

KU 0254 pozycja wydawnictw naukowych  
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2007  
ISBN 978-83-7464-120-3

Redaktor Naczelny Uczelnianych Wydawnictw  
Naukowo-Dydaktycznych AGH: *Jan Sas*

Z-ca Redaktora Naczelnego: *Beata Barszczewska-Wojda*

Komitet Naukowy UWND AGH:  
*Kazimierz Jeleń* (przewodniczący),  
*Edward Fraś*,  
*Tadeusz Sawik*,  
*Ryszard Uberman*,  
*Adam Paweł Wojda*,  
*Mariusz Ziółko*

Recenzent: *prof. dr hab. inż. Marcin Warszyński*

Projekt okładki i strony tytułowej: *Beata Barszczewska-Wojda*

Opracowanie edytorskie: *Ewa Betka*

Korekta: *Danuta Harnik*

Skład komputerowy: „Andre”, tel. 012 423 10 10

WYDANIE PIĄTE POPRAWIONE

---

Redakcja Uczelnianych Wydawnictw Naukowo-Dydaktycznych AGH  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. 012 617 32 28, tel./fax 012 636 40 38  
e-mail: [redakcja@wydawnictwoagh.pl](mailto:redakcja@wydawnictwoagh.pl)  
[www.WydawnictwoAGH.pl](http://www.WydawnictwoAGH.pl)

---

## Spis treści

Wstęp .....	5
Wykaz niektórych oznaczeń .....	7
<b>1. Fizyczne podstawy obliczeń wytrzymałościowych</b> ( <i>Stanisław Kuliński, Michał Maziarz</i> ) .....	11
1.1. Podstawowe rodzaje uszkodzeń zębów .....	11
1.1.1. Mechanizm powstawania wykruszeń na powierzchni roboczej zęba .....	11
1.1.2. Odkształcenia plastyczne i utrata zarysu .....	13
1.1.3. Złamanie u podstawy .....	15
1.1.4. Wytarcie .....	15
1.1.5. Zatarcie .....	15
1.2. Wskazówki wyboru warunków wytrzymałościowych .....	16
<b>2. Dobór materiałów na koła zębate</b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	18
2.1. Główne kryteria doboru materiału na koła zębate .....	19
2.2. Wymagane własności materiału .....	19
2.3. Ogólna charakterystyka stosowanych materiałów .....	20
2.3.1. Żeliwa .....	20
2.3.2. Staliwa .....	21
2.3.4. Stale .....	22
2.4. Materiały stosowane na wały maszynowe .....	26
2.5. Materiały stosowane na korpusy przekładni zębatych .....	27
<b>3. Wyznaczanie naprężeń stykowych dopuszczalnych <math>\sigma_{HP}</math></b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	28
3.1. Współczynnik trwałości $Z_N$ .....	32
3.2. Współczynnik smarowania $Z_L$ .....	36
3.3. Współczynnik uwzględniający wpływ chropowatości zębów $Z_R$ (współczynnik chropowatości) .....	38
3.4. Współczynnik prędkości $Z_V$ .....	39
3.5. Współczynnik wzmocnienia powierzchniowego $Z_W$ .....	40
3.6. Współczynnik wielkości zębów $Z_X$ .....	41
3.7. Naprężenia dopuszczalne stykowe statyczne $\sigma_{HP \max}$ .....	41
3.8. Naprężenia dopuszczalne zmęczeniowe na zginanie u podstawy zęba $\sigma_{FP}$ .....	42
3.8.1. Współczynnik technologii wykonywania zębów $Y_T$ .....	47
3.8.2. Współczynnik postaci cyklu obciążenia $Y_W$ .....	47
3.8.3. Współczynnik sposobu wykonywania półwyrobu koła $Y_Z$ .....	48
3.8.4. Współczynnik trwałości $Y_N$ .....	48
3.8.5. Współczynnik wrażliwości zmęczeniowej materiału $Y_\delta$ .....	50

