

Об использовании гиперболической функции для описания кривой усталости

Б. С. Шульгинов, В. В. Матвеев, А. П. Коломиец

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

Проанализированы особенности гиперболической функции при ее использовании для описания кривой усталости на примере сварного соединения конструкционной малоуглеродистой стали и конструкционной легированной стали. Показано, что используемый в известном уравнении кривой усталости параметр σ_b в общем случае не соответствует значению предела прочности материала, как это принято считать. Предложены методы расчета параметров гиперболического уравнения кривой усталости как при неизвестном, так и при известном физическом пределе выносливости.

Ключевые слова: гиперболическая функция, предел прочности, предел выносливости, среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности.

В работах [1, 2] для описания кривой усталости материала предлагается использовать следующую гиперболическую зависимость долговечности N от максимального напряжения цикла σ :

$$N = \beta \frac{\sigma_b - \sigma}{\sigma - \sigma_{-1}}, \quad (1)$$

где σ_b – предел прочности; σ_{-1} – предел выносливости; β – коэффициент, численно равный числу циклов N при напряжении $\sigma_\beta = 0,5(\sigma_b + \sigma_{-1})$. В [1] утверждается, что “кривая усталости будет всякий раз однозначно определена, если известны ... временное сопротивление образца σ_b ... и представительные данные по числу циклов до разрушения на двух любых уровнях напряжений”, т.е. рассматривается вариант, когда физический предел выносливости не известен. В этом случае коэффициент β и расчетное значение предела выносливости σ_{-1p} предлагается [1] определять по зависимостям

$$\beta = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)N_1N_2}{(\sigma_b - \sigma_1)N_2 - (\sigma_b - \sigma_2)N_1}; \quad (2)$$

$$\sigma_{-1p} = \sigma_1 - \frac{\beta}{N_1}(\sigma_b - \sigma_1) = \sigma_2 - \frac{\beta}{N_2}(\sigma_b - \sigma_2), \quad (3)$$

где σ_1 и σ_2 – произвольно выбранные напряжения при условии, что $\sigma_1 > \sigma_2$; N_1 и N_2 – соответствующие им долговечности, определяемые по кривой усталости, построенной методом графического интерполирования экспериментальных результатов.

Для проверки этой методики использовали результаты испытаний на усталость двух типов образцов. К первому типу образцов относятся плоские сварные образцы с пересекающимися швами из малоуглеродистой стали толщиной 12 мм. При этом предел прочности основного металла $\sigma_B = 549$ МПа; физический предел выносливости сварного соединения $\sigma_{-1} = 88,5$ МПа [3]. Шестнадцать таких образцов испытывали в условиях плоского симметричного изгиба, по четыре образца на каждом из четырех уровней напряжений σ_j (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Результаты испытаний на усталость сварных образцов с пересекающимися швами (над чертой) и цилиндрических образцов из стали 30ХГСА (под чертой)

№ уровня напряжений i	m_i	σ_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: m_i – количество образцов.

Второй тип образцов – это стандартные цилиндрические образцы из стали 30ХГСА диаметром 8 мм; предел прочности стали $\sigma_B = 952$ МПа, физический предел выносливости образцов $\sigma_{-1} = 455$ МПа. Восемьдесят четыре таких образца испытывали при изгибе с вращением на четырех уровнях напряжений в Институте механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины М. Э. Гарф и О. Ю. Крамаренко. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Построение кривой усталости методом графического интерполирования зависит от оператора, что не обеспечивает высокой точности определения циклической долговечности. Чтобы избежать этого, для обоих типов образцов определяли средние значения долговечностей \bar{N}_i на каждом i -ом уровне напряжений. При проведении необходимых вычислений все уровни напряжений σ_j группировали по парам (табл. 2).

Для каждого j -го сочетания двух напряжений определяли коэффициент β_j и расчетный предел выносливости σ_{-1j} сварных образцов и стали 30ХГСА по формулам (2) и (3) соответственно с использованием их предела прочности. Значения коэффициента β_j и расчетного предела выносливости σ_{-1j} , вычисленные для разных сочетаний напряжений, приведены в табл. 2.

