

5. ВІДМОВИ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВСТАЛИВОЇ МІЦНОСТІ

5.1. Характеристики циклів навантаження

Встановлено, що багаторазове застосування навантаження викликає руйнування деталей машин при напругах, значно менших, ніж при одноразовому або постійному навантаженні. При великій кількості повторних навантажень напруги, при яких відбувається руйнування, можуть бути нижчими не тільки за межу міцності і межу плинності, але і т.з. межі пружності. Це явище називають **втомою** металів [Костецький, Орлов, с. 192, Павлице, с. 38]. У сучасних машинах статичні навантаження трапляються як виняток [Орлов, с. 192].

Зовнішнім проявом втоми металів є виникнення та поширення характерного виду тріщин на поверхні деталей у тих місцях, де є сліди обробки інструменту, переходи перерізів та інші концентратори напруги. Втомні злами мають ряд характерних ознак, що відрізняють їх від інших видів зламів [Кубарев, с. 69]. Зазвичай лежить на поверхні зламу можна розрізнити кілька характерних зон. У фокусі зламу, осередку руйнування та ділянці виборчого розвитку тріщин починається утворення та розвиток початкової тріщини втоми. Ці зони мають найбільший блиск і гладкість, спостерігаються характерні лінії втоми. Зона прискореного розвитку тріщин і зона долому є зонами, де відбувається остаточне руйнування деталі. Вони мають матовий колір та характеризуються формами тендітного руйнування.

Сукупність всіх напруг за період їх зміни називається циклом навантаження (рис. 2.4).

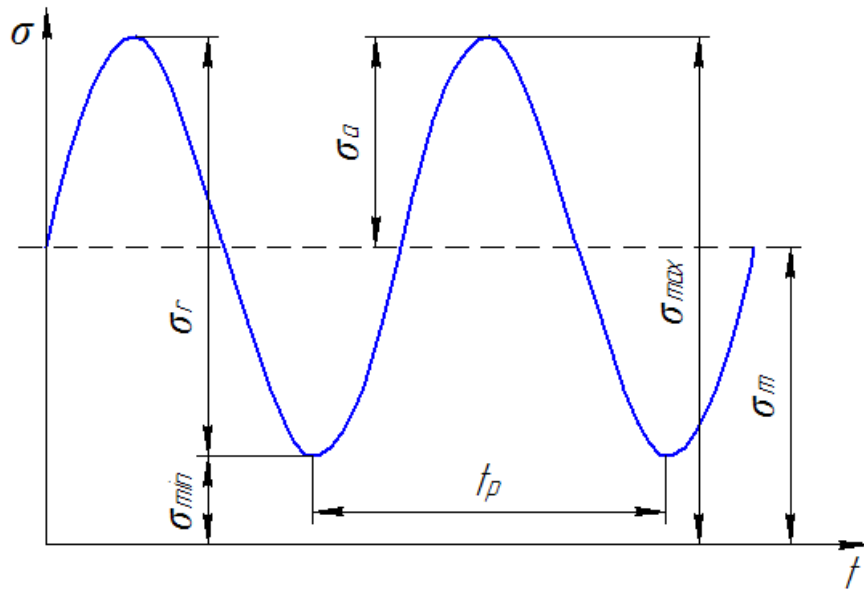
Цикл навантаження характеризується:

- максимальним $\sigma_{\max}$ та мінімальним $\sigma_{\min}$ напругою;
- амплітудою навантаження σ_a

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

- Середньою напругою σ_m

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



Мал. 2.4 – Цикл повторно-змінного навантаження

- Коефіцієнтом асиметрії циклу r

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.14)$$

- Коефіцієнтом амплітуди

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

Розрізняють такі основні цикли напруги [Орлов, с. 57]:

- Постійний – рис.2.5,а

$$a=0, \quad \tau = \text{const}, r=1;$$

- Симетричний знакозмінний – рис.2.5,б

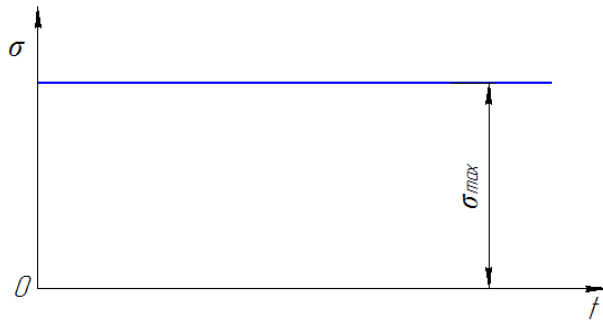
$$\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}, \quad a = \sigma_{\max}, \quad \tau = 0, \quad r = -1;$$

- Пульсуючий (отнульовий) – рис.2.5,в

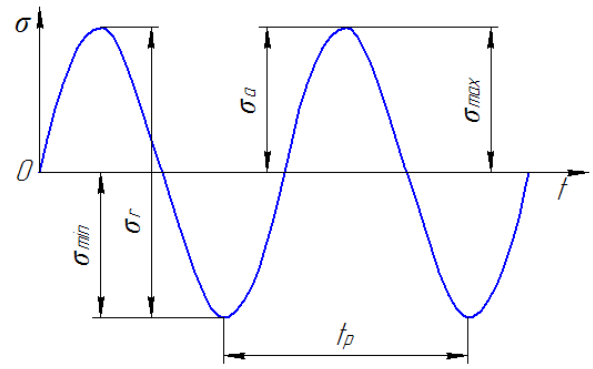
$$\sigma_{\min} = 0, \quad a = 0,5 \sigma_{\max}, \quad \tau = 0,5 \sigma_{\max}, \quad r = 0;$$