3.8.6. Współczynnik stanu powierzchni $Y_R$ .....	50
3.8.7. Współczynnik wielkości zębów $Y_X$ .....	51
3.9. Wyznaczanie statycznych naprężeń dopuszczalnych na zginanie $\sigma_{FP \max}$ .....	52
<b>4. Stan obciążenia</b> ( <i>Stanisław Kuliński</i> ) .....	59
<b>5. Naprężenia obliczeniowe</b> ( <i>Stanisław Kuliński</i> ) .....	63
5.1. Naprężenia kontaktowe w biegunie zazębienia $C$ .....	63
5.2. Naprężenia od zginania u podstawy zęba .....	64
5.3. Współczynniki obciążenia i naprężeń .....	65
5.3.1. Współczynnik przeciążenia .....	65
5.3.2. Współczynnik nadwyżek dynamicznych zewnętrznych $K_v$ .....	67
5.3.3. Współczynnik koncentracji obciążenia na długości zęba $K_{H\beta}$ .....	71
5.3.3.1. Współczynnik $K_{F\beta}$ koncentracji obciążenia przy zginaniu zęba .....	74
5.3.4. Współczynnik $K_{H\alpha}$ $K_{F\alpha}$ rozkładu obciążenia w zazębieniu .....	75
5.3.5. Współczynnik naprężeń kontaktowych .....	77
5.3.5.1. Współczynnik sprężystości materiałów $Z_E$ .....	77
5.3.5.2. Współczynnik $Z_H$ geometrii zarysu .....	78
5.3.5.3. Współczynnik $Z_e$ stopnia pokrycia .....	80
5.3.5.4. Współczynnik $Z_\beta$ pochylenia linii zęba .....	81
5.3.5.5. Współczynnik $Z_B$ zmiany krzywizny powierzchni styku .....	82
5.3.6. Współczynnik naprężeń gnących .....	83
5.3.6.1. Współczynnik $Y_F$ kształtu zęba .....	83
5.3.6.2. Współczynnik $Y_\beta$ pochylenia linii zęba .....	86
5.3.6.3. Współczynnik $Y_\epsilon$ liczby przyporu .....	86
<b>6. Obliczenia konstrukcyjne</b> ( <i>Stanisław Kuliński</i> ) .....	87
6.1. Obliczenia wstępne średnicy zębniaka $d_1$ lub odległości osi $a$ .....	87
6.2. Obliczenia wstępne modułu $m$ .....	90
6.3. Wielkości charakterystyczne wieńca zębatego .....	93
6.4. Przykład obliczeń wstępnych .....	97
<b>7. Obliczenia wytrzymałościowe kół stożkowych</b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	110
7.1. Sprawdzenie zębów kół stożkowych na zginanie .....	116
<b>8. Obliczenia wytrzymałościowe przekładni ślimakowych (walcowych)</b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	120
8.1. Obliczenia przekładni (zębów ślimacznicy) na zginanie zmęczeniowe .....	122
8.2. Sprawdzenie zębów ślimacznicy na złamanie statyczne (doraźne) .....	124
8.3. Sprawdzenie przekładni ślimakowej na rozgrzewanie .....	125
8.3.1. Wyznaczenie przyrostu temperatury w skrzyni .....	126
<b>9. Wytyczne konstruowania kół zębatych</b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	131
<b>10. Wytyczne konstruowania skrzyń reduktorów</b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	138
<b>11. Smarowanie przekładni zębatych</b> ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	145
11.1. Dobór rodzajów środków smarnych dla przekładni zębatych .....	148
Aneks ( <i>Michał Maziarz</i> ) .....	150
Literatura .....	180

## Wstęp

Powszechne zastosowanie przekładni zębatych tak w przemyśle, jak i w życiu codziennym, spowodowało niezwykle szerokie zainteresowanie nimi zarówno w sferze konstrukcji, jak i technologii czy eksploatacji. Prowadzone w związku z tym badania i analizy teoretyczne dają ciągle nowe wyniki, przybliżające w coraz to większym stopniu, uproszczone początkowo, modele obliczeniowe do rzeczywistych warunków pracy przekładni. Dają możliwość lepszego oszacowania własności mechanicznych materiałów stosowanych na przekładnie zębate dla danego prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, jak również lepsze oszacowanie parametrów wytrzymałościowych (trwałościowych). Rozrasta się zatem literatura specjalistyczna na ten temat, a jej objętość, różnorodność pojęć, oznaczeń i hipotez wcale nie ułatwia orientacji początkującemu adeptowi.