По полученным параметрам для каждой j -й пары напряжений по уравнению (1) строили кривые усталости, некоторые из которых для сварных образцов и стали 30ХГСА представлены на рис. 1. В табл. 2 для каждого сочетания напряжений приведены средние квадратические отклонения логарифмов

рифмов долговечностей $S_{lg N}$ всех образцов от соответствующих кривых усталости, вычисленные по ГОСТ 25.502-79 [4], а также относительные погрешности δ_j расчетных предел выносливости сварных образцов и стали 30ХГСА, определенные по зависимости

$$\delta_j = \frac{\sigma_{-1j} - \sigma_{-1}}{\sigma_{-1}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Из рис. 1 и данных табл. 2 видно, что выбор определенной пары напряжений при заданном пределе прочности σ_B может существенно влиять на параметры уравнения кривой усталости, т.е. на коэффициент β_j и на расчетный предел выносливости σ_{-1j} , а следовательно, и на положение кривой усталости, что противоречит выводу о возможности использования “двух любых уровней напряжений” для однозначного определения кривой усталости [1].

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициента β_j , расчетного предела выносливости σ_{-1j} , его относительной погрешности δ_j и среднего квадратического отклонения логарифма долговечности $S_{lg N}$ для сварных образцов с пересекающимися швами (над чертой) и стали 30ХГСА (под чертой)

№ сочетания напряжений j	№ уровня напряжений i	β_j	σ_{-1j} , МПа	$S_{lg N}$	δ_j , %
1	1	6665	121,5	—	37,29
	2	19943	488,5	—	7,36
2	1	9328	106,2	—	20,00
	3	25262	461,5	0,25217	1,43
3	1	11258	95,0	0,14270	7,34
	4	26032	457,5	0,25089	0,55
4	2	15532	97,0	0,21142	9,60
	3	37900	422,2	0,25376	−2,81
5	2	17175	92,4	(0,11675)	4,41
	4	34918	449,9	0,25113	−1,12
6	3	19206	91,5	0,13325	(3,39)
	4	30170	454,0	(0,24845)	(−0,22)

Примечание: Здесь и в табл. 4–6 в скобках приведены наименьшие значения $S_{lg N}$ и δ_j .

Можно отметить две причины неудачного построения кривой усталости по предложенной в [1] методике. Во-первых, необоснованность использования в уравнении (1) предела прочности и, во-вторых, произвольный выбор пары напряжений. Исходя из общих соображений можно предположить, что зависимость (1) вряд ли может описывать полную кривую усталости в диапазоне напряжений от предела прочности до предела выносливости при любых коэффициентах асимметрии цикла напряжений, особенно при симметричном цикле в условиях изгиба. Возможно, что кривая усталости может

быть описана зависимостью (1), где σ_B – предел прочности, если экспериментальные результаты получены, например, при отнулевом цикле напряжений. Заметим, что в [1] приведены результаты испытаний на усталость пластин из нержавеющей стали 347 именно при отнулевом цикле напряжений в условиях растяжения [5]. Относительно выбора пары напряжений отметим, что ранее [6] было установлено: наименьшая погрешность расчетного предела выносливости имеет место при наибольшей близости одной из двух выбираемых точек к фактическому пределу выносливости (см. данные при сочетании напряжений $j = 6$ в табл. 2).