- Знакозмінний - рис.2.5,г

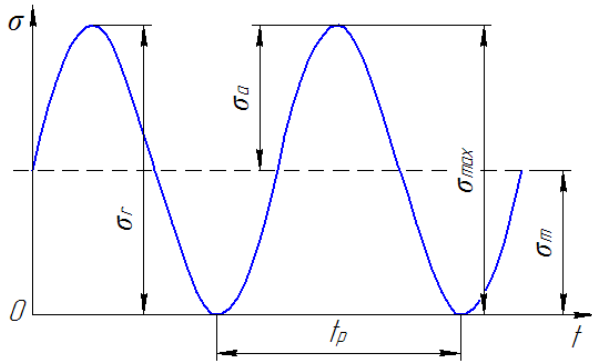
$$-1 < r < 0.$$



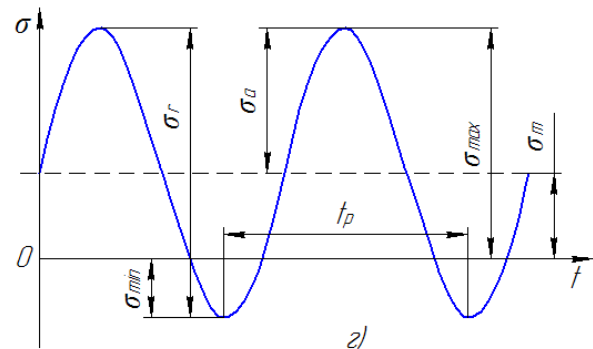
a)



б)



в)



г)

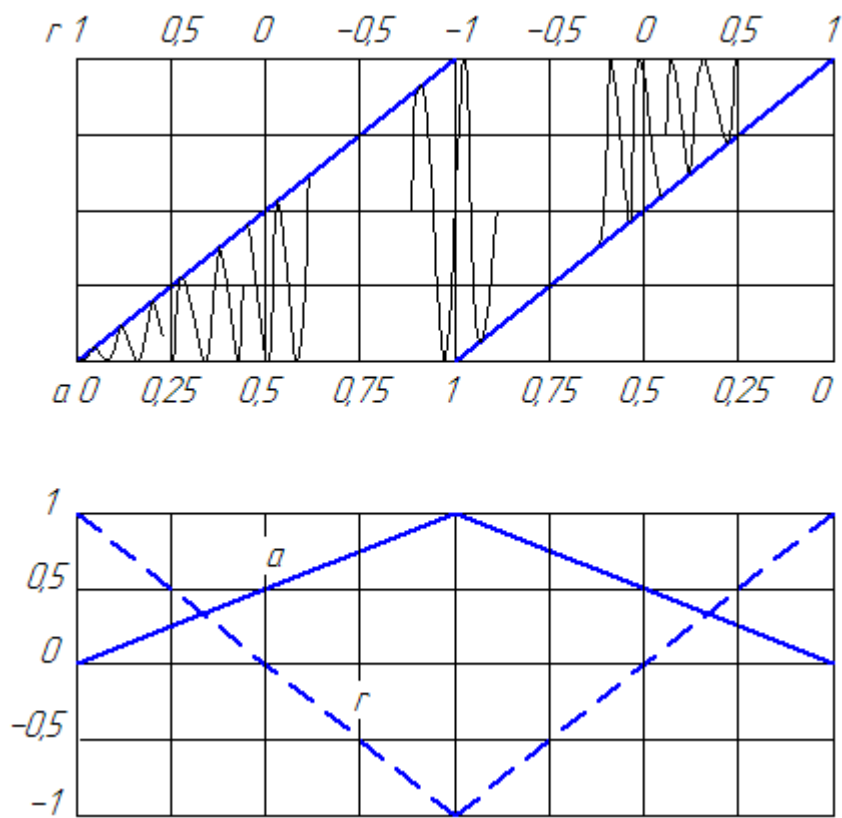
Мал. 2.5 - Типи циклів навантаження

Характеристиками циклів є також [Орлов, с. 195]:

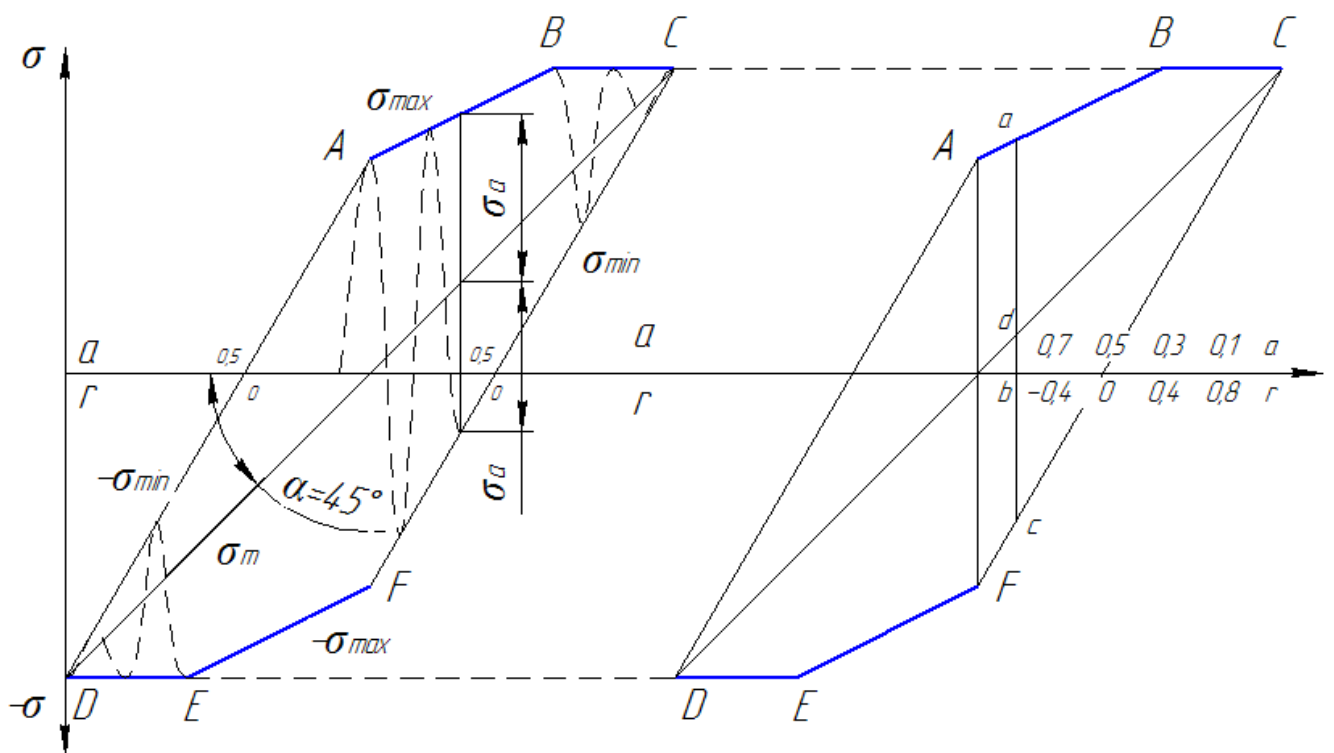
- Період циклу - тривалість одного циклу;
- Частота циклу - число циклів в одиницю часу (величина зворотна періоду).

