

ГЛАВА 27

НОРМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ
ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗКАХ (ГОСТ 25859—83)

27.1. Условия применения

Настоящие нормы и методы расчета распространяются на стальные сосуды и аппараты, применяемые в химической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности и отвечающие требованиям ГОСТ 24306—80, при количестве главных циклов нагружения от давления, стесненности температурных деформаций или других видов нагружений от 10^3 до $5 \cdot 10^5$ за весь срок эксплуатации сосуда.

Настоящий стандарт должен применяться совместно с ГОСТ 14249—89.

Расчетные формулы настоящего стандарта применимы при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывают ползучесть материалов, т.е. при таких температурах, когда допускаемое напряжение определяют по ГОСТ 14249—89 по пределу текучести или временному сопротивлению (пределу прочности).

Если нет точных данных, то формулы применимы при условии, что расчетная температура стенки из углеродистой стали не превышает 380°C , из низколегированной стали 420°C и из аустенитной стали 525°C .

Расчетные формулы применимы для элементов сосудов и аппаратов, отвечающих условиям прочности при статических нагрузках по нормативно-технической документации и для которых в нормативно-технической документации не приведен расчет на малоцикловую усталость.

Под циклом нагружения понимают последовательность изменения нагрузки, которая заканчивается первоначальным состоянием и затем повторяется.

Под размахом колебания нагрузки следует понимать абсолютное значение разности между максимальным и минимальным ее значениями в течение одного цикла.

При расчете на малоцикловую усталость учитывают следующие циклы нагружения:

рабочие циклы, которые имеют место между пуском и остановом рассчитываемого аппарата и относятся к нормальной эксплуатации аппаратов;

циклы нагружения при повторяющихся испытаниях давлением;

циклы дополнительных усилий от воздействия крепления элементов сосуда или аппарата и крепления трубопроводов;

циклы нагружения, вызванные стесненностью температурных деформаций при нормальной эксплуатации сосудов.

При расчете на малоцикловую усталость не учитывают циклы нагружения от:

а) ветровых и сейсмических нагрузок;

б) нагрузок, возникающих при транспортировании и монтаже;

в) нагрузок, у которых размах колебания не превышает 15% для углеродистых и низколегированных сталей, а также 25% для аустенитных сталей от допускаемого значения, установленного при расчете на статическую прочность. При совместном действии нагрузок по подпунктам а—в этим условиям должна удовлетворять сумма размахов нагрузок. При определении суммы размахов нагрузок от различных воздействий не учитывают вспомогательную нагрузку, которая составляет менее 10% от всех остальных нагрузок;

г) температурных нагрузок, при которых размах колебания разности температур в двух соседних точках менее 15°C для углеродистых и низколегированных сталей и 20°C для аустенитных сталей. Под соседними точками следует понимать две точки стенки сосуда, расстояние между которыми не превышает $\sqrt{2Ds}$, где D — диаметр сосуда, s — толщина стенки сосуда.

Размах колебания главных нагрузок определяют на основе рабочих значений этих нагрузок. Число циклов нагружения определяют по установленной в документации долговечности сосуда или аппарата. При отсутствии таких данных принимают долговечность 10 лет.

Расчет на малоцикловую усталость не проводят, если имеются положительные результаты эксплуатации аналогичного сосуда при тех же условиях работы и в течение времени не менее расчетной долговечности.

Расчет на малоцикловую усталость не проводят, если для всех элементов аппарата выполняются следующие условия:

1) все изменения нагрузок, кроме давления, удовлетворяют условиям пп. а) — г);

2) размах давления принимают постоянным в течение всего срока эксплуатации;

3) удовлетворяется условие

$$N_p \leq [N_p] \quad (27.1)$$

для всех элементов сосуда. Допускаемое число циклов нагружения давлением $[N_p]$ определяют по рис. 27.1—27.3.

Номограммы на рис. 27.1—27.3 построены соответственно для температур 380, 420 и 525 °С, где Δp — размах колебания рабочего давления.

Формулу (27.1) применяют на основании расчета отдельных узлов при соответствующих значениях $\xi \cdot \eta \cdot [\sigma]$ и $[p]$. Допускается проводить расчет аппарата в целом при наибольших значениях $\xi \cdot \eta \cdot [\sigma]$ и наименьшем $[p]$.