Celem niniejszej książki nie jest więc powiększenie o jeszcze jedną pozycję tej bogatej bibliografii, obejmującej problematykę przekładni zębatych, lecz podanie wybranych zagadnień, które odpowiednio ułożone i zobrazowane przykładami, mogą stanowić przewodnik przy konstruowaniu lub sprawdzaniu przewidzianej programem nauczania przekładni zębatej (reduktora).

Autorzy pomijają zatem te fragmenty teorii zazębienia i wykonywania, które wynikają z jej bogato opisanego kinematyki, podając jedynie metodę obliczeń przekładni zębatych walcowych, stożkowych i ślimakowych z ewolwentowym zarysem zęba, uwzględniając jednocześnie propozycje zawarte we współcześnie obowiązujących normach międzynarodowych ISO (DIN).

Autorzy zwracają szczególną uwagę na skomentowanie w istniejących obliczeniach współczynników i fizyczne uzasadnienie ich występowania, celem stworzenia podstaw do dalszych samodzielnych studiów i pełnego zrozumienia metod obliczeniowych.

Jeżeli książka ta spełni wyznaczone tu cele, będzie to stanowić pełną satysfakcję dla autorów.

*Autorzy*



## Wykaz niektórych oznaczeń

- $a$  [mm] – geometryczna odległość osi przekładni
- $a_w$  [mm] – rzeczywista odległość osi przekładni
- $b$  [mm] – szerokość wieńca koła
- $b_w$  [mm] – szerokość ząbienia
- $c_w$  [mm] – luz wierzchołkowy
- $c_o$  [mm] – luz obwodowy
- $d$  [mm] – średnica podziałowa koła
- $d_a$  [mm] – średnica okręgu wierzchołków koła
- $d_b$  [mm] – średnica zasadnicza koła
- $d_f$  [mm] – średnica stóp koła
- $d_w$  [mm] – średnica toczna w przekroju normalnym
- $d_{tw}$  [mm] – średnica toczna w przekroju czołowym
- $h_a$  [mm] – wysokość głowy zęba
- $h_f$  [mm] – wysokość stopy zęba
- $h_F$  [mm] – ramię działania siły zginającej
- $h_t$  [mm] – grubość warstwy utwardzonej zęba
- $m_n$  [mm] – moduł zęba w przekroju normalnym
- $m_t$  [mm] – moduł zęba w przekroju czołowym
- $n$  [1/min] – obroty koła
  - $q_H$  – wykładnik nachylenia krzywej Wöhlera dla nacisków stykowych
  - $q_F$  – wykładnik nachylenia krzywej Wöhlera dla zginania
- $s_{Fn}$  [mm] – grubość stopy zęba
- $u = \frac{z_2}{z_1} \geq 1$  – przełożenie przekładni
- $v$  [m/s] – prędkość obwodowa przekładni
  - $z_1$  – liczba zębów zębnika
  - $z_2$  – liczba zębów koła współpracującego
  - $z_v$  – zastępcza liczba zębów
  - $z_c$  – sumaryczna liczba zębów
- $F$  [N] – siła obwodowa działająca na okręgu tocznym
- $F_{bn}$  [N] – siła działająca na ząb na okręgu zasadniczym w przekroju normalnym