В окремому випадку, при однакових знаках максимальної та мінімальної напруги (більше або менше нуля) цикл називається знакопостійним.

Наочні цикли характеризуються діаграмами, показаними на рис. 2.6 та 2.7 (діаграма Сміта).



Мал. 2.6 - Характеристики циклів



Мал. 2.7 - Діаграма Сміта

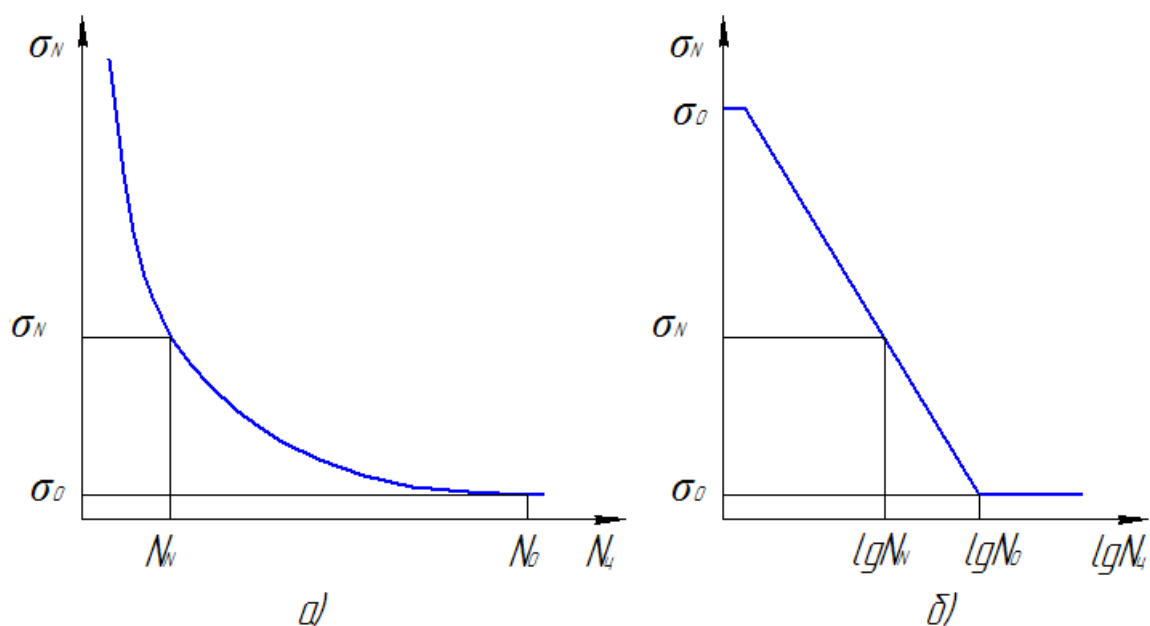
5.2. Запаси міцності при змінних напругах

Число циклів, яке матеріали витримують до руйнування, залежить від максимальної напруги та інтервалу між крайніми значеннями напруг циклу, тобто періоду. У міру зменшення напруг число циклів до руйнування збільшується і при деякому досить малому напрузі стає необмежено більшим. Ця напруга, звана **межею витривалості**, кладуть в основу розрахунку міцності деталей, схильним до циклічних навантажень [Орлов, с. 192].

Межу витривалості визначають за т.з. **кривим втоми** (криві Веллера), що показують залежність числа циклів до руйнування залежно від величини максимальної напруги циклу. Найчастіше криву втоми будують у логарифмічних чи напівлогарифмічних координатах (рис. 2.8). У такому разі крива втоми близька до прямої і може бути апроксимована рівнянням

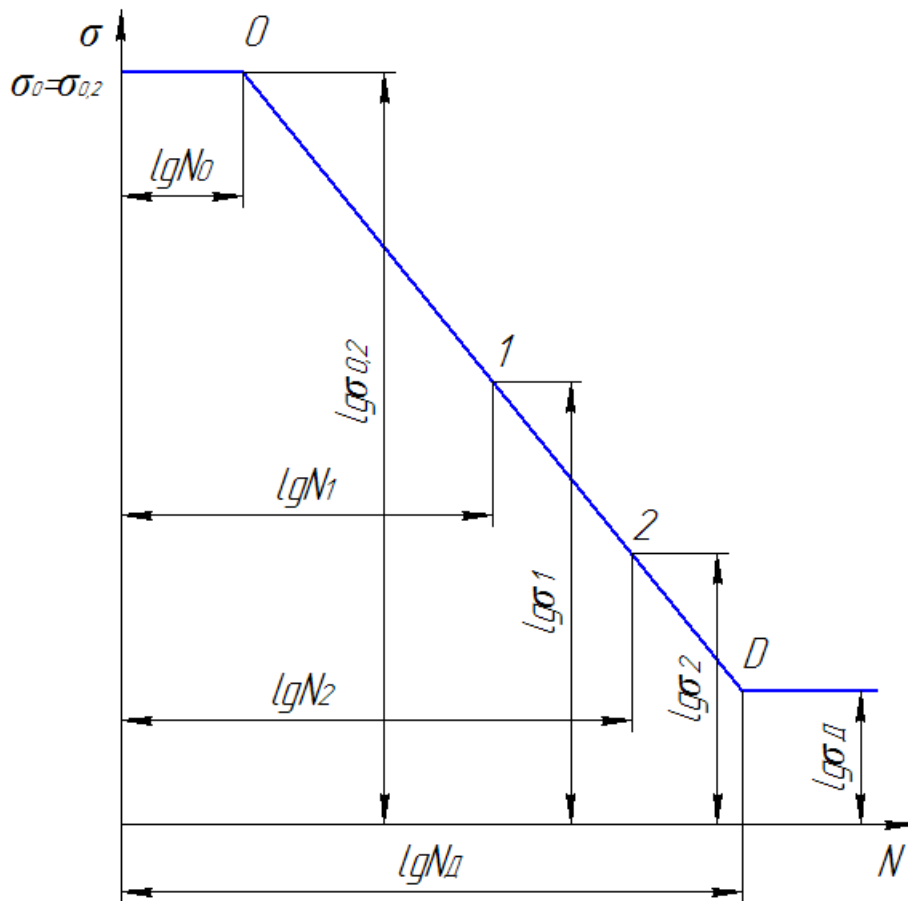
$$N_{\text{ц}} \cdot m = \text{const.}$$

