

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 629.4; 629.4.018

## К вопросу об использовании уравнения Гэттса для описания кривой усталости

**Б. С. Шульгинов**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Проанализированы особенности функции Гэттса при описании кривой усталости на примере сварного соединения конструкционной малоуглеродистой стали и конструкционной легированной стали 30ХГСА. Показано, что параметр  $(1-C) = 0,5$  в известном уравнении кривой усталости имеет ограниченное применение. Изложены упрощенные методы расчета параметров уравнения Гэттса как при известном, так и при неизвестном физическом пределе выносливости. Для определения пределов выносливости материалов и элементов конструкций предложен метод последовательных приближений по результатам испытаний как при двух уровнях напряжений и минимальному среднему квадратическому отклонению логарифма долговечности, так и при трех уровнях напряжений и соответствующих им средних долговечностях.*

**Ключевые слова:** функция Гэттса, предел выносливости, среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности.

В работах [1, 2] для описания кривой усталости образцов или элементов конструкций рассматривается уравнение

$$N = \frac{1}{K} \left[ \frac{1}{\sigma - \sigma_R} - \frac{1}{\sigma(1-C)} \right], \quad (1)$$

где  $N$  – число циклов до разрушения исследуемого объекта при максимальном напряжении цикла  $\sigma$ ;  $\sigma_R$  – предел выносливости;  $K$  и  $(1-C)$  – коэффициенты, величины которых неизвестны. Если предел выносливости получен экспериментально, то в уравнении (1) имеются два неизвестных параметра:  $K$  и  $(1-C)$ , если предел выносливости неизвестен – три неизвестные величины:  $\sigma_R$ ,  $K$  и  $(1-C)$ . В обоих случаях рассмотрены варианты, когда коэффициент  $(1-C)$  неизвестен или равен 0,5, как это предложено в [1].

Для проверки этой методики использовали результаты испытаний на усталость двух типов образцов. К первому типу относятся плоские сварные образцы с пересекающимися швами из малоуглеродистой стали толщиной 12 мм. Предел выносливости рассматриваемого сварного соединения  $\sigma_{-1} = 88,5$  МПа

[3]. Второй тип образцов – это стандартные цилиндрические образцы\* из стали 30ХГСА диаметром 8 мм, предел выносливости которой  $\sigma_{-1} = 455$  МПа. Количество образцов  $m_i$  на каждом уровне напряжений и их средняя долговечность на каждом уровне напряжений  $\bar{N}_i$  приведены в табл. 1 для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА.

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний на усталость сварных образцов с пересекающимися швами и цилиндрических образцов из стали 30ХГСА

№ уровня напряжений	Количество испытанных образцов $m_i$ на $i$ -м уровне напряжений	$\sigma_i$ , МПа	$\bar{N}_i$ , цикл
1	4	160	67393
	17	590	71147
2	4	140	147570
	21	540	159637
3	4	120	289109
	25	500	296308
4	4	100	1014613
	21	480	547222

**Примечание.** Здесь и в табл. 2, 3, 5, 6: над чертой приведены данные для сварных образцов с пересекающимися швами; под чертой – для цилиндрических образцов из легированной стали 30ХГСА.

Значения коэффициентов уравнения (1) получали двумя разными способами. Согласно первому параметры  $K$  и  $(1-C)$  находили расчетным путем, согласно второму параметр  $(1-C)$  принимался равным 0,5, как это было предложено в работе [1], параметр  $K$  вычисляли расчетным путем.

Ниже рассмотрены два условия описания кривой усталости при известном и неизвестном пределе выносливости. В качестве примера использовали результаты испытаний на усталость при симметричном цикле напряжения сварных образцов с пересекающимися швами [3] и цилиндрических образцов из легированной стали 30ХГСА (табл. 1).

**Описание кривой усталости при известном пределе выносливости  $\sigma_R$ .**

Рассмотрим два метода расчета параметров уравнения (1).