- $F_{pb}$  [ $\mu\text{m}$ ] – wypadkowy błąd podziałki  
 $F_t$  [N] – nominalna siła obwodowa działająca na okręgu podziałowym w przekroju czołowym  
 $F_{t\text{ dyn}}$  [N] – międzyzębna siła dynamiczna  
 $F_{t\text{ lim}}$  [N] – graniczna siła dynamiczna międzyzębna  
 $F_{\beta}$  [ $\mu\text{m}$ ] – dopuszczalna odchyłka błędu pochylenia  
 $F_H$  – twardość powierzchni zęba  
 $K_A$  – współczynnik przeciążenia (zastosowania), uwzględniając obciążenia dynamiczne powstające poza zazębieniem  
 $K_{AS}$  – współczynnik przeciążeń udarowych uwzględniany przy statycznym sprawdzaniu zębów  
 $K_F$  – współczynnik obciążenia zewnętrznego (eksploatacyjnego) dla zginania  
 $K_H$  – współczynnik obciążenia zewnętrznego (eksploatacyjnego) dla nacisków  
 $K_V$  – współczynnik nadwyżek dynamicznych, powstających w zazębieniu  
 $K_{F\alpha}$  – współczynnik rozkładu obciążenia w zazębieniu przy zginaniu  
 $K_{F\beta}$  – współczynnik koncentracji obciążenia przy zginaniu  
 $K_{H\alpha}$  – współczynnik uwzględniający rozkład nacisków wzdłuż odcinka przyporu  
 $K_{H\beta}$  – współczynnik uwzględniający rozkład nacisków wzdłuż szerokości zazębienia  
 $\text{KCU}$  [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ] – udarność  
 $K_H$  – twardość rdzenia zęba  
 $N_F$  – wykładnik potęgowy  
 $N$  – liczba cykli zmian naprężenia (ogólnie)  
 $N_{H\text{ lim}}^0$  – bazowa liczba cykli na naciski stykowe (dla próbek)  
 $N_{HE}$  – zastępcza liczba cykli zmian naprężeń stykowych  
 $N_K$  – liczba cykli zmian naprężeń w projektowanym czasie  
 $N_{F\text{ lim}}^0$  – bazowa liczba cykli na zginanie zmęczeniowe (dla próbek)  
 $N_{FE}$  – zastępcza liczba cykli zmian naprężeń na zginanie  
 $P$  [kW] – moc przenoszona przez przekładnię  
 $R_{e^*}$  [mm] – długość tworzącej stożka koła stożkowego  
 $S_F$  – rzeczywisty obliczeniowy współczynnik bezpieczeństwa na zmęczeniowe zginanie  
 $S_{F\text{ min}}$  – wymagany współczynnik bezpieczeństwa na zginanie  
 $S_{F\text{ st}}$  – współczynnik bezpieczeństwa na odkształcenie trwałe oraz powstanie pęknięć kruchych u podstawy zęba (zginanie)  
 $S_H$  – rzeczywisty obliczeniowy współczynnik bezpieczeństwa na naciski  
 $S_{H\text{ min}}$  – wymagany współczynnik bezpieczeństwa na naciski stykowe  
 $S_{H\text{ St}}$  – współczynnik bezpieczeństwa na odkształcenie trwałe i kruchy przełom warstwy wierzchniej (naciski)  
 $T$  [Nm] – moment obrotowy  
 $Y_F$  – współczynnik kształtu zęba (ogólnie)  
 $Y_{Fa}$  – współczynnik kształtu zęba dla przypadku przyłożenia siły do wierzchołka zęba

