5. ОТКАЗЫ ПО ПАРАМЕТРАМ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

5.1. Характеристики циклов нагружения

Установлено, что многократное приложение нагрузки вызывает разрушение деталей машин при напряжениях, значительно меньших, чем при однократном или постоянном нагружении. При большом числе повторных нагружений напряжения, при которых происходит разрушение, могут быть ниже не только предела прочности и предела текучести, но и т. н. предела упругости. Это явление называют ***усталостью*** металлов [Костецкий, Орлов, с. 192, Павлище, с. 38]. В современных машинах статические нагрузки встречаются как исключение [Орлов, с. 192].

Внешним проявлением усталости металлов является возникновение и распространение характерного вида трещин на поверхности деталей в тех местах, где имеются следы обработки инструмента, переходы сечений и другие концентраторы напряжений. Усталостные изломы имеют ряд характерных признаков, отличающих их от других видов изломов [Кубарев, с. 69]. Обычно на поверхности излома можно различить несколько характерных зон. В фокусе излома, очаге разрушения и участке избирательного развития трещин начинается образование и развитие начальной трещины усталости. Эти зоны имеют наибольший блеск и гладкость, наблюдаются характерные усталостные линии. Зона ускоренного развития трещин и зона долома являются зонами, в которых происходит окончательное разрушение детали. Они имеют матовый цвет и характеризуются формами хрупкого разрушения.

Совокупность всех напряжений за один период их смены называется циклом нагружения (рис. 2.4).

Цикл нагружения характеризуется:

- Максимальным $\sigma_{\max}$ и минимальным $\sigma_{\min}$ напряжением;
- Амплитудой нагрузки σ_a

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \qquad (2.12)$$

- Средним напряжением σ_m

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \qquad (2.13)$$

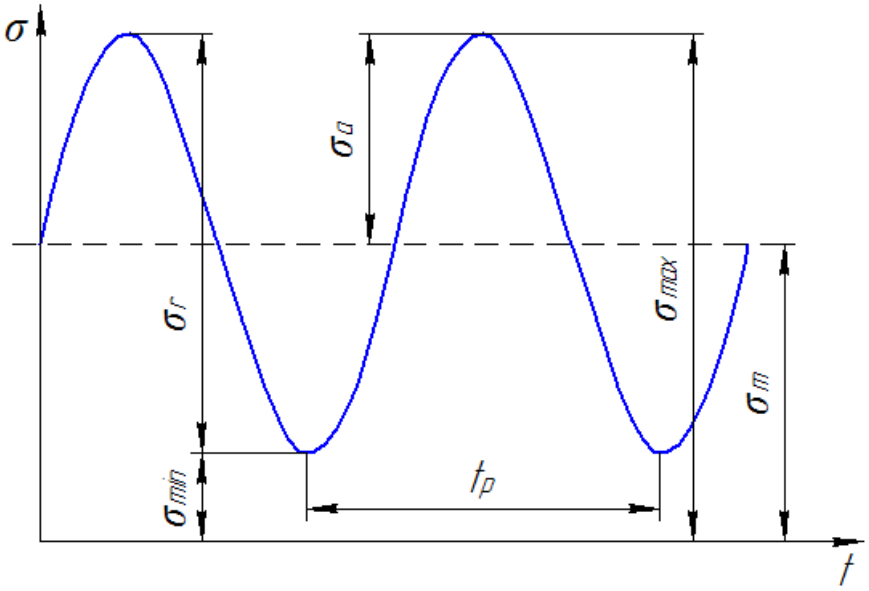

Рис. 2.4 – Цикл повторно-переменной нагрузки

- Коэффициентом асимметрии цикла *r*

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; \tag{2.14}$$

- Коэффициентом амплитуды

$$a = \frac{\sigma_a}{\sigma_{\max}} = 0{,}5(1 - r). \tag{2.15}$$

Различают следующие основные циклы напряжений [Орлов, с. 57]:

- Постоянный – рис. 2.5, *а*

$$\sigma_a = 0, \quad \sigma_m = \sigma = const, \quad r = 1;$$

- Симметричный знакопеременный – рис. 2.5, *б*

$$\sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|, \quad \sigma_a = \sigma_{\max}, \quad \sigma_m = 0, \quad r = -1;$$

- Пульсирующий (отнулевой) – рис. 2.5, *в*

$$\sigma_{\min} = 0, \quad \sigma_a = 0{,}5\sigma_{\max}, \quad \sigma_m = 0{,}5\sigma_{\max}, \quad r = 0;$$

