

УДК 620:178.3

А.В. Коноплєв

**АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ
МЕТОДА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ**

Проведено исследование одного из методов ускоренного определения предела выносливости, основанного на изменении дисперсии разрушающего напряжения.

Показано, что максимальную скорость испытания объектов можно определить с учётом принятой модели кривой усталости и закона накопления повреждений. Установлен основной фактор, влияющий на точность оценки предела выносливости.

Ключевые слова: дисперсия, предел выносливости, скорость проведения испытаний, модель кривой усталости.

Проведено дослідження одного з методів прискореного визначення границі витривалості, заснованого на зміні дисперсії руйнівного напруження.

Показано, що максимальну швидкість випробування об'єктів можна визначити з урахуванням прийнятої моделі кривої втоми і закону накопичення пошкоджень. Встановлений основний чинник, що впливає на точність оцінки границі витривалості.

Ключові слова: дисперсія, границя витривалості, швидкість проведення випробувань, модель кривої втоми.

The investigation of a method of determining the accelerated endurance limit, based on the change in dispersion destructive tension.

It is shown that the maximum speed of the test object can be determined taking into account the accepted model of the curve of fatigue damage accumulation and the law. The basic factor that affects the accuracy of the limits of endurance.

Keywords: dispersion, the limit of endurance, speed test, model of the curve of fatigue.

Постановка проблемы. При проведении испытаний на сопротивление усталости всегда имеет место естественное рассеяние прочностных свойств объектов. Учитывая, что распределения характеристик рассеяния достаточно точно описываются статистическими законами, их можно использовать для создания новых, в том числе ускоренных, методов определения характеристик сопротивления усталости.

© Коноплєв А.В., 2015

На таком подходе разработан метод, в основу которого положена зависимость рассеяния разрушающего напряжения от уровня начальной нагрузки при испытании объектов с возрастающей амплитудой напряжений, в частности, зависимость дисперсии разрушающего напряжения от уровня начальной нагрузки $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$. Он представляет собой модернизацию метода, основанного на использовании зависимости разрушающего напряжения от уровня начальной нагрузки $\sigma_p(\sigma_1)$ [1]. Точность и производительность этого метода зависит от ряда факторов, исследованию которых посвящена статья.

Целью работы является решение задачи выбора максимальной скорости нагружения объектов при их ускоренных испытаниях, а также проведение анализа точности ускоренного метода в зависимости от выбора математической модели аппроксимирующей функции $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$.

Изложение основного материала. Согласно методу, при линейно возрастающей нагрузке необходимо испытать партию объектов (минимум шесть). Для получения минимально устойчивой зависимости $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$ испытывают объекты при 4-5 значениях σ_1 по 4-5 штук на каждом из них (рис. 1).

На схеме приняты следующие обозначения: $\sigma_{11}-\sigma_{15}$ – уровни начальных напряжений; $\bar{\sigma}_{p_{1,5}}$ – среднее разрушающее напряжение, соответствующее 1-му и 5-му уровням начального напряжения; $\bar{\sigma}_{p_2}-\bar{\sigma}_{p_4}$ – средние значения разрушающих напряжений, соответствующие начальным напряжениям $\sigma_{12}-\sigma_{14}$; $\alpha_1-\alpha_5$ – скорости увеличения амплитуды напряжений.

Начальное напряжение первого объекта при испытаниях σ_{11} принимают таким, чтобы оно заведомо не превышало предел выносливости, а для начальных уровней напряжений $\sigma_{12} \dots \sigma_{15}$ – было выше его. Для достижения высокой производительности испытаний скорость увеличения нагрузки первого объекта σ_{11} принимают такой, чтобы его разрушение произошло при напряжениях σ_{p_1} , близких к верхней границе многоциклового области. Скорости увеличения нагрузки $\alpha_2 - \alpha_5$ назначают одинаковыми, и в тоже время такими, чтобы максимальное из разрушающих напряжений (в данном случае σ_{p_5}) не превышало напряжение σ_{p_1} . При такой схеме испытаний достигается максимальная производительность.