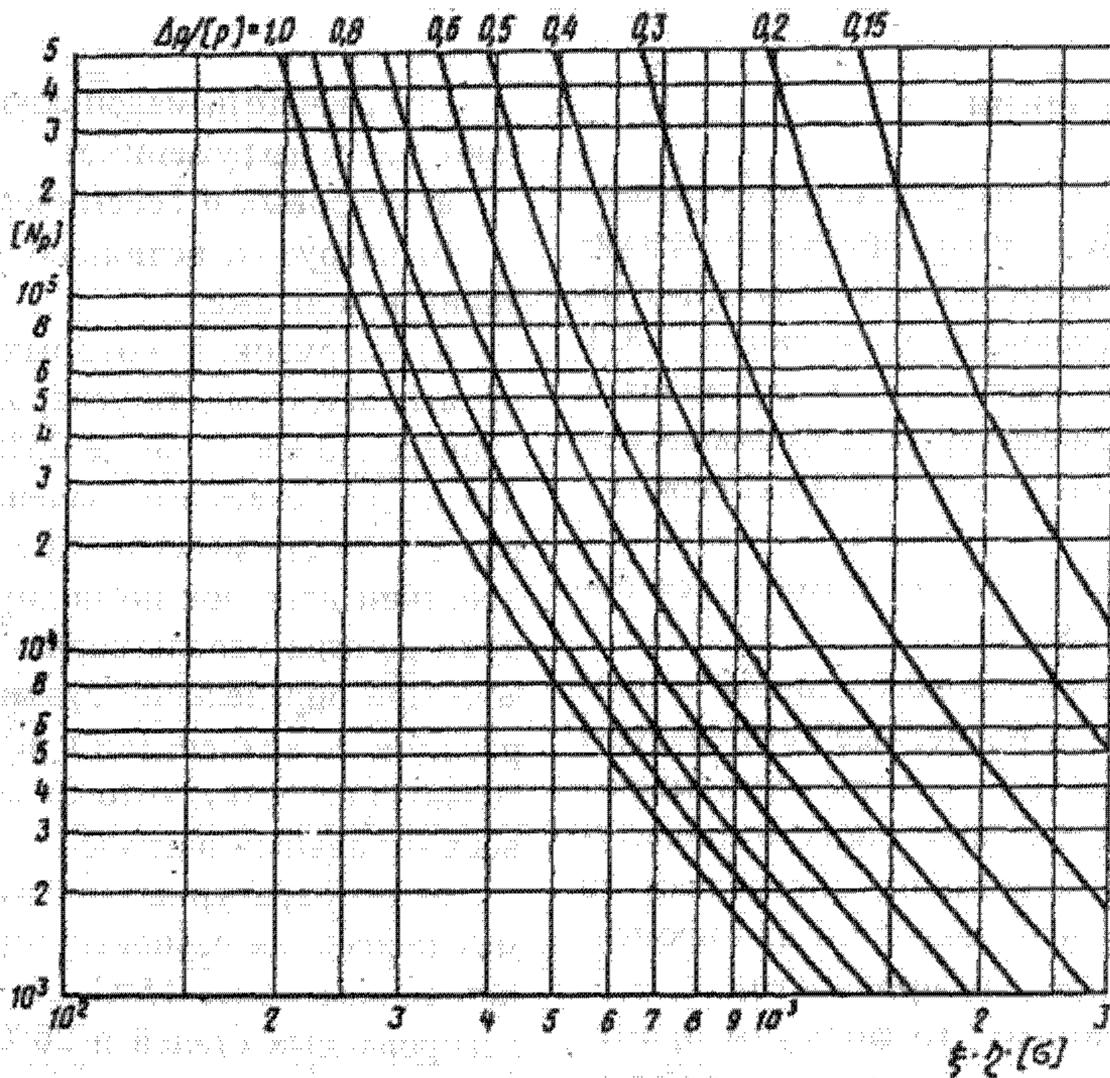


Рис. 27.1. Допускаемое число циклов нагружения давлением для элементов сосудов и аппаратов из углеродистых сталей

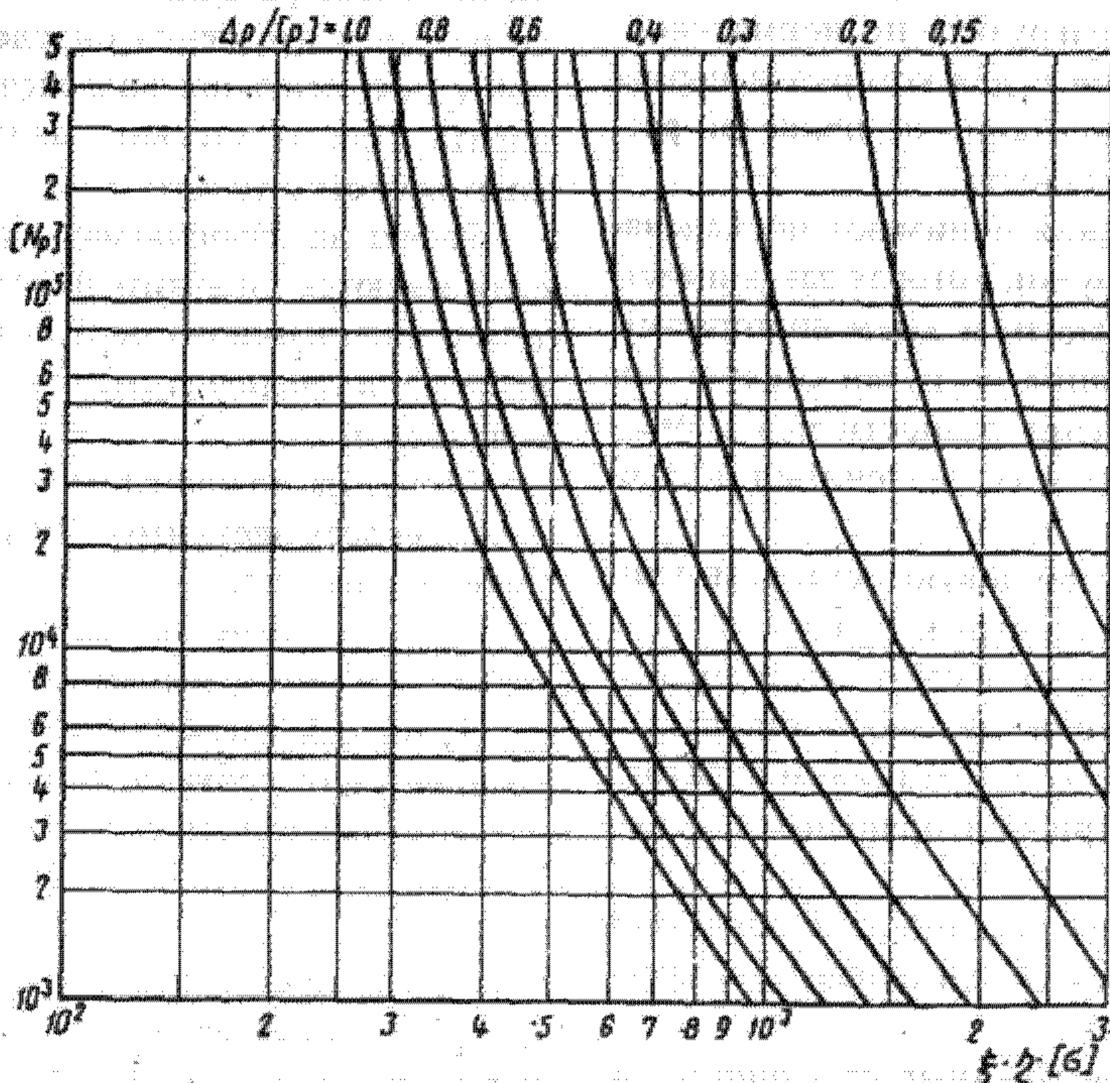


Рис. 27.2. Допускаемое число циклов нагружения давлением для элементов сосудов и аппаратов из низколегированных сталей