- Знакопеременный – рис. 2.5, *г*

$$-1 \le r \le 0.$$

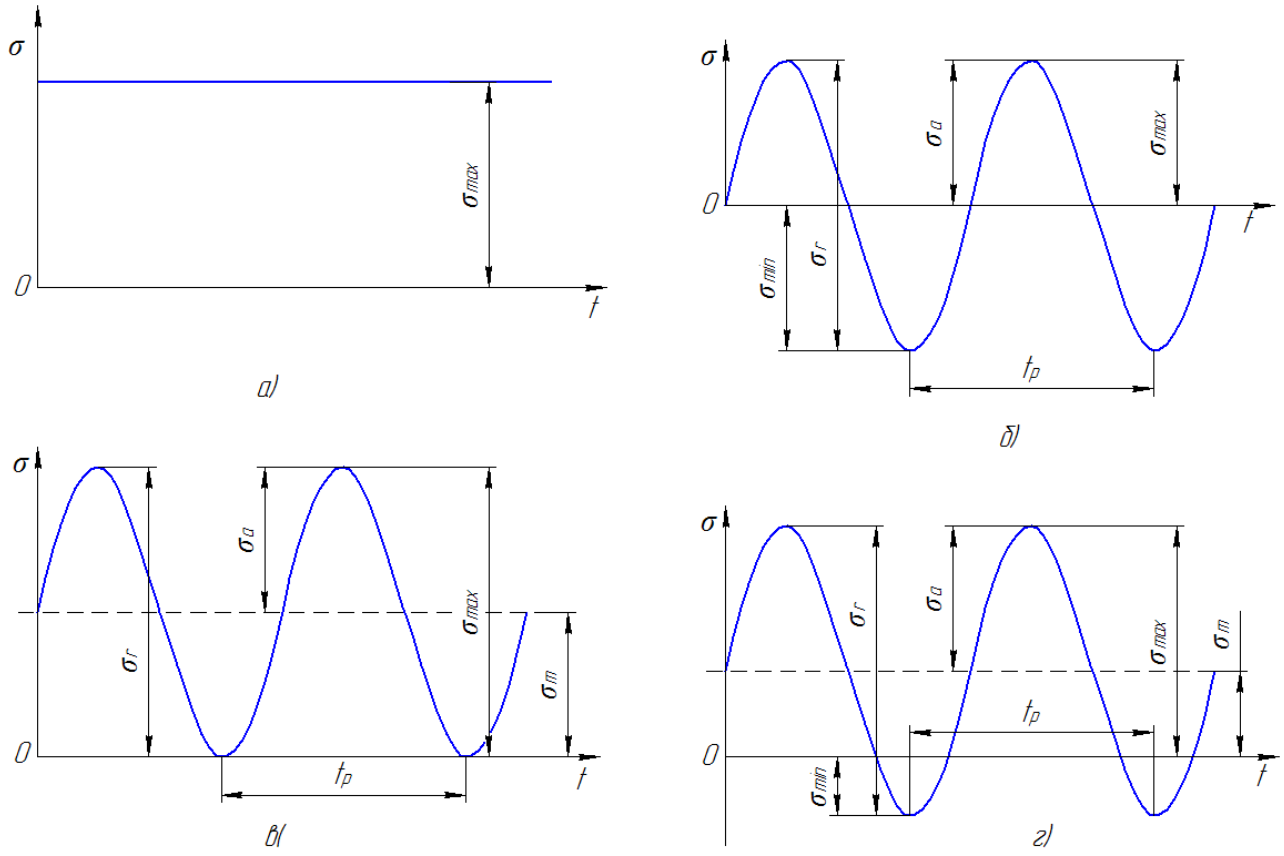

Рис. 2.5 – Типы циклов нагружения

Характеристиками циклов являются также [Орлов, с. 195]:

- период цикла – продолжительность одного цикла;
- частота цикла – число циклов в единицу времени (величина обратная периоду).

В частном случае, при одинаковых знаках максимального и минимального напряжений (больше или меньше нуля) цикл называется знакопостоянным.

Наглядно циклы характеризуются диаграммами, показанными на рис. 2.6 и 2.7 (диаграмма Смита).