*Первый метод.* Примем, что коэффициенты  $K$  и  $(1-C)$  уравнения (1) неизвестны. Для их определения уравнение (1) запишем относительно коэффициента  $K$  для двух произвольно выбранных уровней напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ :

$$K_1 = \frac{1}{\bar{N}_1} \left[ \frac{1}{\sigma_1 - \sigma_R} - \frac{1}{\sigma_1(1-C)} \right]; \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{1}{\bar{N}_2} \left[ \frac{1}{\sigma_2 - \sigma_R} - \frac{1}{\sigma_2(1-C)} \right], \quad (3)$$

\* Испытания образцов проводились в Институте механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины.

где  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  – средние значения долговечностей при напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  соответственно.

Приравняем уравнения друг к другу и запишем это равенство относительно коэффициента  $(1 - C)$ :

$$(1 - C)_{1,2} = \frac{(\bar{N}_2 \sigma_2 - \bar{N}_1 \sigma_1)(\sigma_1 - \sigma_R)(\sigma_2 - \sigma_R)}{\sigma_1 \sigma_2 [(\bar{N}_2 \sigma_2 - \bar{N}_1 \sigma_1) - (\bar{N}_2 - \bar{N}_1) \sigma_R]} \quad (4)$$

Для упрощения вычислений представим уравнение (4) в виде

$$(1 - C)_{1,2} = \frac{b_{1,2}(\sigma_1 - \sigma_R)(\sigma_2 - \sigma_R)}{a_{1,2} - (\bar{N}_2 - \bar{N}_1) \sigma_R}, \quad (5)$$

где

$$a_{1,2} = \bar{N}_2 \sigma_2 - \bar{N}_1 \sigma_1; \quad (6)$$

$$b_{1,2} = \frac{\bar{N}_2}{\sigma_1} - \frac{\bar{N}_1}{\sigma_2} = \frac{a_{1,2}}{\sigma_1 \sigma_2}. \quad (7)$$

После определения коэффициента  $(1 - C)_{1,2}$  по зависимости (5) можно найти коэффициент  $K$  по уравнениям (2) или (3). О достоверности вычислений можно судить по равенству  $K_1 = K_2$ . Далее строится кривая усталости по зависимости (1).

Результаты вычислений параметров уравнения (1) по зависимостям (4) и (2) и средних квадратических отклонений логарифмов долговечностей  $S_{\lg N}$  для всех возможных сочетаний напряжений приведены в табл. 2. Среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности образцов всей партии  $S_{\lg N}$  от расчетной кривой усталости определяли по ГОСТ 25.502-1993 [4]. Следует отметить, что  $S_{\lg N}$  получены для всей выборки образцов, испытанных при всех уровнях напряжений. Из данных табл. 2 видно, что как для сварных образцов, так и для цилиндрических образцов из стали 30ХГСА наименьшие средние квадратические отклонения  $S_{\lg N}$  наблюдаются при сочетании уровней напряжений  $j = 2$  (здесь и в табл. 3–6 отмечены звездочкой), а наибольшие – при сочетании уровней напряжений  $j = 1$ . Отметим, что  $S_{\lg N}$  при сочетании напряжений  $j = 3$  мало отличается от  $S_{\lg N}$  при сочетании напряжений  $j = 2$ . В качестве расчетных коэффициентов  $(1 - C)$  и  $K$  необходимо использовать те, при которых значения  $S_{\lg N}$  наименьшие.

В рассмотренных выше примерах как для сварных образцов, так и для цилиндрических из стали 30ХГСА эти коэффициенты следует использовать при сочетании уровней напряжений  $j = 2$ . Кривые усталости сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА, соответствующие минимальному (сочетание напряжений  $j = 2$ ) и максимальному  $S_{\lg N}$  (сочетание напряжений  $j = 1$ ) показаны на рис. 1. Заметим, что наиболее низкие значения  $S_{\lg N}$  получены в случае, когда в сочетании уровней напряжений одно из них является наименьшим, что соответствует данным работы [5]. Поэтому в дальнейшем используются те сочетания напряжений, которые рекомендованы в этой работе.