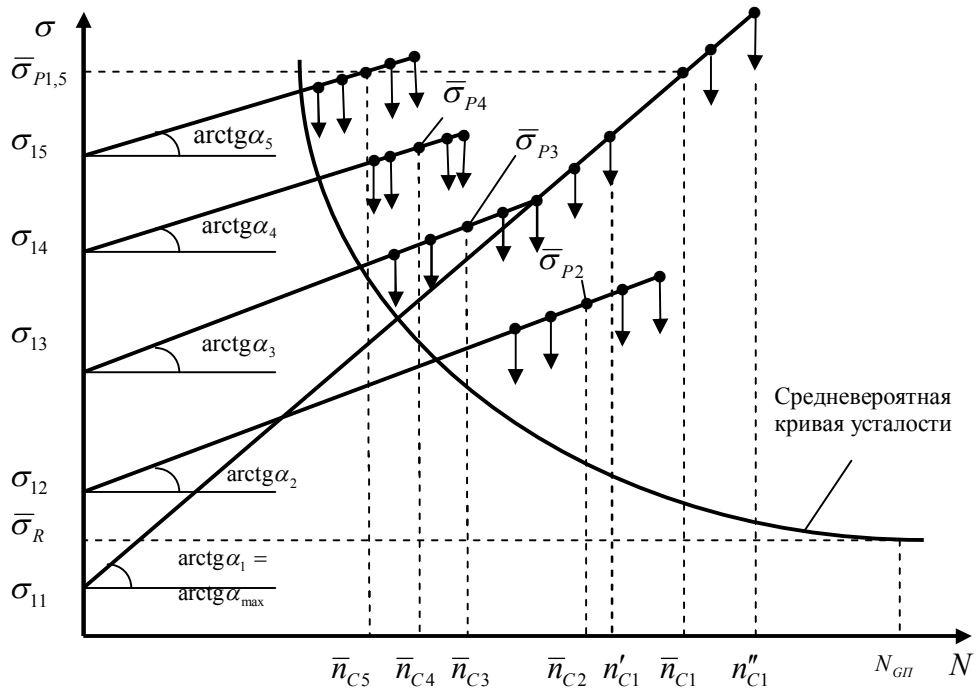


Рис. 1. Схема нагружения объектов

Максимальные скорости α_1 и α_5 можно определить с учётом принятой модели кривой усталости и закона накопления повреждений. Так, если в качестве математической модели кривой усталости принять уравнение Вейбулла, а в качестве закона накопления усталостных повреждений – линейную гипотезу, то максимальное значение скорости увеличения нагрузки для объектов, испытанных при начальных напряжениях $\sigma_{12} - \sigma_{15}$, составит

$$\alpha_{\max} = \frac{(\sigma_{P_i} - \sigma_R)^{m_w+1} - (\sigma_{l_i} - \sigma_R)^{m_w+1}}{(m_w + 1)10^{c_w}}, \quad (1)$$

где i – порядковый номер уровня напряжений.

Принимая во внимание, что $(\sigma_P - \sigma_R) = (10^{C_w} / N)^{1/m_w}$, а также то, что на границе мало и многоциклового усталости долговечность по кривой усталости $N = N_{B.G.}$, запишем уравнение (1) в виде

$$\alpha_{\max} = \frac{(10^{C_w} / N_{B.G.})^{m_w+1} - (\sigma_{15} - \sigma_R)^{m_w+1}}{(m_w + 1)10^{c_w}}. \quad (2)$$

Согласно статистическим данным величина $N_{B.Г.}$ находится в диапазоне значений $5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ циклов [2, 3].

