МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

РД 50—694—90

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО УПРАВЛЕНИЮ
КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ И СТАНДАРТАМ
Москва 1991

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.791.052:539.431.001.24 Т59

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций

РД 50—694—90

ОКСТУ 0027

Дата введения 01.07.91

Настоящие методические указания распространяются на сварные стальные конструкции и устанавливают метод расчетной оценки усталостной долговечности металлоконструкций из низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей по номинальным напряжениям на основе статистической оценки параметров силового воздействия и назначения характеристик сопротивления усталости по параметру вероятности отказа сварных соединений.

Методические указания распространяются также на сварные соединения несущих и вспомогательных (ограждающих) конструкций, изготавливаемых из листового и фасонного проката и поковок черных металлов, эксплуатирующихся в интервале температур до минус 40 °С и защищенных от коррозионного воздействия окружающей среды (например окраской, металлизацией или другими покрытиями).

Методические указания не распространяются на элементы конструкций, применяемые в атомном энергомашиностроении.

Настоящие методические указания регламентируют:

1) методику определения параметров распределения характеристик сопротивления усталости сварных соединений и элементов металлоконструкций с учетом класса прочности стали, коэффициента асимметрии цикла, конструктивного оформления, остаточных напряжений и критериев отказа (критериев предельного состояния);

2) методику оценки параметров распределения расчетных номинальных напряжений, отражающих основные вероятностно-статистические закономерности изменения характера, значения и повторяемость эксплуатационных нагрузок;

© Издательство стандартов, 1991

★

3) метод расчетной оценки усталостной долговечности сварных конструкций по накоплению усталостных повреждений.

Методические указания предназначаются для работников проектных и технологических организаций, НИИ, КБ, ПКТБ, межотраслевых и отраслевых лабораторий, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией сварных стальных конструкций машин и сооружений.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Характеристики сопротивления усталости приведены для качественных сварных соединений, которые отвечают техническим условиям на изготовление сварных конструкций.

1.2. Статистические параметры силового воздействия могут быть установлены на основе экспериментального исследования эксплуатационной нагруженности металлоконструкций или по ГОСТ 25.101—83.

1.3. Усталостная долговечность сварных соединений определяется по стадии образования трещин в многоцикловой области нагружения.

1.4. Расчет сварных соединений металлоконструкций на усталость производят, как правило, по методу предельных состояний. В случае необходимости допускается выполнять расчет по методу допускаемых напряжений.

1.5. За отказ сварного соединения (за критерий предельного состояния) принимают образование усталостной трещины глубиной 2—3 мм, при которой возможен переход в хрупкое состояние.

Все характеристики сопротивления усталости сварных соединений установлены по этому критерию.

1.6. Термины, определения и обозначения, принятые в методических указаниях, — по ГОСТ 23.207—78.

1.7. Определения и обозначения, принятые в методических указаниях, приведены в приложении 1.

1.8. Примеры расчета на усталость приведены в приложении 2.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. Характеристики сопротивления усталости (ХСУ) сварных соединений и элементов конструкций определяют по вероятности отказа и включают параметры $\bar{\sigma}_R$, S_{σ_R} распределения предела выносливости и параметры $\bar{\sigma}_R$, A_R, B_R уравнения медианной (соответствующей вероятности отказа 50 %) кривой усталости вида

$$\sigma = \bar{\sigma}_R \, e^{\frac{A_R}{N+B_R}}. \qquad (1)$$

Кривая усталости по параметру вероятности отказа выражается уравнением

$$\sigma(P;\ N)=\sigma_R(P)e^{\frac{A_R}{N(P)+B_R}}, \qquad (2)$$

в котором параметры A_R и B_R от вероятности отказа P не зависят.

2.2. ХСУ элементов и узлов металлоконструкций определяют в зависимости от:

конструктивно-технологического решения сварного соединения;

остаточных напряжений;

класса прочности стали;

качества сварного соединения;

коэффициента асимметрии цикла.

2.3. По конструктивно-технологическим признакам сварные соединения, элементы и узлы конструкций с учетом действия усилий относительно шва подразделяют на восемь классов (табл. 1—8):

1 — проверяемые на усталость по основному металлу вдали от сварных швов (табл. 1);

2 — с непрерывными продольными стыковыми и угловыми швами или наплавками (табл. 2);

3 — с поперечными стыковыми швами (табл. 3);

4 — с поперечными угловыми швами (табл. 4);

5 — с приваренными встык, впритык или внахлестку косынками (табл. 5);

6 — с накладками, продольными ребрами, различного рода усилениями и т. д., приваренными с обваркой по контуру, а также нахлесточные соединения с обваркой по контуру (табл. 6);

7 — содержащие нахлесточные соединения с фланговыми швами или имеющие короткие продольные швы, прикрепляющие различного рода косынки, фасонки, упоры и т. д. (табл. 7);

8 — содержащие угловые сварные соединения и работающие на кручение (табл. 8).

2.4. Остаточные сварочные напряжения ($\sigma_{ост}$) при определении ХСУ соединений учитывают в соответствии с разделением их на высокие ($\sigma_{ост} > 0{,}5\sigma_т$) и низкие ($\sigma_{ост} \leqslant 0{,}5\sigma_т$).

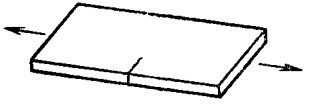
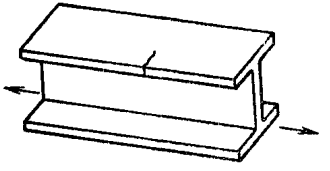
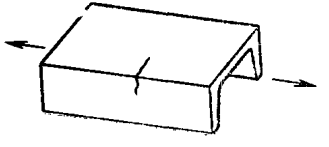
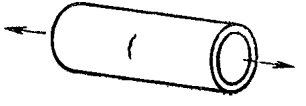
Величину $\sigma_{ост}$ можно устанавливать расчетом, экспериментально или по опыту проектирования.

В последнем случае принимают, что высокие остаточные напряжения в поперечных стыковых соединениях возникают при ширине элемента не менее 200 мм и толщине от 16 мм и больше, а в продольных швах — длиной более 1000 мм или толщиной больше 10 мм. Высокие остаточные напряжения образуются независимо от размеров в местах переходов от элемента и концам фланговых швов.

Низкие остаточные напряжения принимают при расчетах на усталость сварных соединений и элементов с короткими стыковыми швами листового проката толщиной меньше 16 мм и фасонного меньше 10 мм.

Таблица 1

Элементы конструкций, проверяемые на усталость по основному металлу вдали от сварных швов (класс 1)

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
1.1 	1.1. **Основной металл вдали от сварных швов** Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Элементы с прокатной поверхностью, кромки фрезерованы или шлифованы.	1
	Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Элементы с прокатной поверхностью, кромки выполнены механической кислородной резкой.	2
		
		

Продолжение табл. 1

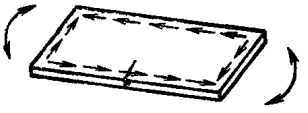
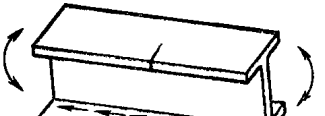
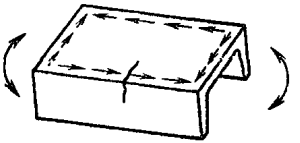
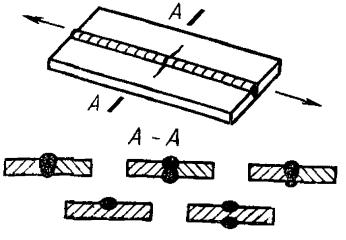
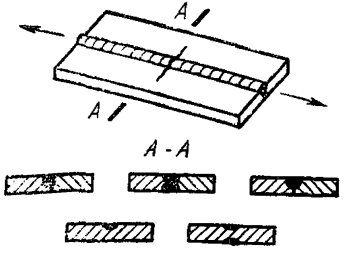
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
	Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Элементы с прокатной поверхностью, кромки обработаны механически при радиусе перехода R, мм: $R \geqslant 200$; $R \geqslant 10$; $R < 10$.	 1 2 3а
		
		
		

Таблица 2

Элементы конструкций с непрерывными продольными стыковыми и угловыми швами или наплавками (класс 2)

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
2.1 	2.1. **Стыковые продольные швы или продольные наплавки** $\sigma_{ост} \leqslant \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественный сварной шов, отвечающий техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	2
	$\sigma_{ост} \leqslant \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественный сварной шов со снятым заподлицо усилением.	1

Продолжение табл. 2

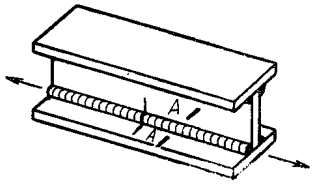
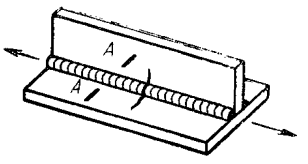
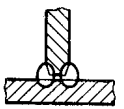
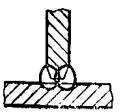
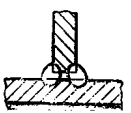
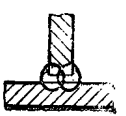
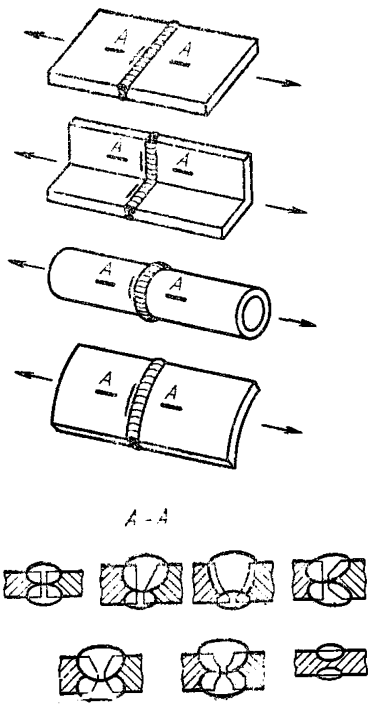
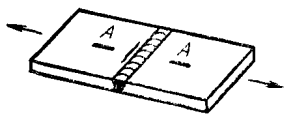
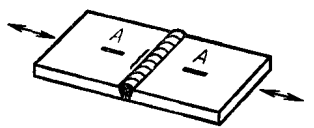
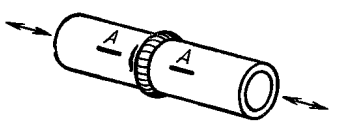
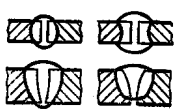
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
2.2   A - A    	**2.2. Угловые продольные швы тавровых, двутавровых, крестообразных и других элементов конструкций (вдали от диафрагм и ребер)** $\sigma_{ост} \leqslant \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные сварные соединения с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	2
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные сварные соединения с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные сварные соединения с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	2

Таблица 3

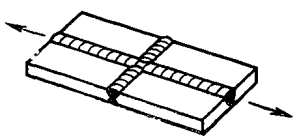
Элементы конструкций с поперечными стыковыми швами (класс 3)

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
3.1  	3.1. **Стыковые соединения с поперечным швом (двусторонние)** $\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные двусторонние швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	3а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные двусторонние швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	3б

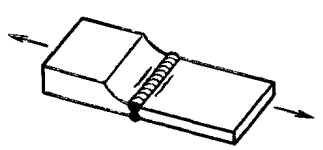
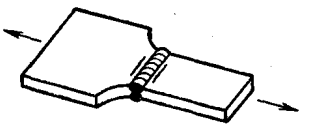
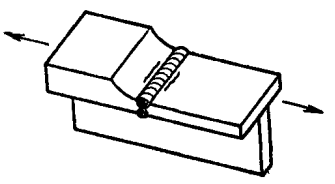
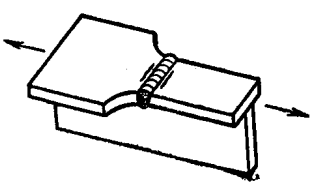
Продолжение табл. 3

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
 А-А 	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. *Усиление швов снято заподлицо с основным металлом* шлифовкой в направлении, совпадающем с направлением нагрузки.	1
3.2   А-А 	3.2. **Стыковые соединения с поперечным швом (односторонние)** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы с обратным формированием при инструментальных методах контроля качества.	3а
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые и низколегированные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	6а
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	7а

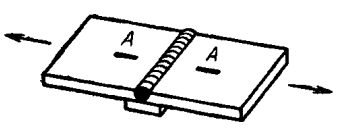
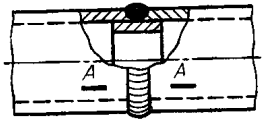
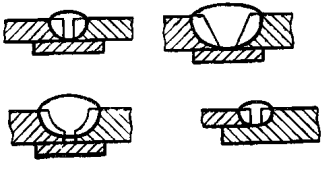
Продолжение табл. 3

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы с обратным формированием при инструментальных методах контроля качества.	3б
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые и низколегированные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	5б
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	6б
3.3 	3.3. **Стыковые соединения, пересекаемые продольным швом, выполненным после стыкового** Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные двусторонние швы, пересекаемые продольным швом и отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	3а

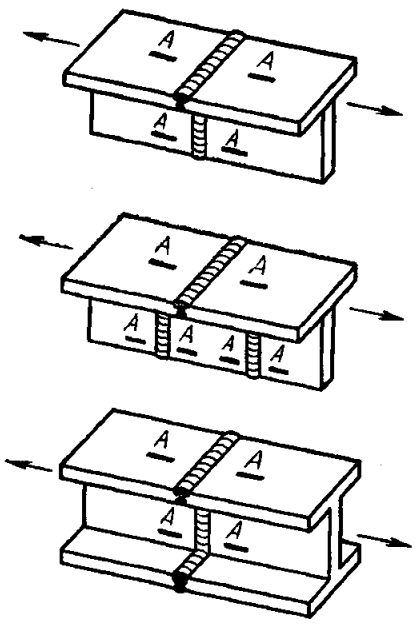
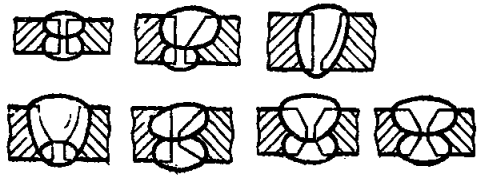
Продолжение табл. 3

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
3.4 	**3.4. Стыковые соединения с поперечным швом разной толщины или ширины** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные (инструментальный контроль) двусторонние швы при стыковании листов разной ширины или разной толщины.	3а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные (инструментальный контроль) двусторонние швы при стыковании листов разной ширины или разной толщины.	3б
		
		

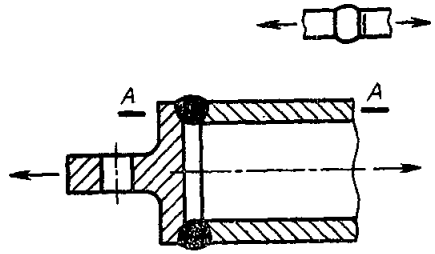
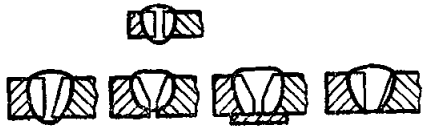
Продолжение табл. 3

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
3.5 	**3.5. Стыковые соединения с поперечным швом на остающейся подкладке**	
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$	
	Низкоуглеродистые, низколегированные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при инструментальных методах контроля качества.	
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$	5а
	Высокопрочные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при инструментальных методах контроля качества.	
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$	7а
	Низкоуглеродистые и низколегированные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при инструментальных методах контроля качества.	5б
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$	
	Высокопрочные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при инструментальных методах контроля качества.	6б
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$	
А – А	Низкоуглеродистые и низколегированные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	6а
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$	
	Высокопрочные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	7а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$	
	Низкоуглеродистые и низколегированные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	6б
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$	
	Высокопрочные стали.	
	Необрабатываемые после сварки односторонние швы при отсутствии инструментальных методов контроля качества.	7б

Продолжение табл. 3

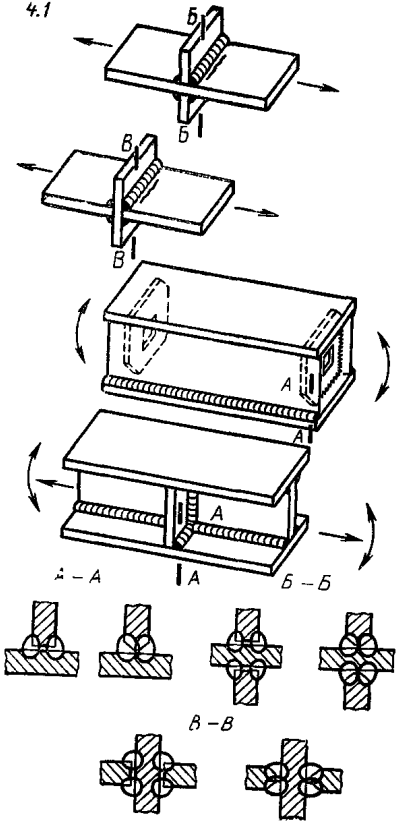
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
3.6  А-А 	3.6. **Стыковые соединения тавровых и двутавровых профилей** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	3а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	3б

Продолжение табл. 3

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
3.7  А - А 	**3.7. Стыковые соединения трубы с оголовком** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	7а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	7б

Элементы конструкций с поперечными угловыми швами (класс 4)

Таблица 4

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
	**4.1. Сварные соединения с поперечными угловыми швами** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные угловые сварные соединения с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	4а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные угловые сварные соединения с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	4б
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные угловые сварные соединения с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5а
	$\sigma_{ост\,т} \leqslant 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные угловые сварные соединения с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5б

Продолжение табл. 4

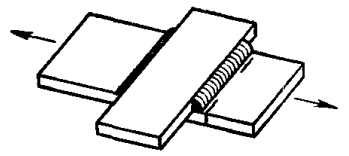
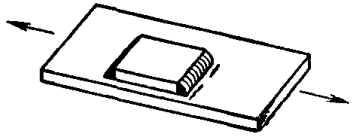
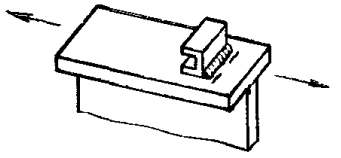
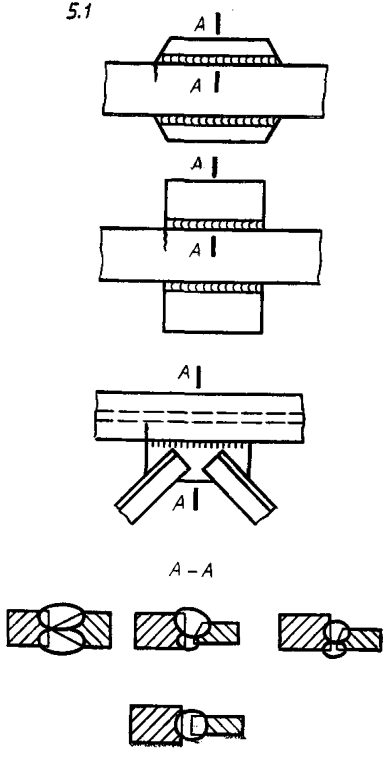
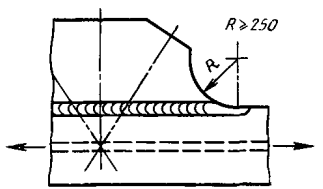
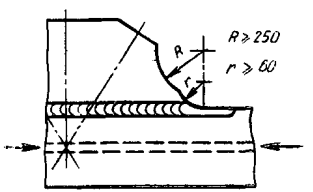
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
4.2   	4.2. **Приварка накладок поперечными угловыми швами** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные поперечные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5а