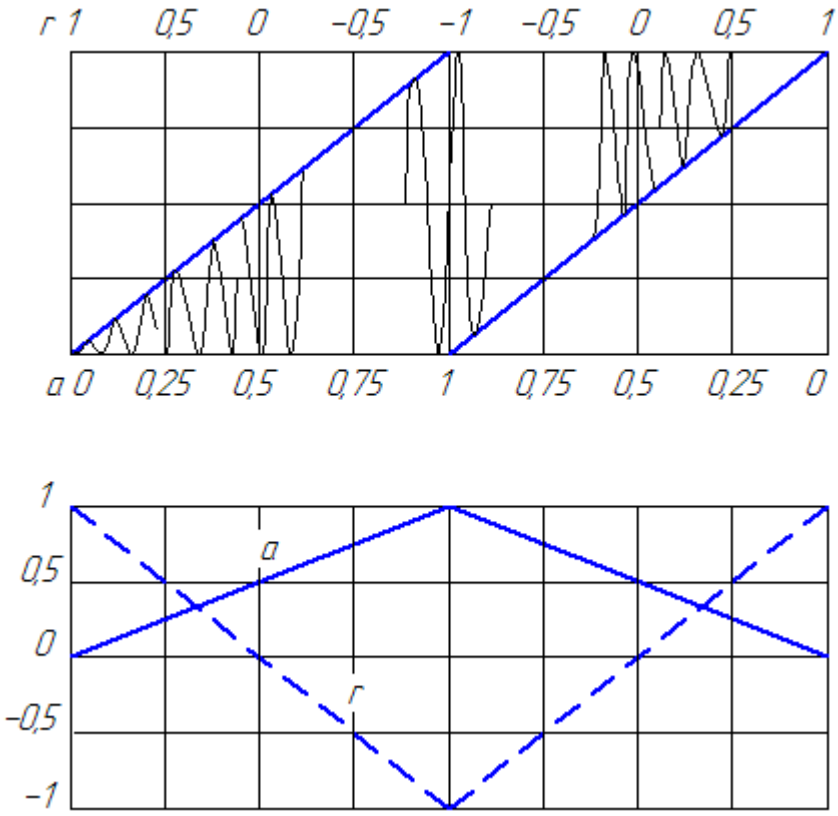

Рис. 2.6 – Характеристики циклов

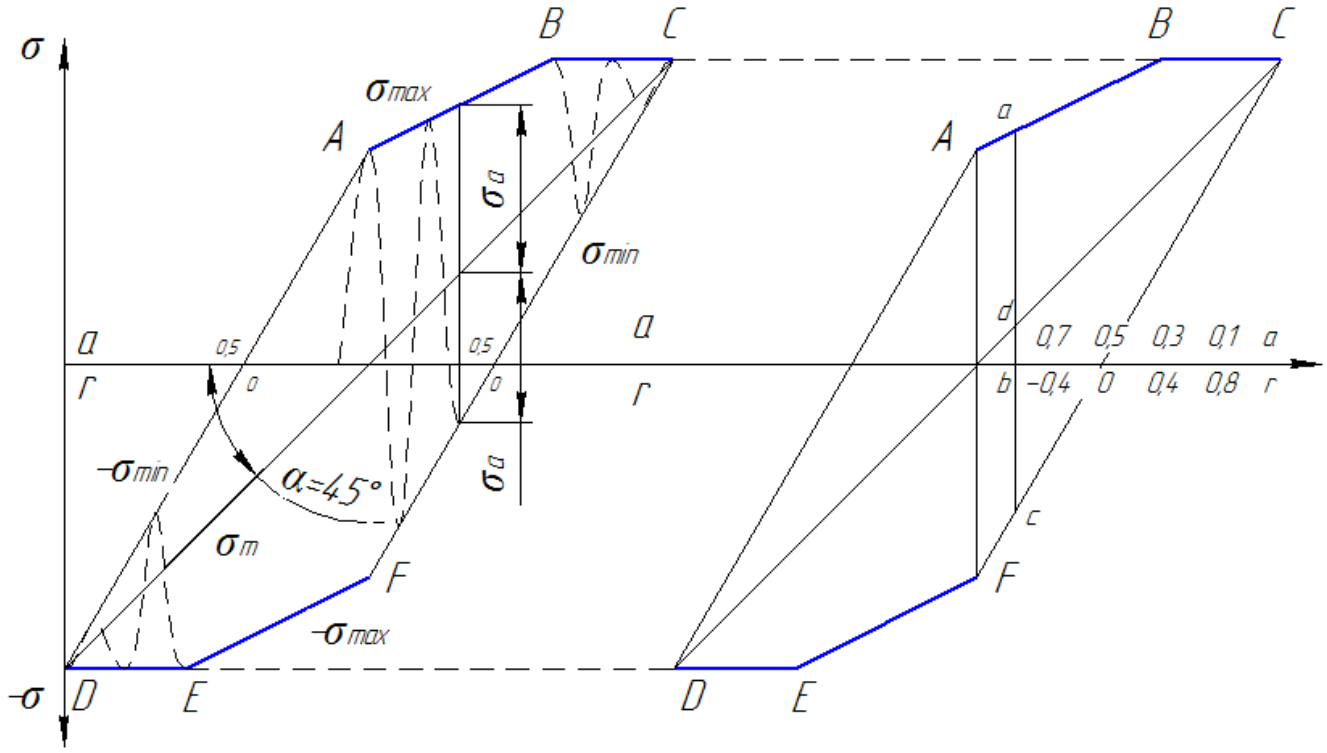

Рис. 2.7 – Диаграмма Смита

5.2. Запасы прочности при переменных напряжениях

Число циклов, которое материалы выдерживают до разрушения, зависит от максимального напряжения и интервала между крайними значениями напряжений цикла, т. е. периода. По мере уменьшения напряжений число циклов до разрушения увеличивается и при некотором достаточно малом напряжении становится неограниченно большим. Это напряжение, называемое ***пределом выносливости***, кладут в основу прочностного расчета деталей, подверженным циклическим нагрузкам [Орлов, с. 192].

Предел выносливости определяют по т. н. ***кривым усталости*** (кривые Веллера), которые показывают зависимость числа циклов до разрушения в зависимости от величины максимального напряжения цикла. Чаще всего кривую усталости строят в логарифмических или полулогарифмических координатах (рис. 2.8). В таком случае кривая усталости близка к прямой и может быть аппроксимирована уравнением

$$N_ц \sigma_i^m = const .$$

Показатель степени m определяется из уравнения прямой (рис. 2.9) и зависит от вида материала, формы детали, коэффициента асимметрии цикла. Для симметричного цикла и гладких образцов показатель m равен 8…15, а для образцов с концентраторами напряжения – 3…8.

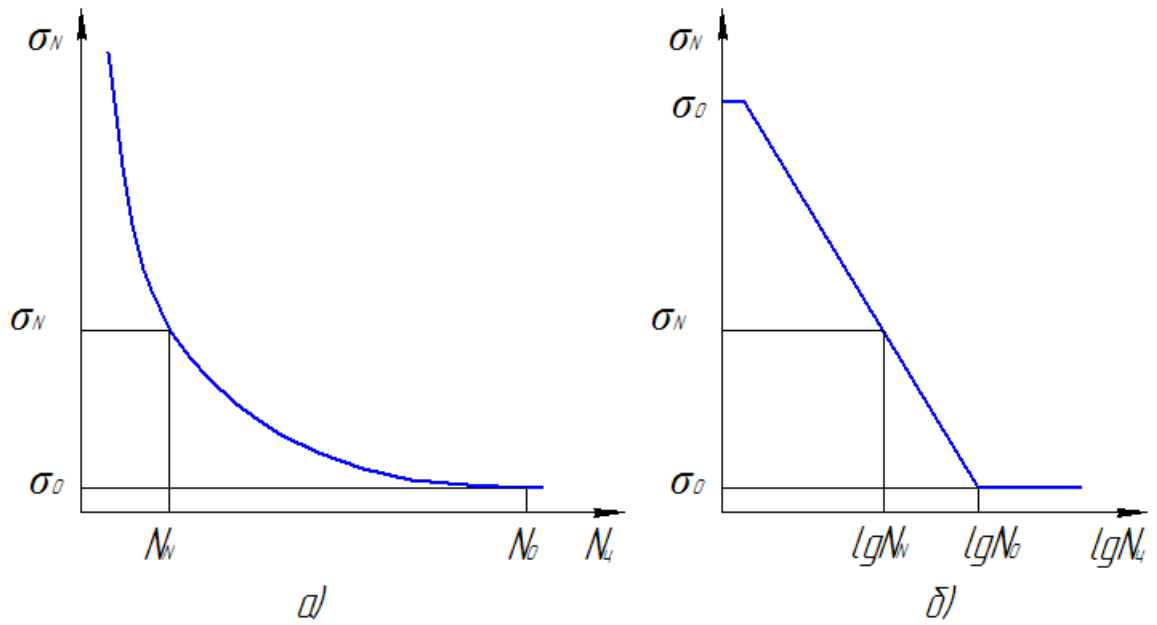

Рис. 2.8 – Кривая усталости

Предел выносливости не является постоянной, присущей данному материалу характеристикой. Он зависит от условий нагружения, типа цикла, формы и размеров детали, технологии ее изготовления, состояния поверхности и других факторов. Пределы выносливости на изгиб имеют минимальное значение при симметричном знакопеременном цикле и повышаются с увеличением его асимметрии. При пульсирующем цикле предел выносливости достигает максимума и с уменьшением амплитуды пульсаций приближается к показателям статической прочности материала.