Поскольку предельная скорость α_{\max} определяется до проведения испытаний, то величинами m_W , C_W и σ_R необходимо предварительно задаваться, используя результаты испытаний аналогичных объектов, либо определять их расчётным путём, основываясь на их корреляционно-статистических взаимосвязях [4], либо их можно принять равными параметрам унифицированной кривой усталости ($m_W=1,0$; $C_W=7,0$) [5]. Что же касается объектов, испытанных при напряжениях $\sigma_{li} \leq \sigma_R$, то для них максимальная скорость может быть определена по тем же формулам, при условии, что $\sigma_{11} = \sigma_R$

$$\alpha_{\max} = \frac{(\sigma_P - \sigma_R)^{m_w + 1}}{(m_W + 1)10^{C_w}} \quad (3)$$

или

$$\alpha_{\max} = \frac{(10^{C_w} / N_{B.Г.})^{m_w + 1}}{(m_W + 1)10^{C_w}} \quad (4)$$

По аналогии с формулами (2) и (4) запишем зависимости для определения α_{\max} для случая, когда в качестве уравнения кривой усталости принята степенная модель

$$\alpha_{\max} = \frac{(10^C / N_{B.Г.})^{m_c + 1} - \sigma_1^{m_c + 1}}{(m_C + 1)10^{C_c}} \quad (5)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{(10^C / N_{B.Г.})^{m_c + 1} - \sigma_R^{m_c + 1}}{(m_C + 1)10^C} \quad (6)$$

Основная идея метода заключается в фиксации напряжения, разделяющего области накопления и ненакопления повреждений. Эта граница и является пределом выносливости. Определить её можно с помощью зависимости $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$, которая может быть получена при реализации схемы нагружения объектов, представленной на рис. 1. Кроме того, экспериментально доказано [1], что эта функция индифферентна по отношению к скорости увеличения нагрузки при начальных напряжениях, не превышающих предел выносливости, и ошутимо реагирует на изменение начального напряжения, когда они превысят указанный предел (рис. 2).

Этот вывод для рассматриваемого метода является ключевым, поэтому обоснуем его логически.

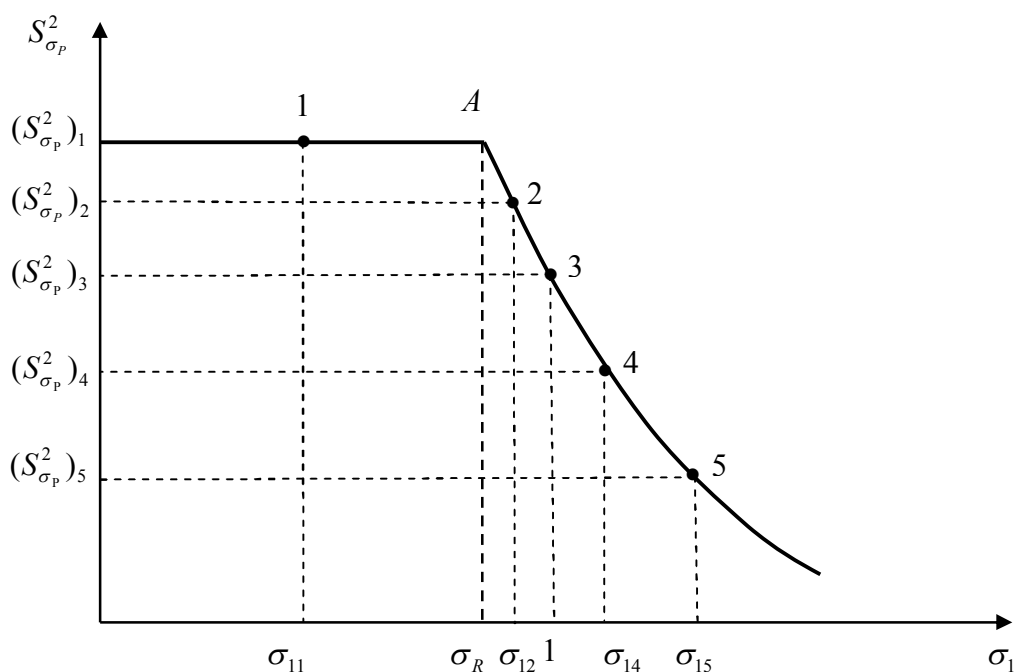


Рис. 2. Графік залежності $S_{\sigma_p}^2$ від σ_1

Запишемо вираження для величини руйнувального напруження, використовуючи в якості кривої усталості рівняння Вейбулла і лінійну гіпотезу суммування пошкоджень

$$\sigma_P = \sigma_R + [a \cdot \alpha (m_W + 1) 10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}}. \quad (7)$$