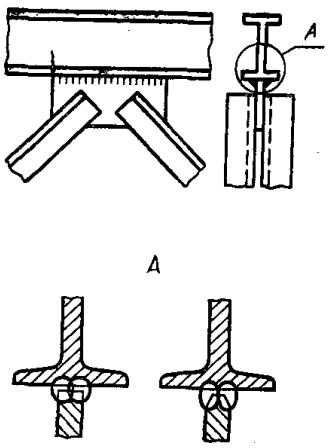
Таблица 5

Элементы конструкций с приваренными встык, впритык или внахлестку косынками (класс 5)

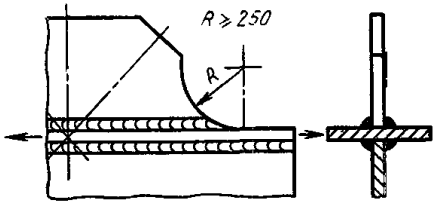
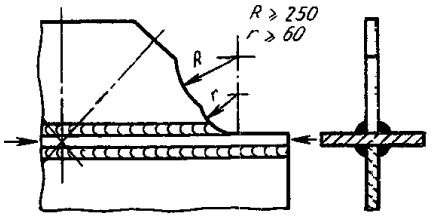
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
5.1  	5.1. **Приварка косынок прямоугольной или трапецеидальной формы встык** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки двусторонние качественные швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки двусторонние качественные швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5б

Продолжение табл. 5

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
5.2  	5.2. **Приварка косынок встык с плавным переходом к элементу** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные швы с полным проваром, радиус перехода не менее 60 мм. $\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные швы с полным проваром, радиус перехода не менее 60 мм.	3а 3б

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
5.3 	**5.3. Приварка косынок прямоугольной или трапецеидальной формы втавр** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые и низколегированные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6а
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	7а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые и низколегированные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	5б
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6б

Продолжение табл. 5

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
54  	**5.4. Приварка косынок трапецеидальной формы втавр с плавным переходом от косынки к элементу** $\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций, радиус перехода не менее 60 мм.	5а
 	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Качественные угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций, радиус перехода не менее 60 мм.	5б

Продолжение табл. 5

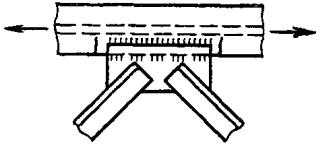
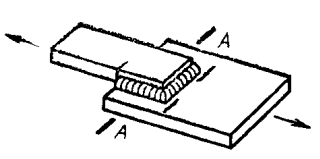
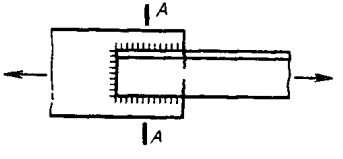
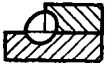
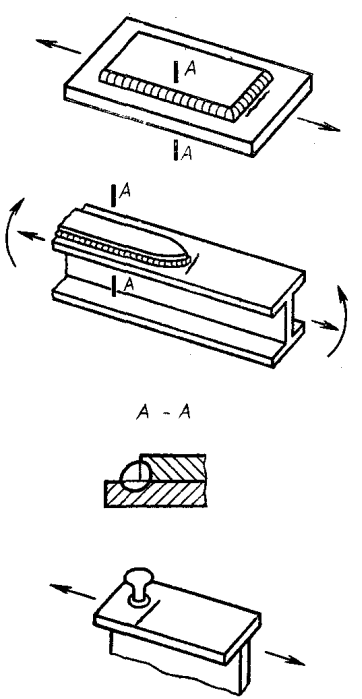
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
5.5 	5.5. **Приварка косынок прямоугольной или трапецеидальной формы внахлест** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки угловые швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6б

Таблица 6

Элементы конструкций с накладками, продольными ребрами или усилениями, приваренными с обваркой по контуру, а также нахлесточные соединения с обваркой по контуру (класс 6)

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
6.1  	6.1. **Нахлесточные соединения с обваркой по контуру** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6а
 A - A 	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6б

Продолжение табл. 6

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
6.2  	**6.2. Приварка накладок или усилений угловыми швами** $\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые сварные соединения, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые сварные соединения, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6б

Продолжение табл. 6

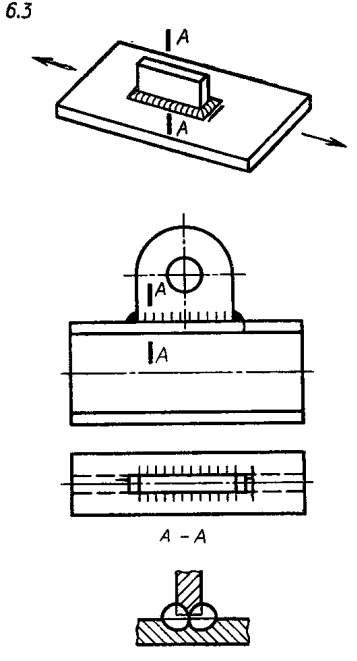
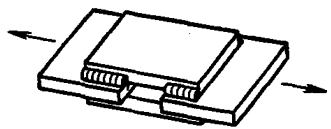
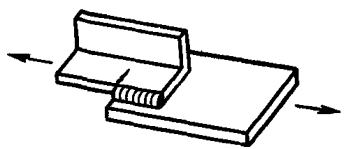
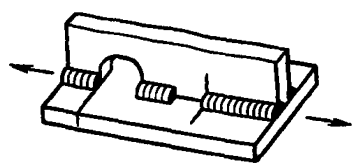
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
6.3  	**6.3. Приварка продольных ребер** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые сварные соединения с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	4а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые сварные соединения с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	4б
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые сварные соединения с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные угловые соединения с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление металлических конструкций.	6б

Таблица 7

Элементы конструкций, содержащие нахлесточные соединения с фланговыми швами, имеющие короткие продольные швы, прикрепляющие различного рода фасонки, косынки, упоры и т. д. (класс 7)

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
7.1 	7.1. **Нахлесточные соединения с фланговыми швами в местах перехода от элемента к концам фланговых швов** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки швы, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7б
		

Продолжение табл. 7

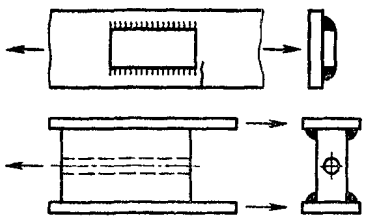
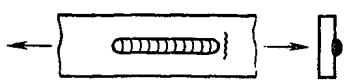
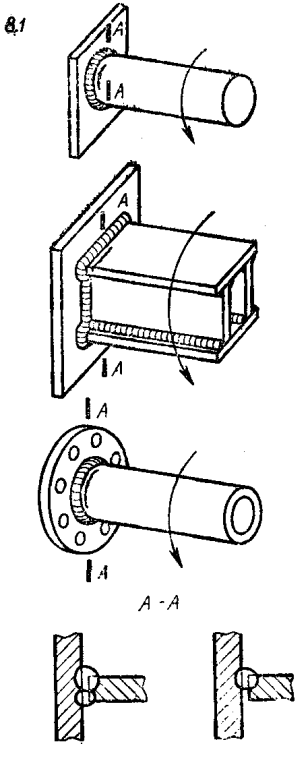
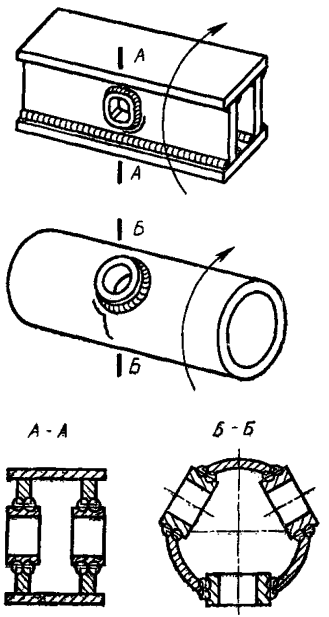
Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
7.2 	**7.2. Прикрепление различного рода фасонок, косынок, упоров и т. д., фланговыми швами** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки качественные швы, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7б
7.3 	**7.3. Короткие продольные наплавки на основной металл** $\sigma_{ост} > 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Швы без видимых дефектов.	7а
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Швы без видимых дефектов с плавным переходом начала и окончания к основному металлу.	4б
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\,\sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Швы без видимых дефектов с механической обработкой мест перехода к основному металлу или зашлифованные заподлицо с основным металлом.	2б

Таблица 8

Элементы конструкций, содержащие угловые сварные соединения, которые работают на кручение (класс 8)

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
8.1  	8.1. **Замкнутый непрерывный угловой шов** $\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7а**
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки односторонние швы, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7б**
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки двусторонние качественные швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	4а*

Продолжение табл. 8

Элемент и схема нагружения	Конструктивно-технологические признаки элемента и качество изготовления	Группа элементов
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки двусторонние качественные швы с полным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	4б*
	$\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки двусторонние швы с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7а*
	$\sigma_{ост} < 0{,}5\ \sigma_т$ Низкоуглеродистые, низколегированные и высокопрочные стали. Необрабатываемые после сварки двусторонние швы с неполным проваром, отвечающие техническим условиям на изготовление сварных конструкций.	7б*

* Установленные значения пределов выносливости понижаются умножением на коэффициент 0,7.
** Установленные значения пределов выносливости понижаются умножением на коэффициент 0,35.

2.5. ХСУ сварных соединений зависит от класса прочности основного металла, из которого изготовлен элемент конструкции. В настоящих МУ приведены ХСУ сварных соединений низкоуглеродистых ($\sigma_т$ =240—260 МПа), низколегированных ($\sigma_т$ =420—480 МПа) и высокопрочных ($\sigma_т$ =600—680 МПа) сталей.

2.6. Качество исполнения элементов характеризуют конструктивно-технологическое решение сварного соединения, способ получения заготовок, качество сварки и послесварочных обработок. Эти факторы учитываются в соответствии с табл. 1—8, в которых в зависимости от сочетания перечисленных факторов каждый элемент в том или ином классе распределен по группам. Для учета $\sigma_{ост}$ по п. 2.4 группы дополнительно обозначены буквами а и б.

2.7. В зависимости от принадлежности к группе элементов и класса прочности стали ХСУ сварных соединений для разных коэффициентов асимметрии цикла определяют по соответствующим диаграммам, таблицам, формулам и графикам.

Нормативное значение предела выносливости σ_R определяют по диаграммам предельных напряжений цикла (черт. 1—14) как значение, отвечающее ветви $N \to \infty$. Для удобства на диаграммах предельных напряжений цикла представлена шкала коэффициентов асимметрии цикла — R_σ .

Нормативные значения среднего квадратического отклонения $S_{\sigma_{-1}}$ предела выносливости для симметричного цикла нагружения ($R_\sigma = -1$) определяют по табл. 9. Для других коэффициентов асимметрии цикла R_σ нормативные значения S_{σ_R} определяют в зависимости от значений $S_{\sigma_{-1}}$ и R_σ по формуле

$$S_{\sigma_R} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{-1}} S_{\sigma_{-1}} . \qquad (3)$$

Таблица 9

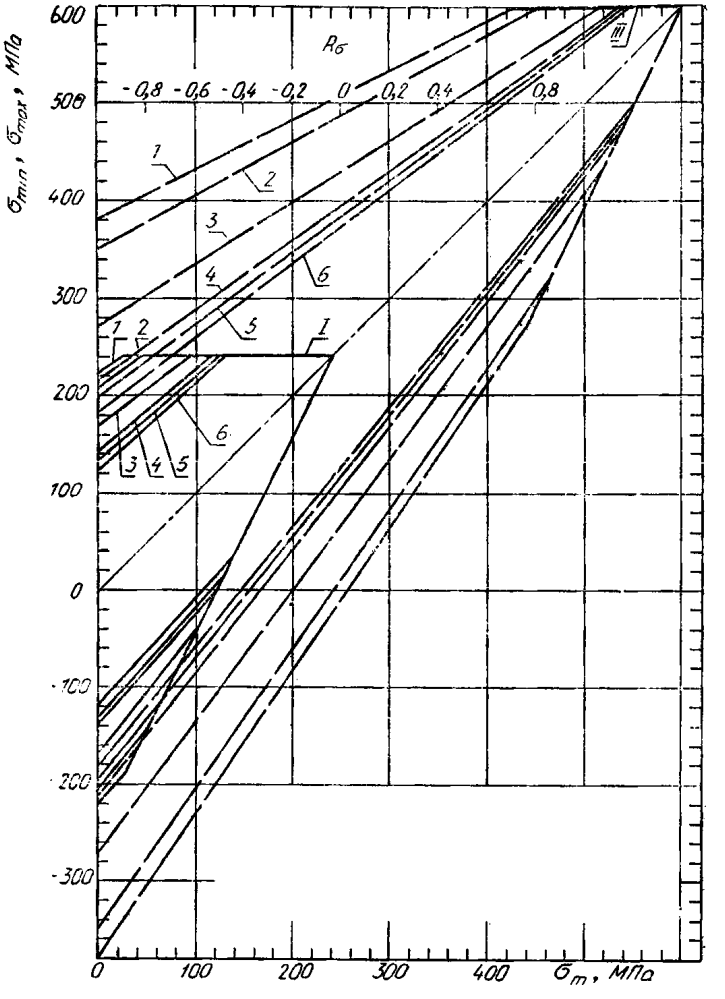
Нормативные значения среднего квадратического отклонения $S_{\sigma_{-1}}$ предела выносливости сварных соединений по группам элементов

Величина остаточных напряжений	$S_{\sigma_{-1}}$ по группам элементов						
$\sigma_{ост} > 0{,}5\ \sigma_т$	1	2	3а	4а	5а	6а	7а
	35	28	12	10	8	6	4
$\sigma_{ост} \leqslant 0{,}5\ \sigma_т$	1	2	3б	4б	5б	6б	7б
	35	28	20	15	12	9	7

Нормативные значения параметров A_R и B_R уравнения кривой усталости (*1*) устанавливаются по графикам (черт. 15—20).

Рекомендуется округлять нормативные значения σ_R до 5 МПа, S_{σ_R} до 1 МПа, а параметров A_R и B_R — до 10^4.

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 1

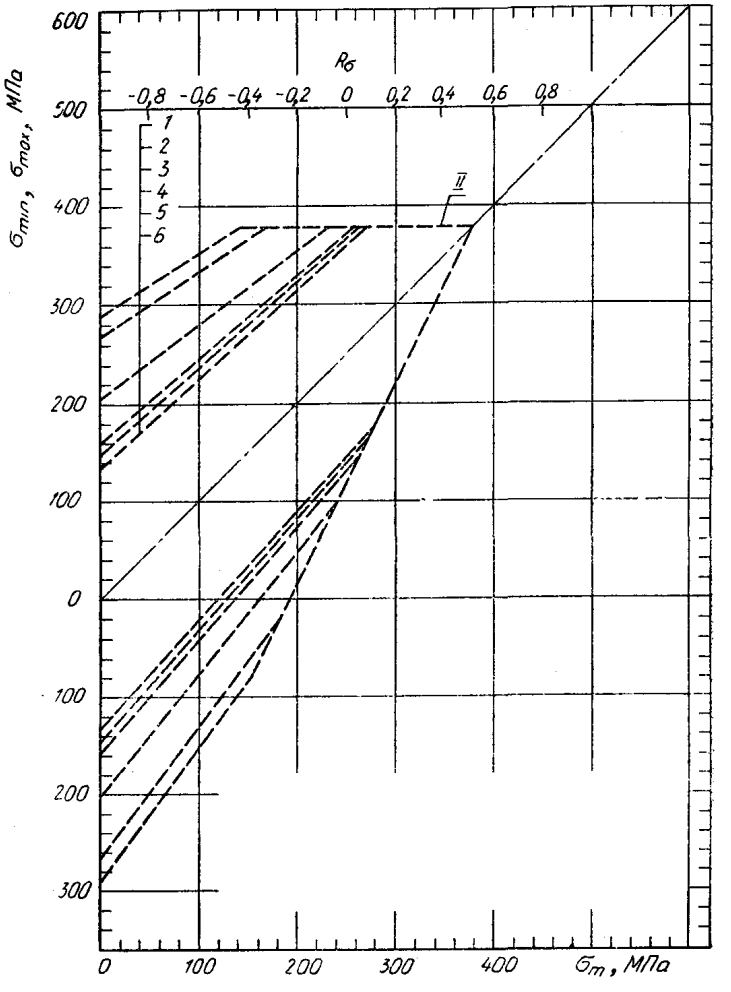


I — низкоуглеродистые; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 1

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 1

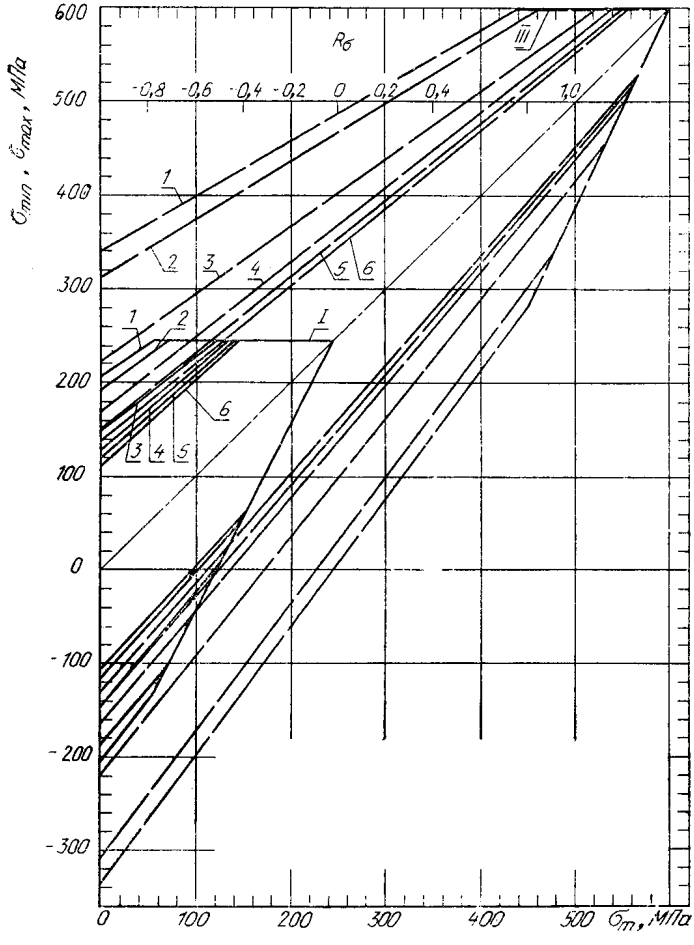


II — низколегированные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 2

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 2

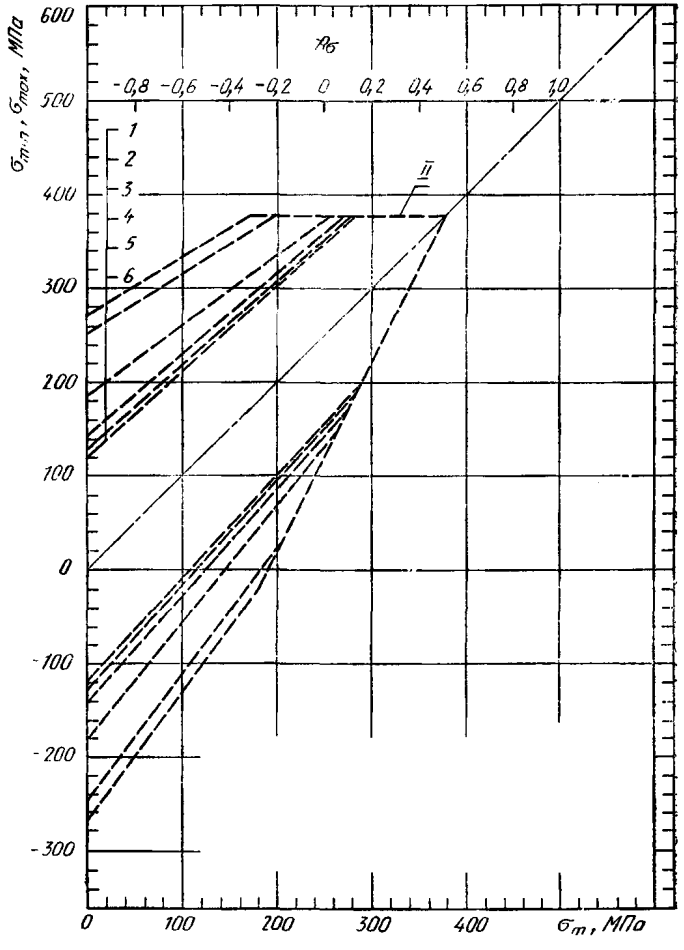


I — низкоуглеродистые; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^8$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 3