Показник ступеня m визначається із рівняння прямої (рис. 2.9) та залежить від виду матеріалу, форми деталі, коефіцієнта асиметрії циклу. Для симетричного циклу та гладких зразків показник m дорівнює 8...15, а зразків із концентраторами напруги – 3...8.



Мал. 2.8 – Крива втоми

Межа витривалості не є постійною, властивою даному матеріалу характеристикою. Він залежить від умов навантаження, типу циклу, форми та розмірів деталі, технології її виготовлення, стану поверхні та інших факторів. Межі витривалості на вигин мають мінімальне значення при симетричному знакозмінному циклі та підвищуються зі збільшенням його асиметрії. При пульсуючому циклі межа витривалості досягає максимуму і зі зменшенням амплітуди пульсацій наближається до показників статичної міцності матеріалу.



Мал. 2.9 – До визначення показника m

Між характеристиками опору втоми та статичної міцності немає певної теоретичної залежності [Орлов, с. 197]. Найбільш стійкі відносини існують між $\sigma_{0.1}$ і σ_B (межою міцності), а також σ_T (межою плинності).

За досвідченими даними ці співвідношення такі:

- для сталі

$$\sigma_{0.1} = 0,2-0,3 \sigma_B - 1 - \frac{-T}{-B};$$

- для сталевих виливків, високоміцного чавуну та мідних сплавів.

$$\sigma_{0.1} = 0,3-0,4 \sigma_B;$$

- для алюмінієвих сплавів

$$\sigma_{0.1} = 0,25-0,5 \sigma_B;$$

- для сірого чавуну

$$\sigma_{0.1} = 0,3-0,6 \sigma_B.$$

На підставі дослідних даних Шимек отримав наступні залежності меж витривалості від межі міцності:

- на розтягування-стиск при симетричному циклі

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

- на розтягування-стиснення при пульсуючому циклі

$$\sigma_0 = 0,58 \sigma_B - 2,3;$$

- на вигин при симетричному циклі

$$\sim 1 \div 0,4 - 5,7;$$

- на крутіння при симетричному циклі

$$\sim 1 - 0,2 - 4,8;$$

- на крутіння при пульсуючому циклі

$$\sim 0 - 0,25 - 24 .$$

Примітка. Межа витривалості σ_{-1} при знакозмінній симетричній цикл є основним показником втомної міцності. На його основі визначають низку інших параметрів. Для виділення його важливості йому надано індекс -1. межа витривалості при пульсуючому циклі має індекс 0.

Межі витривалості при симетричному циклі пов'язані між собою такими орієнтовними залежностями:

$$\sigma_{-1} - 1 - 1,5 - \sigma_{-1p},$$

$$\sigma_{-1} - 0,5 - 0,7 - \sigma_{-1}.$$

Межі витривалості при пульсуючому та знакозмінному циклах пов'язані наступними наближеними залежностями:

- при згинанні

$$\sigma_0 - 1,4 - 1,6 - \sigma_{-1};$$

- при розтягуванні

$$\sigma_0 - 1,5 - 1,8 - \sigma_{-1p};$$

- при крученні

$$\sigma_0 - 1,4 - 2 - \sigma_{-1}.$$

Межі витривалості при асиметричних циклах можна приблизно визначити за емпіричними залежностями:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{-1p} - 1 - \frac{\sigma_{-1}^2}{\sigma_{-1} - \sigma_{-1p}} - \sigma_{-1};$$

$$\sigma_a - \sigma_{-1p} - 1 - \frac{\sigma_{-1}^2}{\sigma_{-1} - \sigma_{-1p}} - \sigma_{-1}.$$

Наведені залежності дають уявлення лише про загальні закономірності. Для більш повної інформації використовують табличні дані або діаграми втоми.

Діаграми втоми будують на підставі численних дослідних даних стандартних зразків при певному вигляді навантаження (стиснення, розтягування, вигин, кручення) та постійних параметрах циклу [Орлов, с. 198].

Найбільшого поширення має діаграма Сміта (рис. 2.7).