Запишемо це условие для двох об'єктів, які мають різні межі виводності σ_{R1} і σ_{R2} , і випробуваних при одній і тій же швидкості α_1 , в вигляді

$$\sigma_{P1} - \sigma_{R1} = \sigma_{P2} - \sigma_{R2} = [a \cdot \alpha_1 (m_W + 1) 10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}},$$

откуда

$$\sigma_{R2} - \sigma_{R1} = \sigma_{P2} - \sigma_{P1}. \quad (8)$$

С другої сторони, для тих же об'єктів, випробуваних при будь-якій другій швидкості α_2 , по аналогії з (8) отримаємо

$$\sigma_{P3} - \sigma_{R1} = \sigma_{P4} - \sigma_{R2} = [a \cdot \alpha_2 (m_W + 1) 10^{C_W}]^{\frac{1}{m_W + 1}}$$

или

$$\sigma_{R2} - \sigma_{R1} = \sigma_{P4} - \sigma_{P3}. \quad (9)$$

Сопоставляя зависимости (8) и (9), получим

$$\sigma_{P_2} - \sigma_{P_1} = \sigma_{P_4} - \sigma_{P_3}. \quad (10)$$

Поскольку равны разности $\sigma_{P_2} - \sigma_{P_1}$ и $\sigma_{P_4} - \sigma_{P_3}$, то равны и дисперсии разрушающих напряжений. Таким образом, для объектов, испытанных от начальных напряжений $\sigma_{1i} \leq \sigma_R$, разрушающее напряжение не будет зависеть от скорости увеличения нагрузки, и в этом случае максимальная скорость испытаний α_{\max} может быть определена по формуле (4).

В тоже время при значениях начальных напряжений $\sigma_1 > \sigma_R$ величина $S_{\sigma_p}^2$ зависит от скорости увеличения напряжений α и достаточно чувствительна к изменению начального напряжения σ_1 . Вид этой зависимости установим с помощью расчёта значений $S_{\sigma_p}^2$ на основе корреляционных зависимостей между параметрами этих кривых и пределом выносливости.

Расчёт проведём на основе унифицированного уравнения Вейбулла с фиксированными параметрами $m_W = 1,0$ и $C = 10^7$, а также на основе степенного уравнения кривой усталости. При этом зададимся конкретным значением предела выносливости, поскольку, в отличие от уравнения Вейбулла, степенная модель предполагает связь между положением наклонного участка и пределом выносливости. Примем $\sigma_R = 200$ МПа, поскольку это значение предела выносливости позволит воспользоваться связями между параметрами кривых усталости и пределом выносливости, обеспечивая максимальное их соответствие.

С целью подбора функции $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$ проведём расчёт величин $S_{\sigma_p}^2$ для принятых исходных данных. Максимально допустимые скорости увеличения нагрузки α_{\max} при начальных напряжениях σ_{11} и σ_{15} определим по зависимостям (2) и (4). Крайние значения величин пределов выносливости, соответствующие каждому из начальных уровней напряжений, примем в обычно наблюдаемом диапазоне их рассеяния $\sigma_R \pm 10$ МПа (табл. 1).

Величины $S_{\sigma_p}^2$ в обоих случаях определим по формуле [2]

$$S_{\sigma_p}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{P_i} - \bar{\sigma}_P)^2, \quad (11)$$

где n – количество испытанных объектов.

