



# ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **И. Ю. РОМАНОВА**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены вопросы вероятностного определения сопротивляемости сварных соединений усталостному разрушению при многоциклового усталости. Проведен анализ вероятности безотказной работы соединений для различных типов приложенных нагрузок при изменяющихся величинах.

*Ключевые слова:* сварные соединения, циклическое нагружение, многоцикловая усталость, сопротивляемость усталости, вероятностные методы прогнозирования, безопасная эксплуатация

В последние годы возрастает интерес к вероятностным методам оценки наступления предельного состояния сварных соединений при различных нагрузках, что в значительной степени связано с большим количеством факторов, имеющих место в зоне соединения и влияющих на наступление предельного состояния. Это особенно актуально при переменных нагрузках и усталостных разрушениях сварных соединений. Наличие множества факторов, трудно поддающихся детерминированному описанию, обуславливает достаточно большие разбросы при испытаниях на усталость сварных соединений.

Использование стохастических методов расчета на усталость сварных соединений требует четких представлений относительно вероятностных характеристик сопротивляемости сварных соединений различных конструкционных материалов усталостным разрушениям. Такие характеристики для отдельных сварных соединений и материалов (в основном конструкционных сталей) в виде размаха изменения нормальных номинальных напряжений  $\Delta\sigma$  и вероятности разрушения получены экспериментальным путем [1–3] и др.

Работы Международного института сварки (МИС) [4], посвященные многоциклового усталости различных типов сварных соединений конструкционных сталей ферритно-перлитного класса прочностью до 900 МПа, показали, что при вероятности отказа  $Q_B = 5 \cdot 10^{-2}$  (вероятность неразрушения  $9,5 \cdot 10^{-1}$ ) сопротивляемость усталостному разрушению достаточно надежно описывается с помощью минимальных размахов номинальных напряжений  $FAT$  на базе  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл. При этом допускаемые размахи при регулярном

циклическом нагружении определяются зависимостью [4]

$$[\Delta\sigma] = FAT \frac{f_1(N)f_2(R)}{\gamma_m f_3(\delta)}, \quad (1)$$

где  $f_1(N)$ ,  $f_2(R)$ ,  $f_3(\delta)$  — соответственно поправки на долговечность  $N$ , асимметрию цикла  $R$ , свариваемую толщину изделия  $\delta$  (при  $N < 2 \cdot 10^6$  цикл,  $R \geq 0,5$  и  $\delta > 25$  мм каждая из этих поправок имеет значение больше 1,0);  $\gamma_m$  — фактор безопасности, равный 1,0...1,4, т. е. при  $f_1 = f_2 = f_3 = 1$  и  $\gamma_m = 1$  вероятность отказа гарантируется на уровне приблизительно 0,05.

Естественно, что при  $\gamma_m > 1$  безопасность возрастает, а вероятность отказа в результате усталостного разрушения резко снижается.

С учетом рекомендаций МИСа [4] представляет большой интерес для практики дополнить их данными о вероятности разрушения при различных значениях  $FAT$  и классов соединений  $K_x$  в зависимости от требуемой долговечности  $N$  и уровня нагрузки  $\Delta\sigma$ . С этой целью можно использовать уже опубликованные экспериментальные результаты относительно вероятности разрушения различных типов сварных соединений, связав эти данные с рекомендациями работы [4]. Поиск соответствующих опубликованных данных привел к созданию в 1987 г. шведской фирмой «Svenskt stal» руководства по проектированию (расчету на прочность) сварных узлов из высокопрочных (EHS) и абразивостойких (AR) сталей для оборудования типа экскаваторов, самосвалов, шахтного, лесоповального оборудования и др. [5]. Стали (особенно типа EHS) вполне соответствуют таковым в работе [4], набор сварных соединений в [5] также соответствует таковым в [4], однако при этом используют иную классификацию, при которой класс соединения определяется отношением  $K_x = 315/\sigma_r$ , где  $\sigma_r$  — максимальное нап-