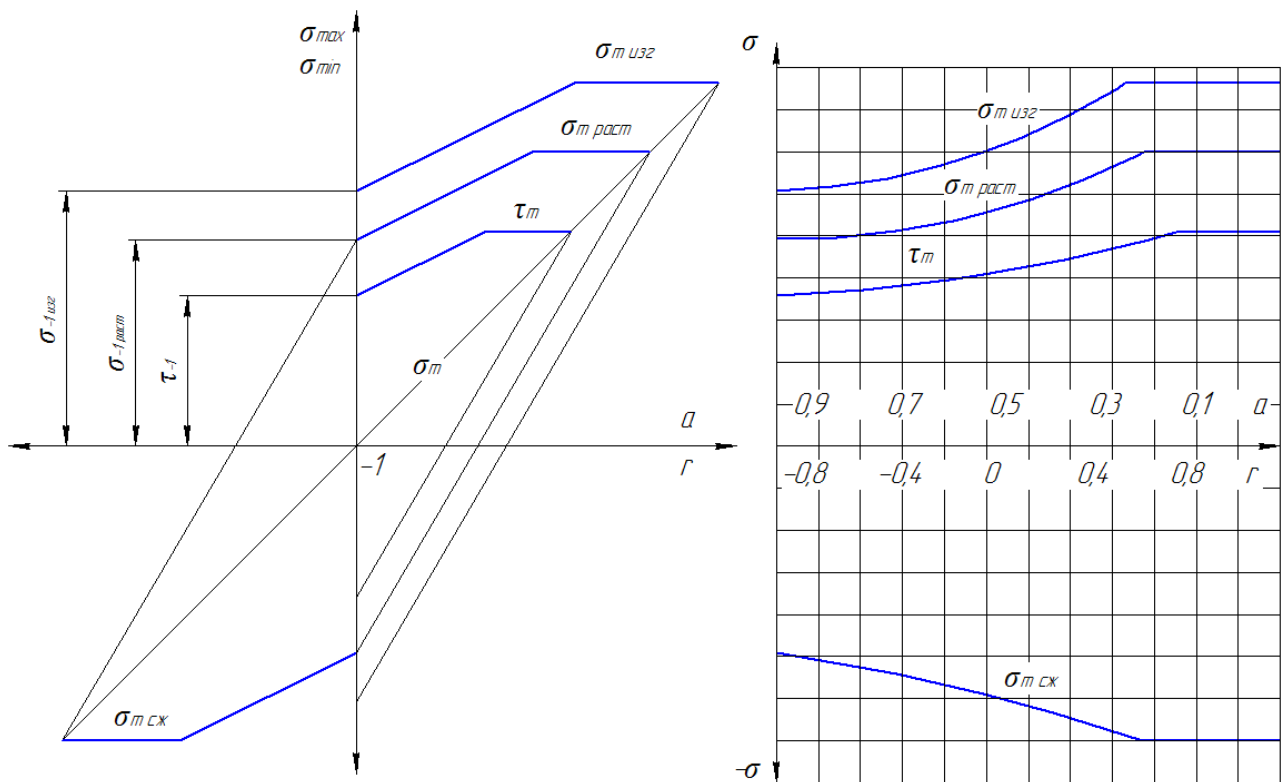
Лінію середньої напруги циклів σ_m , що є водночас нульовою лінією амплітуд, проводять під кутом 45° до осі абсцис. На осі ординат відкладають напруження. На нульовій лінії σ_m відкладають дослідні значення амплітуди напруг σ_a . огибаюча AB сточок $\sigma_{\max}$ являє собою межі витривалості при розтягуванні, що обгинає DE сточок $\sigma_{\max}$. При

розтягування. При малих амплітудах пульсацій межі витривалості практично постійні та близькі до показників статичної міцності.

Коефіцієнт асиметрії для довільної точки визначається як відношення відрізків bcd/ab . Перший відповідає $\sigma_{\min}$, другий – $\sigma_{\max}$.

Як видно із шкали на осі абсцис, межі витривалості при $r > 0,4$ ($a < 0,3$) збігаються з межами плинності σ_T .

Маючи в своєму розпорядженні діаграми Сміта для різних матеріалів і видів навантаження, можна проводити розрахунок на втому при будь-якому значенні коефіцієнта асиметрії циклу (рис. 2.10).



Мал. 2.10 - Узагальнені діаграми втоми

Коефіцієнти запасу міцності при змінних навантаженнях та довільному коефіцієнті асиметрії визначають за формулами

$$n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \cdot \frac{1}{K_{\sigma} \cdot \psi_{\sigma}}; \quad (2.16)$$

$$n = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\min}} \cdot \frac{1}{K_{\tau} \cdot \psi_{\tau}}.$$

Тут зазначено ψ_{σ} і ψ_{τ} – Коефіцієнти впливу асиметрії циклів навантаження. Для сталі приймається $\psi_{\sigma}=0,1$; $\psi_{\tau}=0,05$; для легированих сталей – $\psi_{\sigma}=0,15$; $\psi_{\tau}=0,1$ [Павлище, с. 48].

При одночасному дії нормальних та дотичних напруг (наприклад, вигин та кручення) загальний коефіцієнт запасу міцності буде

$$n = \frac{n - n_0}{\sqrt{m_2 - m_1}} \quad (2.17)$$

5.3. Вплив основних факторів на витривалість деталей машин

Розрахункові значення коефіцієнтів запасу втомної міцності визначають з урахуванням того, що форма, розміри та умови роботи деталей відрізняються від таких при лабораторних дослідженнях.

Принципова схема впливу деяких факторів показано на рис. 2.ппп.