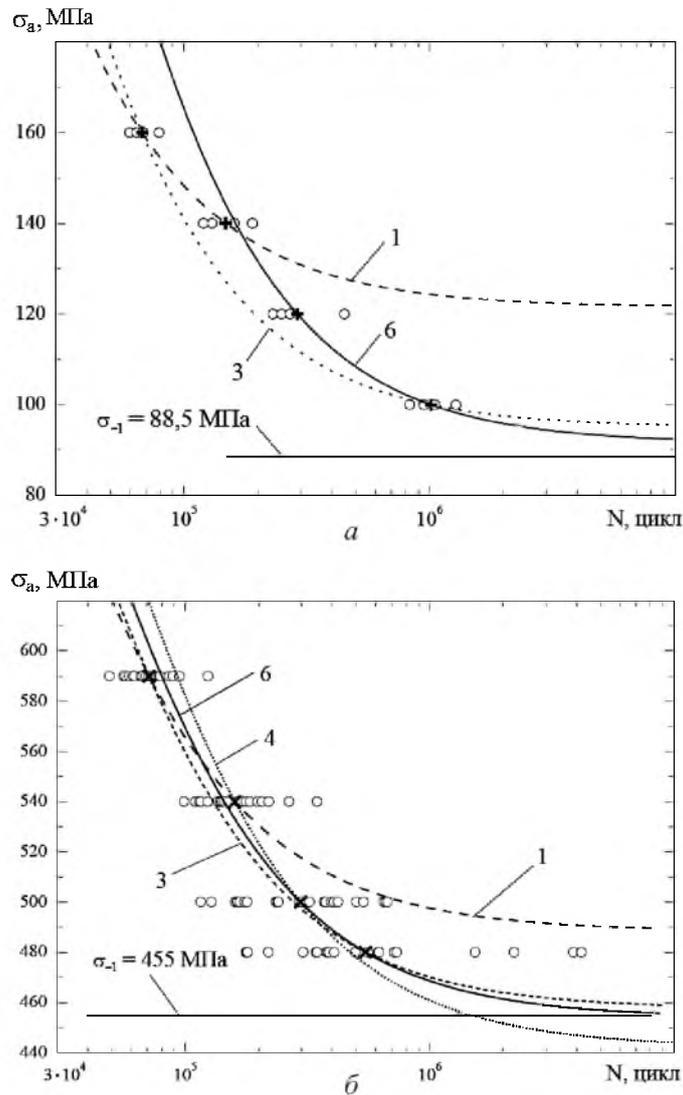


Рис. 1. Кривые усталости сварных образцов (а) и стали 30ХГСА (б), построенные с использованием предела прочности основного металла (светлые точки – долговечности индивидуальных образцов, полученные экспериментально, крестики – их средние значения \bar{N}_i при каждом уровне напряжений, табл. 1). (Здесь и на рис. 2, 5–8 номера кривых соответствуют номерам сочетания напряжений в табл. 2.)

Таким образом, использование предела прочности материала при определении параметров уравнения (1) не имеет достаточного обоснования и не может быть рекомендовано при любых коэффициентах асимметрии цикла, особенно при симметричном цикле нагружения. Поэтому были рассмотрены также другие методы определения параметров зависимости (1). Эти методы зависят от условия, известен ли физический предел выносливости или нет.

Описание кривой усталости при неизвестном физическом пределе выносливости. Рассмотрим следующие два метода расчета параметров уравнения (1).

Первый метод. Примем, что в уравнении (1) величина σ_v не равна пределу прочности, а является некоторой константой, значение которой подлежит определению. Это напряжение назовем предельным и обозначим $\sigma_{\text{п}}$. При разных значениях $\sigma_{\text{п}}$ и заданных двух амплитудах напряжений цикла σ_1 и σ_2 (наибольшая и наименьшая амплитуды соответственно в выборке результатов испытаний на усталость), а также соответствующих им средних долговечностях \bar{N}_1 и \bar{N}_2 можно определить константу $\beta_{\text{п}}$ и расчетный предел выносливости $\sigma_{-1\text{п}}$ по зависимостям (2) и (3) соответственно, заменив σ_v величиной $\sigma_{\text{п}}$, и найти теоретическую зависимость долговечности N_i от амплитуды напряжения σ_i . Начальное значение $\sigma_{\text{п}}$ может быть равно σ_v , а затем оно постепенно уменьшается с каким-либо выбранным интервалом. Вычисления показали, что с уменьшением $\sigma_{\text{п}}$ вначале наблюдается уменьшение среднего квадратического отклонения $S_{\lg N}$ до минимального значения, а затем – его увеличение. За оптимальное значение предельного напряжения $\sigma_{\text{п}}$ принимается такое, при котором среднее квадратическое отклонение $S_{\lg N}$ будет минимальным. (Минимальным $S_{\lg N}$ может служить значение, которое определено при изменении $\sigma_{\text{п}}$ с шагом не более 1 МПа.) Оптимальное значение $\sigma_{\text{п}}$ получено для сочетания напряжений $j=3$, т.е. при $\sigma_1=160$ МПа, $\sigma_2=100$ МПа для сварных образцов и $\sigma_1=590$ МПа, $\sigma_2=480$ МПа для стали 30ХГСА.

Некоторые из значений $\sigma_{\text{п}}$ приведены в табл. 3, а соответствующие им кривые усталости – на рис. 2. В табл. 3 представлены также данные, полученные при $\sigma_{-1\text{п}}$, равном физическому пределу выносливости; оптимальные предельные напряжения $\sigma_{\text{п}}$ и соответствующие им параметры кривых усталости приведены в скобках. Очевидно, что оптимальные напряжения как для сварных образцов, так и для стали 30ХГСА существенно отличаются от предела прочности.

Из рис. 2 видно, что все кривые усталости, полученные при двух амплитудах напряжений цикла (максимальной и минимальной в рассматриваемой выборке) и разных предельных напряжениях $\sigma_{\text{п}}$, пересекаются в двух точках, которые соответствуют выбранным напряжениям цикла, но имеют разную кривизну. Это позволяет, изменяя $\sigma_{\text{п}}$, найти такую кривую усталости, которая обеспечивала бы минимальное для рассматриваемого метода среднее квадратическое отклонение экспериментальных точек от расчетной кривой. Это означает, что предельное напряжение $\sigma_{\text{п}}$ как параметр уравнения (1) может значительно изменяться, а его равенство пределу прочности материала может быть только частным случаем.