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 2

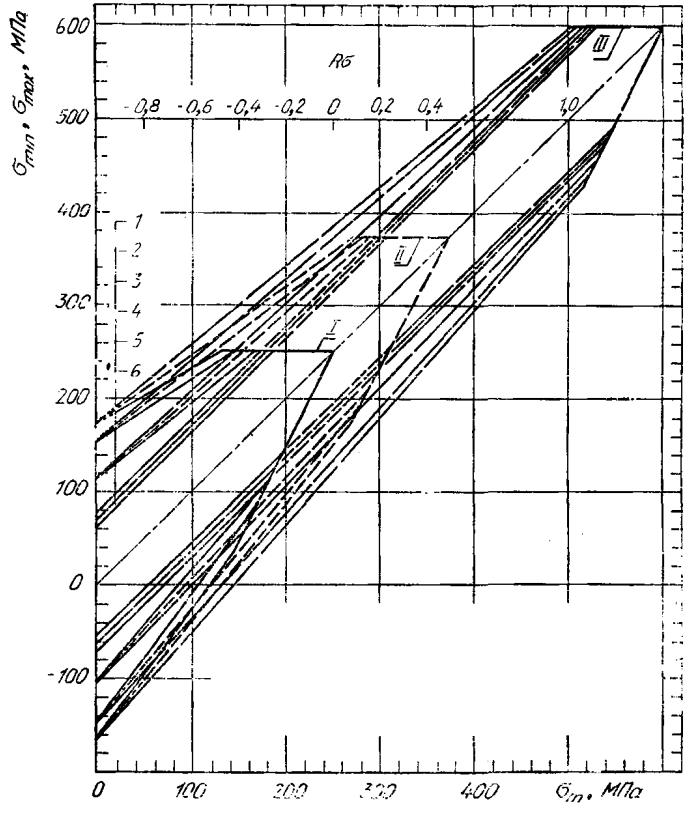


II — низколегированные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 4

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 3а

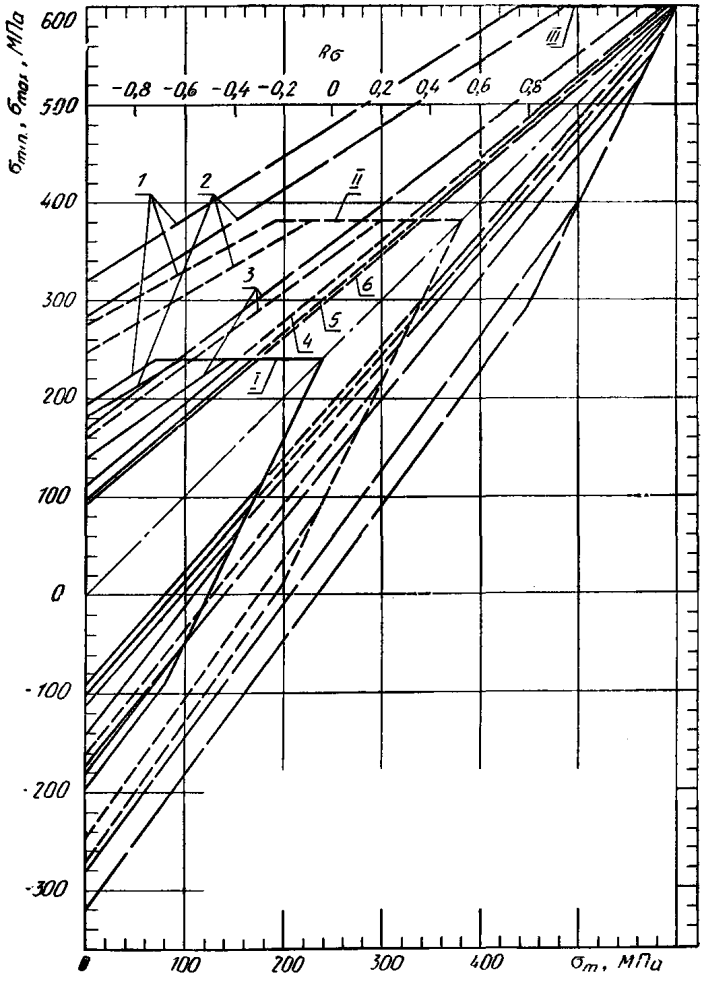


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 5

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 3б

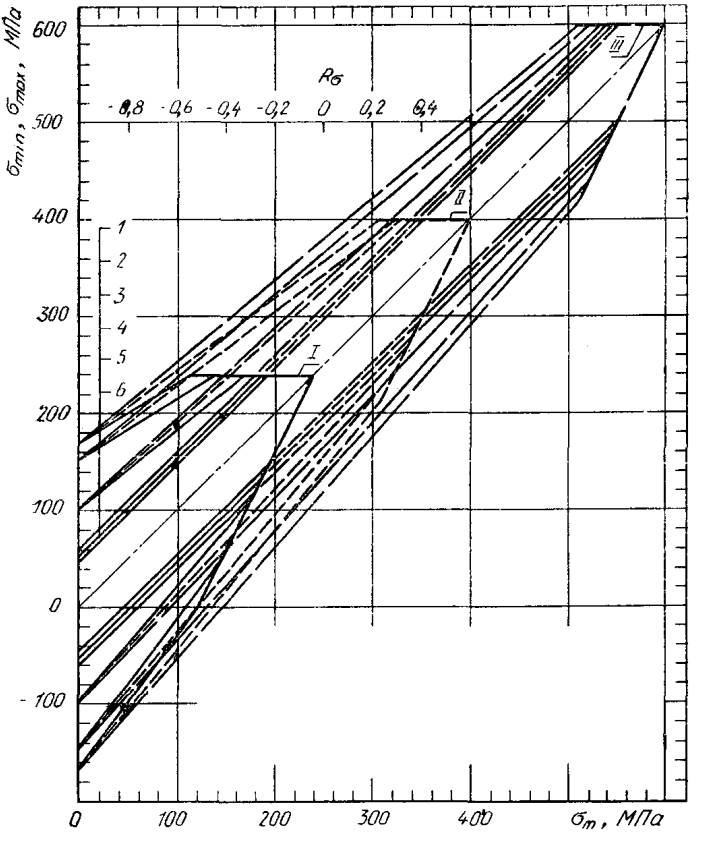


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^8$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 6