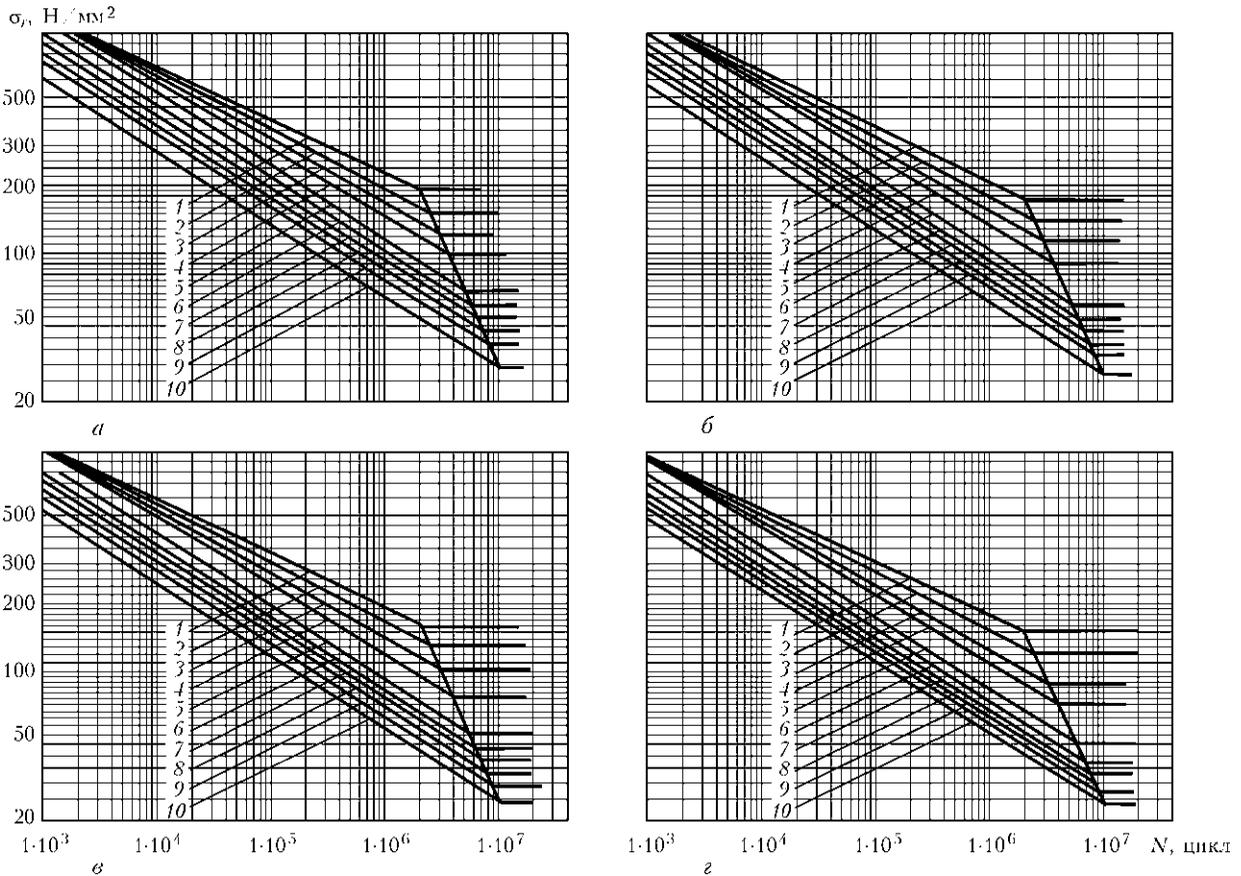


Рис. 1. Экспериментальные данные [5] по сопротивлению усталости сварных соединений различных типов при вероятности  $Q_B = 1 \cdot 10^{-2}$  (а),  $1 \cdot 10^{-3}$  (б),  $1 \cdot 10^{-4}$  (в),  $1 \cdot 10^{-5}$  (г) и  $K_x = 1,3$  (1), 1,5 (2), 1,7 (3), 2,0 (4), 2,3 (5), 2,6 (6), 3,0 (7), 3,5 (8), 4,0 (9), 5,0 (10)