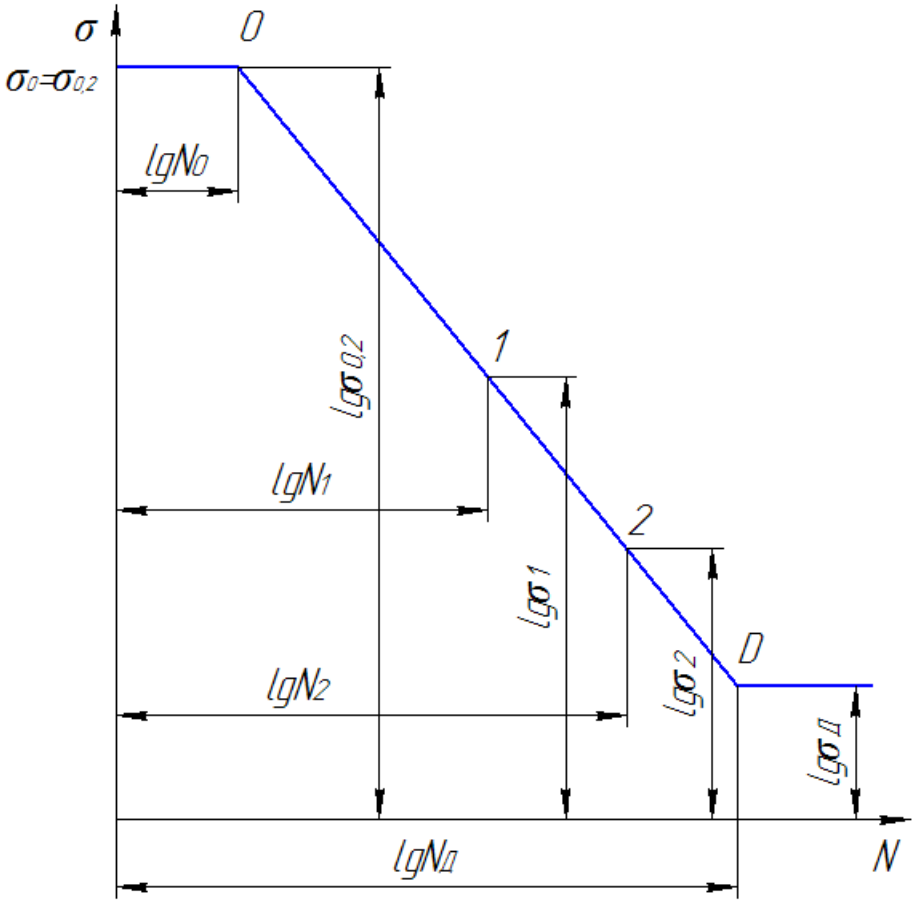

Рис. 2.9 – К определению показателя *m*

Между характеристиками сопротивления усталости и статической прочности нет определенной теоретической зависимости [Орлов, с. 197]. Наиболее устойчивые отношения существуют между σ_{-1} и $\sigma_в$ (пределом прочности), а также σ_T (пределом текучести).

По опытным данным эти соотношения следующие:

- для стали

$$\sigma_{-1} = (0{,}2\ldots0{,}3)\sigma_в\left(1+\frac{\sigma_T}{\sigma_в}\right);$$

- для стальных отливок, высокопрочного чугуна и медных сплавов

$$\sigma_{-1} = (0{,}3\ldots0{,}4)\sigma_в;$$

- для алюминиевых сплавов

$$\sigma_{-1} = (0{,}25\ldots0{,}5)\sigma_в;$$

- для серого чугуна

$$\sigma_{-1} = (0{,}3\ldots0{,}6)\sigma_в.$$

На основании опытных данных Шимек получил следующие зависимости пределов выносливости от предела прочности:

- на растяжение-сжатие при симметричном цикле

$$\sigma_{-1} = 0{,}33\sigma_в + 1{,}25;$$

- на растяжение-сжатие при пульсирующем цикле

$$\sigma_0 = 0{,}58\sigma_в + 2{,}3;$$

- на изгиб при симметричном цикле

$$\sigma_{-1u} = 0{,}4\sigma_в + 5{,}7;$$

- на кручение при симметричном цикле

$$\tau_{-1} = 0{,}2\sigma_в + 4{,}8;$$

- на кручение при пульсирующем цикле

$$\tau_0 = 0{,}25\sigma_в + 24.$$

Примечание. Предел выносливости σ_{-1} при знакопеременной симметричном цикле является основным показателем усталостной прочности. На его основе определяют ряд других параметров. Для выделения его важности ему присвоен индекс -1. предел выносливости при пульсирующем цикле имеет индекс 0.

Пределы выносливости при симметричном цикле связаны между собой следующими ориентировочными зависимостями:

$\sigma_{-1} = (1\ldots1{,}5)\sigma_{-1p}$, $\tau_{-1} = (0{,}5\ldots0{,}7)\sigma_{-1}$.

Пределы выносливости при пульсирующем и знакопеременном циклах связаны следующими приближенными зависимостями:

- при изгибе

$$\sigma_0 = (1{,}4\ldots1{,}6)\sigma_{-1};$$

- при растяжении

$$\sigma_{0p} = (1{,}5\ldots1{,}8)\sigma_{-1p};$$

- при кручении

$$\tau_0 = (1{,}4\ldots2)\tau_{-1}.$$

Пределы выносливости при асимметричных циклах можно приближенно определить по эмпирическим зависимостям:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{-1p}\left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_в}\right)^2\right] + \sigma_m;$$

$$\sigma_a = \sigma_{-1p}\left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_в}\right)^2\right].$$

Приведенные зависимости дают представление лишь об общих закономерностях. Для более полной информации используют или табличные данные или диаграммы усталости.

Диаграммы усталости строят на основании многочисленных опытных данных стандартных образцов при определенном виде нагружения (сжатие, растяжение, изгиб, кручение) и постоянных параметрах цикла [Орлов, с. 198].

Наибольшее распространение имеет диаграмма Смита (рис. 2.7).

Линию средних напряжений циклов σ_m, являющуюся в то же время нулевой линией амплитуд, проводят под углом 45 ° к оси абсцисс. На оси ординат откладывают напряжения. На нулевой линии σ_m откладывают опытные значения амплитуды напряжений σ_a. огибающая *ABC* точек $\sigma_{\max}$ представляет собой пределы выносливости при растяжении, огибающая *DEF* точек - $\sigma_{\max}$ – при

растяжении. При малых амплитудах пульсаций пределы выносливости практически постоянны и близки к показателям статической прочности.

Коэффициент асимметрии для произвольной точки определяется как отношение отрезков *bc*/*ab*. Первый соответствует $\sigma_{\min}$, второй – $\sigma_{\max}$.