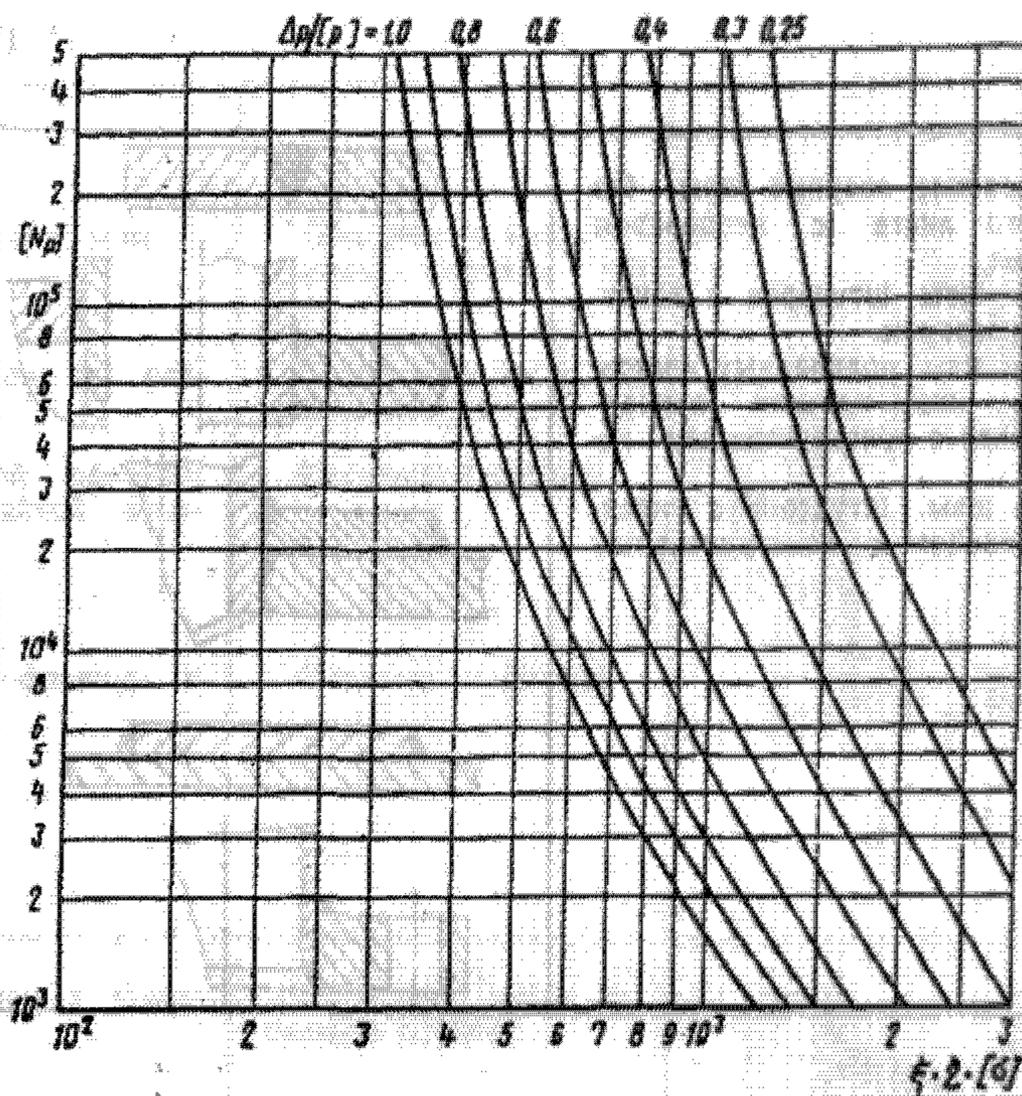


Рис. 27.3. Допускаемое число циклов нагружения давлением для элементов сосудов и аппаратов из аустенитных сталей

Значения коэффициента учета типа сварного соединения η и коэффициента, учитывающего местные напряжения ξ , определяются в зависимости от типа сварных соединений и сопрягаемых элементов по табл. 27.1 и 27.2.

Если условие формулы (27.1) не выполняется, то проводят либо упрощенный, либо уточненный расчет на малоцикловую усталость. Допускается уточненный расчет не проводить, если упрощенный расчет дает положительные результаты.

Таблица 27.1
Значение коэффициента учета типа сварных соединений

Тип сварного шва или соединение элементов	Примеры сварных швов	ξ
<p>Стыковые сварные швы с полным проваром и плавным переходом. Тавровые сварные швы с полным проваром и плавным переходом. Бесшовная обечайка</p>		1,0
<p>Сварные швы сосуда с подкладным листом по всей длине. Стыковые и тавровые сварные швы с полным проваром без плавного перехода. Сварные швы штуцеров с укрепляющим кольцом с полным проваром</p>		1,2