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 4а

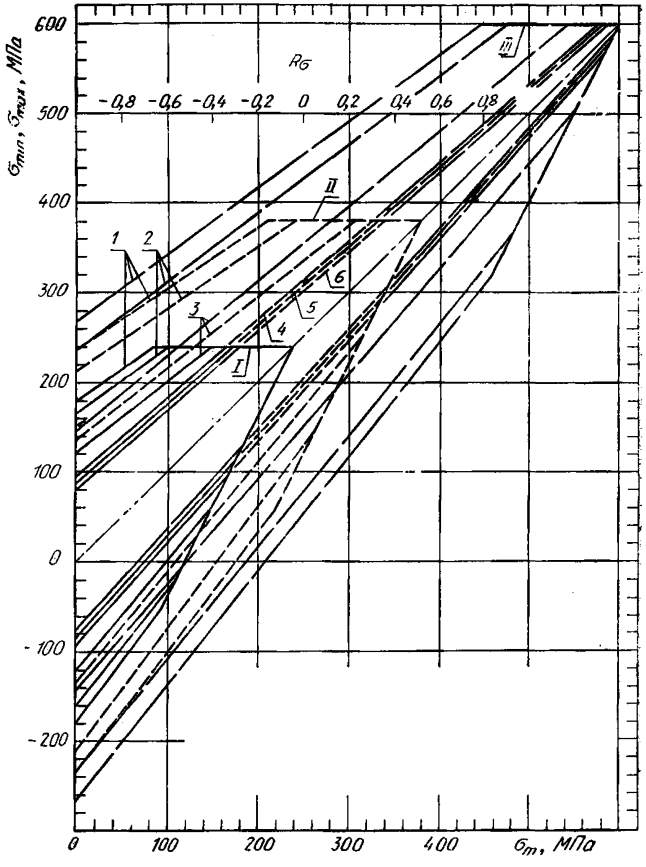


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 7

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 4б

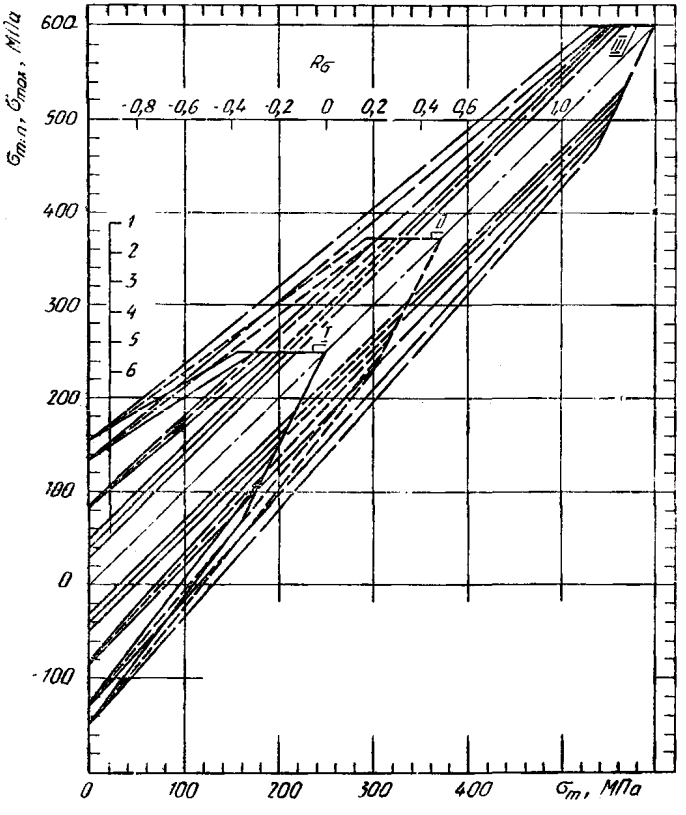


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 8

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 5а

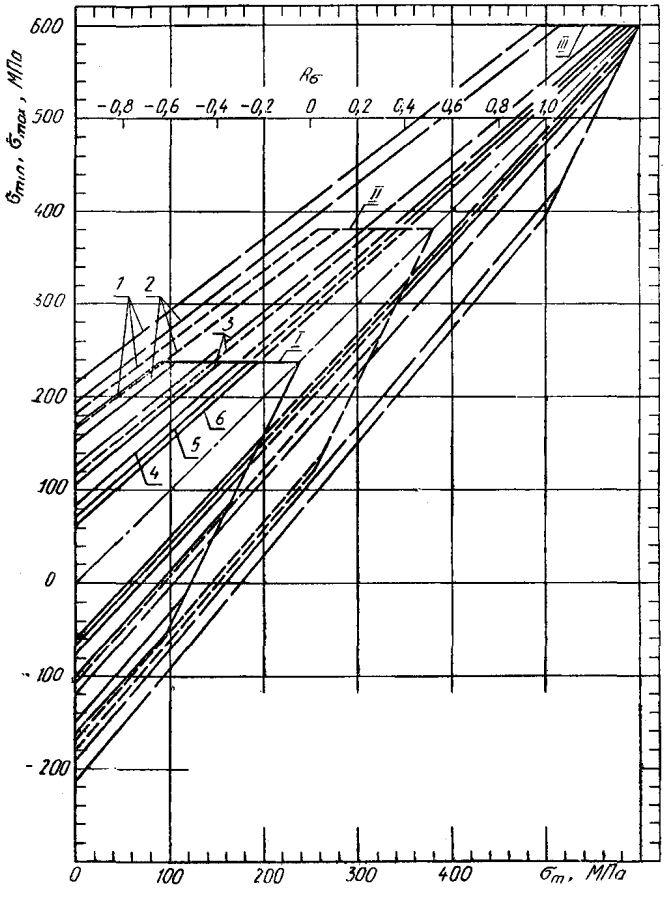


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 9

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 5б

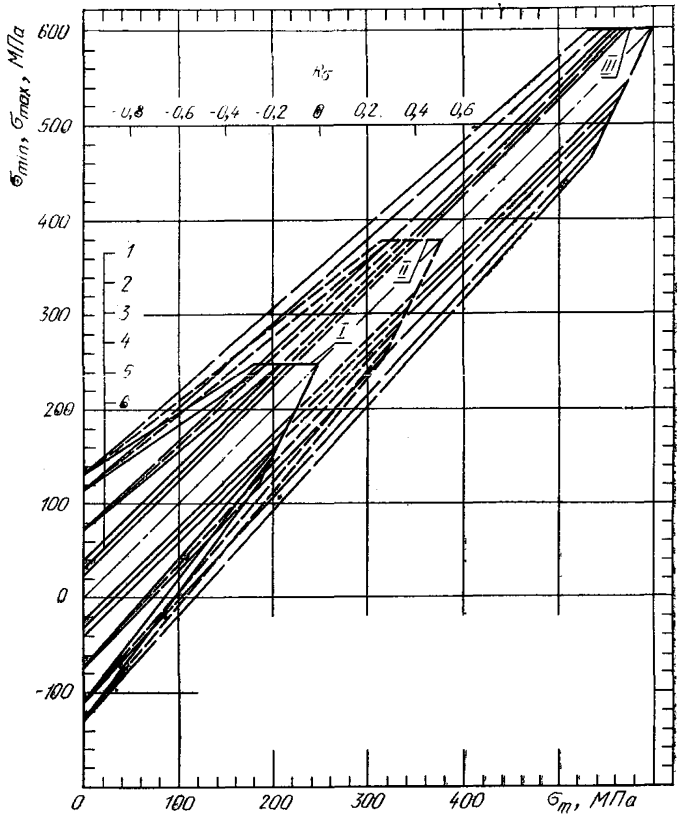


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 10

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 6а

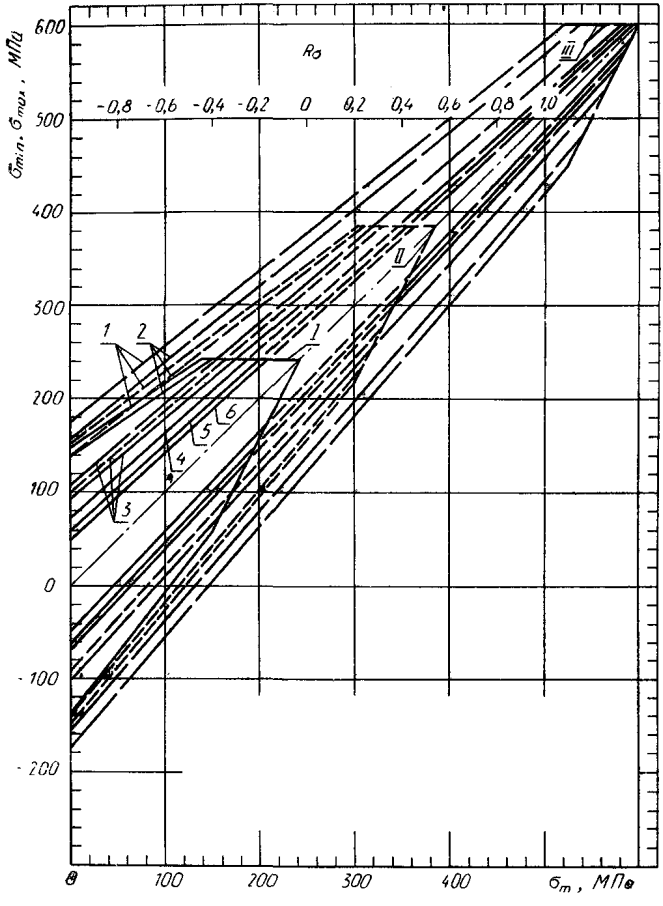


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 11

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 6б

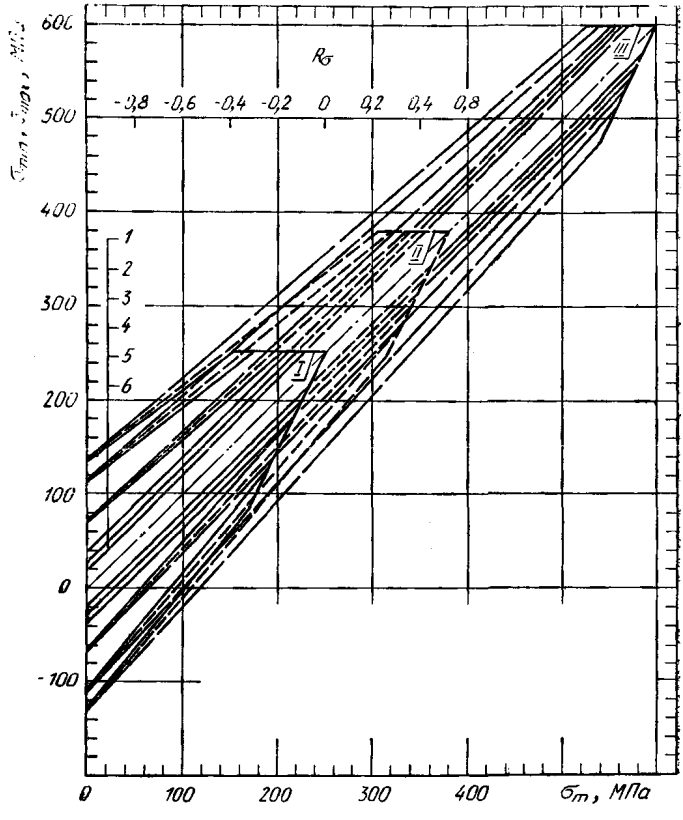


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 12

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 7а

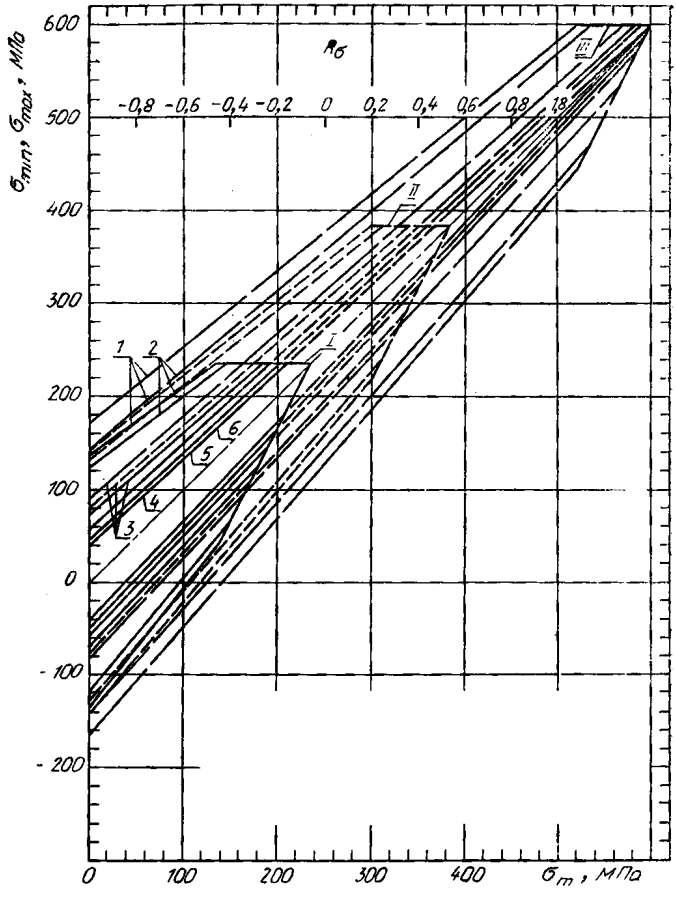


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 13

Диаграммы предельных напряжений цикла элементов группы 7б

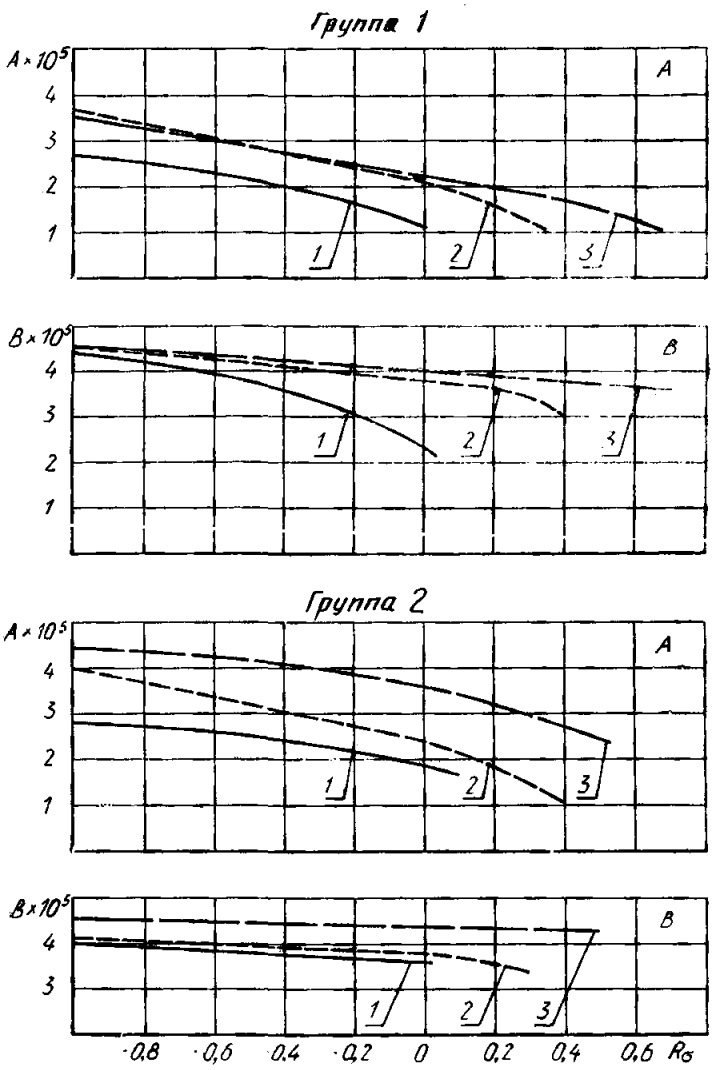


I — низкоуглеродистые; *II* — низколегированные; *III* — высокопрочные стали;

1 — $N=5\cdot10^4$; *2* — $N=1\cdot10^5$; *3* — $N=5\cdot10^5$; *4* — $N=2\cdot10^6$; *5* — $N=5\cdot10^6$; *6* — $N\to\infty$ циклов

Черт. 14

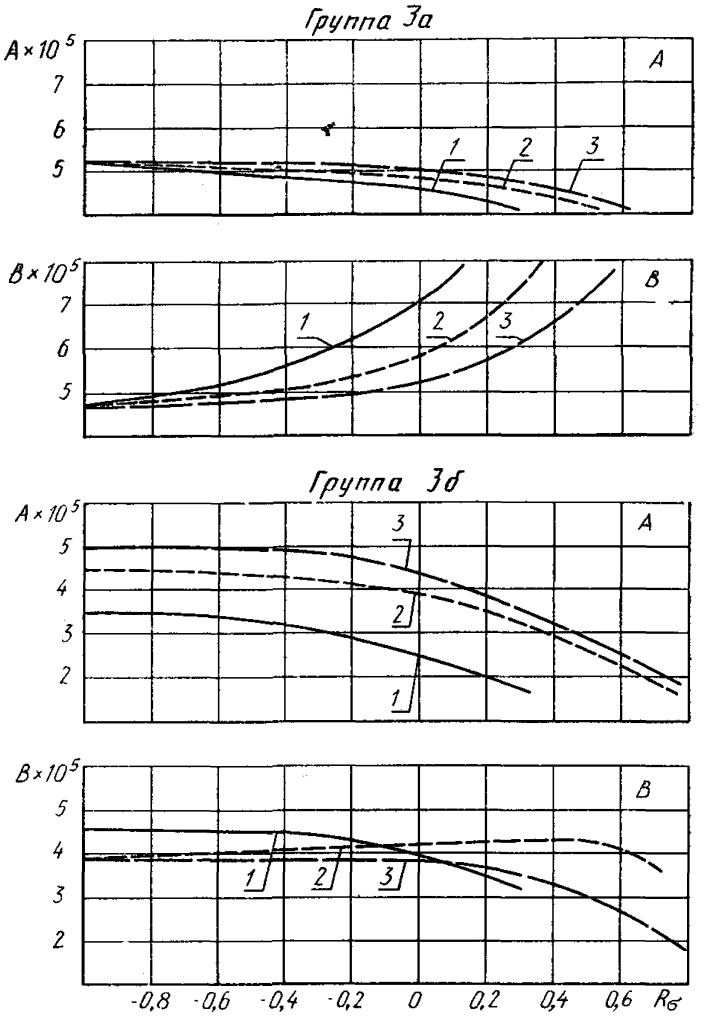
Зависимости параметров уравнения (1) от коэффициентов асимметрии цикла элементов



1 — низкоуглеродистые; *2* — низколегированные; *3* — высокопрочные стали

Черт. 15

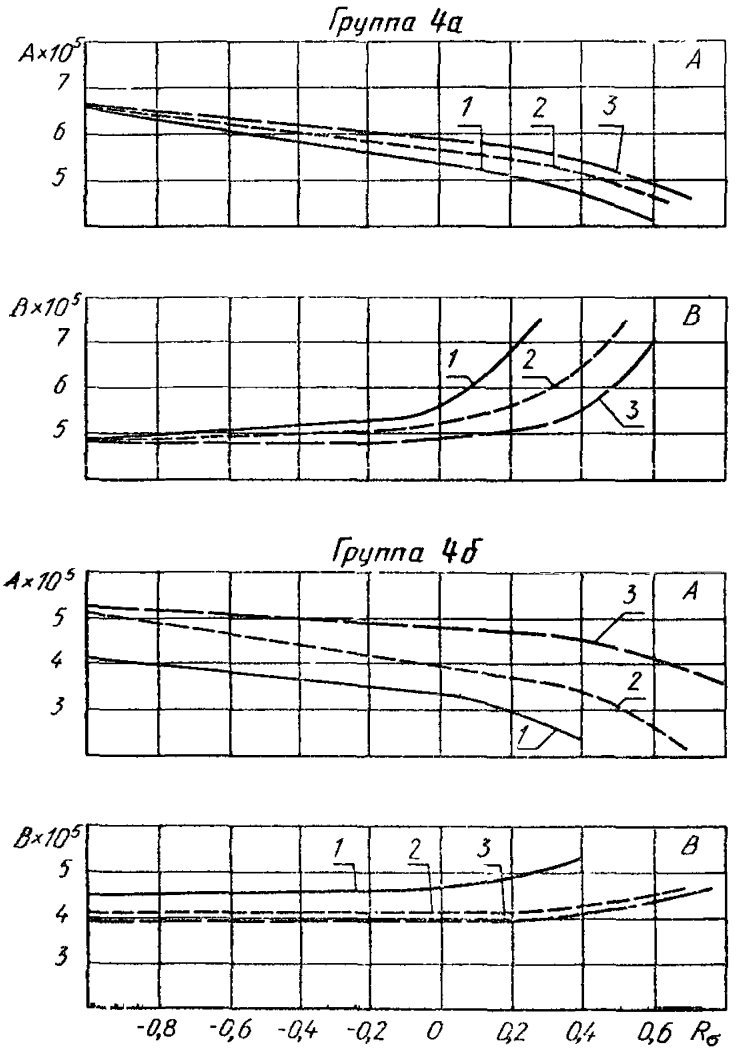
Зависимости параметров уравнения (1) от коэффициентов асимметрии цикла элементов



1 — низкоуглеродистые; *2* — низколегированные; *3* — высокопрочные стали

Черт. 16

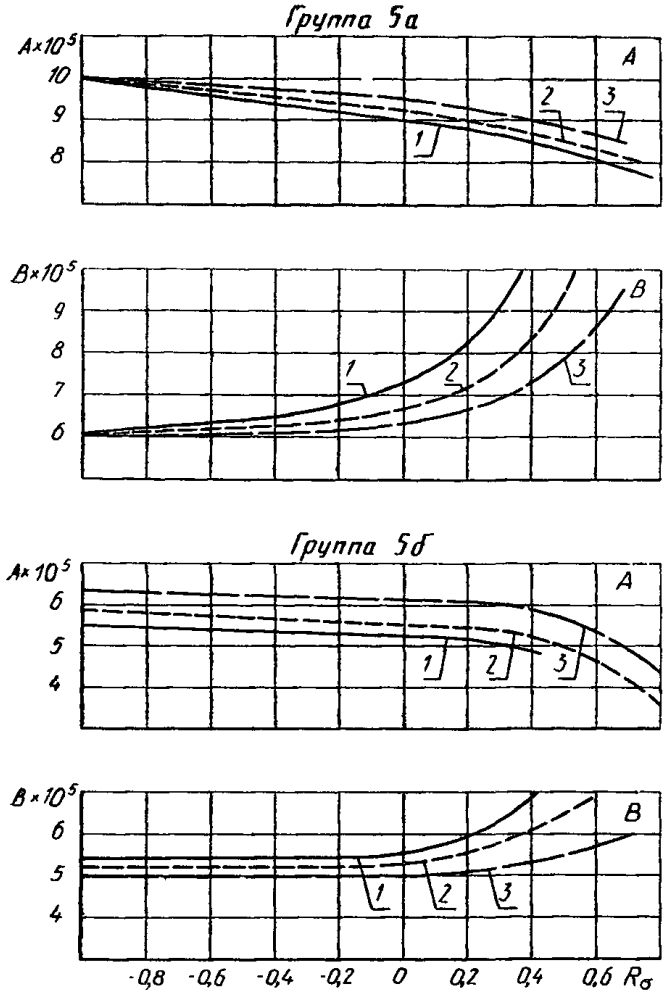
Зависимости параметров уравнения (1) от коэффициентов асимметрии цикла элементов



1 — низкоуглеродистые; *2* — низколегированные; *3* — высокопрочные стали

Черт. 17

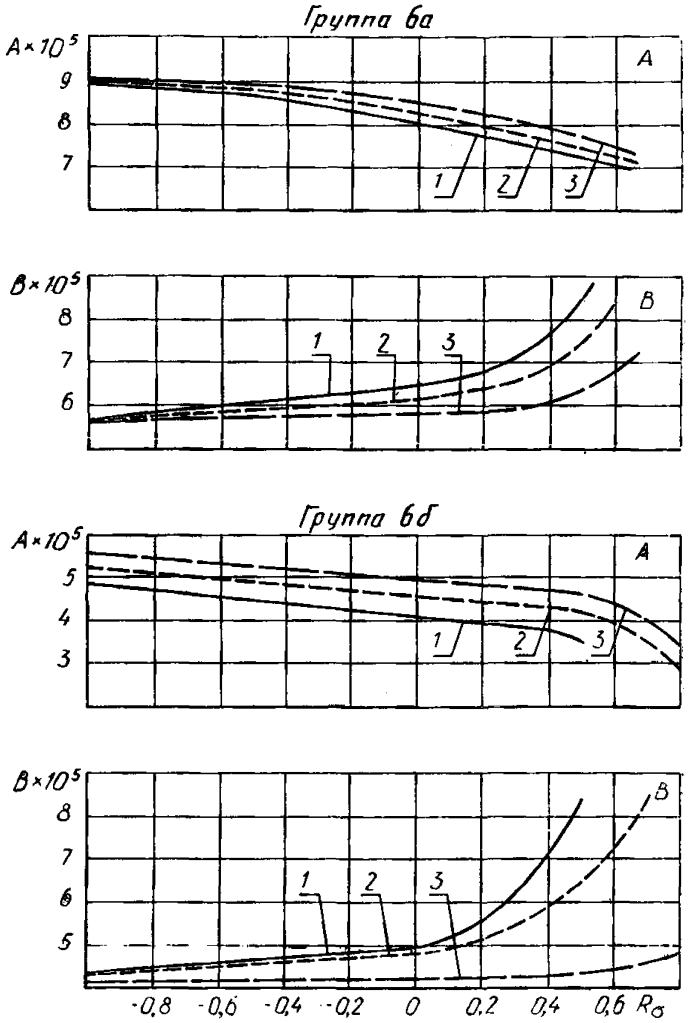
Зависимости параметров уравнения (1) от коэффициентов асимметрии цикла элементов



1 — низкоуглеродистые; *2* — низколегированные; *3* — высокопрочные стали

Черт. 18

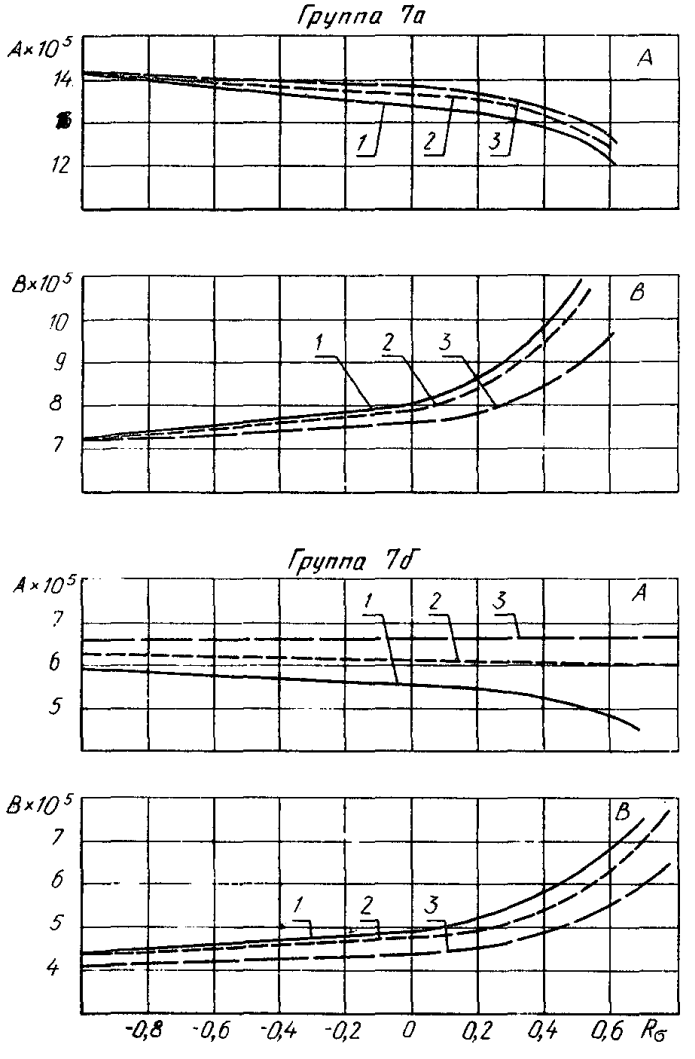
Зависимости параметров уравнения (1) от коэффициентов асимметрии цикла элементов



1 — низкоуглеродистые; *2* — низколегированные; *3* — высокопрочные стали

Черт. 19

Зависимости параметров уравнения (1) от коэффициентов асимметрии цикла элементов



1 — низкоуглеродистые; *2* — низколегированные; *3* — высокопрочные стали

Черт. 20

2.8. В расчетах на усталость по методу допускаемых напряжений с помощью степенного уравнения кривой усталости вида

$$\sigma^m N = \bar{\sigma}_R^m N_б \qquad (4)$$

параметр m уравнения медианной (соответствующей вероятности отказа 50 %) кривой усталости (*4*) может быть определен через параметры $\bar{\sigma}_R$; A_R ; B_R медианной кривой усталости (*1*) по следующим зависимостям:

$$m = \frac{a_2^2 - a_0 b_2}{A(a_1 b_2 - a_2 b_1)} ; \qquad (5)$$

$$a_0 = \int_{x_1}^{x_2} \ln x (x+B)^2 dx;$$

$$a_1 = \int_{x_1}^{x_2} \ln^2 x dx;$$

$$a_2 = \int_{x_1}^{x_2} \ln x (x+B) dx;$$

$$b_1 = B(x_2 - x_1)(x_2 + x_1 + B) + \frac{1}{3}(x_2^3 - x_1^3);$$

$$b_2 = (x_2 - x_1)\left(B + \frac{x_1 + x_2}{2}\right),$$

где x_1 и x_2 — интервал долговечности, в котором достигается наилучшее совпадение степенного (4) и экспоненциального (1) уравнений.