- $Y_{FSa}$  – współczynnik działania karbu
- $Y_N$  – współczynnik trwałości przy zginaniu zmęczeniowym
- $Y_S$  – współczynnik gradientu naprężenia przy zginaniu
- $Y_{Sa}$  – współczynnik spiętrzenia naprężeń
- $Y_T$  – współczynnik technologii wykonania zębów
- $Y_W$  – współczynnik postaci cyklu obciążenia
- $Y_\delta$  – współczynnik wrażliwości zmęczeniowej materiału
- $Y_X$  – współczynnik uwzględniający wielkość zębów
- $Y_Z$  – współczynnik sposobu wykonania półwyrobu koła
- $Y_\alpha$  [ $\mu\text{m}$ ] – współczynnik dotarcia zębów przekładni
- $Y_\beta$  – współczynnik pochylenia linii zęba
- $Y_\epsilon$  – współczynnik liczby przyporu
- $Y_{\delta St}$  – współczynnik wrażliwości na koncentrację naprężeń wytrzymałości statycznej
- $Z_E$  [(MPa) $^{1/2}$ ] – współczynnik sprężystości materiału kół
- $Z_H$  – współczynnik geometrii zarysu
- $Z_L$  – współczynnik smarowania
- $Z_N$  – współczynnik trwałości stykowej
- $Z_R$  – współczynnik chropowatości zębów
- $Z_V$  – współczynnik prędkości
- $Z_W$  – współczynnik wzmocnienia powierzchniowego
- $Z_X$  – współczynnik wielkości zębów
- $Z_B$  – współczynnik zmiany krzywizny powierzchni styku
- $Z_\beta$  – współczynnik pochylenia linii zęba
- $Z_\epsilon$  – współczynnik stopnia pokrycia
- $\alpha_n$  [ $^\circ$ ] – kąt przyporu na okręgu podziałowym w płaszczyźnie normalnej
- $\alpha_t$  [ $^\circ$ ] – kąt przyporu na okręgu podziałowym w płaszczyźnie czołowej
- $\beta$  [ $^\circ$ ] – kąt pochylenia linii zęba na okręgu podziałowym
- $\beta_b$  [ $^\circ$ ] – kąt pochylenia linii zęba na okręgu zasadniczym
- $\beta_w$  [ $^\circ$ ] – kąt pochylenia linii zęba na okręgu tocznym
- $\epsilon_\alpha$  – czołowy wskaźnik zazębienia
- $\epsilon_\beta$  – poskokowy wskaźnik zazębienia
- $\epsilon_\gamma$  – całkowity wskaźnik zazębienia
- $\nu$  – liczba Poissona
- $\nu_t$  [cSt] lub [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] – lepkość oleju
- $\rho_{Fn}$  [mm] – promień zaokrąglenia stopy zęba w przekroju normalnym
- $\sigma_{H \text{ lim}}^0$  [MPa] – średnia wytrzymałość stykowa (granica zmęczenia na naciski stykowe dla próbek)
- $\sigma_{H \text{ lim}}$  [MPa] – wytrzymałość stykowa materiału zębów
- $\sigma_{HP}$  [MPa] – dopuszczalne naprężenia na naciski stykowe
- $\sigma_{HP \text{ max}}$  [MPa] – dopuszczalne naprężenia stykowe nie powodujące odkształceń trwałych zęba
- $\sigma_{H \text{ st}}$  [MPa] – wytrzymałość statyczna na naciski stykowe



- $\sigma_H$  [MPa] – rzeczywiste naprężenia stykowe
- $\sigma_{F\ lim}^0$  [MPa] – średnia wytrzymałość na zginanie zmęczeniowe (dla próbek)
- $\sigma_{F\ lim}$  [MPa] – średnia wytrzymałość na zginanie zmęczeniowe (dla zębów)
- $\sigma_{F\ max}$  [MPa] – maksymalne naprężenie od zginania (przy przeciążeniach)
- $\sigma_{FP}$  [MPa] – dopuszczalne naprężenie na zginanie zmęczeniowe
- $\sigma_{FP\ max}$  [MPa] – dopuszczalne naprężenie na zginanie nie powodujące odkształceń trwałych zębów
- $\sigma_{F\ st}^0$  [MPa] – średnia wytrzymałość statyczna na zginanie próbek
- $\sigma_{F\ st}$  [MPa] – średnia wytrzymałość statyczna na zginanie zębów
- $\sigma_F$  [MPa] – rzeczywiste naprężenia od zginania
- $\Psi_a$  – względna szerokość przekładni odniesiona do odległości osi
- $\tau_c$  [h] – całkowity czas pracy projektowanej przekładni

# 1. Fizyczne podstawy obliczeń wytrzymałościowych

*Stanisław Kuliński, Michał Maziarz*

## 1.1. Podstawowe rodzaje uszkodzeń zębów

Jako podstawę do obliczeń wytrzymałościowych kół zębatych przyjęto najczęściej obserwowane w praktyce uszkodzenia zębów, jak:

- zmęczeniowe wykruszanie powierzchni roboczej (pitting),
- odkształcenie plastyczne i utrata zarysu,
- złamanie u podstawy lub części zębów,
- wytarcie boku zęba,
- zatarcie,
- przegrzanie,
- załamanie warstwy wierzchniej (mała grubość zahartowania).