Как видно из шкал *r* и *a* на оси абсцисс, пределы выносливости при $r > 0{,}4$ ($a < 0{,}3$) совпадают с пределами текучести σ_T.

Располагая диаграммами Смита для различных материалов и видов нагружения, можно производить расчет на усталость при любом значении коэффициента асимметрии цикла (рис. 2.10).

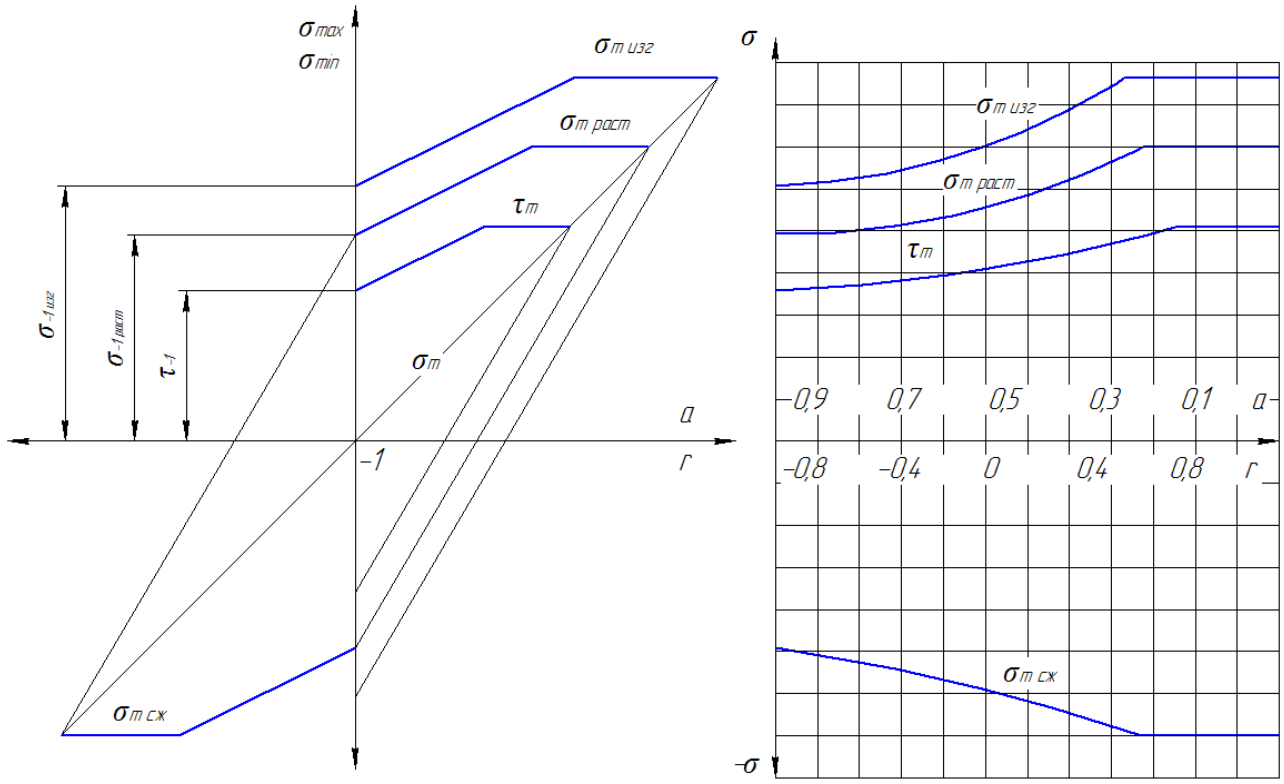

Рис. 2.10 – Обобщенные диаграммы усталости

Коэффициенты запаса прочности при переменных нагрузках и произвольном коэффициенте асимметрии определяют по формулам

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\dfrac{K_\sigma \sigma_a}{\beta \varepsilon_\sigma} + \psi_\sigma \sigma_m};$$

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\dfrac{K_\tau \tau_a}{\beta \varepsilon_\tau} + \psi_\tau \tau_m}. \qquad (2.16)$$

Здесь обозначено ψ_σ и ψ_τ – коэффициенты влияния асимметрии циклов нагружения. Для стали принимается $\psi_\sigma = 0{,}1$; $\psi_\tau = 0{,}05$; для легированных сталей – $\psi_\sigma = 0{,}15$; $\psi_\tau = 0{,}1$ [Павлище, с. 48].

При одновременном действии нормальных и касательных напряжений (например, изгиб и кручение) общий коэффициент запаса прочности будет

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}}. \qquad (2.17)$$

5.3. Влияние основных факторов на выносливость деталей машин

Расчетные значения коэффициентов запаса усталостной прочности определяют с учетом того, что форма, размеры и условия работы деталей отличаются от таковых при лабораторных исследованиях.

Принципиальная схема влияния некоторых факторов показана на рис. 2.ппп.