ряжение при  $R = 0$ , т. е.  $\sigma_r \approx \Delta\sigma$ . На рис. 1 и в табл. 1 приведены данные о различных значениях вероятностей отказа  $Q_B$ ,  $K_x$ , долговечности  $N$ ,  $\sigma_r = \Delta\sigma$  при  $R = 0$ , что соответствует

$$\sigma_r = FAT f_2(R) f_4(Q_B), \quad (2)$$

где  $f_2$  — поправка на коэффициент асимметрии цикла  $R$  по [4] при  $R = 0$   $f_2(R) = 1,2$ ;  $f_4(Q_B)$  — поправка, связанная с вероятностью  $Q_B$ , отличной от 0,05, соответствующей  $FAT$  по [4].

Для описания  $Q_B$  предлагаю использовать трехпараметрический закон Вейбулла в виде

$$Q_B = \left( \frac{\Delta\sigma - A}{B} \right)^\eta, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma > A$  (здесь  $A, B, \eta$  — параметры этого закона, зависящие от  $K_x$  (либо  $FAT$ ) и  $N$ . Их можно определить с помощью данных табл. 1. Достаточно хорошее согласование получено при  $\eta = 4$ . Расчеты значений  $A$  и  $B$  в зависимости от долговечности  $N$  и класса соединения  $FAT$  представлены на рис. 2.

Покажем степень согласованности расчета  $Q_B$  по (2) с экспериментальными данными табл. 1,

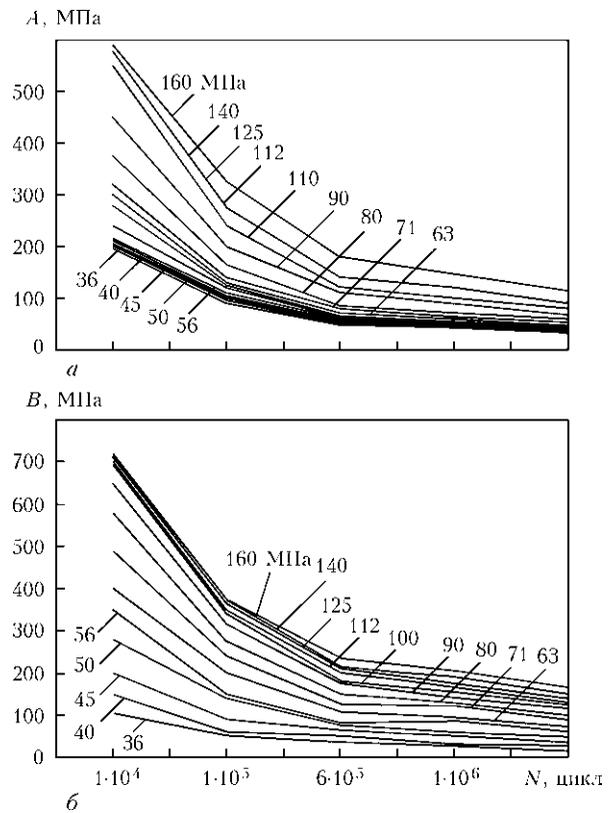


Рис. 2. Зависимость параметров уравнения Вейбулла  $A$  (а) и  $B$  (б) от долговечности  $N$  и класса соединения от 36 до 160 МПа



Таблица 1. Максимальное напряжение  $\sigma_r$  (Н/мм<sup>2</sup>) по данным работы [5]