Т а б л и ц а 2

Параметры  $(1-C)$  и  $K$  уравнения (1) и средние квадратические отклонения логарифма долговечности  $S_{\lg N}$  для сварных образцов и цилиндрических образцов из стали 30ХГСА при известных пределах выносливости

№ сочетания напряжений $j$	№ уровня напряжений $i$	Коэффициенты уравнения Гэттса		$S_{\lg N}$
		$(1-C)$	$K \cdot 10^{-8}$	
1	1, 2	0,583775	4,8667430	0,119538
		0,401819	4,4826907	0,265154
2	1, 3	0,654048	6,5736011	0,086545 *
		0,586356	6,3485723	0,249134 *
3	1, 4	0,680350	7,1217495	0,088479
		0,645298	6,7196706	0,249891
4	2, 3	0,899149	7,77492651	0,102880
		-3,730052	7,68065860	0,256534
5	2, 4	0,840223	7,3973944	0,099706
		12,985895	7,2803304	0,255226
6	3, 4	0,786987	7,3180449	0,091965
		1,548293	7,0637569	0,2507641

*Второй метод.* Примем, что коэффициент  $K$  уравнения (1) неизвестен, а  $(1-C)=0,5$ .

В работе [1] рекомендуется принимать значение коэффициента  $(1-C)=0,5$ . В этом случае для каждого уровня напряжений определяется свой коэффициент  $K_i$  по зависимости (2). Полученные значения коэффициентов  $K_i$  и соответствующие им средние квадратические отклонения  $S_{\lg N}$  для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что каждому напряжению  $\sigma_i$  соответствует свое значение коэффициента  $K_i$ . По мере увеличения коэффициента  $K_i$  среднее квадратическое отклонение сначала уменьшается, а затем возрастает. Это позволяет установить границы  $K$ , между которыми методом последовательных приближений можно находить расчетное значение  $K_p$ , которому соответствует минимальная величина  $S_{\lg N}$ . С помощью такого метода можно значительно сократить объем вычислений. Выбранные значения  $K_i$  и соответствующие им  $S_{\lg N_i}$  представлены в табл. 4. Как для сварных образцов, так и для образцов из стали 30ХГСА минимальные значения  $S_{\lg N}$  и соответствующие им значения коэффициента  $K$  можно использовать как расчетные  $K_p$ . Кривые усталости сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА, построенные по уравнению (1) с использованием коэффициентов  $(1-C)=0,5$  и  $K_p$  (табл. 4), приведены на рис. 1 (кривые 3).

Сопоставление данных табл. 4 и 2 показывает, что использование коэффициента  $(1-C)=0,5$  не всегда дает удовлетворительные результаты. Если для образцов из стали 30ХГСА отношение  $S_{\lg N2}/S_{\lg N1}=1,0035$ , что весьма приемлемо, то для сварных образцов  $S_{\lg N2}/S_{\lg N1}=2,288$ , что совершенно неприемлемо. Здесь  $S_{\lg N1}$  определяли по двум значениям амплитуд напря-

жений при вычисленном коэффициенте  $(1 - C)$ , а  $S_{lg N 2}$  – путем подбора коэффициента  $K$  при коэффициенте  $(1 - C) = 0,5$ . Полученные результаты свидетельствуют, что только в некоторых случаях коэффициент  $(1 - C)$  можно взять равным 0,5, использовать это равенство при обработке данных усталостных испытаний любых объектов представляется нецелесообразным.