Т а б л и ц а 3

Параметры уравнения (1) кривых усталости σ_p , β_p , σ_{-1p} ,
а также средние квадратические отклонения логарифма долговечности $S_{\lg N}$
и относительная погрешность δ_p расчетного предела выносливости
для сварных образцов (над чертой) и стали 30ХГСА (под чертой)

№ п/п	σ_p , МПа	β_p , цикл	σ_{-1p} , МПа	$S_{\lg N}$, МПа	δ_p , %
1	549,0	11258	95,02	0,14268	7,37
	952,0	26032	457,55	0,25085	0,56
2	202,2	114188	88,50	0,08171	0
	849,1	37071	455,00	0,24919	0
3	(200,0)	(121219)	(88,05)	(0,08161)	-0,51
	(725,0)	(75874)	(446,03)	(0,24728)	-1,97
4	180,0	275332	78,29	0,11311	-11,54
	650,0	206509	415,85	0,25334	-8,60

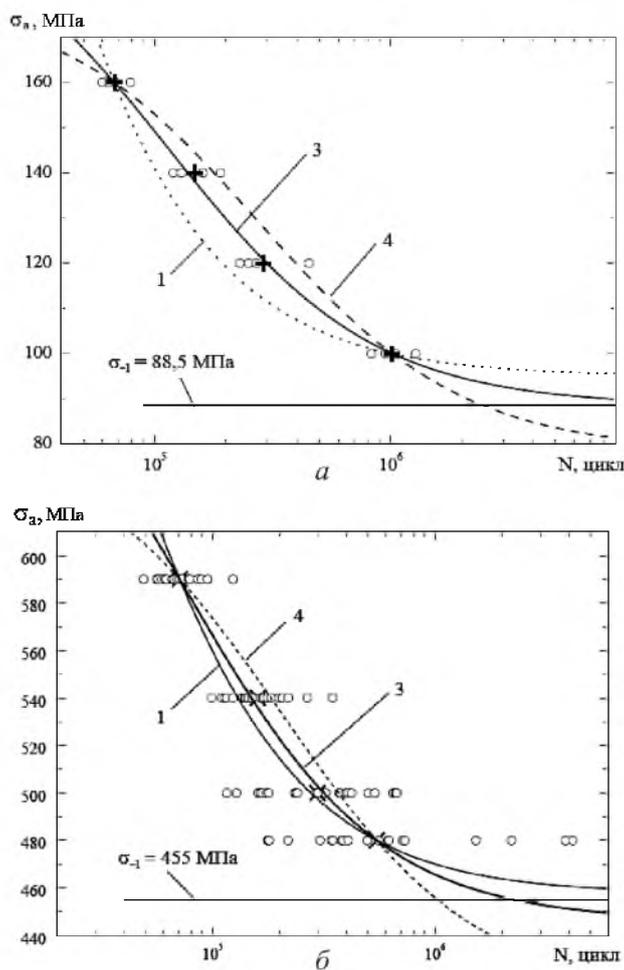


Рис. 2. Кривые усталости сварных образцов (а) и стали 30ХГСА (б), построенные с использованием предельного напряжения σ_p . (Номера кривых соответствуют порядковым номерам в табл. 3.)

Анализ данных табл. 3 и рис. 2 дает основание утверждать.

1. Кривые усталости сварных образцов и стали 30ХГСА (на рис. 2 кривые 3) при оптимальных предельных напряжениях $\sigma_{\text{п}} = 200$ и 725 МПа соответственно при рассматриваемой функциональной зависимости N от σ наиболее близко расположены к индивидуальным точкам с относительной погрешностью расчетного предела выносливости $\delta_{\text{п}} = -0,51\%$ для сварных образцов и $\delta_{\text{п}} = -1,97\%$ для стали 30ХГСА, что значительно меньше допускаемой [4].

2. Значение предельного напряжения $\sigma_{\text{п}}$, при котором расчетный предел выносливости равен физическому, может значительно отличаться от оптимального (табл. 3).

Анализ предложенного метода определения кривой усталости с использованием гиперболической функции (1) с оптимальным предельным напряжением $\sigma_{\text{п}}$ при наличии двух представительных данных по средним долговечностям при соответствующих двух крайних (максимальное и минимальное) напряжениях выборки показал, что с помощью этой зависимости можно аппроксимировать результаты усталостных испытаний лучше, чем с помощью функции (1) с пределом прочности $\sigma_{\text{в}}$.