N, цикл	$K_x$									
	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,5	4,0	5,0
$Q_B = 1 \cdot 10^{-2}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	900	900	900	800	720	600
$1 \cdot 10^4$	690	680	620	580	540	460	420	370	340	280
$1 \cdot 10^5$	400	350	325	290	245	220	195	175	160	135
$6 \cdot 10^5$	260	220	195	170	138	120	110	100	87	74
$1 \cdot 10^6$	220	190	168	142	115	103	92	83	75	62
$2 \cdot 10^6$	185	160	138	115	93	80	73	65	58	48
$Q_B = 1 \cdot 10^{-3}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	900	856	781	705	655	554
$1 \cdot 10^4$	636	598	559	529	450	398	362	327	304	257
$1 \cdot 10^5$	357	321	289	258	209	184	168	152	141	119
$6 \cdot 10^5$	228	197	176	147	115	101	93	84	78	66
$1 \cdot 10^6$	201	172	149	125	97	86	78	71	66	55
$2 \cdot 10^6$	169	143	123	101	77	68	62	56	52	44
$Q_B = 1 \cdot 10^{-4}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	900	800	710	650	600	520
$1 \cdot 10^4$	600	560	520	490	410	360	340	300	280	240
$1 \cdot 10^5$	340	300	270	240	190	170	158	140	130	112
$6 \cdot 10^5$	215	185	160	137	107	95	87	78	70	63
$1 \cdot 10^6$	185	160	140	115	87	80	73	65	58	53
$2 \cdot 10^6$	160	135	114	94	70	64	57	52	47	42
$Q_B = 1 \cdot 10^{-5}$										
$1 \cdot 10^3$	900	900	900	900	781	692	642	592	554	491
$1 \cdot 10^4$	557	514	481	450	363	322	298	275	257	228
$1 \cdot 10^5$	312	276	249	219	168	149	138	128	119	106
$6 \cdot 10^5$	199	170	150	125	93	82	76	70	66	58
$1 \cdot 10^6$	176	148	129	107	78	69	64	59	55	49
$2 \cdot 10^6$	148	123	106	86	62	55	51	47	44	39

использовав указанную выше зависимость между  $K_x$  и  $FAT$  в виде

$$FAT(K_x) = \sigma_r(K_x, Q_B = 5 \cdot 10^{-2}, N = 2 \cdot 10^6) / 1,2, \quad (4)$$

а также данные табл. 1 и зависимость (3).

Полученные результаты приведены в табл. 2. Они показывают, что экспериментальные данные по [5] для  $\sigma_r$  из табл. 1 и расчетные данные на основе (3) при разных значениях параметров  $A$  и  $B$  при  $Q_B = 1 \cdot 10^{-2}, 1 \cdot 10^{-3}, 1 \cdot 10^{-4}, 1 \cdot 10^{-5}$  достаточно хорошо согласуются.

Особый интерес представляет вопрос о том, как расчет по допустимой вероятности разрушения согласуется с расчетом по заданному значению фактора безопасности  $\gamma_m = 1,0 \dots 1,4$ , рекоменду-

мому в работе [4]. В табл. 3 приведены такие данные, полученные для сварных соединений с различным значением  $K_x$  [5] и соответствующим  $FAT$  [4] для долговечности  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл при коэффициенте асимметрии цикла  $R = 0$ .

Из табл. 3 видно, что относительно небольшое изменение  $\gamma_m$  резко влияет на значения  $Q_B$ , т. е. при разумных рисках отказа в пределах  $Q_B = 1 \cdot 10^{-4}$  необходимость в  $\gamma_m > 1,64$  невелика. Соответственно при  $\gamma_m = 1,4$  вероятность отказа для рассматриваемых условий составляет  $1 \cdot 10^{-3}$ .