Т а б л и ц а 3

**Параметр  $K$  уравнения (1) и средние квадратические отклонения логарифма долговечности  $S_{lg N}$  для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА при  $(1 - C) = 0,5$**

№ уровня напряжений $i$	$\sigma_i$ , МПа	$\bar{N}_i$	$K_i \cdot 10^{-8}$	$S_{lg N}$
1	160	67393	2,204998	0,328363
	590	71147	5,646868	0,250464 *
2	140	147570	2,477510	0,208102 *
	540	159637	5,049583	0,257959
3	120	159637	5,215806	0,227442
	500	296308	6,149757	0,250989
4	100	1014613	6,599218	0,291624
	480	547222	6,548226	0,254839

Т а б л и ц а 4

**Задаваемые значения коэффициента  $K$  и соответствующие им средние квадратические отклонения логарифма долговечности  $S_{lg N}$  для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА при  $(1 - C) = 0,5$**

Образцы	$K \cdot 10^8$	$S_{lg N}$
Сварные	3,47751	0,208102
	3,75	0,2004
	4,0306	0,197983*
	4,25	0,199316
	5,0	0,218992
	5,215806	0,227442
Сталь 30ХГСА	5,64687	0,250463
	5,798	0,250040
	5,845	0,2500159*
	6,0	0,250275
	6,1	0,250703
	6,149757	0,250989

**Описание кривой усталости при неизвестном пределе выносливости  $\sigma_R$ .** Рассмотрим два метода расчета предела выносливости и параметров уравнения (1).

*Первый метод.* Расчетный предел выносливости определяется по трем уровням напряжений и соответствующим им средним долговечностям при неизвестных параметрах  $(1 - C)$  и  $K$ .

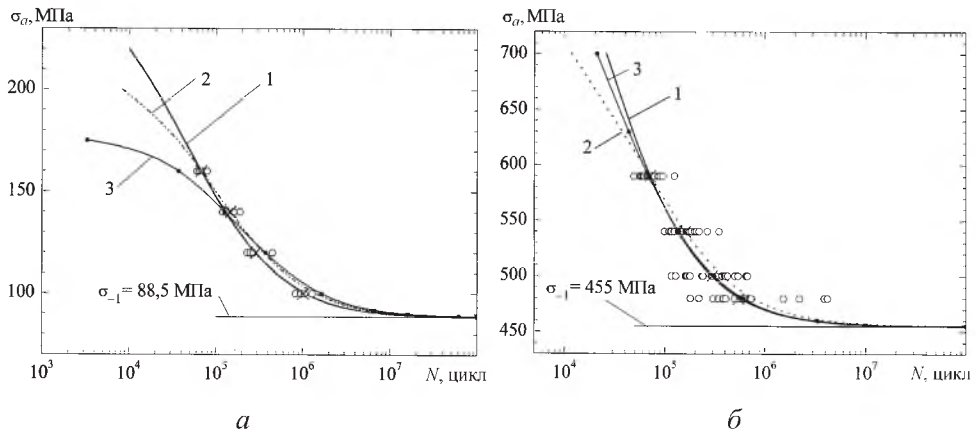


Рис. 1. Кривые усталости сварных образцов (а) и цилиндрических образцов из стали 30ХГСА (б), построенные при двух уровнях напряжений  $\sigma_i$  и соответствующих им средних долговечностях  $\bar{N}_i$  и разном физическом пределе выносливости при неизвестных коэффициентах  $(1-C)$  и  $K$  уравнения (1) и  $(1-C) = 0,5$ ; 1 -  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_3, \bar{N}_3; (S_{lg N})_{\min}$ ; 2 -  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_2, \bar{N}_2; (S_{lg N})_{\max}$ ; 3 -  $(1-C) = 0,5; K$  при  $(S_{lg N})_{\min}$ .

Для определения параметров уравнения (1), в которое входят три неизвестные величины, запишем его относительно коэффициентов  $K_1, K_2$  (уравнения (2) и (3)) и  $K_3$  для трех произвольно выбранных уровней напряжений  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$ :

$$K_3 = \frac{1}{N_3} \left[ \frac{1}{\sigma_3 - \sigma_R} - \frac{1}{\sigma_3(1-C)} \right]. \quad (8)$$

Правые части указанных трех уравнений приравняем друг к другу и после некоторого преобразования запишем их в виде

$$\frac{(1-C)}{\sigma_1 - \sigma_R} = \frac{b_{1,2}(\sigma_2 - \sigma_R)}{a_{1,2} - (\bar{N}_2 - \bar{N}_1)\sigma_R} = \frac{b_{1,3}(\sigma_3 - \sigma_R)}{a_{1,3} - (\bar{N}_3 - \bar{N}_1)}. \quad (9)$$