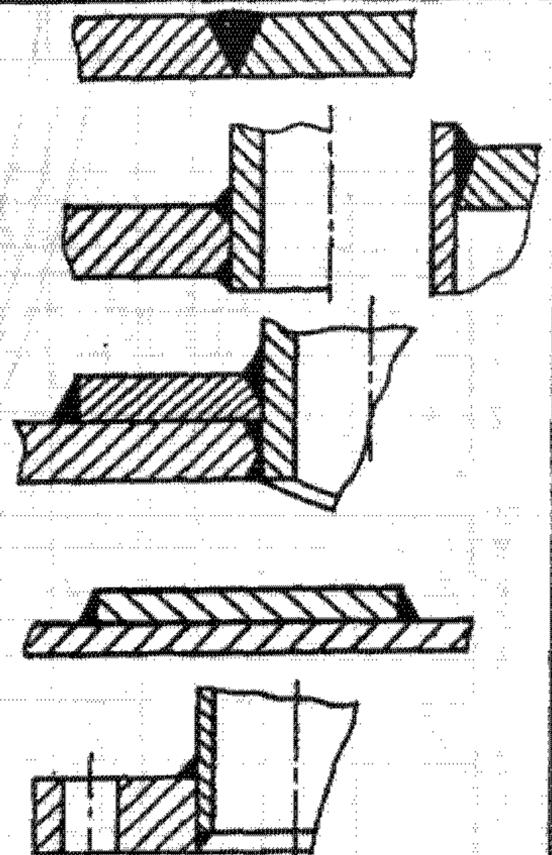
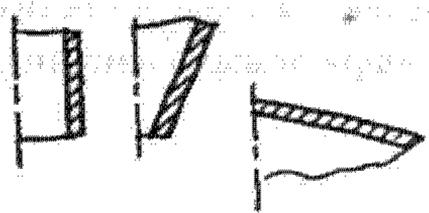
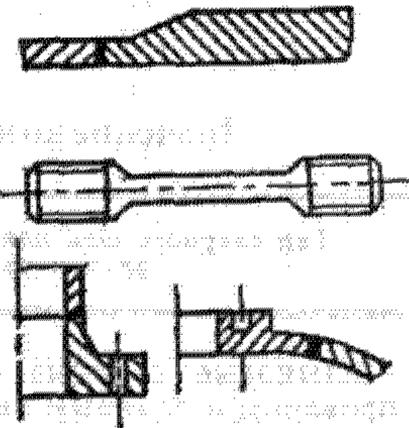
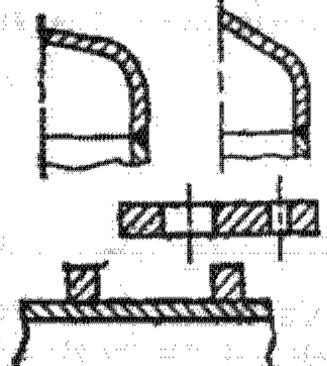
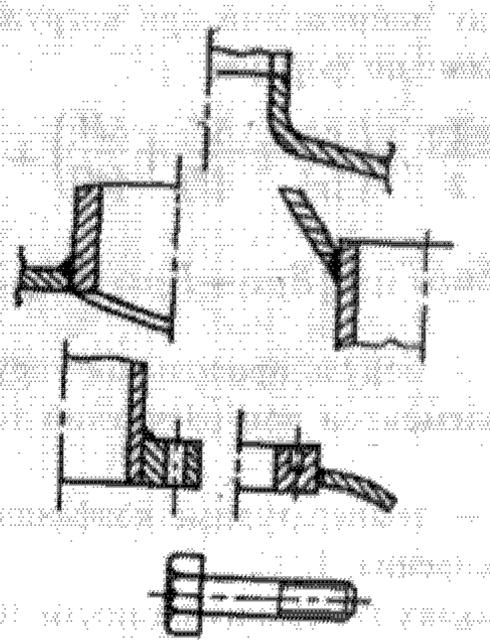
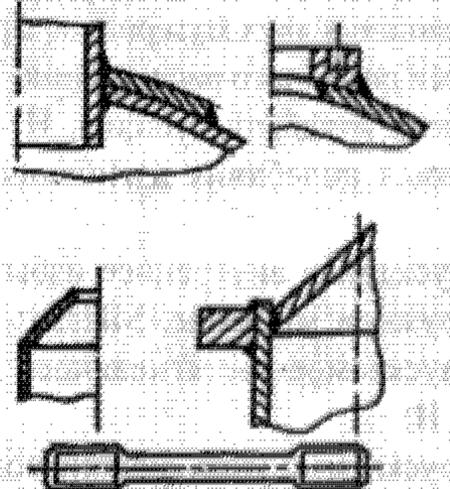
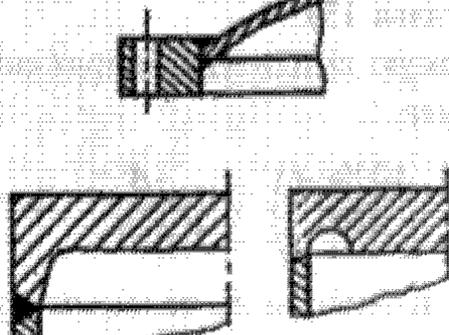
<p>Односторонние сварные швы без подкладного листа с непроваром в корне шва. Сварные швы штуцеров с конструктивным зазором. Сварные швы подкладных листов. Сварные швы плоских приварных фланцев с конструктивным зазором. Сварные швы штуцеров с укрепляющим кольцом и конструктивным зазором</p>		<p>1.5</p>
--	--	------------

Таблица 27.2

Значение коэффициента, учитывающего местные напряжения

Узел или элемент сосуда	Расчетный элемент	Эскиз узла	n
<p>Гладкая оболочка. Сферическая часть выпуклых днищ без отверстий.</p>	<p>Оболочка</p>		<p>1.5</p>
<p>Соединение оболочек разных толщин. Плоское днище или крышка без отверстий (отверстия для болтов не учитываются). Эллипсоидное днище. Шпильки фланцевых соединений. Приварные встык фланцы с плавным переходом.</p>	<p>Более тонкая оболочка. Плоское днище, крышка. Эллипсоидное днище. Шпильки. Оболочка и фланец</p>		<p>2.0</p>
<p>Отбортованная часть торосферического и конического днища. Плоское днище или крышка с отверстием, трубная решетка. Обечайка с кольцом жесткости.</p>	<p>Переход. Днище, крышка, трубная решетка. Обечайка</p>		<p>3.0</p>

<p>Отбортованные штуцеры и лазы.</p> <p>Оболочка со штуцером без накладного кольца.</p> <p>Соединение конической обечайки с цилиндрической обечайкой меньшего диаметра.</p> <p>Приварные плоские фланцы к оболочке.</p> <p>Болты с головкой.</p>	<p>Оболочка в месте установки штуцера или лаза.</p> <p>Оболочка в месте установки штуцера.</p> <p>Конический переход.</p> <p>Оболочка и фланец.</p> <p>Болт</p>		<p>3,0</p>
<p>Оболочка со штуцером и укрепляющим кольцом.</p> <p>Угловые соединения конической или сферической обечайки.</p> <p>Болты и шпильки из высокопрочной стали.</p>	<p>Оболочка в месте установки штуцера</p> <p>Переход.</p> <p>Болт или шпилька в зоне резьбы</p>		<p>4,0</p>
<p>Сферическая крышка с кольцом.</p> <p>Соединение с обечайкой плоского днища с отбортовкой или выточкой.</p>	<p>Сферический сегмент.</p> <p>Обечайка</p>		<p>4,0</p>
<p>Соединение с обечайкой приварных плоских днищ остальных типов.</p>	<p>Обечайка</p>		<p>6,0</p>

27.2. Упрощенный расчет на малоцикловую усталость

Для всех нагруженных элементов сосуда должно выполняться условие:

$$U = \sum \frac{N_j}{[N_j]} \leq 1, \quad (27.2)$$

где N_j и $[N_j]$ — соответственно фактическое и допускаемое число циклов нагружения.