Таблиця 1

Расчётные значения $S_{\sigma_p}^2$ и $\lg S_{\sigma_p}^2$, соответствующие принятым

начальным напряжениям σ_1

$\sigma_1, МПа$	$\lg \sigma_1$	$\sigma_R, МПа$	$\alpha, Па/цикл$	Уравнение Вейбулла			Степенное уравнение		
				$\sigma_p, МПа$	$S_{\sigma_p}^2, МПа^2$	$\lg S_{\sigma_p}^2$	$\sigma_p, МПа$	$S_{\sigma_p}^2, МПа^2$	$\lg S_{\sigma_p}^2$
σ_R	2,30	190	500	290,0	112,8	2,05	304,0	161,0	2,21
		200		316,0					
		210		327,9					
220	2,34	190	180	257,1	53,1	1,73	272,4	106,2	2,03
		200		281,8					
		210		291,8					
240	2,38	190	180	268,1	22,9	1,36	278,6	79,7	1,90
		200		286,6					
		210		295,4					
260	2,41	190	180	282,2	9,8	0,99	287,5	53,0	1,72
		200		293,9					
		210		301,2					
280	2,45	190	180	298,2	4,5	0,65	299,2	33,0	1,49
		200		304,0					
		210		310,0					

Результаты расчёта, приведенного в табл. 1, показывают, что, во-первых, дисперсия разрушающего напряжения ощутимо изменяется в зависимости от принятого начального уровня нагрузки, и, во-вторых, на неё заметно влияет модель кривой усталости.

Используя данные табл. 1, представим графики зависимости $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$ для обеих моделей кривой усталости в обычных координатах и проанализируем возможность её аппроксимации линейной функцией, определив соответствующие коэффициенты корреляции (рис. 3).

Для определения погрешности, обусловленной аппроксимацией функции $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$ прямой линией, определим пределы выносливости, подставляя $S_{\sigma_p}^2$ в соответствующие уравнения, приведенные на рис. 3:

– для уравнения Вейбулла

$$S_{\sigma_p}^2 = 352,5 - 1,3\sigma_1 = 112,8,$$

откуда

$$\sigma_1 = \sigma_R = \frac{352,5 - 112,8}{1,3} = 184,5 \text{ МПа}.$$

– для степенного уравнения

$$S_{\sigma_p}^2 = 475,6 - 1,6\sigma_1 = 167,9,$$

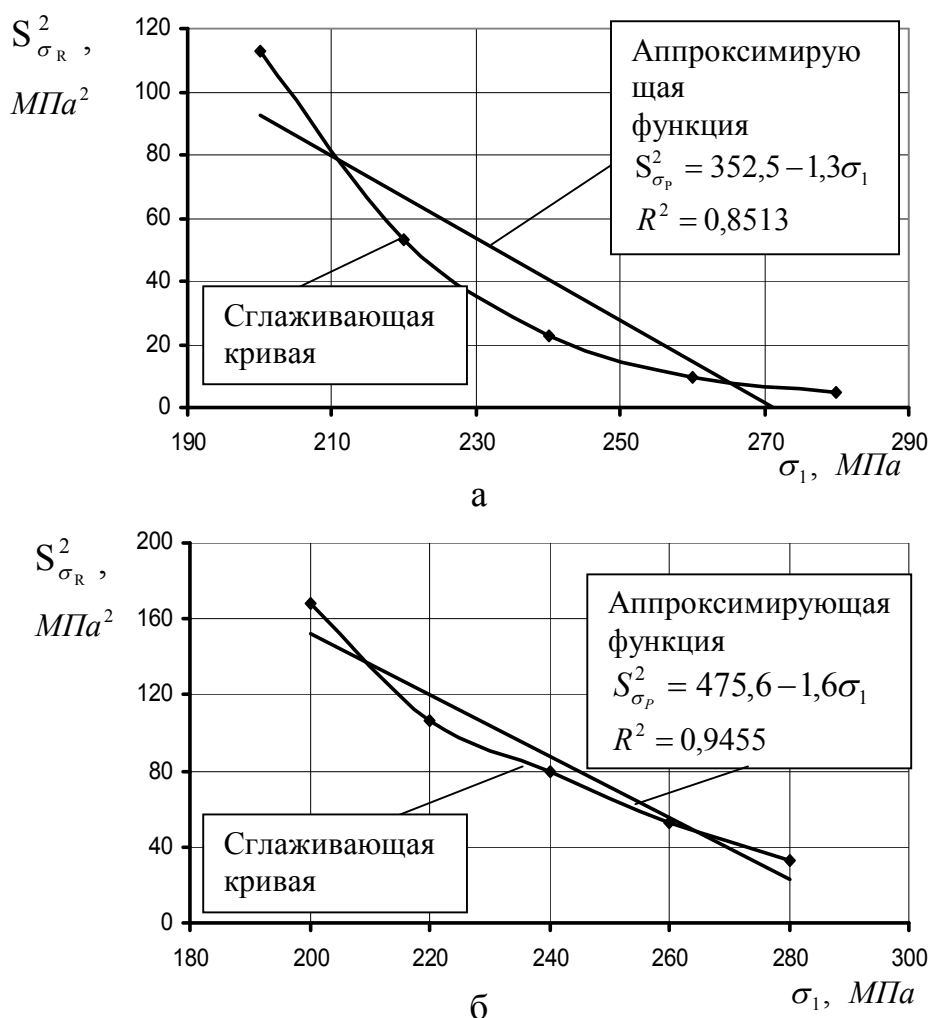


Рис. 3. График зависимости $S^2_{\sigma_p}$ от σ_1

(с учётом напряжений $\sigma_1 \leq \sigma_R$), полученный
на основе уравнения Вейбулла (а) и степенного уравнения (б)

откуда

$$\sigma_1 = \sigma_R \frac{475,5 - 167,9}{1,6} = 190,5 \text{ МПа}.$$

Таким образом, погрешности оценки предела выносливости соответственно составили - 7,8 % и - 4,3 %.

Приведенный расчёт выполнен в предположении, что начальное напряжение σ_1 совпадало с искомым значением σ_R , чего реально достичь невозможно, поскольку σ_R – искомая величина. Но даже в этом случае погрешности оказались достаточно большими.

Оценим, в какой мере изменятся погрешности в реальном случае, при $\sigma_1 < \sigma_R$. Для этого построим графики $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$ без учёта значений $S_{\sigma_p}^2$, соответствующих пределу выносливости σ_R .

В соответствии с расчётом, аналогичным предыдущему, пределы выносливости для уравнения Вейбулла и степенного уравнения соответственно составили 136,4 МПа и 168,9 МПа, а их погрешности соответственно -31,8 % и -15,6 %.

Выводы

1. Используя математическую модель кривой усталости Вейбулла или степенную модель кривой усталости можно определить максимальную скорость нагружения объектов на основе линейной гипотезы накопления усталостных повреждений.
2. В рассмотренном методе линейная аппроксимация зависимости $S_{\sigma_p}^2(\sigma_1)$ является грубой и может приводить к погрешностям оценки предела выносливости, превышающим допустимые.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олейник Н.В., Коноплёв А.В., Кобаков А.Г. Методы ускоренного определения характеристик сопротивления усталости в практических приложениях. – Одесса: Астропринт, 2000. – 138 с.
2. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
3. Троценко В.Т. Деформационные критерии усталостного разрушения металлов // Прочность материалов и конструкций. – К.: Наук. думка, 1975. – С. 42-55.
4. Олейник В.Н. Определение характеристик усталости деталей машин расчётным путём // Детали машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1986. – Вып. 43. – С. 100-106.
5. Олейник Н.В. Высокопроизводительные испытания на усталость и оценка индивидуальных характеристик сопротивления. – Одесса: Астропринт, 1999. – 182 с.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2015

Рецензент – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Прикладна механіка» Одеського національного політехнічного університету
С.В. Бершак