Если одну правую дробь уравнения (9) приравнять к другой, то получим квадратное уравнение

$$D_{1,2,3}\sigma_R^2 - d_{1,2,3}\sigma_R + e_{1,2,3} = 0, \quad (10)$$

где

$$D_{1,2,3} = b_{1,3}(\bar{N}_2 - \bar{N}_1) - b_{1,2}(\bar{N}_3 - \bar{N}_1); \quad (11)$$

$$d_{1,2,3} = b_{1,3}[a_{1,2} + \sigma_3(\bar{N}_2 - \bar{N}_1)] + b_{1,2}[a_{1,3} + \sigma_2(\bar{N}_3 - \bar{N}_1)]; \quad (12)$$

$$e_{1,2,3} = b_{1,3}a_{1,2}\sigma_3 - b_{1,2}a_{1,3}\sigma_2. \quad (13)$$

Проведенный анализ показывает, что при разных сочетаниях напряжений величина  $e_{1,2,3} = 0$ . Тогда уравнение (10), записанное относительно предела выносливости, имеет вид

$$\sigma_{R_p} = \frac{d_{1,2,3}}{D_{1,2,3}}. \tag{14}$$

После определения расчетного значения предела выносливости по уравнению (14) коэффициенты  $(1 - C)$  и  $K$  вычисляются по уравнениям (5) и (3) соответственно.

При более трех уровнях напряжений расчетное значение предела выносливости следует определять для всех возможных сочетаний напряжений. Результаты проведенных вычислений представлены в табл. 5. За расчетный предел выносливости принимается то значение, при котором  $S_{lg N}$  минимальное.

Т а б л и ц а 5

Расчетные значения пределов выносливости  $\sigma_{-1p}$  и параметры  $(1 - C)$  и  $K$  уравнения (1) кривых усталости, а также средние квадратические отклонения логарифма долговечности  $S_{lg N}$  для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА

№ сочетания напряжений $j$	№ уровня напряжений $i$	$\sigma_{-1p}$ , МПа	Коэффициенты уравнения Гэттса		$S_{lg N}$
			$(1 - C)$	$K \cdot 10^8$	
1	1, 2, 3	$\frac{24,95}{380,14}$	$\frac{0,869822}{0,439812}$	$\frac{0,325095}{1,281084}$	$\frac{0,151225}{0,253971}$
		$\frac{80,58}{432,69}$	$\frac{0,609077}{0,394606}$	$\frac{3,458334}{2,897568}$	$\frac{0,087002}{0,248321^*}$
3	1, 3, 4	$\frac{86,91}{451,45}$	$\frac{0,648999}{0,534679}$	$\frac{6,012826}{5,689331}$	$\frac{0,084580^*}{0,248471}$
		$\frac{89,36}{457,75}$	$\frac{0,935355}{-1,303837}$	$\frac{8,205600}{8,506007}$	$\frac{0,103416}{0,598391}$

Из данных табл. 5 следует, что при минимальных значениях  $S_{lg N}$  пределы выносливости, полученные путем расчета по уравнению (14), меньше, определенных экспериментально, для сварных образцов на 1,8%, для образцов из стали 30ХГСА – на 5,1%. Кривые усталости сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА показаны на рис. 2 и 3.

*Второй метод.* Расчетный предел выносливости определяется методом последовательных приближений при сочетании двух уровней напряжений и соответствующих им средних долговечностях при неизвестных коэффициентах  $(1 - C)$  и  $K$ .