Значение допускаемого числа циклов нагружения j -го вида определяют в зависимости от амплитуды напряжения j -го вида по следующим уравнениям:

$$[N] = \frac{1}{n_N} \left[\frac{A}{\left(\frac{\sigma_A}{n_\sigma} - \frac{B}{n_\sigma} \right)} \cdot \left(\frac{2300-t}{2300} \right)^2 \right]^2, \quad (27.3)$$

$$\sigma_A = \max \left\{ \sigma_A; \frac{B}{n_\sigma} \right\}, \quad (27.4)$$

где t — расчетная температура, °С; $n_\sigma = 2$ — коэффициент запаса прочности по напряжениям; $n_N = 10$ — коэффициент запаса прочности по числу циклов.

Значения характеристик материалов A и B , входящих в уравнения (27.3) и (27.4), приведены в табл. 27.3.

В табл. 27.3 $\sigma_{\tau 20}$, $\sigma_{\sigma 20}$ и $\sigma_{\sigma 0}$ — соответственно предел текучести и временного сопротивления в МПа при 20°C и предел выносливости при изгибе в МПа при 10^6 циклов.

Амплитуду напряжений при нагружении j -го вида определяют по формуле:

$$\sigma_A = \frac{[\sigma] \xi \eta}{2} \cdot \left(\frac{\Delta p_j}{[p]} + \frac{\Delta F_j}{[F]} + \frac{\Delta M_j}{[M]} \right) + \frac{\eta}{2} (E \alpha \Delta T_{\tau j} + |E_1 \alpha_1 - E_2 \alpha_2| \Delta T_{\sigma j}), \quad (27.5)$$

где E , E_1 , E_2 — модуль продольной упругости сопрягаемых элементов при расчетной температуре, МПа;

α , α_1 , α_2 — температурные коэффициенты линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$;

$\Delta T_{\tau j}$ — размах колебания разности температур двух соседних точек стенки аппарата, $^\circ\text{C}$;

$\Delta T_{\sigma j}$ — размах колебания расчетной температуры в месте соединения двух материалов с различными коэффициентами линейного расширения, $^\circ\text{C}$;

ΔF_j — размах колебания усилия, Н;

ΔM_j — размах колебания изгибающего момента, Н · м;

$[p]$ — допускаемое внутреннее избыточное давление или наружное давление, МПа;

$[F]$ — допускаемое растягивающее или сжимающее усилие, Н;

$[M]$ — допускаемый изгибающий момент, Н · м.

Значения $[p]$, $[F]$ и $[M]$ определяются по ГОСТ 14249—89 (глава 13).

Допускаемую амплитуду напряжений определяют по формуле:

$$[\sigma_A] = \left(\frac{2300 - t}{2300} \right) \cdot \frac{A}{\sqrt{n_N N}} + \frac{B}{n_\sigma} \quad (27.6)$$

Условие прочности на малоцикловую усталость:

$$\sigma_A \leq [\sigma_A] \quad (27.7)$$

Допускаемое число циклов нагружения может также находиться по графикам рис. 27.4—27.7.

27.3. Уточненный расчет на малоцикловую усталость

Уточненный расчет на малоцикловую усталость основан на определении напряжений для упругого материала по теории пластин, оболочек, колец и балок при линейном распределении напряжений по толщине стенки. При расчете определяют напряжения для проверяемого узла в нескольких точках каждого элемента на внутренней и наружной поверхностях в трех направлениях.

Для упрощения расчетов эпюры циклов нагружения принимают в виде прямоугольников (рис. 27.8), причем количество циклов определяют при постоянной нагрузке или одна нагрузка может иметь в одном главном цикле (пуск в эксплуатацию и остановка) несколько второстепенных циклов.

Для каждого вида нагрузки рассчитывают размах отдельных составляющих напряжений $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\Delta\sigma_z$, $\Delta\tau_{xy}$, $\Delta\tau_{xz}$, $\Delta\tau_{yz}$, $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$ как разность напряжений обоих нагруженных состояний, входящих в цикл.

Амплитуду напряжений для каждого цикла определяют по формуле

$$\sigma_A = \frac{K_\sigma}{2} \max \{ |\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2|; |\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3|; |\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_1| \} \quad (27.8)$$

или по формуле

$$\sigma_A = \frac{K_\sigma}{2} \sqrt{\Delta\sigma_x^2 + \Delta\sigma_y^2 + \Delta\sigma_z^2 - \Delta\sigma_x \Delta\sigma_y - \Delta\sigma_x \Delta\sigma_z - \Delta\sigma_y \Delta\sigma_z + 3(\Delta\tau_{xy}^2 + \Delta\tau_{xz}^2 + \Delta\tau_{yz}^2)} \quad (27.9)$$

Для плоского напряженного состояния при главных напряжениях $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_2$

$$\sigma_A = \frac{K_\sigma}{2} \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 - \Delta\sigma_1 \Delta\sigma_2} \quad (27.10)$$

Таблица 27.3

Значения A и B в МПа

Сталь	A	B
Углеродистые	$0,6 \cdot 10^6$	$1,43 \sigma_{\sigma 0} - 0,43 \sigma_{\tau 20}$
Низколегированные	$0,45 \cdot 10^6$	или $0,66 \sigma_{\sigma 20} - 0,43 \sigma_{\tau 20}$
Аустенитные коррозионностойкие	$0,6 \cdot 10^6$	$\sigma_{\sigma 0}$ или 270
Высокопрочные болты с $\sigma_s \geq 700$	$0,95 \cdot 10^6$	$1,43 \sigma_{\sigma 0} - 0,43 \sigma_{\tau 20}$ или $0,66 \sigma_{\sigma 20} - 0,43 \sigma_{\tau 20}$

