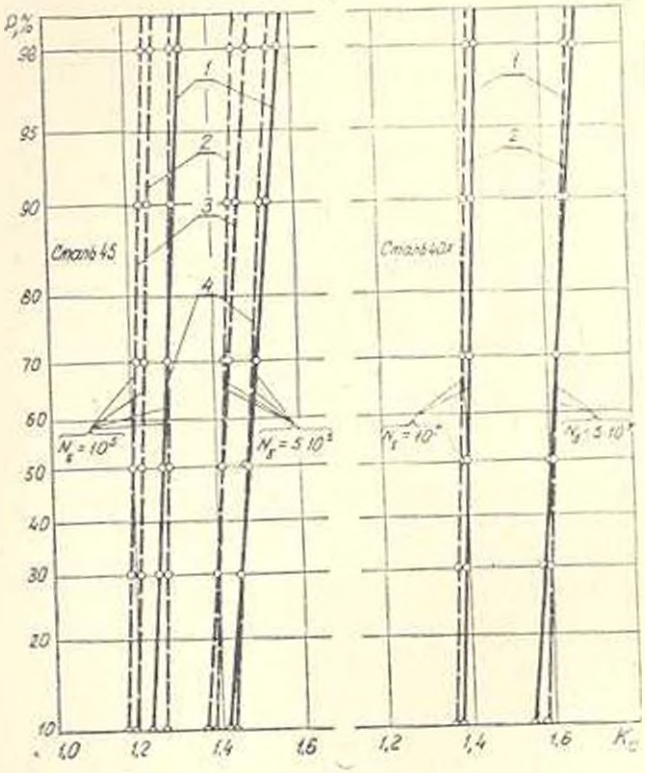

Рис. 2. Зависимости эффективных коэффициентов концентрации напряжений от вероятности неразрушения. Линии: *1* — стационарное нагружение (сплошные линии); *2* — $\alpha=1{,}2$, $\beta=1$, $n_6=9600$ циклов (штриховые линии); *3* — $\alpha=1{,}5$, $\beta=0{,}1$, $n_6\approx5000$ циклов (то же); *4* — $\alpha=1{,}5$, $\beta=0{,}01$, $n_6\approx5000$ циклов (то же).

Выводы

1. Вероятностный подход к оценке результатов усталостных испытаний позволил выявить важную особенность накопления повреждения в сталях при программном нагружении, состоящую в том, что с повышением требований к надежности работы материала роль концентрации напряжений становится все менее существенной.

2. Количественные показатели накопленного повреждения в области высоких вероятностей неразрушения не сильно отличаются от единицы, что делает возможным использование гипотезы линейного суммирования повреждений в расчетах ответственных деталей.

3. Эффективный коэффициент концентрации напряжений практически не зависит от режима нагружения и вероятности неразрушения.

ЕрПИ им. К. Маркса Поступило 16.XI 1978.

Ն. Վ. ՕԼԵՅՆԻԿ, Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ

ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ՎՆԱՍՎԱԾՔՆԵՐԻ ԿՈՒՏԱԿՈՒՄԸ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ ԵՎ ՉՔԱՅՔԱՅՄԱՆ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՊԱՏՃԱՌՈՎ

Ամփոփում

Ցույց է տրված, որ հարաբերական երկարակեցությունների a գումարի և լարումների կուտակման արդյունավետ գործակցի արժեքները ենթարկվում են նորմալ բաշխման օրենքին:

Չքայքայման P հավանականությունների բարձր արժեքների դեպքում ողորկ և լարումների կուտակիչ ունեցող փորձանմուշների համար $a=f(P)$ կախումները իրար մոտենում են և $a \approx 1$, որի պատճառով պատասխանատու մեքենաների մասերի հաշվարկներում կարելի է կիրառել վնասվածքների գծային գումարման հիպոթեզի վրա հիմնված բանաձևերը:

Հաստատված է, որ փորձարկումների ընդունված պայմանների համար (բեռնվածության ռեժիմները և լարումների կուտակիչի տեսքը) լարումների կուտակման արդյունավետ գործակիցները գործնականորեն քիչ են կախված P-ից և բեռնվածության ռեժիմից:

ЛИТЕРАТУРА

1. *Когаев В. П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М., «Машиностроение», 1977, 232 с. с ил.
2. *Олейник Н. В.* Эффективность тренировки металла с учетом вероятности неразрушения. Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 1. Киев, «Техника», 1966.
3. *Олейник Н. В.* Сопротивление стали перегрузкам в связи с оценкой надежности. Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 5, Киев, «Техника», 1967.

4. *Олейник Н. В., Нгуен Чонг Гиеп.* Предел усталости при нестационарном нагружении Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 6. Киев, «Техника», 1967.

5. *Олейник Н. В., Нгуен Чонг Гиеп.* Накопление усталостных повреждений при нестационарном нагружении в связи с длительностью действия амплитуд спектра. Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 7. Киев, «Техника», 1968.

6. *Гаспарян С. А., Стакян М. Г.* Вероятностная оценка некоторых характеристик выносливости при стационарном и программном нагружениях. Межвуз. сб. научн. тр. «Машиностроение», сер. XVI, вып. 1. Ереван, изд. ЕрПИ, 1976.