Для каждой пары напряжений находится текущее значение предела выносливости  $\sigma_{R_j}$  путем его последовательного уменьшения, начиная со значения, задаваемого несколько ниже минимального напряжения, при котором

все испытываемые на усталость образцы были разрушены. При каждом заданном пределе выносливости  $\sigma_{R_j}$  и двум уровням напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , при которых были проведены испытания на усталость, вычисляются коэффициенты  $(1-C)_{1,2}$  по зависимости (5) и  $K_{1,2}$  – по зависимостям (2) и (3) соответственно, а также среднее квадратическое отклонение логарифма долговечностей  $S_{lg N}$  для всех образцов. Равенство коэффициентов  $K_1 = K_2$  свидетельствует о достоверности их вычислений. При уменьшении  $\sigma_{R_j}$  значение среднего квадратического отклонения  $S_{lg N}$  уменьшается и по достижении минимума начинает увеличиваться. В качестве примера такие графики для сварных соединений при двух разных напряжениях приведены на рис. 4. За расчетный предел выносливости  $\sigma_{R_j}$  при выбранной паре напряжений принимается то значение, при котором  $S_{lg N}$  минимальное. Результаты подобных вычислений для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА при разных парах напряжений приведены в табл. 6.

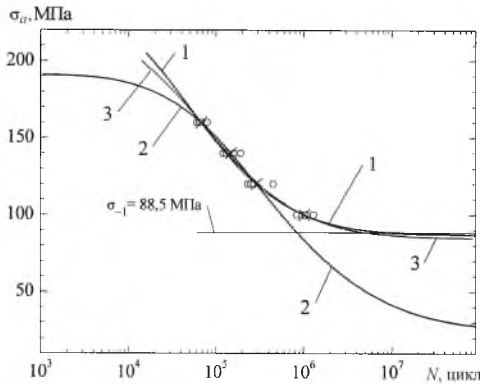


Рис. 2

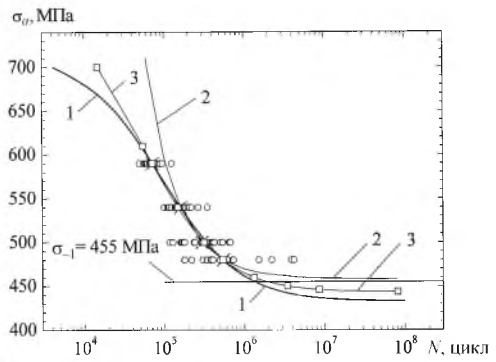


Рис. 3

Рис. 2. Кривые усталости сварных образцов, построенные с использованием трех уровней напряжений  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_3, \bar{N}_3; \sigma_4, \bar{N}_4$  (кривая 1 с минимальным  $S_{lg N}$ ),  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_2, \bar{N}_2; \sigma_3, \bar{N}_3$  (кривая 2 с максимальным  $S_{lg N}$ ) и двух уровней напряжений  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_4, \bar{N}_4$  и  $(1-C) = 0,5$  (кривая 3 с минимальным  $S_{lg N}$ ).

Рис. 3. Кривые усталости образцов из стали 30ХГСА при неизвестном пределе выносливости  $\sigma_R$ , построенные с использованием трех уровней напряжений  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_2, \bar{N}_2; \sigma_4, \bar{N}_4$  (кривая 1 с минимальным  $S_{lg N}$ ),  $\sigma_2, \bar{N}_2; \sigma_3, \bar{N}_3; \sigma_4, \bar{N}_4$  (кривая 2 с максимальным  $S_{lg N}$ ) и двух уровней напряжений  $\sigma_1, \bar{N}_1; \sigma_4, \bar{N}_4$  (кривая 3 с минимальным  $S_{lg N}$ ).

Из данных табл. 6 видно, что расчетные пределы выносливости как сварных образцов, так и образцов из стали 30ХГСА, которым соответствуют минимальные значения  $S_{lg N}$ , получены при одном сочетании напряжений, а именно: при  $j=3$  (табл. 6). Следует отметить, что коэффициент  $(1-C)$  может изменяться в широком диапазоне и принимать отрицательное значение.