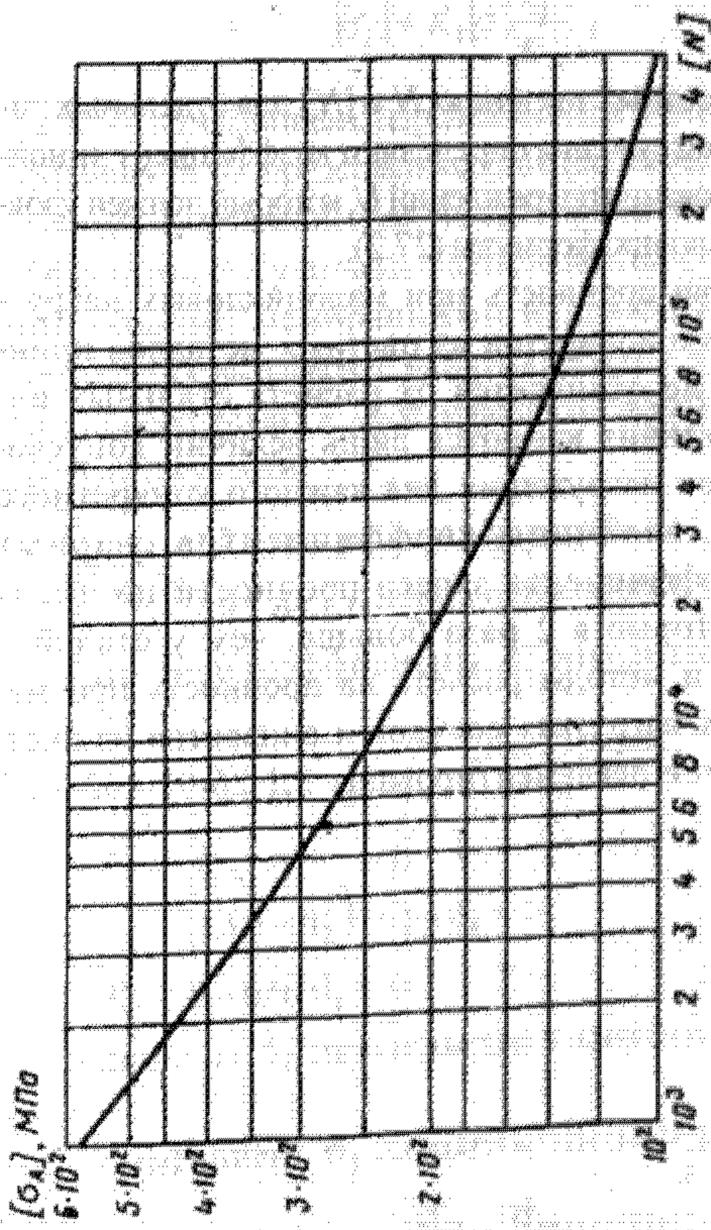


Рис. 27.4. Расчетная кривая усталости для углеродистых сталей до температуры 380°C

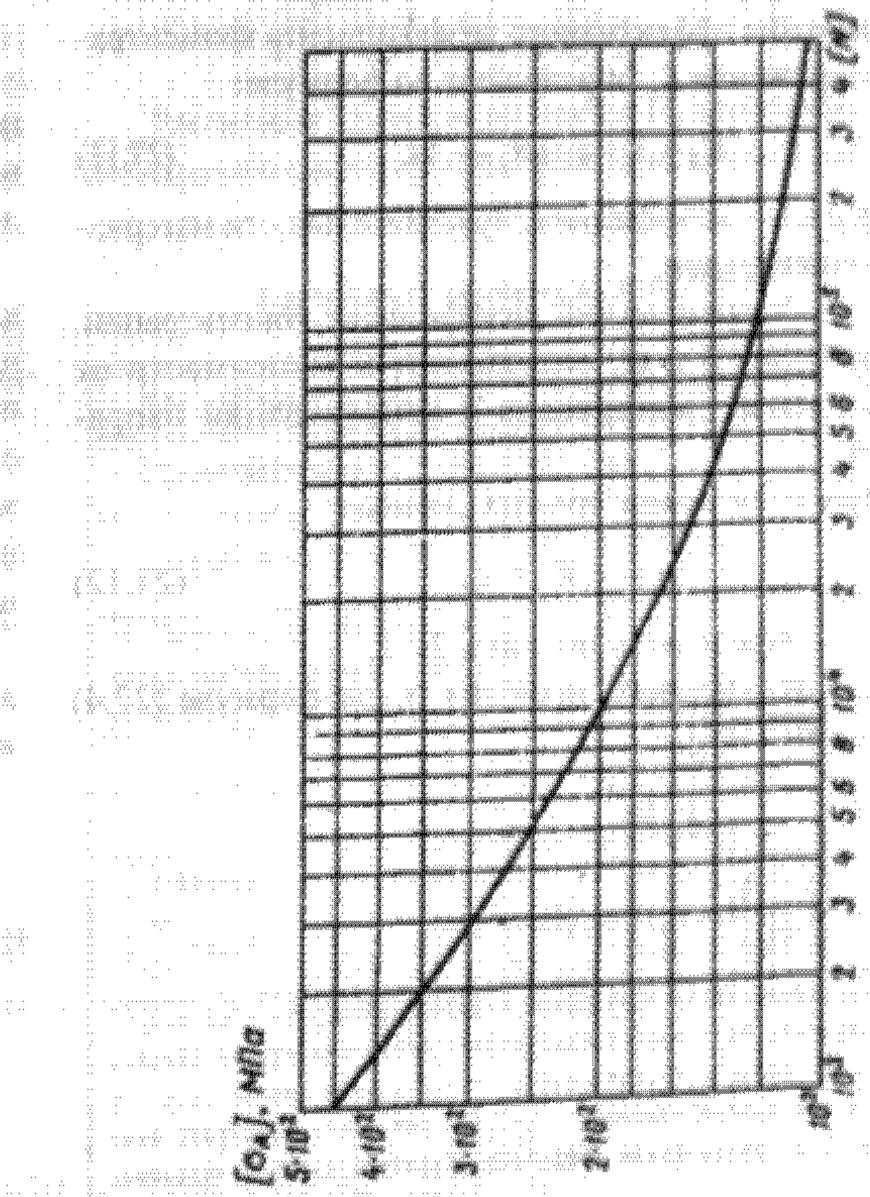


Рис. 27.5. Расчетная кривая усталости для низколегированных сталей до температуры 420°C