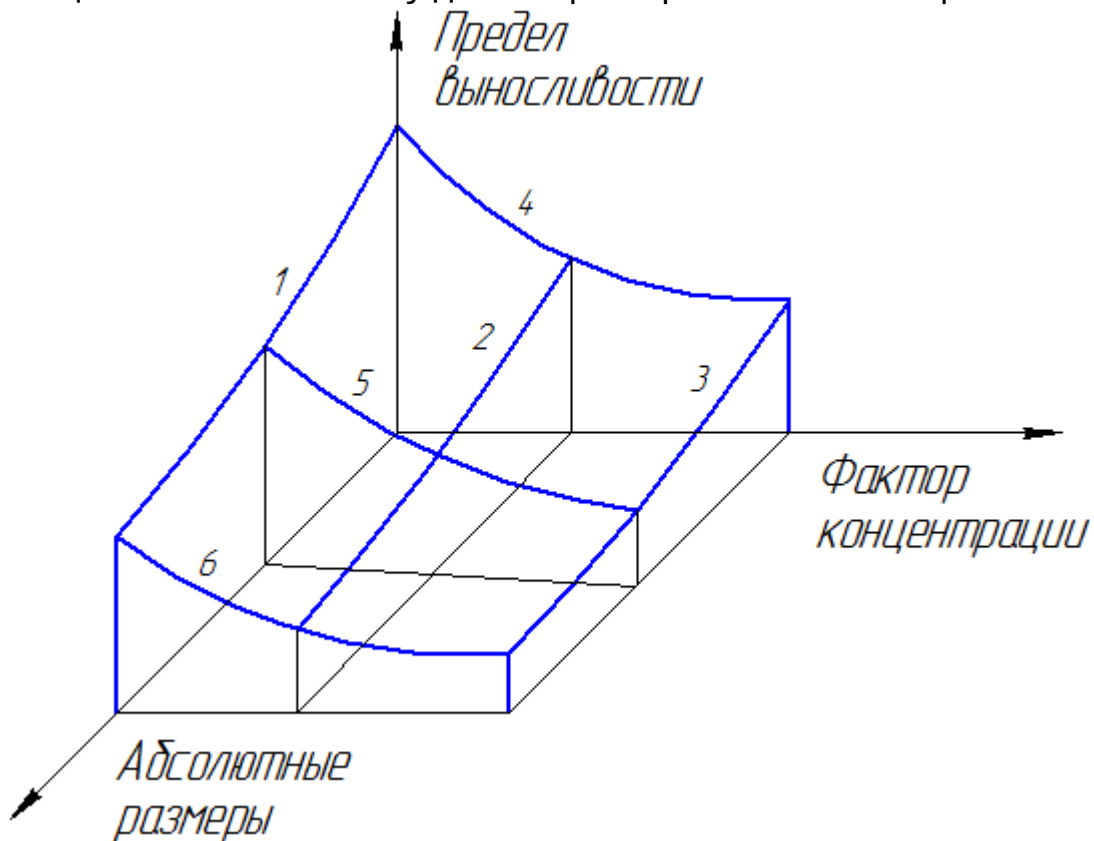


Рисунок 5.55 – Схема впливу факторів на витривалість

Вплив абсолютних розмірів деталей (масштабний фактор)

При збільшенні розмірів деталей внаслідок зміни відносного впливу поверхневого шару матеріалу та збільшення його неоднорідності відбувається зниження показників міцності. Зменшення показників характеризується коефіцієнтами форми $\varepsilon_T, \varepsilon_B, \varepsilon$

$$\varepsilon_T = T_d - T - T_0$$

$$\varepsilon_B = B_d - B - B_0$$

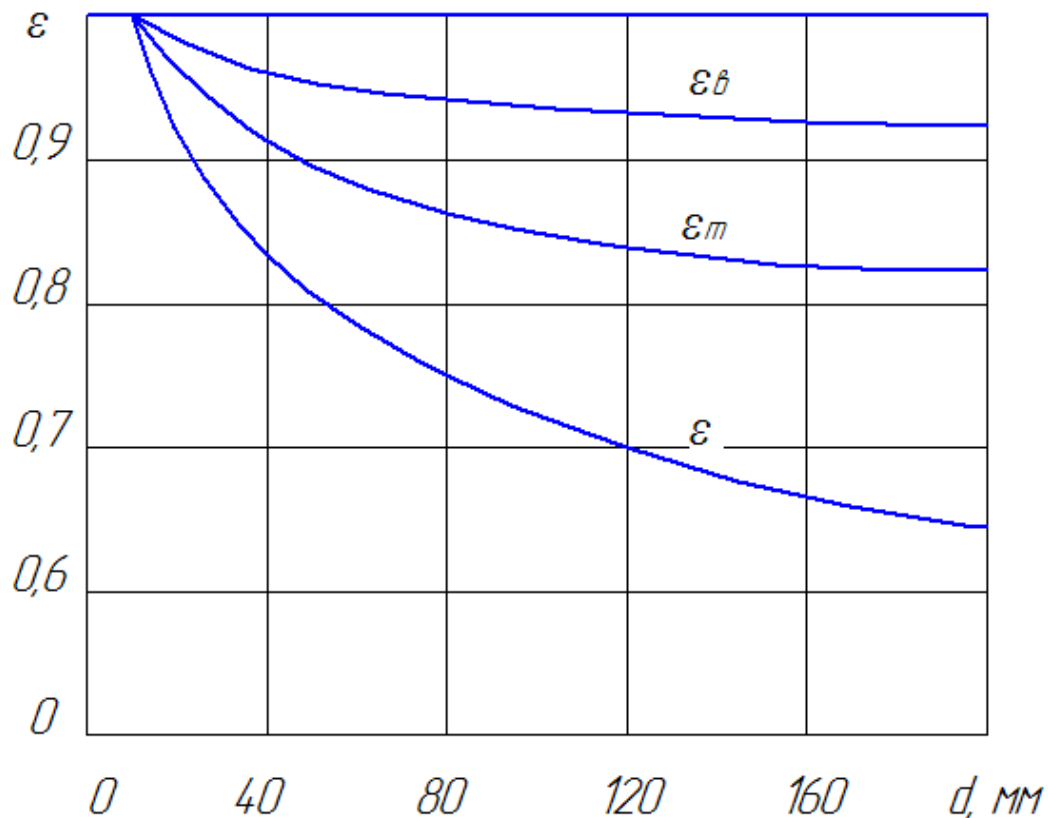
$$\varepsilon = 1_d - 1$$

де ε_T – Коефіцієнт абсолютних розмірів деталі за межею плинності;

ε_B – Коефіцієнт абсолютних розмірів деталі за межею міцності;

ε – Коефіцієнт абсолютних розмірів деталі по напрузі витривалості.

Значення коефіцієнтів наведено у довідковій літературі. Наприклад на рис. 2.11 показано залежність коефіцієнтів від абсолютних розмірів деталей.



Мал. 2.11 – Коефіцієнт впливу абсолютних розмірів деталей

Вплив конструктивної форми деталі

На величину показників міцності особливо при циклічних навантаженнях надає місцеву зміну форми деталі та пов'язане з цим явище концентрації напруги. У місцях розташування концентраторів напруг (отвори, переходи діаметрів, пази, надрізи, проточки та ін) виникають піки навантажень. Вплив зміни форми деталей враховується коефіцієнтами концентрації нормальних D_{σ} та дотичних напруг D_{τ} . Значення коефіцієнтів наведено у довідковій літературі. Для пластичних матеріалів значення коефіцієнтів близькі до одиниці. Для крихких матеріалів значення коефіцієнтів досягають 1,3...1,4 для сталі і навіть 2,5...3,0 – для чавуну.