Т а б л и ц а 6

Параметры  $(1-C)$  и  $K$  уравнения (1) и средние квадратические отклонения логарифма долговечности  $S_{\lg N}$  для сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА

№ сочетания напряжений $j$	№ уровня напряжений $i$	$\sigma_{R_p}$ , МПа	Коэффициенты уравнения Гэттса		$S_{\lg N}$
			$(1-C)$	$K \cdot 10^8$	
2	1,3	86,6	0,6482477	5,909519	0,084525
		446,9	0,4925271	4,985252	0,248236
3	1,4	84,8	0,625648	4,908872	0,082968 *
		443,2	0,434297	4,08918	0,2474501 *
4	2,3	93,25	-36,23735	1,462864	0,130675
		410,00	0,453853	2,262646	0,253181
5	2,4	82,1	0,621972	3,921499	0,0861603
		435,0	0,409096124	3,1303	0,24820759

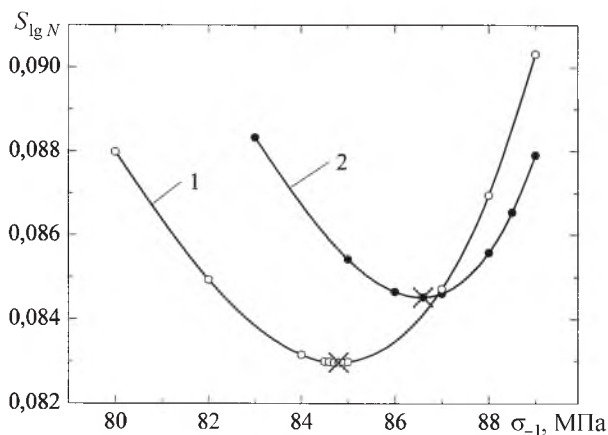


Рис. 4. Изменение среднего квадратического отклонения логарифма долговечности  $S_{\lg N}$  в зависимости от задаваемого значения предела выносливости  $\sigma_{-1i}$  сварных образцов: 1 – при  $j = 3$ ; 2 – при  $j = 2$  (табл. 6).

На основании проведенных исследований можно заключить, что в уравнении Гэттса коэффициент  $(1-C)$  не всегда можно принимать равным 0,5, как это рекомендует автор рассматриваемой функции [1], поскольку этот коэффициент колеблется в довольно большом интервале и может быть даже с отрицательным знаком.

Для оценки эффективности описания кривых усталости сварных образцов и образцов из стали 30ХГСА уравнением Гэттса по сравнению с другими функциями – гиперболической [6], экспоненциальной [7] и степенной [8] приведена табл. 7, в которой функции кривых усталости расположены в порядке возрастания  $S_{\lg N}$  при известном пределе выносливости. Принято, чем меньше  $S_{\lg N}$ , тем эффективнее функция, которая описывает кривую усталости. Из данных табл. 7 следует, что уравнение Гэттса по эффективности занимает третье место среди рассмотренных функций.

Т а б л и ц а 7

**Эффективность описания кривых усталости сварных образцов с пересекающимися швами и образцов из стали 30ХГСА с помощью разных функций**

Объект испытаний на усталость	Функция кривой усталости	$\sigma_R$ , МПа	Задаваемые величины, входящие в уравнение кривой усталости	$\sigma_{R_0}$ , МПа	$S_{lg N}$
Стыковое сварное соединение	Экспоненциальная	–	$\sigma_1, \sigma_4$ ; коэффициент $B$ – методом подбора	88,32	0,0815160*
		88,5	$\sigma_1, \sigma_4$	–	0,081538
	Гиперболическая	–	$\sigma_1, \sigma_4; \sigma_n$ – методом подбора	88,05	0,081611
		88,5	$\sigma_4; \sigma_n$ – методом подбора	–	0,081562
	Уравнение Гэттса	–	$\sigma_1, \sigma_3; \sigma_R$ – методом подбора	84,8	0,082968
		–	$\sigma_1, \sigma_3, \sigma_4$	86,91	0,084558
		88,5	$\sigma_1, \sigma_3$	–	0,086545
	Степенная	–	Метод наименьших квадратов	–	0,088736
	Сталь 30ХГСА	Экспоненциальная	–	$\sigma_1, \sigma_4$ ; коэффициент $B$ – методом подбора	446,26
455			$\sigma_1, \sigma_3$	–	0,248610
Гиперболическая		–	$\sigma_1, \sigma_4; \sigma_n$ – методом подбора	446,03	0,247281
		455	$\sigma_1, \sigma_3$	–	0,248637
Уравнение Гэттса		–	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_4$	432,69	0,248321
		–	$\sigma_1, \sigma_4; \sigma_R$ – методом подбора	443,2	0,247450
		455	$\sigma_1, \sigma_3$	–	0,249134
Степенная		–	Метод наименьших квадратов	–	0,249109