Рекомендуется определять параметр m уравнения (4) из условия наилучшего совпадения с (1) в интервале долговечностей $x_1 = N_1 = 5 \cdot 10^4$ и $x_2 = N_2 = 2 \cdot 10^6$. При этом нормативные значения $\bar{\sigma}_R$ предела выносливости должны определяться по диаграммам предельных напряжений (черт. 1—14) как значения, соответствующие ветви $N_б = 2 \cdot 10^6$ циклов.

В приложении 3 приведены программы оценки параметров уравнения (4) через параметры уравнения (1) на ЭВМ типа ЕС-1040 и ПЭВМ типа IBM, а также контрольный пример.

2.9. Расчетный предел выносливости $R_R = \sigma_R(P)$ определяют в зависимости от допускаемой вероятности отказа P (вероятности образования усталостной трещины глубиной 2—3 мм) по формуле

$$R_R = \bar{\sigma}_R - Z_P S_{\sigma_R}, \qquad (6)$$

где Z_P — квантиль нормального распределения для вероятности P

Установленные значения S_{σ_R}; A_R ; B_R принимают за расчетные.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

3.1. Расчет сварных конструкций и их элементов на усталость должен базироваться на анализе и учете режимов нагружения во всех типичных для данной машины или сооружения условиях эксплуатации. При этом под режимом нагружения конструкции понимают характер изменения, значение и повторяемость воспринимаемых переменных воздействий, а под режимом нагружения сварного соединения или элемента конструкции — характер изменения, значение и повторяемость переменных номинальных напряжений в проверяемом сечении.

3.2. По характеру изменения воздействия или напряжений режимы нагружения подразделяют на регулярные, периодические и случайные. Настоящие методические указания регламентируют расчет сварных соединений на усталость при таких режимах нагружения конструкции, когда изменение эксплуатационных напряжений в элементах можно рассматривать как стационарный или нестационарный случайный процесс, который может быть представлен ступенчатым квазистационарным.

3.3. Переменные воздействия и напряжения могут быть описаны двумя характеристиками цикла, например, (σ_{max}, σ_{min}); (σ_a, σ_m); (σ_{max}, R_σ); (σ_a, R_σ) и т. д. С первой из указанных характеристик цикла связано понятие «уровень нагружения». При анализе стационарных случайных режимов нагружения двухмерный закон распределения переменных напряжений, как правило, заменяют одномерным законом распределения уровней нагружения из условия постоянства второй характеристики цикла.

3.4. Повторяемость переменных напряжений определяют числом циклов каждого уровня нагружения. Усталостную долговечность, определенную по расчету в циклах, увязывают с временем эксплуатации машин и сооружений через наработку в годах, километры пробега, объем переработки и т. п.

3.5. В зависимости от типичных для данной машины или сооружения условий эксплуатации выделяют типовые режимы случайного нагружения несущих конструкций. Стационарные случайные режимы нагружения характеризуются одним типовым режимом. При нестационарных случайных режимах нагружения каждый типовой режим описывает вполне определенные условия работы машин или сооружений, при которых изменение напряжений в элементах конструкции можно рассматривать как стационарный случайный процесс.

3.6. В расчетах на усталость типовые режимы нагружения элементов (сварных соединений) задаются законом распределения расчетных напряжений и относительной длительностью (в годах, километрах пробега и т. д.) данного режима в общем периоде эксплуатации сооружения или машины. Типовые режимы должны отражать основные закономерности изменения значения и повторяемости рабочих напряжений и устанавливаются, как правило,

по результатам экспериментального исследования действительной нагруженности конструкции в характерных условиях ее эксплуатации. При этом необходимо учитывать все нагрузки и воздействия на конструкцию, которые вызывают изменение и повторяемость напряжений в ее элементах.

3.7. Для расчета сварных конструкций по накоплению усталостных повреждений необходимо получить распределение амплитуд расчетных напряжений σ_a при фиксированном значении коэффициента асимметрии цикла R_σ, распределение амплитуд σ_a при постоянном среднем напряжении цикла σ_m или совместное распределение максимальных σ_{max} и минимальных σ_{min} напряжений. С этой целью записи случайных режимов нагружения элементов конструкций схематизируют по ГОСТ 25.101—83 (ТГЛ 33787/01), МР 75—85. Рекомендуется использовать методы «дождя» или полных циклов.

3.8. Весь диапазон зарегистрированных при тензометрировании амплитуд напряжений разбивают равномерно на 8—16 интервалов так, чтобы их размер не превышал 5 МПа. За амплитуду σ_{a_i} принимают значение, соответствующее середине i-го интервала. По результатам последующей статистической обработки устанавливается закон и параметры распределения переменных напряжений схематизированного процесса. В расчетах элементов конструкций на усталость распределение напряжений может быть представлено в аналитической, графической или табличной форме.

3.9. В аналитическом виде одномерную плотность $f(\sigma_a)$ распределения амплитуд напряжений σ_a в элементах сварных конструкций наиболее часто описывают следующими законами:

логарифмически нормальным

$$f(\sigma_a)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a S_{\ln\sigma_a} F_R}\exp\left[-(\ln\sigma_a-\overline{\ln\sigma_a})^2\frac{1}{2S^2_{\ln\sigma_a}}\right]; \qquad (7)$$

нормальным

$$f(\sigma_a)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{\sigma_a}F_R}\exp\left[-\frac{(\sigma_a-\overline{\sigma}_a)^2}{2S\sigma_a^2}\right]; \qquad (8)$$

экспоненциальным

$$f(\sigma_a)=\frac{1}{2\beta F_R}\exp\left[\frac{\sigma_a-\overline{\sigma}_a}{\beta}\right];\ S_{\sigma_a}=\sqrt{2\beta^2}; \qquad (9)$$

Релея

$$f(\sigma_a)=\frac{\sigma_a}{S^2\sigma_a F_R}\exp\left[-\frac{\sigma_a^2}{2S^2\sigma_a}\right]; \qquad (10)$$

Вейбулла

$$f(\sigma_a)=\frac{b}{c}\left(\frac{\sigma_a}{c}\right)^{b-1}\exp\left[-\left(\frac{\sigma_a}{c}\right)^b\right], \qquad (11)$$

где $\overline{\sigma}_a$; S_{σ_a}; b; c; $\overline{\ln\sigma_a}$ и $S_{\ln\sigma_a}$ — параметры распределения;

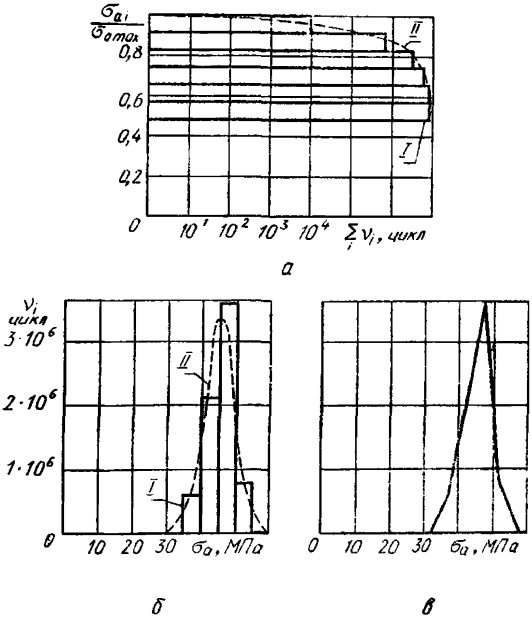
F_R — параметр усечения, который ограничивает учитываемый в расчетах на усталость диапазон значений σ_a.

Двухмерная плотность $f(\sigma_{max}, \sigma_{min})$ совместного распределения максимальных и минимальных напряжений цикла в аналитическом виде представлена в виде корреляционной матрицы

$$f_{ij} = \begin{matrix} \sigma_{max} \uparrow \\ \sigma_{min} \rightarrow \end{matrix} \left\| \begin{matrix} f_{11} & f_{12} & f_{13}, \ldots, & f_{1l} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23}, \ldots, & f_{2l} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33}, \ldots, & f_{3l} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ f_{l_1} & f_{l_2} & f_{l_3} & f_{ll} \end{matrix} \right\| \qquad (12)$$

3.10. Графически распределения амплитуд могут быть представлены в виде гистограмм, полиномов или спектров амплитуд. Примеры графического представления распределения в координатах $(\sigma_{a_l}/\sigma_{a_{max}} - \Sigma\nu_l$ и $(\sigma_{a_l} - \nu_l)$, где $\sigma_{a_{max}}$ — максимальная амплитуда и ν_l — число циклов с амплитудой $\sigma_{a_{max}}$, приведены на черт. 21. Табличная форма представления одномерного распределения амплитуд σ_{a_l} показана в табл. 10 и 11.

Графическое представление распределений амплитуд напряжений



а — в виде спектров; *б* — гистограмм; *в* — полигонов; *I* — ступенчатая функция распределения; *II* — аналитическая функция распределения

Черт. 21

Таблица 10

Ступенчатая одномерная функция распределения амплитуд напряжений

Параметры	Номер интервала амплитуд i			
i	1	2	3	...
Амплитуда σ_{a_i}, МПа				
Число циклов ν_i, цикл				
Относительная амплитуда $\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}}$				
Частота $P_i = \nu_i / \sum_i \nu_i$				

Таблица 11

Корреляционная таблица максимумов и минимумов процесса нагружения

Максимальное напряжение σ_{max}, МПа	Номер интервала $i\sigma_{max}$				
σ_{max_1}	1				
σ_{max_2}	2				
σ_{max_3}	3				
...	...				
Номер интервала $i\sigma_{min}$		1	2	3	...
Минимальное напряжение σ_{min}, МПа		σ_{min_1}	σ_{min_2}	σ_{min_3}	...

Формы представления распределений переменных напряжений могут трансформироваться друг в друга, поэтому их выбирают по удобству описания данных о нагруженности конкретной конструкции и особенностями ее расчета на усталость.

3.11. Параметры распределения амплитуд переменных напряжений — (среднее значение $\overline{\sigma}_a$ и среднее квадратическое отклонение S_{σ_a}), полученные по результатам статистической обработки экспериментальных данных, считают нормативными, отвечающими вероятности 50 %. Расчетные значения параметров $\hat{\sigma}_a$ и $\hat{S}_{\sigma_a}$ определяют как верхние границы распределения $\overline{\sigma}_a$ и S_{σ_a} с довери-

тельной вероятностью α в зависимости от объема эксперимента $\nu_э$ (числа циклов $\nu_э$ напряжений схематизированного процесса)

$$\hat{\sigma}_a = \bar{\sigma}_a + \frac{z_\alpha S_{\sigma_a}}{\sqrt{\nu_э}}; \quad (13)$$

$$\hat{S}_{э_a} = \frac{2\sqrt{\nu_э} S_{\sigma_a}}{(\sqrt{2\nu_э - 3} - z_\alpha)}. \quad (14)$$

Максимальные напряжения цикла σ_{max} или размаха напряжений $2\sigma_a$, нормативные и расчетные значения параметров их распределения определяются по аналогии с параметрами распределения амплитуд σ_a.

3.12. Распределение переменных напряжений (расчетные напряжения) для расчета на усталость вновь проектируемых конструкций в ряде случаев можно устанавливать по результатам исследования действительной нагруженности конструкций-аналогов. Аналоги в общем случае отличаются от проектируемой конструкции по форме узлов и используемым материалам, однако они имеют одно и то же функциональное назначение и поэтому воспринимают одинаковые или подобные воздействия.

Для выбора и обоснования аналогов определяющее значение имеет анализ динамических свойств конструкции и корреляционной взаимосвязи напряжений с параметрами внешнего воздействия.

3.13. При частоте вынуждающих воздействий значительно ниже собственной частоты колебания элементов и хорошей корреляции напряжений и воздействий (коэффициент корреляции $r_{xy} = 1{,}0, \ldots, 0{,}8$) аналоги могут не быть конструктивно-подобными. Если коэффициент корреляции r_{xy} между этими величинами соответствует неравенству $0{,}8 > r_{xy} \geqslant 0{,}6$, то следует стремиться к подбору конструктивно-подобных аналогов.

Если взаимосвязь выражена более слабо, то целесообразно использовать имеющиеся данные по исследованию действительной нагруженности только для аналогичных по размерам и форме конструкций.

3.14. При коэффициенте корреляции $r_{xy} \geqslant 0{,}8$ конструкцию условно рассматривают как линейный преобразователь воздействий в номинальные напряжения. Параметры распределения расчетных напряжений $\hat{\sigma}_a$ и $\hat{S}_{\sigma_a}$ для таких конструкций определяют по значениям параметров распределения расчетных нагрузок $\hat{Q}$ и $\hat{S}_a$ следующим образом:

$$\hat{\sigma}_a = K_п \hat{Q}; \quad (15)$$

$$\hat{S}_{э_a} = K_п \hat{S}_Q, \quad (16)$$

где $K_п$ — коэффициент перехода от нагрузок к напряжениям, который для вновь проектируемых конструкций определяется расчетом на прочность или по результатам статических испытаний моделей.

Значения $\hat{Q}$ и $\hat{S}_Q$ и вид закона распределения Q определяют по данным экспериментального исследования конструкции-аналога и в дальнейшем используют для проектирования новых конструкций.

Если $0{,}8 > r_{xy} \geqslant 0{,}6$, то параметры $\hat{\sigma}_a$ и $\hat{S}_{\sigma_a}$ расчетных напряжений принимают равными значениям, установленным по результатам исследования конструктивно-подобного аналога.

3.15. При отсутствии экспериментальных данных по исследованию действительной нагруженности конструкций для расчета на усталость их основных несущих элементов параметры расчетных напряжений можно вычислять по приближенным соотношениям:

$$\hat{\sigma}_a = k\sigma_{ст}; \tag{17}$$

$$\hat{S}_{\sigma_a} = \vartheta_\varepsilon \hat{\sigma}_a, \tag{18}$$

где $\sigma_{ст}$ — напряжение в рассчитываемом сечении от действия расчетной статической нагрузки; K — коэффициент перехода от $\sigma_{ст}$ к σ_a; ϑ_ε — коэффициент вариации амплитуд напряжений. Расчетные коэффициенты K и ϑ_ε приведены в табл. 12.

3.16. В расчетах на усталость по данным табл. 12 распределение амплитуд напряжений в элементах конструкций рекомендуется задавать логарифмически нормальным законом (7).

Параметры логарифмически нормального закона (среднее значение $\ln\hat{\sigma}_a$ и среднее квадратическое отклонение $\hat{S}_{\ln\sigma_a}$ натуральных логарифмов амплитуд напряжений) рассчитывают по известным значениям параметров $\hat{\sigma}_a$ и $\hat{S}_{\sigma_a}$ по формулам:

$$\ln\hat{\sigma}_a = \ln(\hat{\sigma}_a) - \frac{1}{2} S_{\ln\sigma_a}^2; \tag{19}$$

$$\hat{S}_{\ln\sigma_a} = \sqrt{\ln\left[\left(\frac{\hat{S}_{\sigma_a}}{\hat{\sigma}_a}\right)^2 + 1\right]}. \tag{20}$$

Таблица 12

Расчетные коэффициенты асимметрии цикла R_σ, вариации ϑ_ε и K перехода от $\sigma_{ст}$ к $\hat{\sigma}_a$ (рекомендуемые)

Тип конструкции и ее элементы	Характер нагружения	Типовые режимы нагружения	R_σ	K	ϑ_ε
1. Балки и фермы подкрановых путей	Стационарный	Проход крана, включая подъем — опускание груза			
1.1. В цехах металлургических заводов:					
под четырехкатковые краны (опорные сечения);			0	0,15—0,25	0,20—0,30
под четырехкатковые краны (межопорные сечения);			—1	»	»
под многокатковые краны			0	»	»
1.2. В цехах машиностроительных и других заводов:					
под четырехкатковые краны (опорные сечения);			0	0,10—0,20	0,25—0,35
под четырехкатковые краны (межопорные сечения);			—1	»	»
под многокатковые краны			0	»	0,15—0,25
1.3. Под краны, работающие с приспособлением на крюке, и специальные краны металлургических заводов			+0,3	0,25—0,30	0,15—0,25
2. Балки рабочих площадок производственных зданий при наличии рельсовых путей	»	Работа оборудования на рельсовых путях	0	0,15—0,25	0,10—0,20
3. Балки и фермы покрытий и чердачных перекрытий, несущие подъемно-транспортное или технологическое оборудование	»	Работа подъемно-транспортного или технологического оборудования	+0,3	0,20—0,30	0,30—0,40

Продолжение табл. 12

Тип конструкции и ее элементы	Характер нагружения	Типовые режимы нагружения	R_σ	K	ϑ_ε
4. Элементы конструкции бункерных и разгрузочных эстакад	Стационарный		0	—	—
5. Конструкции под двигатели			+0,3	—	—
6. Башенные краны					
6.1. Пояса стрел и башен строительных и портальных кранов			0	0,2—0,25	0,1—0,2
6.2. Решетка башен	»		0	—	—
6.3. Поворотные и ходовые рамы	Нестационарный	1. Подъем — опускание груза	0	—	—
		2. Поворот стрелы без груза	—1	—	—
		3. Поворот стрелы с грузом	—0,5	—	—
		4. Передвижение тележки без груза	0	—	—
		5. Передвижение тележки с грузом	0,3	—	—
7. Краны-перегружатели, перегрузочные грейферные краны	Стационарный	Передвижение крана, включая подъем — опускание груза			
7.1. Консоли			0,2	0,25	0,4
7.2. Пролет			—0,5	0,15	»
8. Экскаваторы-лопаты					
8.1. Рукоятки, стрелы и шарнирные соединения рукояти, стрелы и поворотной платформы;	»	Режим копания			
8.2. Поворотные платформы	Нестационарный	1. Режим копания;	0	0,25	0,35
		2. Поворот платформы с полным ковшом;	—0,5	»	»
		3. Поворот платформы с порожним ковшом;	—1	»	»
		4. Транспортный режим	0,3	»	»