Второй метод. Предельное напряжение $\sigma_{\text{п}j}$ можно определить по какому-либо j -у сочетанию трех произвольно выбранных уровней амплитуд напряжений σ_{j1} , σ_{j2} , σ_{j3} и соответствующих им средних значений долговечностей \bar{N}_{j1} , \bar{N}_{j2} и \bar{N}_{j3} по зависимости

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{п}j} = & [(\sigma_{j1}\bar{N}_{j3} - \sigma_{j3}\bar{N}_{j1})(\sigma_{j2} - \sigma_{j3})\bar{N}_{j2} - \\ & - (\sigma_{j2}\bar{N}_{j3} - \sigma_{j3}\bar{N}_{j2})(\sigma_{j1} - \sigma_{j3})\bar{N}_{j1}] \times \\ & \times [(\bar{N}_{j3} - \bar{N}_{j1})(\sigma_{j2} - \sigma_{j3})\bar{N}_{j2} - (\bar{N}_{j3} - \bar{N}_{j2})(\sigma_{j1} - \sigma_{j3})\bar{N}_{j1}]^{-1}, \quad (5) \end{aligned}$$

где σ_{j1} , σ_{j2} и σ_{j3} – напряжения при трех произвольно выбранных из табл. 1 уровнях напряжений для j -го сочетания напряжений при условии $\sigma_{j1} > \sigma_{j2} > \sigma_{j3}$; \bar{N}_{j1} , \bar{N}_{j2} и \bar{N}_{j3} – средние долговечности образцов при соответствующих напряжениях.

Для проведения необходимых вычислений все уровни напряжений σ_i , значения которых приведены в табл. 1, группировали по трем уровням. Для сварных образцов и стали 30ХГСА в табл. 4 представлены четыре номера сочетания напряжений j по три напряжения в каждом. При вычисленном по (5) значении $\sigma_{\text{п}j}$ коэффициент $\beta_{\text{п}j}$ и расчетное значение предела выносливости σ_{-1j} определяются по зависимостям (2) и (3) соответственно, в которых значения двух напряжений и соответствующих им средних долговечностей выбираются из числа тех, которые использовались при вычислении предельного напряжения $\sigma_{\text{п}j}$ по зависимости (5).

Для каждого сочетания напряжений (табл. 4) определены предельные напряжения $\sigma_{\text{п}j}$, коэффициенты $\beta_{\text{п}j}$ и расчетные пределы выносливости σ_{-1j} , на основании которых построены кривые усталости сварных образцов и стали 30ХГСА (рис. 3) и найдены средние квадратические отклонения логарифмов долговечностей $S_{\lg N}$ и относительные погрешности расчет-

ных пределов выносливости δ_j . Отметим, что при некотором сочетании напряжений ($j = 4$, табл. 4) предельное напряжение $\sigma_{пj}$ и коэффициент $\beta_{пj}$ могут иметь отрицательные значения для стали 30ХГСА. Однако и в этом случае возможно построение кривой усталости (на рис. 3,б кривая 4). Из рис. 3 и данных табл. 4 следует:

а) для сварных образцов кривая усталости 3 (рис. 3,а), соответствующая сочетанию напряжений $j = 3$, имеет наименьшее среднее квадратическое отклонение, которое несколько больше минимального $S_{lg N}$, полученного по первому методу. Для этого же сочетания напряжений наблюдается наименьшая относительная погрешность расчетного предела выносливости;

б) для стали 30ХГСА кривая усталости 2 (рис. 3,б), соответствующая сочетанию напряжений $j = 2$, имеет наименьшее среднее квадратическое отклонение $S_{lg N} = 0,248$, которое несколько больше минимального, полученного по первому методу ($S_{lg N} = 0,24728$). Наименьшая относительная погрешность расчетного предела выносливости наблюдается для кривой 4 (сочетание напряжений $j = 4$).