Следует отметить, что в большинстве случаев вероятность отказа  $Q_B$  определяет риск возникновения усталостной макротрещины, после чего наступает период ее роста до критических раз-



Таблица 2. Сопоставление экспериментальных данных из табл. 1 с расчетными (3) для  $\sigma_r$  (МПа) при  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл и средних значениях параметров  $A$  и  $B$

$Q_B$	$K_x$									
	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,6	3,0	3,5	4,0	5,0
$1 \cdot 10^{-2}$	$\frac{185}{192}$	$\frac{160}{166}$	$\frac{138}{141}$	$\frac{115}{120}$	$\frac{93}{95}$	$\frac{80}{84}$	$\frac{73}{75}$	$\frac{65}{67}$	$\frac{58}{60}$	$\frac{48}{50}$
$1 \cdot 10^{-3}$	$\frac{169}{170}$	$\frac{143}{145}$	$\frac{123}{124}$	$\frac{101}{102}$	$\frac{77}{78}$	$\frac{68}{70}$	$\frac{62}{63}$	$\frac{56}{57}$	$\frac{52}{52}$	$\frac{44}{44}$
$1 \cdot 10^{-4}$	$\frac{160}{158}$	$\frac{135}{133}$	$\frac{114}{113}$	$\frac{94}{93}$	$\frac{70}{69}$	$\frac{64}{62}$	$\frac{57}{56}$	$\frac{52}{51}$	$\frac{47}{47}$	$\frac{42}{41}$
$1 \cdot 10^{-5}$	$\frac{148}{151}$	$\frac{123}{126}$	$\frac{106}{108}$	$\frac{86}{87}$	$\frac{62}{63}$	$\frac{55}{57}$	$\frac{51}{52}$	$\frac{47}{48}$	$\frac{44}{45}$	$\frac{39}{40}$

Примечание. В числителе приведены данные по [5], в знаменателе — расчетные по формуле (3).

Таблица 3. Вероятность отказа  $Q_B$  и соответствующие значения фактора безопасности  $\gamma_m$  для  $N = 2 \cdot 10^6$  цикл при  $R = 0$

$K_x$	$FAT, \text{МПа}$	$Q_B = 5 \cdot 10^{-2}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-2}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-3}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-4}$		$Q_B = 1 \cdot 10^{-5}$	
		$\Delta\sigma, \text{МПа}$	$\gamma_m$								
1,7	135	161,9	1,0	138	1,17	123	1,32	114	1,42	106	1,53
2,0	116	139,5	1,0	115	1,21	101	1,38	94	1,48	86	1,62
2,3	95	114,6	1,0	93	1,23	77	1,49	70	1,64	62	1,85
2,6	84	100,6	1,0	80	1,26	68	1,48	64	1,58	55	1,83
3,0	74	89,00	1,0	73	1,22	62	1,43	57	1,56	51	1,74
3,5	65	78,00	1,0	65	1,20	56	1,39	52	1,50	47	1,66
4,0	58	68,70	1,0	58	1,18	52	1,32	47	1,46	44	1,56
5,0	46	55,60	1,0	48	1,16	44	1,26	42	1,32	39	1,42

меров, при которых происходит переход к спонтанному разрушению. Таким образом, рекомендуемые в работе [4] значения  $\gamma_m = 1,0 \dots 1,4$ , соответствуют вероятности возникновения усталостной трещины  $Q_B = 5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ , что в зависимости от тяжести ожидаемых последствий [4] является вполне обоснованным.

Возможность получения количественных характеристик относительно вероятности зарождения усталостных трещин для отдельных сварных соединений более обоснованно позволяет оценивать возможность безопасной эксплуатации отдельных узлов с большим количеством сварных соединений различного типа (разные  $FAT$ ) и различными размахами напряжений (табл. 4).

В работах используются известные зависимости:

$$Q(n) = 1 - \exp[-nQ(1)]; \Sigma Q_B = 1 - \exp[-\Sigma Q(n)]. \quad (5)$$

Из табл. 4 видно, что вероятность  $\Sigma Q_B$  всегда выше вероятности  $Q(n)$ , которая в свою очередь выше  $Q(1)$ , т. е. обеспечение безопасности сварного узла только по одному из наиболее слабых соединений без учета характеристик других со-

единений является далеко не всегда обоснованным.