Продолжение табл. 12

Тип конструкции и ее элементы	Характер нагружения	Типовые режимы нагружения	R_σ	K	ϑ_ε
8.3. Ходовые тележки	Нестационарный	1. Режим копания;	0	0,25	0,35
		2. Поворот платформы с полным ковшом;	—0,5	»	»
		3. Поворот платформы с порожним ковшом;	—1	»	»
		4. Транспортный режим	0,3	»	»
9. Экскаваторы-драглайны					
9.1. Верхний пояс стрелы;	Стационарный	Режим копания	0,3	0,30—0,40	0,15—0,20
9.2. Оттяжка надстройки			0,3	0,30	0,15
10. Элементы конструкции золотодобывающих драг	»	Режим черпания			
10.1. Сваи;			—1	0,25	0,25—0,45
10.2. Стакеры;			0	»	»
10.3. Черпаковые рамы;			0,3	»	»
10.4. Подвесы стакеров и черпаковых рам			0,3	»	»
11. Дымовые трубы	Нестационарный	Колебания под воздействием ветрового потока четырех основных направлений:			
		1. Вдоль ветрового потока	0	0,15	0,3—0,5
		2. Поперек ветрового потока	—1	0,10	»
12. Антенно-мачтовые сооружения	»	См. дымовые трубы			
12.1. Ствол:					
— трубчатой конструкции;			—1	0,10	»
— решетчатой конструкции;			—1	0,08	»
12.2. Оттяжки			0	0,15	»
13. Пролетные строения автодорожных мостов					

Продолжение табл. 12

Тип конструкции и ее элементы	Характер нагружения	Типовые режимы нагружения	R_σ	K	ϑ_ε
13.1. Элементы главных балок	Нестационарный	По весовым характеристикам транспортных средств с учетом схемы нагружения	0,3	0,15	0,25—0,40
13.2. Элементы ортотропных плит проезжей части	»	Воздействие каждой оси транспортного средства	0	0,20—0,25	»
14. Пролетные строения железнодорожных мостов	»				
14.1. Элементы главных балок;		Воздействие локомотива и поезда	0,3	0,10	0,40
14.2. Элементы проезжей части и связи		Воздействие каждой оси	0	0,20	0,35—0,40
15. Элементы опорных блоков морских глубоководных стационарных платформ трубчатой конструкции	»	Колебания под воздействием ветровых волн четырех основных направлений:			
		1. Вдоль ветрового волнения	0	0,15	0,4—0,5
		2. Поперек ветрового волнения	—1	0,1	»
16. Сварные резервуары, работающие под внутренним давлением					
16.1. Стационарные резервуары и накопители;	Детерминированный	Режим детерминированного нагружения	0,4	—	—

Продолжение табл. 12

Тип конструкции и ее элементы	Характер нагружения	Типовые режимы нагружения	R_σ	K	$\vartheta_в$
16.2. Транспортные резервуары для перевозки жидкостей	Нестационарный	Воздействие неровностей дорожного покрытия при транспортировке по:			
		1) асфальту в заполненном состоянии;	0,7	0,01	1,2
		2) асфальту в опорожненном состоянии;	0,4	0,01	»
		3) булыжнику в заполненном состоянии;	0,7	0,02	»
		4) булыжнику в опорожненном состоянии;	0,4	0,02	»
		5) грунту в заполненном состоянии;	0,7	0,02	»
		6) грунту в опорожненном состоянии	0,4	0,02	»

4. РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ НА УСТАЛОСТЬ

4.1. При накоплении усталостных повреждений сварные металлические конструкции рассчитывают на усталость. Определяют усталостную долговечность (ресурс, срок службы) при заданной допустимой вероятности появления трещины (далее — вероятности отказа P).

4.2. Условие прочности при оценке усталостной долговечности конструкции по вероятности отказа P записывают в виде

$$a < a_P , \tag{21}$$

где a_P — предельное накопленное усталостное повреждение. Работоспособность конструкции обеспечивается, если накопленное усталостное повреждение a в том или ином элементе за расчетный срок службы при допускаемой вероятности отказа P не превосходит a_P.

4.3. Исходными данными для расчета служат характеристики сопротивления усталости элементов конструкций (разд. 2) и статистические распределения амплитуд расчетных напряжений (разд. 3).

4.4. Расчет сварных конструкций на усталость основан на линейной гипотезе накопления усталостных повреждений (далее — линейная гипотеза НУП):

$$a_P = \sum_i \frac{n_i}{N_i} , \tag{22}$$

где n_i — число циклов напряжения уровня σ_i; N_i — предельное число циклов при действии циклических напряжений уровня σ_i.

4.5. Расчетную усталостную долговечность элемента конструкции $T(P)$ в зависимости от принятой вероятности отказа вычисляют по уравнению

$$T(P) = \frac{T_н \cdot a_P}{a} . \tag{23}$$

4.6. В распределении расчетных напряжений выделяют диапазон повреждающих напряжений, который ограничивается снизу расчетным сопротивлением усталости $R_R(P)$ с вероятностью P, а сверху в общем случае — расчетным сопротивлением R основного металла при расчете на прочность по методу предельных состояний. Если расчет на прочность выполняют по методу допускаемых напряжений, диапазон повреждающих напряжений ограничивается снизу средним пределом выносливости σ_R, а сверху — допускаемым напряжением $[\sigma]$.

Верхнюю границу уточняют по данным экспериментальных исследований и приравнивают к максимальному зарегистрированному значению амплитуды $\sigma_{a\,max}$.

Диапазон повреждающих напряжений разбивают на k интервалов размером не более 5 МПа.

4.7. По расчетным характеристикам сопротивления усталости данного элемента (сварного соединения) из уравнения кривой усталости (п. 2.2) находят предельное число циклов N_i (σ_{a_i}; P) как функцию амплитуды напряжений σ_{a_i} и вероятности отказа P. При постоянном коэффициенте асимметрии R_σ число циклов N_i (σ_{a_i} ; P) вычисляют по формуле

$$N_i(\sigma_{a_i},P)=\frac{A}{\ln\left[\frac{2\sigma_a}{(1-R_\sigma)R_R(P)}\right]}-B, \qquad (24)$$

а при постоянном среднем напряжении цикла σ_m

$$N_i(\sigma_{a_i},P)=\frac{A}{\ln\left(\frac{\sigma_{a_i}+\sigma_m}{R_R(P)}\right)}-B. \qquad (25)$$

4.8. Исходные данные для расчета на усталость оформляют таблицей, в которую вносятся ступенчатая функция распределения P_j (σ_{a_i}) амплитуд расчетных напряжений и отвечающее i-й ступени число циклов N_{ij} для j-го типового режима нагружения. N_{ij} определяют по уравнению (24) или (25), а P_j (σ_{a_i}) находят как отношение числа циклов n_{ij} напряжений σ_{a_i} i-й ступени к общему числу циклов n_j ($T_н$) напряжений для j-го типового режима за время $T_н$

$$P_j(\sigma_{a_i})=P_{ij}=\frac{n_{ij}}{n_j(T_н)}. \qquad (26)$$

Обе величины n_{ij} и n_j ($T_н$) в соотношении (26) задаются применительно к конкретной наработке $T_н$, которую измеряют в годах службы, километрах пробега и т. д.

Пример представления данных для расчета на усталость приведен в табл. 13.

В табл. 13 k — число интервалов разбиения диапазона повреждающих напряжений; l — количество типовых режимов нагружения; Δa_j — усталостное повреждение от действия диапазона повреждающих напряжений σ_a при j-м типовом режиме нагружения, накопленное за период $T_н$. Значения Δa_j по линейной гипотезе накопления усталостных повреждений вычисляют по данным табл. 13 по формуле

$$\Delta a_j=n_j(T_н)\sum_{i=1}^{k}\frac{P_{ij}}{N_{ij}}. \qquad (27)$$

Таблица 13

Данные для расчета на усталость по линейной гипотезе НУП

Значения предельного числа циклов N_{ij} по формуле (24) или (25) и повторяемости P_{ij} по формуле (26) для режимов нагружения

Номер типового режима j	1		2		...		l	
Номер интервала амплитуд i	N_{i1}	P_{i1}	N_{i2}	P_{i2}	...	...	N_{il}	P_{il}
1	N_{11}	P_{11}	N_{12}	P_{12}	...	...	N_{1l}	P_{1l}
2	N_{21}	P_{21}	N_{22}	P_{22}	...	...	N_{2l}	P_{2l}
...	...	...	...	...	...	...	...	...
k	N_{k1}	P_{k1}	N_{k2}	P_{k2}	...	...	N_{kl}	P_{kl}
Наработка $n_j(T_н)$ цикл	n_1		n_2		...		n_l	
Накопленное усталостное повреждение Δa_j	Δa_1		Δa_2		...		Δa_l	

4.9. Полное накопленное усталостное повреждение a за период $T_н$ составляет сумму Δa_j по всем типовым режимам нагружения или

$$a = \sum_{j=1}^{l} \Delta a_j . \qquad (28)$$

Полученное по уравнению (28) значение a подставляют в соотношение (23).

4.10. Распределение долговечности $T(P)$ по вероятности отказа P получают с учетом распределения амплитуд, например, по закону (7) — (11). Для логарифмически нормального закона искомое распределение $T(P)$ имеет вид

$$T(P) = \frac{a_P T_н}{\sqrt{2\pi}} \sum_{j=1}^{l} \frac{n_j}{(\hat{S}_{\ln\sigma_a})_j} \left\{ \int_{R_{R_j}}^{\sigma_{a\,max}} \frac{1-R_{\sigma_j}}{2} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\exp\left[-\dfrac{(\ln\sigma_a - \ln\hat{\sigma}_{a_j})^2}{2(\hat{S}_{\ln\sigma_a})_j^2} \right] d\sigma_a}{\sigma_a \left[\ln \dfrac{A_j}{\dfrac{2\sigma_a}{(1-R_{\sigma_j})R_{R_j}}} - B_j \right]} \right\} . \qquad (29)$$

При расчете металлоконструкций, если расчетные характеристики сопротивления усталости сварных соединений и расчетные напряжения устанавливаются с запасом вероятности, принимают $a_P = 1$.

4.11. Если расчет проводится по принятой в машиностроении корректированной линейной гипотезе накопления усталостных повреждений, то за расчетные характеристики сопротивления усталости принимают их нормативные значения, установленные по табл. 1—8 и черт. 1—14 для 50 %-ной вероятности отказа. Кривую усталости описывают степенным уравнением вида (4) при постоянном коэффициенте асимметрии $R_\sigma = -1$ и вероятность отказа сварного соединения определяют в соответствии с пп. 4.12—4.15.

4.12. Предельное накопленное усталостное повреждение a_P вычисляют из соотношений

$$\begin{cases} a_P = \dfrac{\sigma_{a_{max}}\xi - 0{,}5\sigma_{-1}}{\sigma_{a_{max}} - 0{,}5\sigma_{-1}} \text{ при } a_P > 0{,}1; \\ a_P = 0{,}1 \text{ при } \sum\limits_i \dfrac{n_i}{N_i} \leqslant 0{,}1; \end{cases} \tag{30}$$

$$\xi = \sum_{i=1}^{k_1} \frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} P_i^*, \tag{31}$$

$$(\sigma_a \geqslant 0{,}5\sigma_{-1})$$

$$P_i = \frac{n_i}{n^*},$$

где n^* — число циклов амплитуд напряжений $\sigma_{a_i} \geqslant 0{,}5\sigma_{-1}$ за наработку $T_н$; k_1 — число интервалов разбиения диапазона напряжений $0{,}5\sigma_{-1} \leqslant \sigma_{a_i} \leqslant \sigma_{a_{max}}$.

4.13. Накопленное усталостное повреждение a, входящее в зависимость (23), определяют как сумму

$$a = \frac{n(T_н)}{N_б} n_P^m \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}}\right)^m P_i \tag{32}$$

по всем амплитудам $\sigma_{a_i} \geqslant \sigma_{-1}$. Здесь $n_P = \sigma_{a_{max}}/\sigma_{-1}$ — коэффициент относительной нагруженности; k — число интервалов разбиения диапазона напряжений $\sigma_{-1} \leqslant \sigma_{a_i} \leqslant \sigma_{a_{max}}$; m — показатель степени уравнения кривой усталости

$$P_i = \frac{n_i}{n(T_н)}. \tag{33}$$

4.14. Исходные данные для расчета по корректированной линейной гипотезе накопления усталостных повреждений вносят в таблицу. Пример табличной формы представления данных приведен в табл. 14.

Таблица 14

Данные для расчета на усталость по корректированной линейной гипотезе НУП

Параметры	Номер интервала амплитуд						Сумма
	1	2	...	k	...	k_1	
1. Амплитуда σ_{a_i}, МПа							
2. Наработка $n_i(T_н)$, цикл							$n(T_н)$
3. Наработка $n_i^*(T_н)$, цикл							$n^*(T_н)$
4. Повторяемость, P_i							
5. Повторяемость P_i^*							$\sum_{i-1}^{k_1} P_i^* = 1$
6. Относительная амплитуда $\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}}$							
7. $\left(\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}}\right)^m P_i$							$\sum_{i-1}^{k_1}\left(\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}}\right)^m P_i$

4.15. Вероятность отказа P находится по квантили нормального распределения z_P, определяемой по формуле

$$z_P = \frac{1-\tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2\vartheta_{\sigma_R}^2 + \vartheta_\varepsilon^2}}, \qquad (34)$$

$$\tilde{n} = \frac{n_P}{n}, \quad n = \frac{\overline{\sigma_{a_{max}}}}{\sigma_{-1}}. \qquad (35)$$

Здесь $\overline{\sigma_{a_{max}}}$ — максимальная амплитуда $\sigma_{a_{max}}$, полученная непосредственно в результате статистической обработки процесса нагружения; ϑ_{σ_R} — коэффициент вариации предела выносливости; ϑ_ε — коэффициент вариации амплитуд расчетных напряжений.

Коэффициент ϑ_{σ_R} вычисляют как отношение

$$\vartheta_{\sigma_R} = \frac{S_{\sigma_{-1}}}{\sigma_{-1}}, \qquad (36)$$

в котором величины σ_{-1} могут быть найдены по диаграммам (черт. 1—14), а $S_{\sigma_{-1}}$ — по табл. 9.

Коэффициент ϑ_ε вычисляют в соответствии с разд. 3 по данным экспериментальных исследований нагруженности конструкций-аналогов; в ряде случаев его можно приближенно оценить по табл. 12.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Обязательное

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЯХ

Нормативные значения ХСУ установлены с вероятностью неразрушения 50 %; расчетные значения ХСУ — значения, принимаемые в расчетах на усталость и устанавливаемые для заданной допускаемой вероятности отказа P.

σ — расчетное максимальное номинальное напряжение, МПа;

$\overline{\sigma_R}$ — параметр уравнения (1) кривой усталости, соответствующий среднему пределу выносливости сварных соединений при коэффициенте асимметрии R_σ, МПа;

R_R — расчетный предел выносливости элементов сварных металлоконструкций, МПа;

$\sigma(P, N)$ — расчетное максимальное номинальное напряжение, соответствующее долговечности N по параметру вероятности отказа P, МПа;

$\sigma_R(P)$ — ограниченный предел выносливости, соответствующий расчетному, МПа;

σ_{max}, σ_{min} — максимальное и минимальное напряжение цикла, МПа;

σ_a — амплитуда напряжений цикла, МПа;

σ_m — среднее напряжение цикла, МПа;

$\sigma_{ост} \leqslant 0{,}5\sigma_т$ — низкие остаточные сварочные напряжения, МПа;

$\sigma_{ост} > 0{,}5\sigma_т$ — высокие остаточные сварочные напряжения, МПа;

$\sigma_т$ — предел текучести основного металла, МПа;

$\sigma_{ст}$ — напряжение в рассчитываемом сечении от действия статической нагрузки, МПа;

$\overline{\sigma_a}$ — нормативное среднее значение распределения амплитуды напряжения цикла, МПа;

$\widehat{\sigma_a}$ — расчетное среднее значение распределения амплитуды нагружения цикла, МПа;

S_{σ_R} — среднее квадратическое отклонение предела выносливости элементов сварных металлоконструкций при коэффициенте асимметрии R_σ, МПа;

$S_{\ln\sigma_a}$ — среднее квадратическое отклонение логарифма амплитуды напряжений цикла, МПа;

$\widehat{S}_{\ln\sigma_a}$ — расчетное среднее квадратическое отклонение логарифма амплитуды напряжений цикла, МПа;

ϑ_{σ_R} — коэффициент вариации предела выносливости;

ϑ_ε — коэффициент вариации амплитуды напряжений цикла;

$\widehat{Q}$ — расчетное значение распределения нагрузок, кН;

$\widehat{S}_Q$ — расчетное среднее квадратическое отклонение распределения нагрузок, кН;

A_R, B_R — параметр уравнений (1) и (2) кривой усталости для асимметрии цикла R_σ;

m — параметр степенного уравнения (4);

$N_б$ — циклическая долговечность, соответствующая базовому числу циклов;

N_i — предельное число циклов при напряжении σ_{a_i};

ν_i — число циклов i-й ступени схематизированного процесса;

P_i — относительное число циклов i-й ступени схематизированного процесса;

n_i — число циклов напряжений σ_{a_i}, отвечающее наработке $T_н$;

n — число циклов напряжений повреждающего диапазона, отвечающее наработке $T_н$;

n^* — число циклов напряжений диапазона $0{,}5\sigma_{-1} \leqslant \sigma_{a_i} \leqslant \sigma_{a_{max}}$ отвечающее наработке $T_н$;

$n(T_н)$ — число циклов, отвечающее наработке $T_н$;

$n(T)$ — усталостная долговечность в циклах;

T — усталостная долговечность;

a — накопленное усталостное повреждение;

a_P — предельное значение накопленного усталостного повреждения;

$f(\sigma_a)$ — функция плотности вероятностей распределения амплитуд;

$f(\sigma_{max}, \sigma_{min})$ — функция плотности двумерного распределения напряжений;

F_R — параметр усечения статистического распределения;

r_{xy} — коэффициент корреляции;

n_P — коэффициент относительной нагруженности;

$K_п$ — коэффициент перехода от нагрузок к напряжениям;

K — коэффициент перехода от $\sigma_{ст}$ к $\widehat{\sigma}_a$ в формуле (18);

z_P — квантиль нормального распределения для вероятности P.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

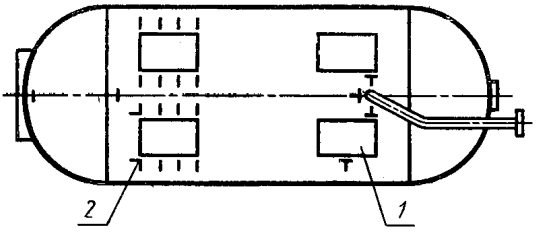
Справочное

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА НА УСТАЛОСТЬ

1. Пример расчета на усталость сварного опорного узла транспортных цистерн жидкой двуокиси углерода

Наиболее ответственной частью цистерны является внутренний сосуд. Сосуд сварной, изготовлен из низколегированной горячекатаной листовой стали 09Г2С. Корпус сосуда состоит из цилиндрической обечайки с одним продольным и двумя поперечными стыковыми швами, к которой приварены эллиптические днища с фланцевыми бобышками (черт. 22). Внутренний диаметр обечайки 1200 мм, толщина стенки — 8 мм.