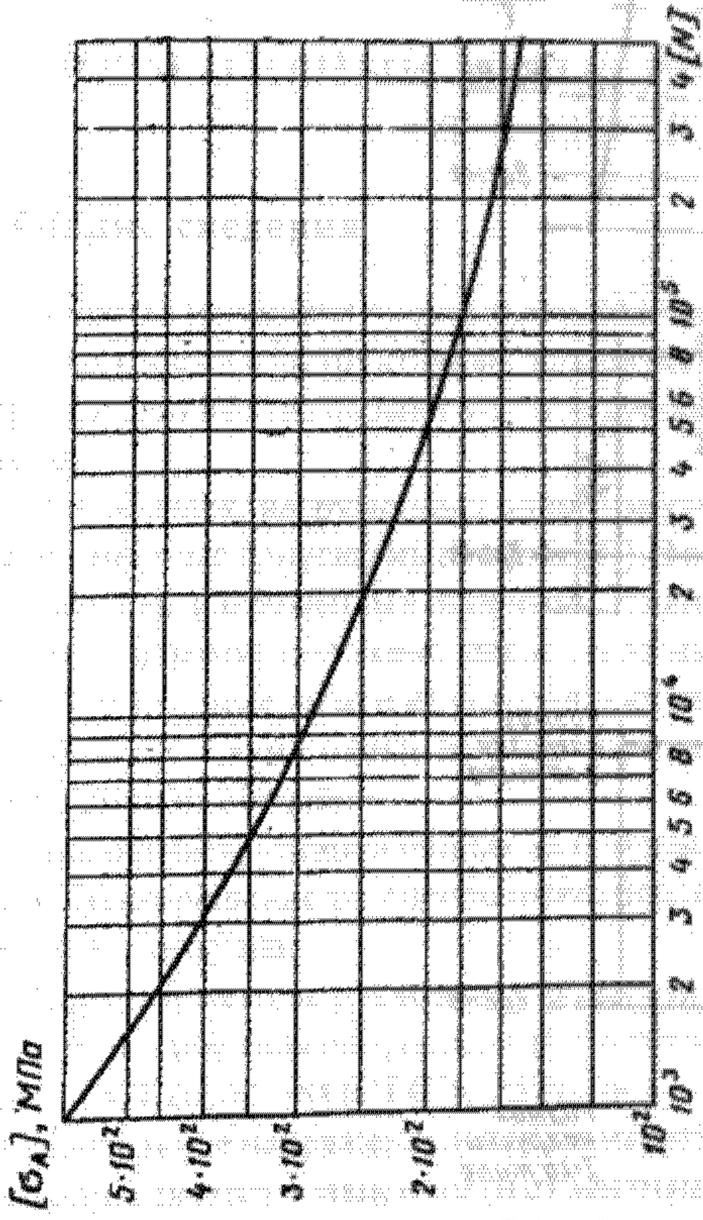


Рис. 27.6. Расчетная кривая усталости для аустенитных сталей до температуры 525°C