### Выводы

1. Сопrotивляемость усталостному разрушению сварного соединения является величиной достаточно стохастической. В этой связи рекомендации МИС [4], основанные на статистической обработке экспериментальных данных с гарантированной вероятностью отказа  $5 \cdot 10^{-2}$  в сочетании с рекомендациями по фактору безопасности  $\gamma_m = 1,0 \dots 1,4$ , являются достаточно обоснованными по схеме наиболее слабого звена для сварных конструкций при многоциклового усталости.

2. Сочетание экспериментальных данных отдельных организаций о вероятностных характеристиках сопротивляемости усталости с рекомендациями МИСа для многоциклового усталости сварных конструкций из ферритно-перлитных (ферритно-бейнитных) конструкционных сталей способствует расширению расчетных возможностей оценки безопасности за счет использования вероятностных подходов.



Таблица 4. Примеры расчета долговечности сварных узлов с 15 сварными соединениями для различных  $N$

FAT, МПа	A, МПа	B, МПа	n	Ds, МПа	Q(1)	Q(n)
$N = 2 \cdot 10^6$ цикл						
71	44	88	5	70	$7,59 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-2}$
63	42	73	5	60	$3,68 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$
45	36	36	2	50	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$4,52 \cdot 10^{-2}$
36	32	15	3	40	$7,77 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-1}$
$\Sigma Q_B$						$2,84 \cdot 10^{-1}$
$N = 1 \cdot 10^6$ цикл						
71	55	120	5	70	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
63	52	95	5	70	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$6,44 \cdot 10^{-3}$
45	46	49	2	60	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$
36	43	25	3	45	$4,09 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
$\Sigma Q_B$						$2,1 \cdot 10^{-2}$
$N = 6 \cdot 10^5$ цикл						
71	65	125	5	80	$2,07 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
63	62	108	5	80	$7,71 \cdot 10^{-4}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$
45	53	64	2	70	$4,96 \cdot 10^{-3}$	$9,93 \cdot 10^{-3}$
36	48	35	3	60	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$
$\Sigma Q_B$						$5,44 \cdot 10^{-2}$
$N = 1 \cdot 10^5$ цикл						
71	125	240	5	140	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$7,63 \cdot 10^{-5}$
63	120	200	5	140	$9,99 \cdot 10^{-5}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$
45	100	90	2	110	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$3,05 \cdot 10^{-4}$
36	90	50	3	100	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$4,79 \cdot 10^{-3}$
$\Sigma Q_B$						$5,66 \cdot 10^{-3}$
$N = 1 \cdot 10^4$ цикл						
71	280	490	5	310	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$7,02 \cdot 10^{-5}$
63	240	400	5	270	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$
45	205	200	2	220	$3,16 \cdot 10^{-5}$	$6,33 \cdot 10^{-5}$
36	195	105	3	210	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
$\Sigma Q_B$						$1,54 \cdot 10^{-3}$
Примечание. $n$ — количество однотипных соединений при заданном FAT; $Q(1)$ — вероятность отказа одного соединения; $Q(n)$ — вероятность отказа хотя бы одного из $n$ однотипных соединений; $\Sigma Q_B$ — вероятность отказа хотя бы одного из соединений сварного узла.						

1. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 256 с.
2. Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. — М.: Машиностроение, 1977. — 230 с.
3. Мэддокс С. Д. Усталостная прочность поперечных стыковых сварных швов, выполненных с одной стороны // [www.svarkainfo.ru](http://www.svarkainfo.ru).
4. Recommendation for fatigue design of welded joints and components. — S. I., [1996]. — 117 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96/XV-845-96).
5. Design with EHS and AR plate // Svenskt stal, Heavy Plat Devision. — Oxeloesund, 1987.

The paper deals with the issues of probabilistic determination of welded joint resistance to fatigue fracture at high-cycle fatigue. Analysis of the probability of reliable performance of joints for various types of applied loads at varying magnitudes has been performed.

Поступила в редакцию 09.02.2010