Внутренний сосуд цистерны



1 — опорные накладки; *2* — тензодатчики

Черт. 22

Сосуды автоцистерн устанавливают на полуприцеп на четырех опорах. Места опирания сосуда усилены приваренными по контуру прямоугольными стальными накладками толщиной 8 мм. При транспортировании несущая система передает нерегулярные воздействия неравностей дорожного покрытия на корпус сосуда, в результате чего у сварных швов возникают переменные напряжения, которые могут превосходить предел выносливости сварного соединения опорной накладки с обечайкой сосуда.

Рабочий цикл транспортных цистерн составляют заправка внутреннего сосуда, перевозка двуокиси на предприятие-потребитель, опорожнение и пробег порожней цистерны в обратном направлении. Полное усталостное повреждение a опорного узла сосуда складывается из повреждения $a_д$, вызванного циклированием внутреннего давления, и повреждения $a_т$ от действия переменных напряжений при транспортировке. Для того, чтобы определить $a_д$, необходимо знать режим и число циклов изменения внутреннего давления. Внутреннее давление p при заполнении-опорожнении сосуда изменяется от максимального рабочего $P_{max}=1{,}8$ МПа до минимального, что соответствует изменению номинальных окружных напряжений в обечайке от $\sigma_{P_{min}}=80$ МПа до $\sigma_{P_{max}}=180$ МПа. Число циклов за наработку $T_н=1$ год составляет 150.

В условиях эксплуатации цистерны транспортируют по асфальтовым, булыжным и грунтовым дорогам. Процесс изменения напряжений в опорном узле в общем случае является случайным нестационарным, в то время как при транспортировании по дороге с однородным покрытием его можно рассматривать как случайный стационарный. Поэтому нагруженность в соответствии с п. 3.5 описывалась типовыми режимами.

В расчетах на усталость реальный пробег по дорогам общего назначения условно заменялся пробегом по типовой дороге, составленной из участков с однородным покрытием. Относительные длины пробегов по каждому j-му участку определялись по нормативно-техническим материалам как общие для парка автопоездов, к которым согласно классификации автотранспортных средств принадлежат рассматриваемые цистерны. Участки типовой дороги и относительные длины пробегов по ним приведены в табл. 15.

Таблица 15

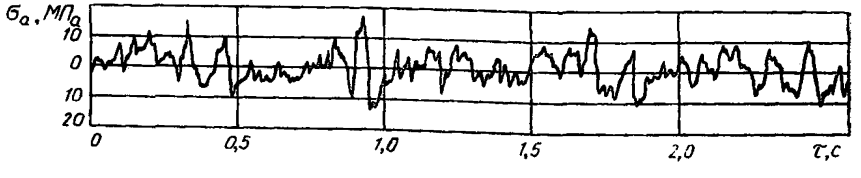
Состав типовой дороги

Тип дороги		Загрузка цистерны, %	Относительный пробег ψ_j, %
1	Асфальт	0	32,5
2		100	32,5
3	Булыжник	0	10,0
4		100	10,0
5	Грунт	0	7,5
6		100	7,5

Таким образом, типовые режимы нагружения опорного узла автоцистерны в расчете на усталость были представлены типовой дорогой, состоящей из шести участков, и режимом циклирования внутреннего давления с постоянной амплитудой при заполнении — опорожнением цистерны. При пробеге по каждому из участков типовой дороги величина переменных напряжений в опорном узле описывалась статистическим законом распределения их амплитуд и характеризовалась постоянным значением коэффициента асимметрии R_σ .

Тип и параметры закона распределения амплитуд случайных напряжений изучались по результатам испытательных пробегов. На черт. 23 приведен фрагмент типичной осциллограммы, записанной при пробеге заполненной цистерны по булыжнику. Корреляционный анализ показал, что процесс нагружения при транспортировании по дороге с однородным покрытием является случайным узкополосным, и его можно отнести к стационарным гауссовским колебаниям с небольшой долей периодической составляющей.

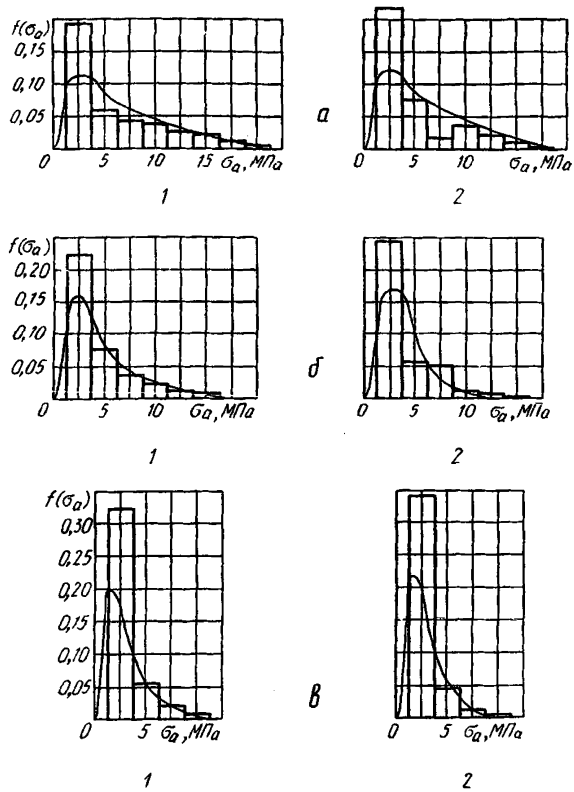
Осциллограмма напряжений



Черт. 23

Осциллограммы схематизировались методом выделения полных циклов. По результатам схематизации были построены гистограммы распределения амплитуд напряжений в сварном соединении накладки с обечайкой сосуда для каждого типового режима транспортирования цистерны. Такие гистограммы, представляющие собой эмпирические распределения, показаны на черт. 24. На основании критериальной оценки для описания эмпирических распределений амплитуд был принят логарифмически нормальный закон, как наиболее удовлетворительно соответствующий экспериментальным данным.

Гистограммы распределения амплитуд напряжений в опорном узле при транспортировке цистерны по булыжнику (а), грунту (б) и асфальту (в)



1 — заполненная цистерна; *2* — опорожненная цистерна

Черт. 24

Нормативные параметры распределения среднего значения $\overline{\ln\sigma_a}$ и среднего квадратического отклонения $S_{\ln\sigma_a}$ логарифмов амплитуд определялись для каждого типового транспортного режима нагружения по известным зависимостям:

$$\overline{\ln\sigma_a} = \frac{1}{\nu_э} \sum_i \nu_i \ln\sigma_{a_i};$$

$$S_{\ln\sigma_a} = \left[\frac{1}{\nu_э - 1} \sum_i \nu_i (\ln\sigma_{a_i} - \overline{\ln\sigma_a})^2 \right]^{1/2}.$$

Затем по формулам (13) и (14) при уровне доверия $\alpha=0{,}99$ определялись расчетные параметры распределения $\overline{\ln\sigma_a}$ и $\hat{S}_{\ln\sigma_a}$. Результаты расчетов, а также

зарегистрированное при транспортировании по j-му участку полигона число циклов $\nu_э$ и число циклов δ_j, приходящееся на 1 км пробега по полигону, приведены в табл. 16. Здесь же представлены коэффициент асимметрии R_{σ_j} отвечающий режимам транспортирования цистерны. При циклировании внутреннего давления R_σ вычисляют по формуле

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{P_{min}}}{\sigma_{P_{max}}} = \frac{80}{180} = 0{,}44.$$

Таблица 16

Данные для расчета на усталость опорного узла транспортной цистерны

Параметры	Типовые режимы					
	асфальта		булыжника		грунта	
Загрузка цистерны, %	0	100	0	100	0	100
Коэффициент асимметрии R_{σ_j}	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7
Число циклов схематизированного процесса $\nu_{э_j}$	3427	3203	2962	2837	13872	13099
Число циклов на 1 км пробега δ_j	490	458	1481	1419	1681	1588
Нормативное значение среднего $\overline{\ln\sigma_{a_j}}$	1,1	1,03	1,59	1,53	1,43	1,40
Нормативное значение среднего квадратического отклонения $S_{\ln\sigma_{a_j}}$	0,52	0,63	0,70	0,67	0,65	0,64
Расчетное значение среднего $\widehat{\lg\sigma_{a_j}}$	1,13	1,07	1,62	1,57	1,44	1,41
Расчетное значение среднего квадратического отклонения $S_{\ln\sigma_{a_j}}$	0,64	0,65	0,73	0,70	0,66	0,65
Наработка за 1 год $n_j(T_н)\cdot10^{-6}$, цикл	7,32	6,43	6,81	6,53	5,80	5,48
Накопленное усталостное повреждение за 1 год $\Delta a_j \times 10^3$	1,43	1,71	22,0	26,9	8,57	10,4

Число циклов $n_j(T_н)$ определялось по данным анкетного опроса предприятий — владельцев автоцистерн о годовых пробегах. Такие данные представлены в табл. 17 и охватывают 203 транспортные цистерны. Годовой пробег зависит от расстояния между заводом-поставщиком и потребителем, соотношения между числом действующих цистерн и потребностью предприятия в двуокиси углерода и является случайной величиной. В качестве расчетного был принят пробег с вероятностью непревышения 0,97, равной $3{,}6\cdot10^4$ км. Протяженность каждого

j-го участка типовой дороги по отношению к ее полной длине составляет $\psi_j \cdot 4{,}6 \cdot 10^4$ км. С учетом числа циклов δ_j, приходящихся на 1 км пробега, наработка в циклах за период $T_н = 1$ год при движении по j-му участку равна

$$n_j = \delta_j \psi_j \cdot 4{,}6 \cdot 10^4.$$

Таблица 17

Распределение величин годового пробега транспортных цистерн

Номер интервала	1	2	3	4	5	6	7	8
Интервалы пробега, тыс. км	0—12	12—24	24—36	36—44	44—48	48—52	52—60	60—64
Число цистерн	119	41	26	9	4	2	—	2

Значения n_j приведены в табл. 16.

Сварное соединение опорной накладки с обечайкой сосуда, выполненное угловыми швами с обваркой по контуру без предварительной разделки кромок, согласно табл. 6, относят к классу элементов 6. При вводе в эксплуатацию сосуды испытывают при давлении около 80 % от нормативного, что приводит к значительной релаксации остаточных сварочных напряжений. Принимая во внимание небольшую толщину соединяемых элементов (8 мм), можно принять, что остаточные напряжения в сварном шве не превышают 0,5 $\sigma_т$, т. е. $\sigma_{ост} \leqslant 0{,}5\,\sigma_т$. Следовательно, рассматриваемый узел можно отнести к группе элементов 6б.

Нормативный предел выносливости σ_R определяют по диаграмме предельных напряжений цикла (черт. 12). Пересечения ветви диаграммы на неограниченной базе с прямыми $R_{\sigma_1} = 0{,}4$, $R_{\sigma_2} = 0{,}7$ и $R_{\sigma_3} = 0{,}44$ дают следующие значения предела выносливости: $\sigma_{0,4} = 140$ МПа, $\sigma_{0,7} = 235$ МПа, $\sigma_{0,44} = 150$ МПа.

Нормативные средние квадратические отклонения S_{σ_R} предела выносливости рассчитывались по формуле (3). Входящая в эту формулу $S_{\sigma_{-1}} = 9$ МПа определялась по табл. 9, а предел выносливости при симметричном цикле $\sigma_{-1} = 55$ МПа — по диаграмме предельных напряжений S_{σ_R}. Тогда нормативные S_{σ_R} составляют

$$S_{\sigma_{0,4}} = \frac{\sigma_{0,4}}{\sigma_{-1}} S_{\sigma_{-1}} = \frac{140}{55} \cdot 9 = 23 \text{ МПа};$$

$$S_{\sigma_{0,7}} = \frac{\sigma_{0,7}}{\sigma_{-1}} S_{\sigma_{-1}} = \frac{235}{55} \cdot 9 = 39 \text{ МПа};$$

$$S_{\sigma_{0,44}} = \frac{\sigma_{0,44}}{\sigma_{-1}} S_{\sigma_{-1}} = \frac{150}{55} \cdot 9 = 25 \text{ МПа}.$$

Квантиль нормального распределения для вероятности неразрушения $P = 0{,}95$ равна $z_P = 1{,}645$. Значения расчетного сопротивления усталости R_R, отвечающие вероятности $P = 0{,}95$, определялись по уравнению (6)

$$R_{0,4}=\sigma_{0,4}-z_P\ S_{\sigma_{0,4}}=140-1{,}645\cdot 23=100\ \text{МПа};$$

$$R_{0,7}=\sigma_{0,7}-z_P\ S_{\sigma_{0,7}}=235-1{,}645\cdot 39=170\ \text{МПа};$$

$$R_{0,44}=\sigma_{0,44}-z_P\ S_{\sigma_{0,44}}=150-1{,}645\cdot 25=110\ \text{МПа}.$$

Входящие в уравнение кривой усталости (2) параметры A_R и B_R были найдены по диаграммам (черт. 19). Например, при асимметрии $R_\sigma=0{,}4$ эти параметры равны

$$A_{0,4}=4{,}2\cdot 10^5;\quad B_{0,4}=5{,}8\cdot 10^5.$$

В итоге уравнения, описывающие расчетные кривые усталости сварного опорного узла цистерны, построенные для вероятности отказа $P=100-P'=5\ \%$, имеют вид:

$$\sigma(0{,}95;N)=100\ \exp\frac{4{,}2\cdot 10^5}{+5{,}8\cdot 10^5};$$

$$\sigma(0{,}95;N)=170\ \exp\frac{2{,}9\cdot 10^5}{+9{,}3\cdot 10^5};$$

$$\sigma(0{,}95;N)=110\ \exp\frac{4{,}2\cdot 10^5}{+6{,}0\cdot 10^5}. \qquad (37)$$

Необходимые для расчета характеристики сопротивления усталости в зависимости от коэффициента асимметрии цикла R_σ сведены в табл. 18.

Таблица 18

Расчетные значения характеристик сопротивления усталости опорного узла цистерны

Характеристики	Коэффициент асимметрии R_σ		
	0,4	0,7	0,44
R_R, МПа	100	170	110
A_R	$4{,}2\cdot 10^5$	$2{,}9\cdot 10^5$	$4{,}2\cdot 10^5$
B_R	$5{,}8\cdot 10^5$	$9{,}3\cdot 10^5$	$6{,}0\cdot 10^5$

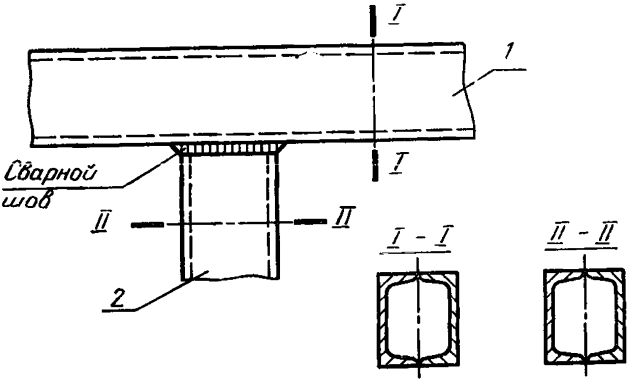
Усталостная долговечность T опорного узла цистерны выражалась в годах службы. Для ее определения данные о нагруженности (табл. 16) и характеристиках сопротивления усталости (табл. 18) были подставлены в уравнение (29). Интегрирование осуществлялось методом Симпсона. В формуле (29) выражение, стоящее под знаком суммы, умноженное на $\sqrt{2\pi}$, представляет собой накопленное усталостное повреждение Δa_j на j-м участке типовой дороги. Значения Δa_j, полученные интегрированием, записаны в нижней строке табл. 16. При суммировании необходимо было также учесть усталостное повреждение $a_д$, накопленное от действия внутреннего давления. По уравнению кривой усталости (37) $a_д$ за 1 год составила $7{,}5\cdot 10^{-4}$.

В результате расчета было получено значение $T=14{,}3$ года с вероятностью отказа $P=5\ \%$. С учетом принятого годового пробега, равного $4{,}6\cdot 10^4$ км, это соответствует примерно 660 тыс. км пробега до появления усталостной трещины в районе приварки опорной накладки.

2. Пример расчета на усталость сварного узла несущей системы выправочно-подбивочно-рихтовочной машины

Сварной узел несущей системы путевой выправочно-подбивочно-рихтовочной машины представляет собой тавровое соединение продольной балки с вертикальной стойкой (черт. 25). Соединение выполнено угловыми швами с обваркой по контуру без предварительной разделки кромок. Балка и стойка имеют коробчатое сечение и сварены каждая из двух швеллеров продольными стыковыми швами.

Сварной узел несущей системы путевой машины



1 — продольная балка; *2* — вертикальная стойка

Черт. 25

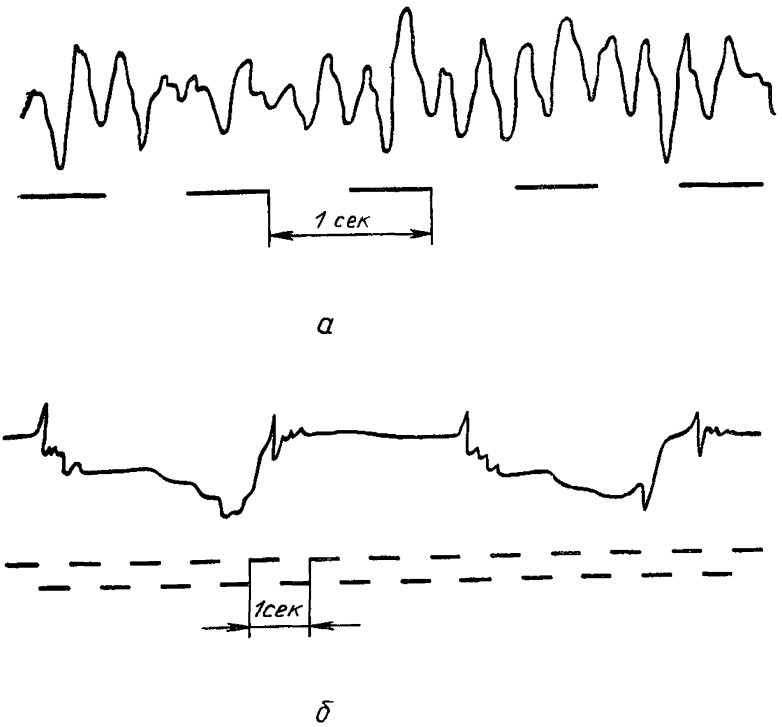
Номинальные переменные нормальные напряжения, возникающие в балке вблизи сварного углового шва, определялись тензометрированием в условиях эксплуатации. На черт. 26 представлены фрагменты осциллограмм напряжений в транспортном и рабочем режимах работы машины. Учитывая, что рабочий режим — наиболее тяжело нагруженный, а также большую долю времени работы машины в этом режиме, расчет на усталость проведен для рабочего режима.