Наближено між коефіцієнтами існує зв'язок

$$D_{\sigma} \sim 1 - 0,6 - D_{\tau} \sim 1 -$$

Вплив стан поверхні деталей

Якість поверхні мало впливає на міцність деталей за постійного статичного навантаження. При змінних навантаженнях руйнування починаються з появи мікротріщин на поверхні деталі, тому будь-який дефект сприяє виникненню концентраторів напруги та зниженню межі витривалості. Вплив якості поверхні враховується коефіцієнтом стану поверхні β , Значення якого рівні 0,75 ... 1. Найменші значення приймаються для більш грубої поверхні (обточування, фрезерування, свердління).

На рис. 23 показаний характер впливу способів обробки поверхні на межу витривалості. Якщо прийняти межу витривалості шліфованого зразка за 100 %, полірування дає подальше підвищення міцності, інші види обробки знижують межу витривалості ті значніші, ніж вище межа міцності матеріалу.

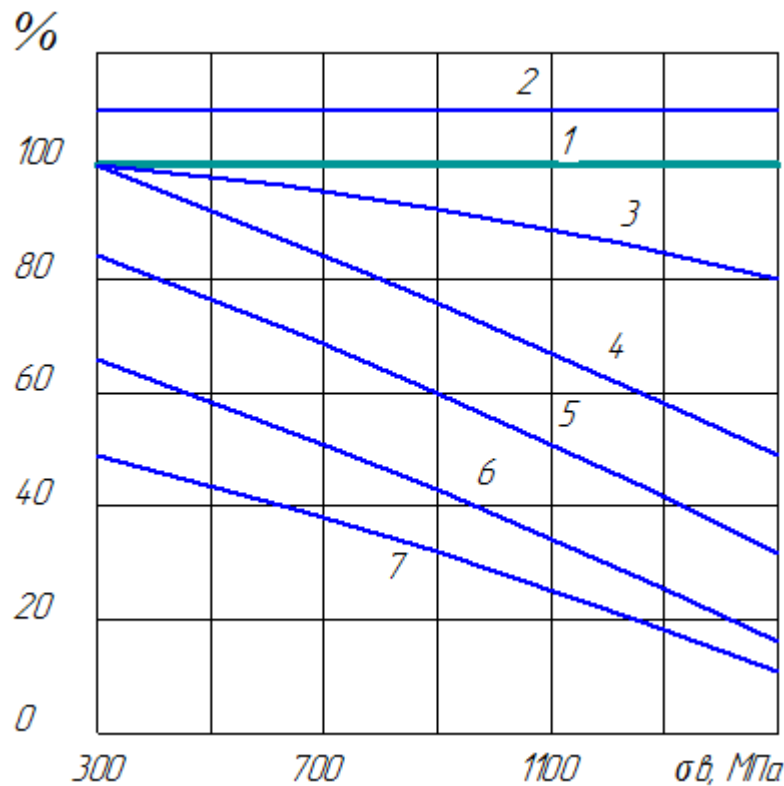


Рисунок 5.444 – Вплив стану поверхні на витривалість деталей

6. КОНТАКТНА МІЦНІСТЬ

Крім звичайних видів руйнувань, зумовлених зазначеними видами деформацій, на практиці мають місце випадки локалізованих руйнувань, пов'язаних із контактними деформаціями та напругами [Орлов с. 240].

Контактна напруга виникають тоді, коли початковий контакт деталей відбувається по лінії чи точці (рідко). Якщо контактна напруга перевищує допустимі значення, на поверхнях контакту можуть виникати вм'ятини, дрібні раковини, відбувається фарбування поверхонь. Подібні руйнування спостерігаються на поверхнях бігових кілець підшипників, колесах та рейках тощо.

Для найбільш поширеного випадку контакту двох тіл по лінії (два циліндри з паралельними осями), показаного на рис. 2.12 максимальна контактна напруга визначається за формулою Герца

$$\sigma_{H\max} = Z_H \sqrt{\frac{Q_H}{2-\pi r}} \quad (2.17)$$

де Z_H – Коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалів деталей

$$Z_H = \sqrt{\frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}};$$

q_H – розподілений лінійний тиск на контактній поверхні

$$q_H = \frac{F}{l_k}$$

F – Сила стисків деталей; l_k –

Довжина контактної лінії;

ρ_{pr} – наведений радіус кривизни поверхонь тіл

$$\frac{1}{\rho_{pr}} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2};$$

ρ_1, ρ_2 – відповідно радіуси кривизни контактуючих тіл зони контакту;

E_1, E_2 – модулі пружності контактуючих тіл;

μ_1, μ_2 – Коефіцієнти Пуассона для матеріалів контактуючих тіл.

Знак плюс приймається для зовнішнього контакту деталей, знак мінус для внутрішнього.

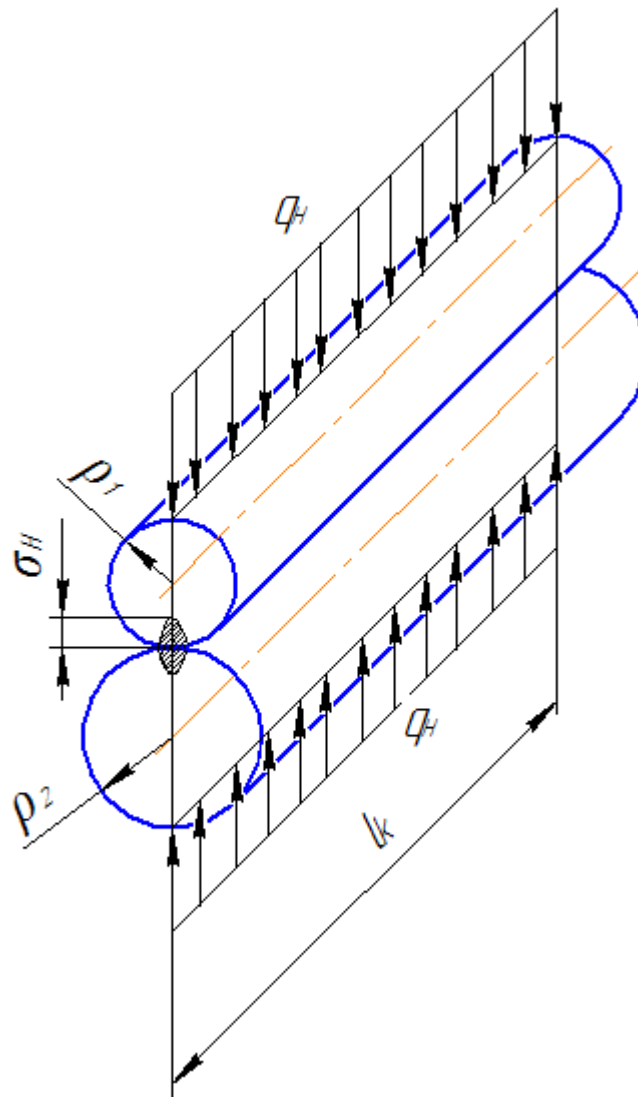
Примітка. Основоположником теорії контактних напруг Генрі Герц (H. Herz). На його честь приписують індекс H позначення контактних напруг [Іванов, с. 126].