Т а б л и ц а 4

Параметры уравнения (1) кривых усталости $\sigma_{пj}$, $\beta_{пj}$, σ_{-1j} , определенные по трем напряжениям σ_i и соответствующим им средним долговечностям N_i , а также средние квадратические отклонения логарифма долговечности $S_{lg N}$ и относительная погрешность δ_j расчетного предела выносливости для сварных образцов (над чертой) и стали 30ХГСА (под чертой)

№ сочетания напряжений j	№ уровня напряжений i	$\sigma_{пj}$, МПа	$\beta_{пj}$	σ_{-1j} , МПа	$S_{lg N}$	δ_j , %
1	1	188,0	222306	67,7	0,13773	-23,500
	2	667,8	170806	403,3	0,25332	-11,360
	3					
2	1	193,6	147540	86,4	0,08369	-2,370
	2	689,3	108505	438,5	(0,24800)	-3,630
	4					
3	1	206,1	103448	89,2	(0,08256)	(0,790)
	3	796,1	47436	452,6	0,24820	-0,527
	4					
4	2	257,2	62580	90,3	0,09782	2,030
	3	-363,3	-14572	457,3	0,25775	(0,505)
	4					

Анализ данных табл. 4 показал, что параметры кривых усталости сварных образцов и стали 30ХГСА, имеющих наименьшие $S_{lg N}$ и δ_j , получены при сочетании трех амплитуд напряжений: максимальном, минимальном и любом промежуточном. Среднее напряжение из трех, при котором $S_{lg N}$ и δ_j будут наименьшими, может быть разным.

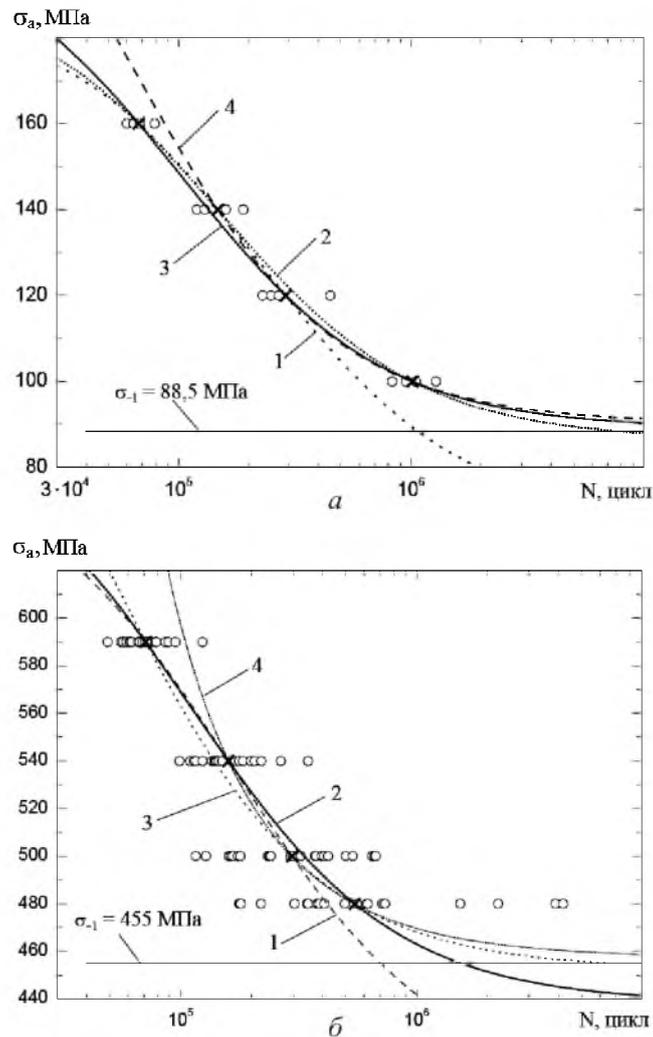


Рис. 3. Кривые усталости сварных образцов (а) и стали 30ХГСА (б), построенные с использованием трех уровней напряжений. (Номера кривых соответствуют номерам сочетаний напряжений в табл. 4.)

Описание кривой усталости при физическом (известном) пределе выносливости. Метод расчета параметров уравнения (1) при известном физическом пределе выносливости σ_{-1} , пределе прочности σ_b , одном из нескольких уровней напряжений σ_i и соответствующем ему среднем числе циклов до разрушения \bar{N}_i не рассматривается, поскольку выше было показано, что предел прочности не может быть использован при любых значениях асимметрии цикла напряжений. Рассматривается следующий метод определения параметров уравнения (1) при известном пределе выносливости.