Схематизация осциллограмм осуществлялась стандартным методом полных циклов. В результате последующей статистической обработки нагруженность узла была описана ступенчатой функцией распределения амплитуд расчетных напряжений при коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = -1$. Диапазон повреждающих напряжений ($\sigma_{a_{max}} \geqslant \sigma_{a_i} \geqslant \sigma_{-1}$) был разбит на $k=9$ интервалов, а диапазон напряжений $\sigma_{a_{max}} \geqslant \sigma_{a_i} \geqslant 0{,}5\sigma_т$ — на 13 интервалов. За срок службы машины рассматриваемый сварной узел испытывает $N_{сум} \cong 4 \cdot 10^6$ циклов нагружений.

Соединение продольной балки с вертикальной стойкой в соответствии с разд. 2 было отнесено к классу элементов — 7а. Кривая усталости аппроксимируется степенным уравнением вида. Средний предел выносливости составляет $\sigma_{-1}=22{,}5$ МПа, показатель угла наклона левой ветви кривой усталости $m=5$, точка перелома кривой усталости $N_G = 6 \cdot 10^6$.

Расчет узла выполнялся на основе корректированной линейной гипотезы накопления усталостных повреждений (30). Исходные данные для расчета приведены в табл. 19.

Осциллограммы напряжений



а — транспортный режим; *б* — рабочий режим

Черт. 26

Таблица 19

Данные для расчета на усталость сварного узла несущей системы путевой машины

Номер интервала амплитуд i	Параметры					
	Амплитуда σ_{a_i}, МПа	Повторяемость $P_i \times 10^2$	Повторяемость $P_i^* \times 10^2$	Относительная амплитуда $\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}}$	$\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}} P_i^* \times 10^2$	$\left(\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}}\right)^m P_i \times 10^2$
1	39,0	0,345	1,56	1,000	1,56	1,56
2	37,2	1,38	6,25	0,954	5,96	5,18
3	33,2	1,55	7,03	0,851	5,93	3,69
4	30,7	1,03	4,69	0,787	3,69	1,80
5	28,2	1,72	7,81	0,723	5,65	2,13
6	25,5	0,345	1,56	0,654	1,02	0,29
7	23,0	0,172	0,78	0,590	0,46	0,09
8	20,5	1,03	4,69	0,526	2,47	0,19
9	17,9	2,41	10,9	0,459	5,02	0,49
10	15,3	5,51	25,0	0,392	9,80	—
11	12,8	6,55	29,7	0,328	9,74	—
12	10,2	7,24	—	0,262	—	—
13	7,7	18,8	—	0,197	—	—
14	5,1	24,1	—	0,131	—	—
15	2,6	27,8	—	0,067	—	—

Вначале по уравнению строим зависимость относительной долговечности $D=N_{сум}/N_G$ от коэффициента относительной нагруженности $n_P=\sigma_{max}/\sigma_{-1д}$, вычислив предварительно корректировочный коэффициент a_P по формуле (30). Для вычисления ξ входящего в формулу образуем новый укороченный блок, отбрасывая $\sigma_{a_i}<0{,}5\sigma_{-1д}=11{,}25$ МПа. В табл. 19 приведены числа $\nu^*_{iб}$ укороченного блока, сумма которых $\nu^*_б=307$ представляет собой общее число циклов в укороченном блоке. Относительное число циклов в укороченном блоке определяется по формуле $P_i=\nu^*_{iб}/\nu^*_б$. Вычислив отношения $\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}}$ и затем $(\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}})\,P_i$ и просуммировав последнее, определяем ξ, которая равна $\xi=0{,}422$.

Коэффициент a_P находим по формуле

$$a_P=\frac{\sigma_{a_{max}}\xi-0{,}5\sigma_{-1д}}{\sigma_{a_{max}}-0{,}5\sigma_{-1д}}=\frac{46{,}7\cdot 0{,}422-0{,}5\cdot 22{,}5}{46{,}7-0{,}5\cdot 22{,}5}=0{,}24.$$

Далее для расчета зависимости D от n_P по табл. 20 задаемся несколькими значениями n_P, представленными в табл. 20, где также приведены значения $1/n_P$ и n_P^m, необходимые для расчета. В табл. 20 знаком Σ обозначена сумма, стоящая в знаменателе. Для ее подсчета в табл. 20 вычислены значения $\left(\frac{\sigma_{a_i}}{\sigma_{a_{max}}}\right)^m P_i$. Например, при $n_P=2$, $1/n_P=0{,}5$, следовательно суммирование должно выполняться от $i=1$ до $i=9$, так как при $i<9$ $\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}}<0{,}5$. Аналогично подсчитаны значения этой суммы при других n_P. Далее при $n_P=2$ согласно формулы имеем

Таблица 20

Расчет функции распределения усталостной долговечности сварного узла несущей системы путевой машины

Коэффициент относительной нагруженности n_P	2,5	2,2	2,0	1,5	1,1
1. $1/n_P$	0,4	0,454	0,500	0,667	0,909
2. n_P^m	39,062	23,426	16,0	5,062	1,464
3. $\sum_i(\sigma_{a_i}/\sigma_{a_{max}})^m P_i$	0,1542	0,1542	0,1493	0,1436	0,0674
4. Относительная долговечность	0,0533	0,0889	0,134	0,440	3,253
5. Коэффициент по формуле	1,410	1,241	1,128	0,846	0,620
6. Квантиль нормального распределения	—1,00	—1,238	—0,682	0,894	2,34
7. Вероятность безотказной работы	2,270	10,7	25,1	81,4	99,04

$$D=\frac{N_{\text{сум}}}{N_Q}=\frac{\lambda\nu_б}{N_G}=\frac{a_P}{n^m\Sigma}=\frac{0{,}24}{32\cdot 0{,}0742}=0{,}1011.$$

Отсюда число блоков λ равно

$$\lambda=\frac{DN_G}{\nu_б^*}=\frac{0{,}1011\cdot 6\cdot 10^6}{307}=1974.$$

Наработка в рабочих циклах составит

$$L=\lambda\cdot l_б=T=1974\cdot 81=159894 \text{ раб.цикла},$$

где $l_б=81$ раб. цикл.

Наработка в километрах отремонтированного пути

$$S=\frac{L}{b}=\frac{159894}{920}=173{,}8,$$

где $b=920$ — число рабочих циклов нагружения на 1 км пути при частоте шпал 1840 шт./км.

Квантиль нормального распределения $z=u_P$ определяется по формуле

$$u_P=\frac{1-\tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2\vartheta^2_{з\ -1д}+\vartheta^2_{\varepsilon}}}.$$

Из указанного соотношения находятся значения n

$$\tilde{n}=\frac{n_P}{n},\quad \text{где } n=\frac{\bar{\sigma}_{a_{max}}}{\bar{\sigma}_{-1д}}=\frac{46{,}7}{22{,}5}=2{,}075.$$

Значение коэффициентов вариации $\vartheta_{-1д}=0{,}1$ и $\vartheta_{\varepsilon}=0{,}1$

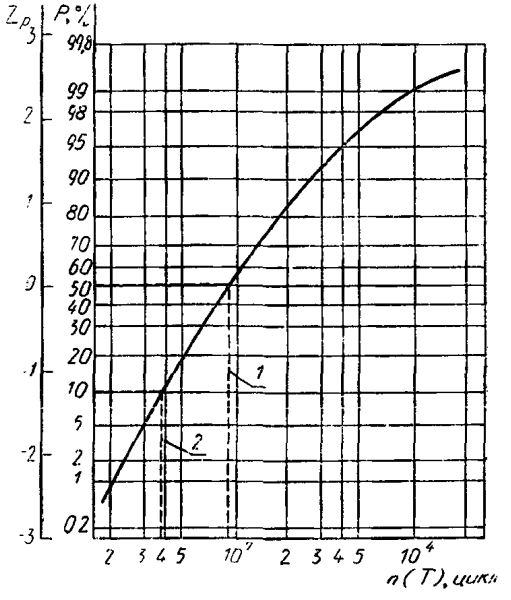
при $n_P=2$, $n=0{,}963$

$$z=u_P=\frac{1-0{,}963}{0{,}963\cdot 0{,}1^2+0{,}1^2}=0{,}266.$$

По таблицам функций нормального распределения находим, что вероятность появления трещины при относительном числе циклов $D=0{,}1011$ равна $\rho=60{,}4$ %. Аналогично находятся значения D при других P. Результаты расчетов приведены в табл. 20.

Функция распределения долговечности сварного узла несущей системы путевой машины представлена на черт. 27 на нормально вероятностной бумаге. По оси ординат отложена вероятность появления трещины, а по оси абсцисс — усталостная долговечность в логарифмическом масштабе. Из черт. 27 видно, что медианная долговечность (соответствующая вероятности появления трещины 50 %) равна $T=L=141\,000$ раб. цикл. Гамма-процентный ресурс, соответствующий вероятности безотказной работы $P'=90$ % или вероятности появления трещины $100-P=P=10$ % составляет $T=L=60000$ раб. цикл.

Функция распределения долговечности сварного узла несущей системы путевой машины



Значения долговечности при вероятности отказа: *1* — P=50 % и *2* — P=10 %

Черт. 27

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Рекомендуемое

ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СТЕПЕННОГО УРАВНЕНИЯ ПО ИЗВЕСТНЫМ ПАРАМЕТРАМ A, B, σ_R ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

1. Программа CMABS написана на языке ФОРТРАН IV для ЕС ЭВМ и состоит из одной главной программы. Она предназначена для вычисления параметров (m, c) степенного уравнения (4) кривой усталости через параметры (A, B, σ_R) экспоненциального уравнения (1).

Параметр m вычисляется по формуле (5), затем согласно п. 2.8 вычисляется параметр c.

Программа CMABS предусматривает получение одновременно любого требуемого числа оценок параметров m и c и это число регулируется идентификатором IBM.

Носителем информации могут быть перфокарты, а также при наличии диалоговой системы коллективного использования PRIMVS возможен ввод и редактирование данных с экрана дисплея. При подготовке исходных данных первым набирается значение параметра A, а за ним параметра B по формату 19. Значения параметров A и B соответствует идентификаторам IA и IB. Затем набирается по формату F 6.1 значение предела выносливости, соответствующее идентификатору SR. Для тех случаев, когда необходимо вычислить одновременно требуемое число значений параметров m и c, предусмотрена подготовка исходных данных сериями по три значения A, B, σ_R .

2. В результате работы программы на печать выводятся исходные данные и значения параметров m и c. Выводимые на печать данные комментируются соответствующими надписями.

3. Программа отлажена и проверена на ЭВМ ЕС-1040. Объем используемой оперативной памяти ЭВМ, необходимой для вычисления программы составляет 38К. Процессорное время счета контрольного примера составляет около 6 с.

4. В качестве контрольного примера рассматривается оценка параметра m и c степенного уравнения по известным параметрам $A=530\,000$, $B=480\,000$ (черт. 16), $\sigma_R=62{,}1$ (черт. 5). Эти параметры получены по результатам испытания на усталость элементов сварных металлоконструкций группы 3а.

Текст программы CMABS и результат вычисления контрольного примера приводятся.

5. Приводится текст программы, написанный на языке Бейсик для операционной системы ДОС-16, функционирующей на персональном компьютере Правец-16 или любом другом персональном компьютере, совместном с IBM. Контрольный пример аналогичен приведенному в программе CMABS.

ПРОГРАММА «CMABS»

```
//CMABS JOB (0003,042), 'КОРОБОВИЧ# 60',  MSGLEVEL=(2,0),  TIME=1
//STEP1 EXEC FORTGCLG, REGION. GO=40K
//FORT, SYSIN DD*

    56—02.79              MAIN              DATE 02.06.89(153 )—15,
0001      REAL*8C1,C2,C3,C4,A,B,SLM,C,TO,T1,T2,T3,T4,X1,X2,X12,X22,
         RSLN1,X13,X23,D1,D2,D212,CC,AL1,AL2,R(2),G(4),SR(3)
0002      DIMENSION  IA(3),IB(3)
0003      DO 7 IBM=1,10000
0004      READ2,(IA(I)IB(I)SR(I),I=1,3)
0005    2 FORMAT(3(2I9,D6.1))
0006      DO 7 I=1,3
0007      A=IA(I)
0008      B=IB(I)
0009      SLN1=SR(I)
0010      IF(SLN1.LT..0001) GO TO 8
0011      SLN=DLOG(SLN1)
0012      X1=50000
0013      X2=200000
0014      AL1=((X2+B)**2—(X1+B)**2)/2
0015      AL2=((X2+B)**3—(X1+B)**3)/3
0016          D2=DLOG(X2)
0017          D1=DLOG(X1)
0018          D22=D2*D2
0019          D12=D1*D1
0020           X22=X2*X2
0021           X12=X1*X1
0022           X13=X1*X12
0023           X23=X2*X22
0024         TO=(X22*D2—X12*D1+(X12—X22)/2)/2
0025         T1=(X23*D2—X13*D1+(X13—X23)/3)/3
0026          C1=(X2*D2—X1*D1+(X1—X2))
0027          C2=B*C1+TO
0028          C3=B*(C1*B+2*TO)+T1
0029          T2=X2*D22—X1*D12—2*C1
0030          T3=(X22*D22—X12*D12)/2—TO
0031         T4=((X23*D22—X13*D12)—2*T1)/3
0032          C4=B*(T2*B+2*T3)+T4
0033          R(1)=—A*C2
0034          R(2)=—A*AL1
0035          G(1)=C3
0036          G(2)=AL2
0037          C(3)=C4
0038          G(4)=C3
0039        CALL DGELG(R,G,2,1,1.E—14, IR)
0040        CM=1. D OO/R(2)
0041        C=(—R(1)+SLN)/(DLOG(10. D OO)*R(2))
0042        CC=10. D OO**C
0043      PRINT1,CC,CM,IA(I),IB(I),SLN1
0044    1 FORMAT(2X,'C=',E12.6,4X,'M=' ,F8.4,3X,
        F' A=' I8,4X,' B=' ,I8,4X,' SIGR=' ,F6.1)
0045    7 CONTINUE
0046    8 STOP
0047      END

          A=53000     B=480000     SIGR=62.1
           C=0.160719D 15     M=4.202
```

```
 10 CLS:DEFDBL A—H,O—Z:DEFINT I—N
 20 INPUT" A=, B/10000=, SGR="; A,B,SGR
 30 X1=5#: X2=200#
 40 AL1=((X2+B)^2—(X1+B)^2)/2
 50 AL2=((X2+B)^3—(X1+B)^3)/3
 60 D2=LOG(X2)
 70 D1=LOG(X1)
 80 D22=D2*D2
 90 D12=D1*D1
100  X22=X2*X2
110  X12=X1*X1
120  X23=X2*X22
130  X13=X1*X12
140  TO=(X22*D2—X12*D1+(X12—X22)/2)/2
150  T1=(X23*D2—X13*D1+(X13—X23)/3)/3
160  C1=(X2*D2—X1*D1+X1—X2)
170  C2=B*C1+TO
180  C3=B*(C1*B+2*TO)+T1
190  T2=X2*D22—X1*D12—2*C1
200  T3=(X22*D22—X12*D12)/2—TO
210  T4=((X23*D22—X13*D12)—T1*2)/3
220  C4=B*(T2*B+2*T3)+T4
230  R(1)=—A*C2
240  R(2)=—A*AL1
250  G(1)=C3: G(2)=AL2: G(3)=C4: G(4)=C3
260  D=G(1)*G(4)—G(2)*G(3)
270  RR=(R(1)*G(4)—R(2)*G(3))/D
280  R(2)=(R(2)*G(1)—R(1)*G(2))/D
290  CM=1#/R(2): R(1)=RR
300  C=10#^((LOG(SGR)—R(1))/(LOG(10#)*R(2))+4#)
310  PRINT"M=",CM: PRINT"C=";: PRINT USING"+. ####^^^^";
       C: STOP

 A=, B/10000=, SGR=? 53,48,62.1
M= 4.202510036832682
C=0.16078D+15
Break in 310
Ok
```

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

1. РАЗРАБОТАНЫ И ВНЕСЕНЫ

Академией наук УССР
Академией наук СССР
Министерством тяжелого машиностроения СССР
Министерством высшего и среднего специального образования СССР

Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам

РАЗРАБОТЧИКИ

В. И. Труфяков, чл.-кор. АН УССР; **В. И. Дворецкий,** д-р техн. наук; **В. П. Когаев**, д-р техн. наук; **А. П. Гусенков,** д-р техн. наук (руководители темы); **А. П. Коробович,** канд. техн. наук **В. Э. Филатов; П. П. Михеев,** д-р техн. наук; **А. В. Дворецкий; И. М. Петрова,** канд. техн. наук; **Л. Л. Смирнова,** канд. техн. наук; **А. Г. Буренко,** канд. техн. наук; **Н. А. Клыков,** д-р техн. наук; **В. Н. Мышенков,** канд. техн. наук; **С. Н. Клыков; А. И. Кубарев,** канд. техн. наук; **В. Л. Соболев,** канд. техн. наук; **А. А. Фортунин; М. А. Алимов; В. Г. Перфилов,** канд. техн. наук; **Б. Б. Бунин,** канд. техн. наук; **В. Г. Шевченко; Л. В. Даниленко,** канд. техн. наук

2. УТВЕРЖДЕНЫ И ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 30.03.90 № 696

3. ВВЕДЕНЫ ВПЕРВЫЕ

4. ССЫЛОЧНЫЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Обозначение НТД, на который дана ссылка	Номер пункта
ГОСТ 25.101—83	1.2
ГОСТ 23207—78	1.6

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Надежность в технике
Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций

РД 50—694—90

Редактор *Р. С. Федорова*
Технический редактор *Г. А. Теребинкина*
Корректор *А. С. Черноусова*

Сдано в наб. 22.05.90 Подп. в печ. 22.01.91 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Печать высокая. Гарнитура литературная 5,5 усл. п. л. 5,5 усл. кр.-отт. 4,53 уч.-изд. л. Тираж 14000 экз. Зак. 893 Цена 90 к. Изд. № 646/4

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123557, Москва, ГСП, Новопресненский пер., 3.
Калужская типография стандартов, ул. Московская, 256.

gost.e-ecolog.ru