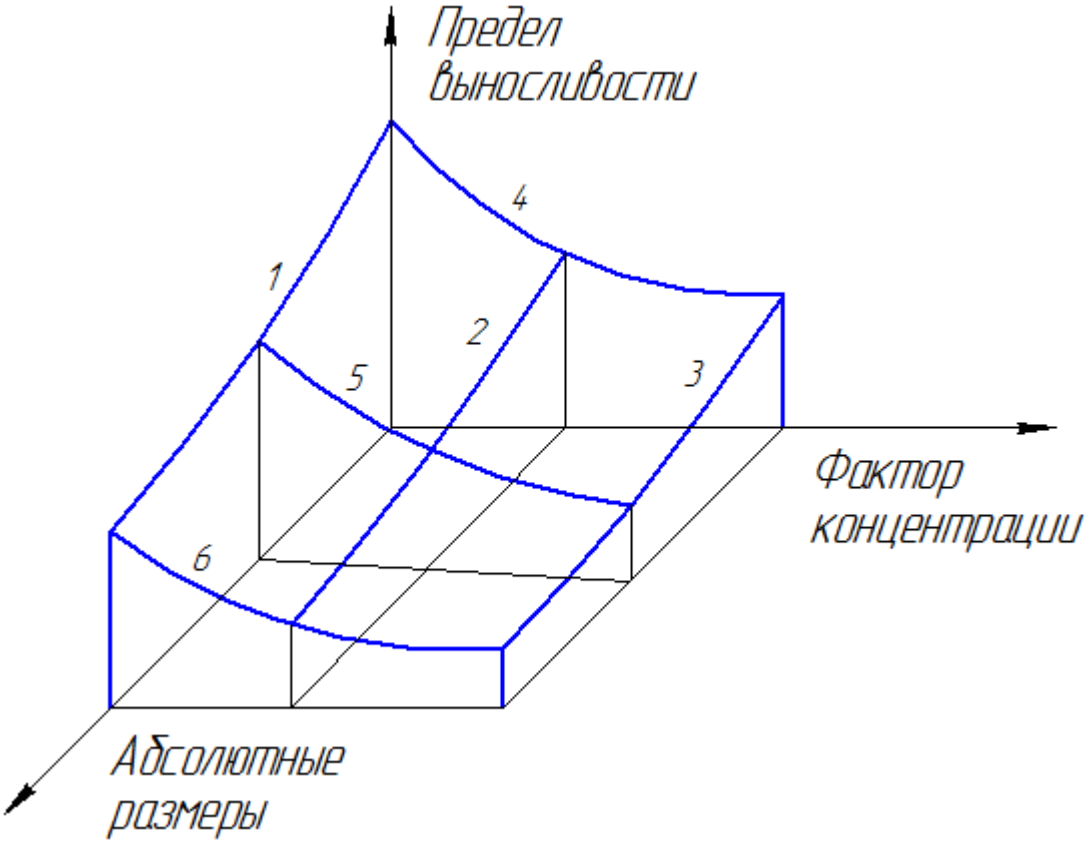

Рисунок 5.55 – Схема влияния факторов на выносливость

Влияние абсолютных размеров деталей (масштабный фактор)

При увеличении размеров деталей вследствие изменения относительного влияния поверхностного слоя материала и увеличении его неоднородности происходит снижение показателей прочности. Уменьшение показателей характеризуется коэффициентами формы ε_m, $\varepsilon_в$, ε

$$\sigma_{Tд} = \varepsilon_m \sigma_T; \qquad \sigma_{вд} = \varepsilon_в \sigma_в; \qquad \sigma_{-1д} = \varepsilon \sigma_{-1},$$

где ε_m – коэффициент абсолютных размеров детали по пределу текучести;

$\varepsilon_в$ – коэффициент абсолютных размеров детали по пределу прочности;

ε – коэффициент абсолютных размеров детали по напряжению выносливости.

Значения коэффициентов приведены в справочной литературе. Для примера на рис. 2.11 показаны зависимости коэффициентов от абсолютных размеров деталей.

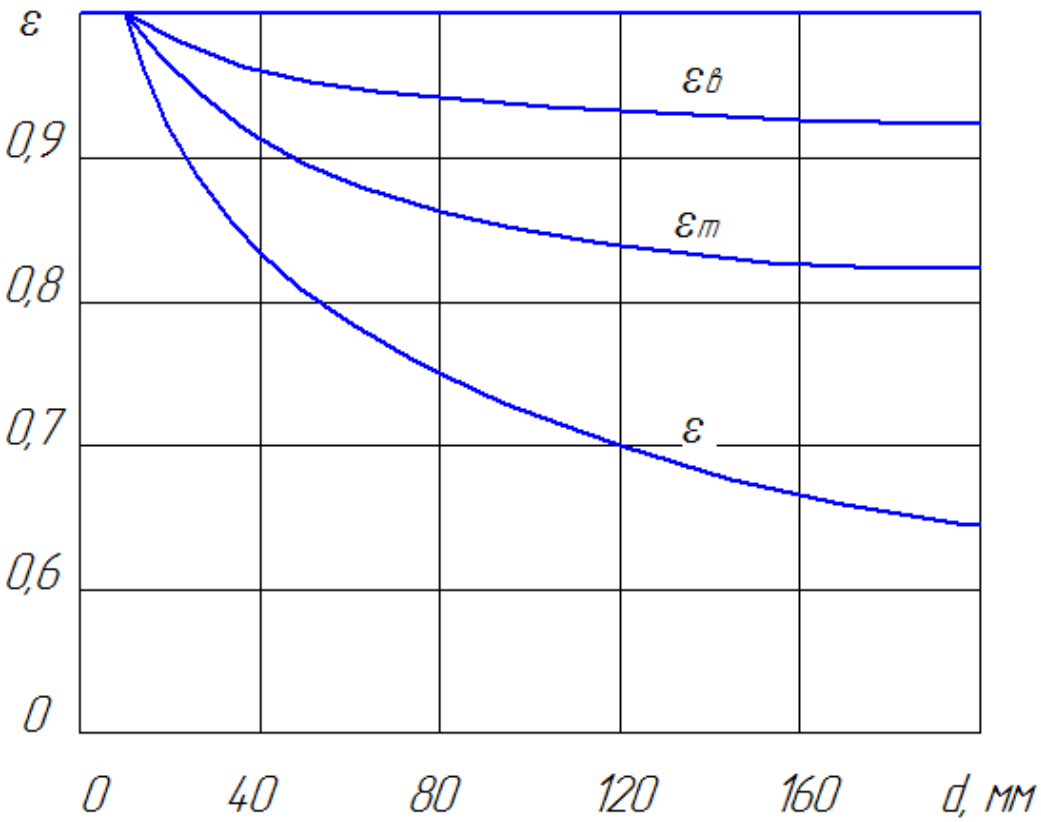

Рис. 2.11 – Коэффициент влияния абсолютных размеров деталей

Влияние конструктивной формы детали

На величину показателей прочности особенно при циклических нагрузках оказывает местное изменение формы детали и связанное с этим явление концентрации напряжений. В местах расположения концентраторов напряжений (отверстия, переходы диаметров, пазы, надрезы, проточки и др.) возникают пики нагрузок. Влияние изменения формы деталей учитывается коэффициентами концентрации нормальных K_σ и касательных напряжений K_τ. Значения коэффициентов приведены в справочной литературе. Для пластичных материалов значения коэффициентов близки к единице. Для хрупких материалов значения коэффициентов достигают 1,3…1,4 для стали и даже 2,5…3,0 – для чугуна.