Третий метод. Примем, что известны предел выносливости σ_{-1} , два любых уровня напряжений σ_1 и σ_2 и соответствующие им средние числа циклов до разрушения \bar{N}_1 и \bar{N}_2 (табл. 1). В этом случае предельное напряжение σ_{ij} при выбранном сочетании напряжений j можно определить по формуле

$$\sigma_{ij} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_{-1})\sigma_1 \bar{N}_2 - (\sigma_1 - \sigma_{-1})\sigma_2 \bar{N}_1}{(\sigma_2 - \sigma_{-1})\bar{N}_2 - (\sigma_1 - \sigma_{-1})\bar{N}_1}, \quad (6)$$

а коэффициент β_j – по формуле

$$\beta_j = \frac{(\sigma_1 - \sigma_{-1})\bar{N}_1}{\sigma_{ij} - \sigma_1} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_{-1})\bar{N}_2}{\sigma_{ij} - \sigma_2}. \quad (7)$$

Эти же параметры гиперболического уравнения кривой усталости можно определить по зависимостям, которые требуют несколько меньшего объема вычислений:

$$\beta_j = \frac{(\sigma_2 - \sigma_{-1})\bar{N}_2 - (\sigma_1 - \sigma_{-1})\bar{N}_1}{\sigma_1 - \sigma_2}, \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_1 + \frac{(\sigma_1 - \sigma_{-1})\bar{N}_1}{\beta_j} = \sigma_2 + \frac{(\sigma_2 - \sigma_{-1})\bar{N}_2}{\beta_j}. \quad (9)$$

Расчеты по формулам (6), (7) или по формулам (8), (9), в которых непосредственно используется значение физического предела выносливости σ_{-1} , дают одинаковые результаты (табл. 5). Кривые усталости строили по зависимости (1), где вместо σ_b и β использовали σ_{ij} и β_j соответственно. Некоторые кривые усталости сварных образцов и стали 30ХГСА, соответствующие разным сочетаниям напряжений, приведены на рис. 4. С помощью рассматриваемого метода минимальное значение $S_{lg N}$ получено для кривой усталости 3 (напряжения σ_1 и σ_4) сварных образцов (рис. 4,а) и кривой усталости 2 (напряжения σ_1 и σ_3) стали 30ХГСА (рис. 4,б).

Т а б л и ц а 5

Параметры уравнения (1) кривых усталости σ_{ij} и β_j , а также средние квадратические отклонения логарифма долговечности $S_{lg N}$ для сварных образцов с пересекающимися швами (над чертой) и стали 30ХГСА (под чертой)

№ сочетания напряжений j	№ уровня напряжений i	σ_{ij} , МПа	β_j	$S_{lg N}$
1	1; 2	194,65	139063	0,088946791
		711,14	79286	0,260070151
2	1; 3	204,95	107208	0,082716782
		821,81	41434	(0,248637142)
3	1; 4	202,21	114158	(0,081715552)
		849,23	37052	0,249198446
4	2; 3	240,86	75354	0,097140778
		-1766,84	-5882	0,256702810
5	2; 4	214,72	101705	0,086874175
		7848,01	1857	0,255169614
6	3; 4	191,12	128256	0,095770027
		1269,21	17335	0,250039391

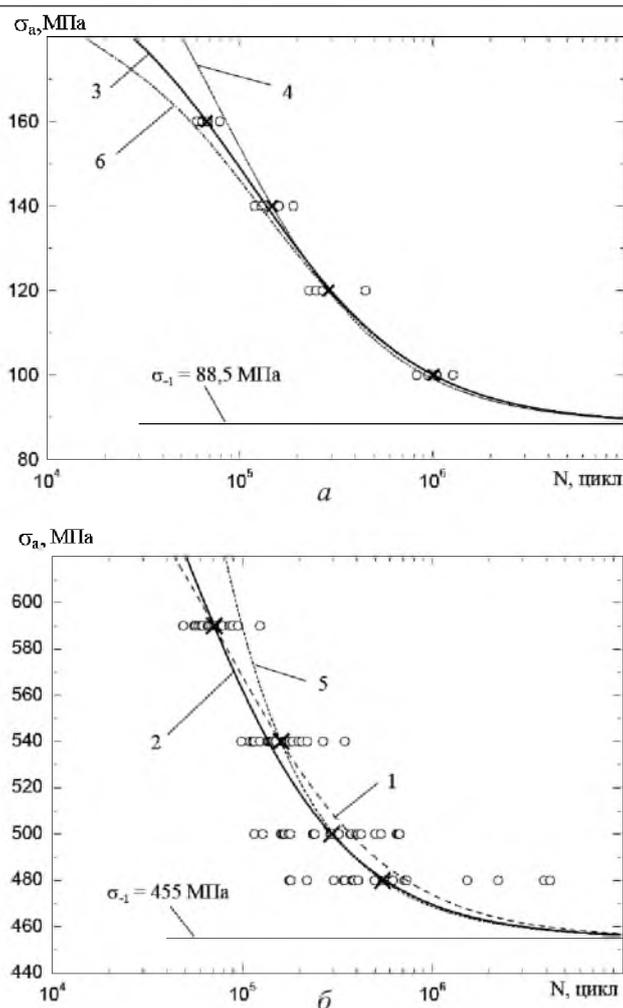


Рис. 4. Кривые усталости сварных образцов (а) и стали 30ХГСА (б), построенные с использованием предела выносливости. (Номера кривых соответствуют номерам сочетания напряжений в табл. 5.)