Якщо деталі виготовлені з однакового матеріалу ($E_1 = E_2 = E, \mu_1 = \mu_2 = \mu$), тоді

$$Z_H = \sqrt{\frac{E}{1 - \mu^2}}.$$

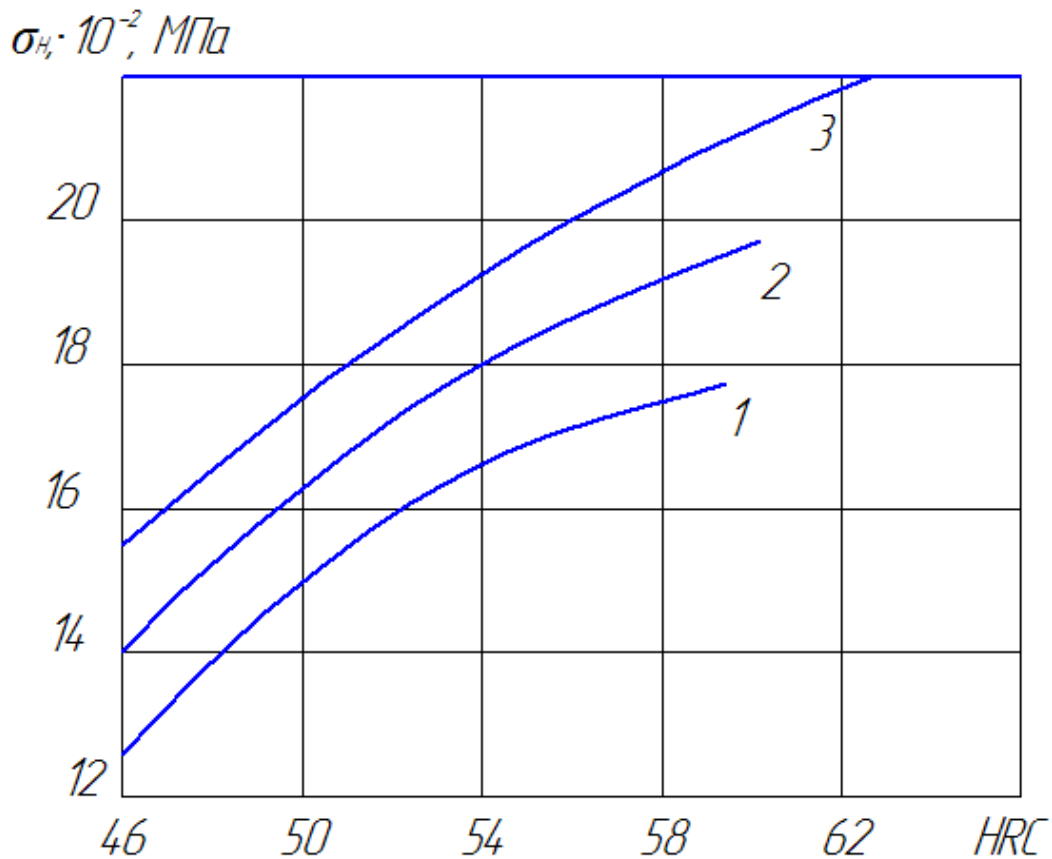
(2.18)

Для сталевих деталей ($E = 2,15 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$) тоді $Z_H = 275$ МПа^{1/2}. Формули (2.9) і (2.10) справедливі як для кругових циліндрів, але й будь-яких інших. При контакті циліндра з площиною $\rho_2 = \infty$.



Мал. 2.12 - Схема для розрахунку контактної навантаження

Головними значеннями для опору за умов контактної навантаження має твердість поверхневого шару (рис. 2.13). При втомному руйнуванні по контактній міцності первинні тріщини утворюються в зоні дії максимальної дотичної напруги на глибині, що дорівнює 0,3-0,4 розміру майданчика контакту. Поступово розвиваючись, вони виходять на поверхню, утворюючи характерний точковий висип. На подальшому етапі точкові дефекти розростаються і зливаються в ланцюжка, а між ними називається відшарування та фарбування великих частинок металу. Це явище називається **ПІТТИНГОМ** (Втомне руйнування поверхневих шарів). Типовим прикладом контактної руйнування є пitting зубчастих коліс.



Мал. 2.13 – Залежність контактної міцності від твердості поверхні
1 – сталь 45ХН; 2 – сталь 20Х2Н4А; 3 – сталь ШХ15

До певної міри сприятливий вплив робить підвищення швидкості відносного руху (качання з прослизанням).

Присутність мастила діє подвійно. При помірному тиску в зоні контакту масляна плівка сприяє більш рівномірному розподілу тиску і збільшенню фактичної площі поверхні контакту. Перекочування поверхонь створює певний гідродинамічний ефект, що полягає у підвищенні тиску мастила, що сприяє поділу поверхонь. Крім того, при тисках у зоні контакту підвищується в'язкість олії – **тиксотропічний ефект**. В результаті навантаження сприймається частково пружною деформацією металевими поверхонь, що виступають, частково тиском в масляній плівці (**еластогідродинамічний ефект**).

При високих тисках мастило негативно впливає на контактну міцність. Під дією поверхонь, що набігають, а також внаслідок капілярності масло впроваджується в мікротріщини і розширює їх, викликаючи прискорене фарбування металу.