**Примечание.**  $\sigma_n$  – предельное напряжение при малом числе циклов.

Наименьшее значение  $S_{lg N}$  получено при использовании экспоненциальной функции, максимальное – степенной функции. Следует также отметить, что минимальное значение расчетного предела выносливости получено для сварных образцов по гиперболической функции, для образцов из стали 30ХГСА – по уравнению Гэттса, однако наиболее близкое значение к фактическому пределу выносливости получено как для сварных образцов, так и для образцов из стали 30ХГСА по экспоненциальной функции.

## Выводы

1. Показано, что параметр  $(1 - C)$  уравнения кривой усталости Гэттса в общем случае не равен 0,5, как это утверждается Гэттсом.

2. Предложены методы определения параметра  $(1 - C)$  уравнения Гэттса как при известном, так и при неизвестном пределе выносливости.

3. Для определения расчетного предела выносливости по критерию минимального среднего квадратического отклонения логарифма долговечности  $S_{lg N}$  предложены методы последовательных приближений с использованием двух или трех уровней напряжений и соответствующих им средних долговечностях, определенных экспериментально.

4. Установлено, что уравнение кривой усталости (1), параметры которой определены по предложенным методам, обеспечивает более тесную связь с экспериментальными точками по сравнению со степенной функцией, но менее тесную по сравнению с экспоненциальным и гиперболическим уравнениями.

## Резюме

Проаналізовано особливості функції Геттса при опису кривої втоми на прикладі зварного з'єднання конструкційної маловуглецевої сталі і конструкційної легованої сталі 30ХГСА. Показано, що параметр  $(1 - C) = 0,5$  у відомому рівнянні кривої втоми має обмежене використання. Описано спрощені методи розрахунку параметрів рівняння Геттса як при відомій, так і при невідомій фізичній границі витривалості. Для визначення границь витривалості матеріалів і елементів конструкцій запропоновано метод послідовних наближень за результатами випробувань як при двох рівнях напружень і мінімальному середньому квадратичному відхиленню логарифма довговічності, так і при трьох рівнях напружень і відповідних їм середніх довговічностях.

1. Гэттс Р. Р. Применение понятия кумулятивного повреждения к проблеме усталости // Техническая механика: Тр. Амер. о-ва инженеров-механиков. – 1961. – **83D**, № 4. – С. 59 – 73.
2. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
3. РД 50-551-85. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 52 с.
4. Шульгинов Б. С. Определение параметров экспериментальной функции при описании кривой усталости // Пробл. прочности. – 2008. – № 3. – С. 82 – 91.
5. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость. – Введ. 01.01.81.
6. Матвеев В. В. К обоснованию использования деформационных критериев многоциклового усталостного разрушения металлов. Сообщ. 1. Анализ известных подходов // Пробл. прочности. – 1994. – № 5. – С. 11 – 21.
7. Шульгинов Б. С., Матвеев В. В., Коломиец А. П. Об использовании гиперболической функции для описания кривой усталости // Там же. – 2007. – № 4. – С. 77 – 89.
8. Шульгинов Б. С., Коломиец А. П. К вопросу об использовании степенной функции для описания результатов усталостных испытаний // Там же. – 2007. – № 3. – С. 147 – 155.

Поступила 24. 09. 2008