Для сравнения результаты расчетов по предложенным методам сведены в табл. 6, где для каждого из них приведены наименьшие значения средних квадратических отклонений $S_{lg N}$ и соответствующие им значения относительных погрешностей расчетных пределов выносливости δ_j . Минимальное среднее квадратическое отклонение $S_{lg N}$ как для сварных образцов, так и для стали 30ХГСА при неизвестном пределе выносливости получено с помощью первого метода расчета, т.е. при использовании оптимизированного предельного напряжения σ_{II} . Для сварных образцов и для стали 30ХГСА различие между значениями $S_{lg N}$, полученными по второму и первому методам расчета, наблюдается только в третьем знаке после запятой. Большее различие между $S_{lg N}$ имеет место при оценке расчетного предела выносливости по этим методам, однако во всех приведенных в табл. 6 случаях относительная погрешность не превышала 5%, что допускается нормативным документом [4].

Т а б л и ц а 6

Наименьшие отклонения расчетных пределов выносливости от физических и наименьшие средние квадратические отклонения логарифмов долговечности для сварных образцов и стали 30ХГСА

Метод расчета	№ рисунка	Способ расчета	Сварной образец		Сталь 30ХГСА	
			$S_{lg N}$	$\delta_j, \%$	$S_{lg N}$	$\delta_j, \%$
Гиперболическая функция						
[2]	1	σ_b и два оптимальных уровня напряжений	0,11675	4,41	0,24845	(-0,22)
Первый	2	Оптимальное σ_n и два крайних уровня напряжений	(0,08161)	(-0,51)	(0,24728)	-1,97
Второй	3	Три оптимальных уровня напряжений	0,08256	0,79	0,24800	-3,63
Третий	4	Предел выносливости σ_{-1} и два оптимальных уровня напряжений	(0,08171)	-	(0,24864)	-
Степенная функция			0,08874		0,24911	

Отметим, что при всех предложенных методах расчета средние квадратические отклонения $S_{lg N}$ как для сварных образцов, так и для стали 30ХГСА несколько меньше, определенных для аналогичных кривых усталости, описанных степенной функцией [7]. Это свидетельствует о том, что некоторые результаты усталостных испытаний иногда целесообразнее описывать не степенной функцией, как обычно, а гиперболической.

Выводы

1. Показано, что величина σ_b , используемая в известной гиперболической зависимости для описания кривой усталости, в общем случае не соответствует пределу прочности материала исследуемого объекта, а использование двух любых уровней напряжений и соответствующих им долговечностей для определения параметров уравнения кривой усталости не обеспечивает оптимальное значение этих параметров.

2. Предложены два метода определения параметров гиперболического уравнения кривой усталости при неизвестном пределе выносливости и один – при известном пределе выносливости.

3. Установлено, что уравнение кривой усталости (1), параметры которой определены по предложенным методам, обеспечивает более тесную связь с экспериментальными точками, чем степенная функция.

Резюме

Проаналізовано особливості гіперболічної функції при її використанні для опису кривої втоми на прикладі зварного з'єднання конструкційної малоуглецевої сталі і конструкційної легованої сталі. Показано, що параметр

σ_B , який використовується у рівнянні кривої втоми у загальному випадку, не відповідає значенню тимчасового опору матеріалу, як це прийнято вважати. Запропоновано методи розрахунку параметрів гіперболічного рівняння кривої втоми як при невідомій, так і при відомій фізичній границі витривалості.

1. Колесин Ю. В. Гиперболическая аппроксимация и преобразование кривой усталости // Вест. ВНИИЖТ. – 1987. – № 2. – С. 27 – 31.
2. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М.: ВНИИЖТ, 1998. – 145 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. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний материалов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 01.01.81.
5. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машгиз, 1963. – 451 с.
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., Коломиец А. П. К вопросу об использовании степенной функции для описания результатов усталостных испытаний // Пробл. прочности. – 2007. – № 3. – С. 147 – 155.

Поступила 05. 12. 2005