Приближенно между коэффициентами существует связь

$$K_\tau = 1 + 0{,}6(K_\sigma - 1).$$

Влияние состояние поверхности деталей

Качество поверхности мало влияет на прочность деталей при постоянной статической нагрузке. При переменных нагрузках разрушения начинаются с появления микротрещин на поверхности детали, поэтому любой дефект способствует возникновению концентраторов напряжений и снижению предела выносливости. Влияние качества поверхности учитывается коэффициентом состояния поверхности β, значения которого равны 0,75…1. Меньшие значения принимаются для более грубой поверхности (обтачивание, фрезерование, сверление).

На рис. 23 показан характер влияния способов обработки поверхности на предел выносливости. Если принять предел выносливости шлифованного образца за 100 %, то полирование дает дальнейшее повышение прочности, другие виды обработки снижают предел выносливости те значительнее, чем выше предел прочности материала.

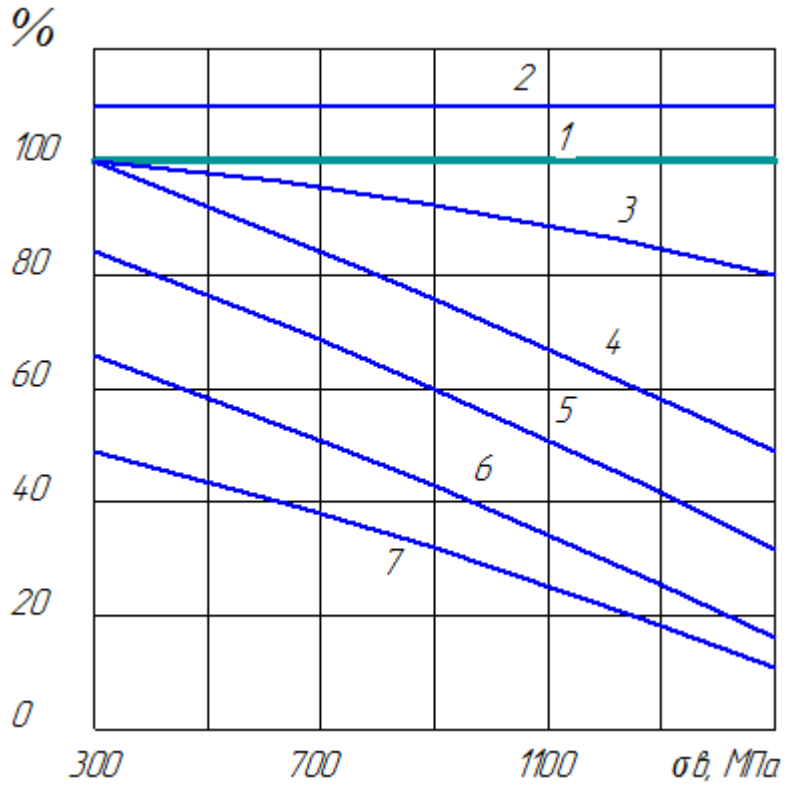

Рисунок 5.444 – Влияние состояния поверхности на выносливость деталей

6. КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ

Кроме обычных видов разрушений, обусловленных указанными видами деформаций, на практике имеют место случаи локализованных разрушений, связанных с контактными деформациями и напряжениями [Орлов с. 240].

Контактные напряжения возникают тогда, когда начальный контакт деталей происходит по линии или точке (редко). Если контактные напряжения превышают допустимые значения, на поверхностях контакта могут возникать вмятины, мелкие раковины, происходит выкрашивание поверхностей. Подобные разрушения наблюдаются на поверхностях беговых колец подшипников, колесах и рельсах и т. д.

Для наиболее распространенного случая контакта двух тел по линии (два цилиндра с параллельными осями), показанного на рис. 2.12, максимальное контактное напряжение определяется по формуле Герца

$$\sigma_H = Z_M \sqrt{\frac{q_H}{2\rho_{пр}}} \le [\sigma_H], \qquad (2.17)$$

где Z_H – коэффициент, учитывающий механические свойства материалов деталей

$$Z_H = \sqrt{\frac{2E_1E_2}{\pi\left[E_2\left(1-\mu_1^2\right)+E_1\left(1-\mu_2^2\right)\right]}};$$

q_H – распределенное линейное давление на контактной поверхности

$$q_H = \frac{F_H}{l_k};$$

F_H – сила сжатий деталей;

l_k – длина контактной линии;

$\rho_{пр}$ – приведенный радиус кривизны поверхностей тел

$$\frac{1}{\rho_{пр}} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2};$$

ρ_1, ρ_2 – соответственно радиусы кривизны контактирующих тел в зоне контакта;

E_1, E_2 – модули упругости контактирующих тел;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для материалов контактирующих тел.

Знак плюс принимается для внешнего контакта деталей, знак минус – для внутреннего.

Примечание. Основоположником теории контактных напряжений является Генри Герц (H. Herz). В его честь приписывают индекс *H* обозначениям контактных напряжений [Иванов, с. 126].

Если детали изготовлены из одинакового материала ($E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = \mu$), тогда

$$Z_H = \sqrt{\frac{E}{\pi\left(1-\mu^2\right)}}. \tag{2.18}$$

Для стальных деталей ($E = 2{,}15 * 10^5$ МПа; $\mu = 0{,}3$) тогда Z_H=275 МПа$^{1/2}$.

Формулы (2.9) и (2.10) справедливы не только для круговых цилиндров, но и для любых других. При контакте цилиндра с плоскостью $r_2 = \infty$.