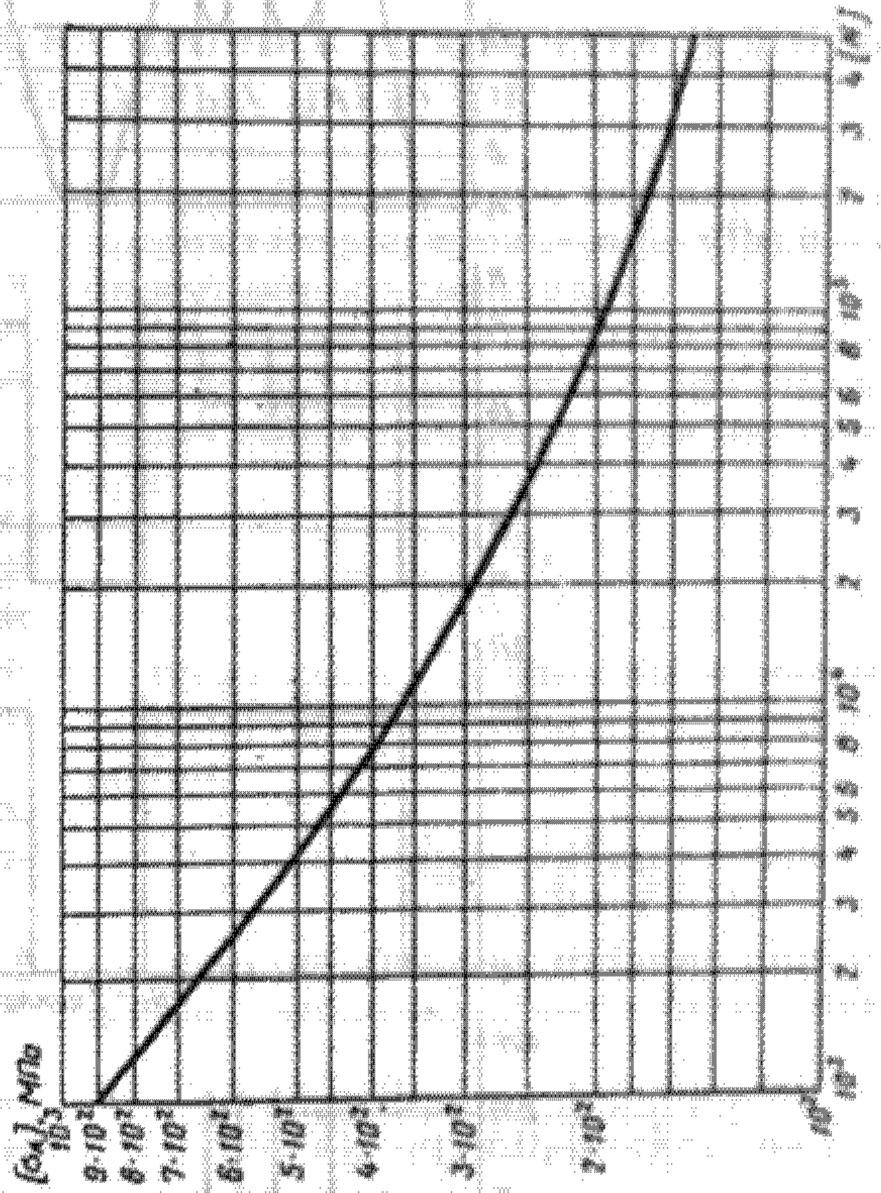


Рис. 27.7. Расчетная кривая усталости для высокопрочных ($\sigma_s \geq 2$ МПа) легированных сталей

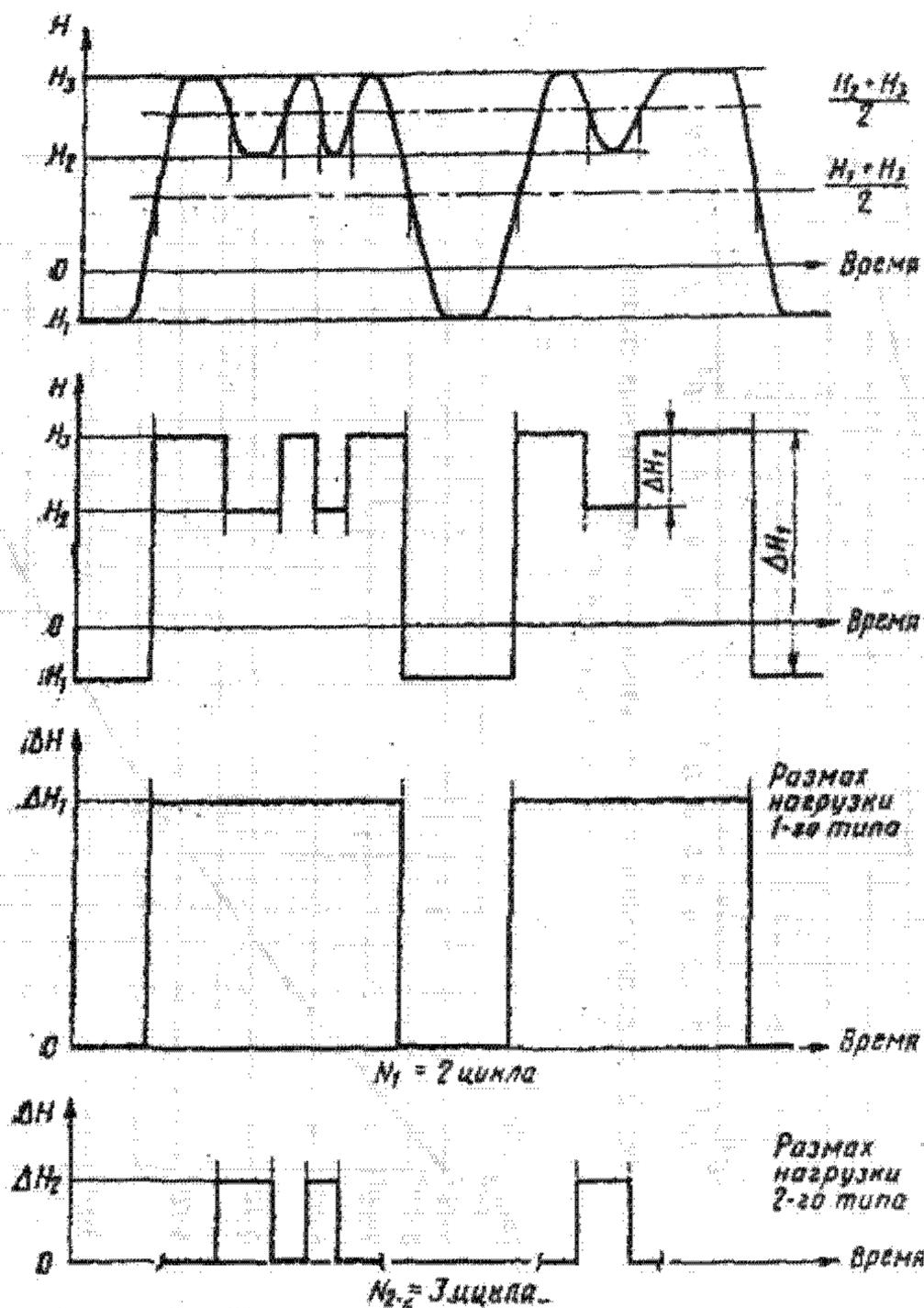


Рис. 27.8. Приведенные эпюры циклов нагружения

Значение эффективного коэффициента концентрации напряжения K_σ определяют по формуле:

$$K_\sigma = 1 + q \cdot (\alpha_\sigma - 1), \quad (27.11)$$

где $0 \leq q \leq 1$ — коэффициент чувствительности материала к концентрации;

α_σ — теоретический коэффициент концентрации.

Значения q и α_σ определяют в зависимости от применяемых материалов и концентрации напряжений.

При отсутствии точных данных

$$K_\sigma = \xi, \quad (27.12)$$

где ξ — определяют по табл. 27.1.

Для полученного значения σ_A по формуле (27.4) определяют $[N]$.

При известных значениях N_i и $[N_i]$ для отдельных типов циклов нагружения определяют коэффициент линейного суммирования повреждений U , который должен удовлетворять условию формулы (27.2).

Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках сосудов и аппаратов из цветных металлов принципиально не отличается от расчета стальных аппаратов. Отличия касаются лишь величин допускаемых циклов нагружения для каждого конкретного материала, величины коэффициентов сварных швов и коэффициента запаса прочности по числу циклов, которые в 2 раза больше, чем у сталей.

Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках сосудов и аппаратов из цветных металлов регламентированы РД 26-01-162—87.