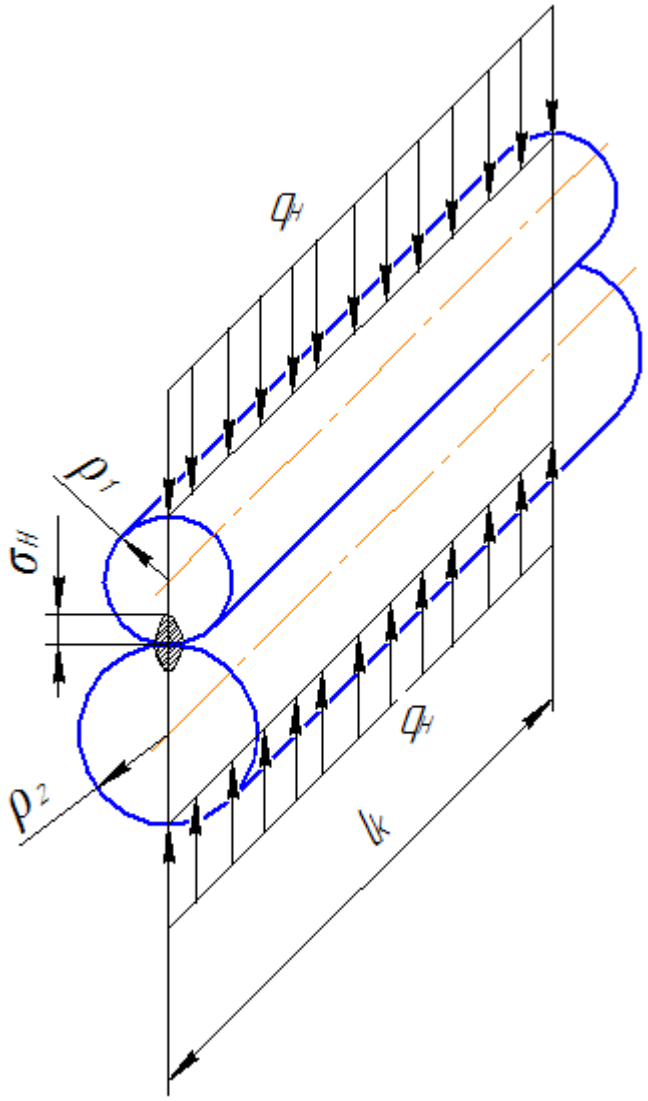

Рис. 2.12 – Схема для расчета контактного нагружения

Главное значение для сопротивления в условиях контактного нагружения имеет твердость поверхностного слоя (рис. 2.13). При усталостном разрушении по контактной прочности первичные трещины образуются в зоне действия максимальных касательных напряжений на глубине, равной 0,3–0,4 размера площадки контакта. Постепенно развиваясь, они выходят на поверхность, образуя характерную точечную сыпь. На дальнейшем этапе точечные дефекты разрастаются и сливаются в цепочки, а между ними называется отслаивание и выкрашивание крупных частиц металла. Это явление называется ***питтингом*** (усталостное разрушение поверхностных слоев). Типичным примером контактного разрушения является питтинг зубчатых колес.

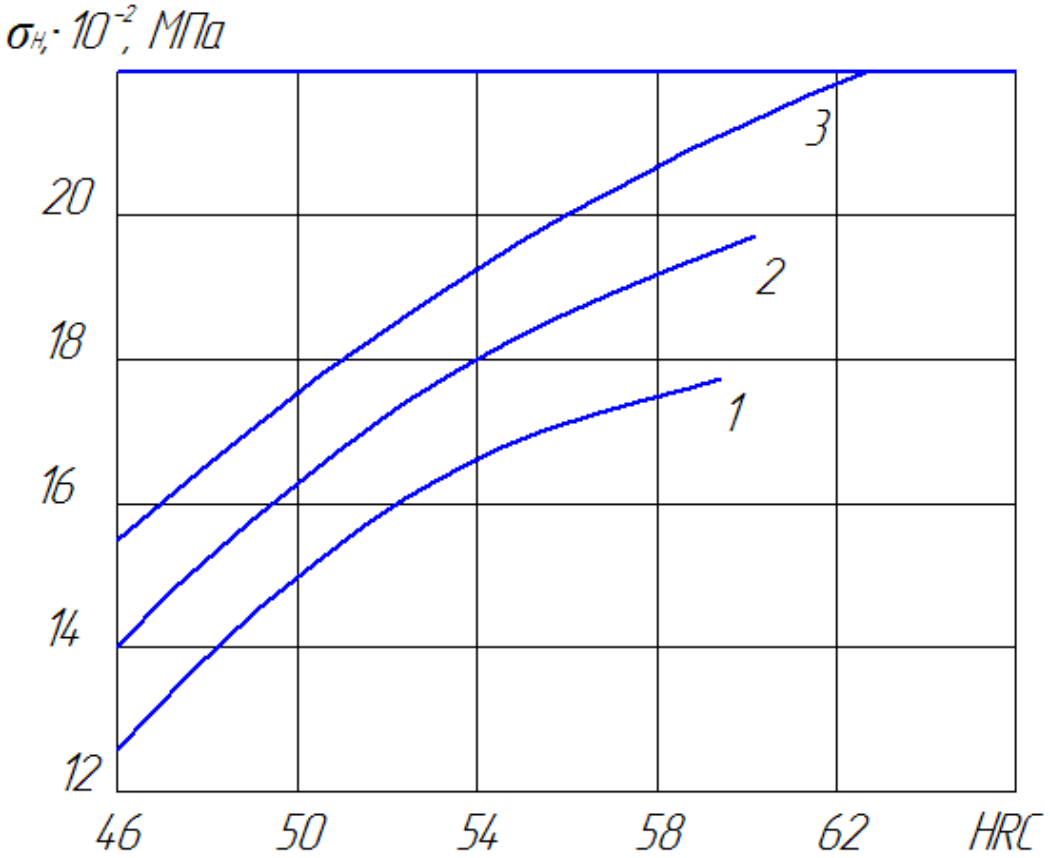

Рис. 2.13 – Зависимость контактной прочности от твердости поверхности
1 – сталь 45ХН; 2 – сталь 20Х2Н4А; 3 – сталь ШХ15

До некоторой степени благоприятное влияние оказывает повышение скорости относительного движения (качение с проскальзыванием).

Присутствие смазки действует двояко. При умеренных давлениях в зоне контакта масляная пленка способствует более равномерному распределению давления и увеличению фактической площади поверхности контакта. Перекатывание поверхностей создает определенный гидродинамический эффект, состоящий в повышении давления смазки, способствующее разделению поверхностей. Кроме того, при давлениях в зоне контакта повышается вязкость масла – ***тиксотропический эффект***. В результате нагрузка воспринимается частично упругой деформацией выступающими металлических поверхностей, отчасти давлением в масляной пленке (***эластогидродинамический эффект***).

При высоких давлениях смазка оказывает отрицательное влияние на контактную прочность. Под действием набегающих поверхностей, а также вследствие капиллярности масло внедряется в микротрещины и расширяет их, вызывая ускоренное выкрашивание металла.