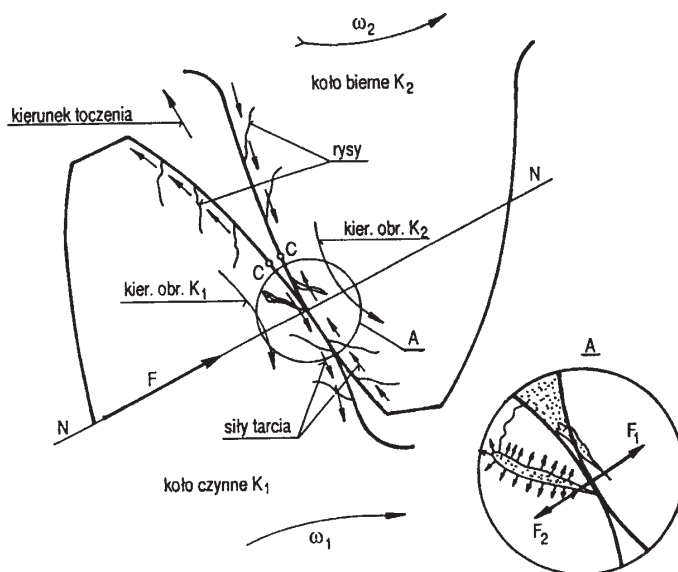
Literatura specjalistyczna [4, 2, 1] opisuje także inne (odpryski, wytarcie, wydarcie, korozja), które tu pomijamy, gdyż są one następstwem bądź technologii obróbki cieplnej zębów, bądź warunków eksploatacji przekładni i nie wpływają na metodę obliczeń głównych jej wymiarów z warunków wytrzymałościowych.

### 1.1.1. Mechanizm powstawania wykruszeń na powierzchni roboczej zęba

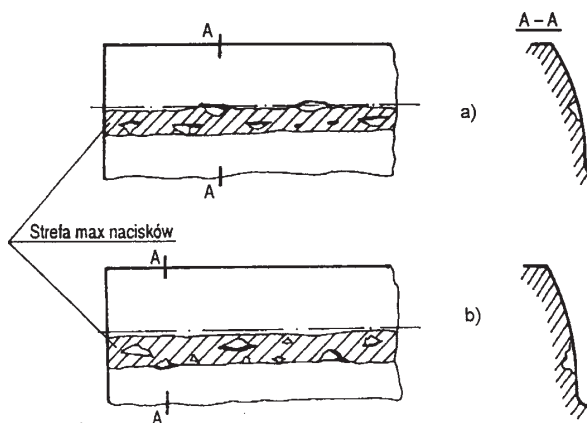
Zjawisko to zwane pittingiem nie jest całkowicie poznane, zwłaszcza jego początek. Z obserwacji wiemy, że może ono być przejściowe (pitting docierania – zupełnie nieszkodliwy, z czasem zanikający) i trwale postępujące, objawiające się na zębach kół „miękkich” o twardości poniżej 350 HB, w przekładniach zamkniętych, obficie smarowanych, zwykle po przekroczeniu liczby cykli obciążeń  $N > 10^4$  cykli. Obserwujemy również umiejscowienie wykruszeń zwykle w okolicy średnicy podziałowej koła z tendencją rozciągania się na stopę zęba, a więc w obszarze największego nacisku (jednoparowy przypór [1]) przy niedostatku filmu olejowego (prędkość poślizgu  $v_s \approx 0$ ). Można zatem przyjąć, opierając się również na wynikach badań wytrzymałości stykowej, że na poddanej naciskowi i naprężeniom stycznym powierzchni zęba powstają pęknięcia (rysy). Pęknięcia te, odchylone od normalnej do powierzchni zęba w stronę działania sił tarcia, wypełniają się olejem, który może wydatnie przyspieszyć proces

wykruszania w zależności od tego, czy jest zaciskany w szczelinie, czy też z niej wy-ciskany (rys. 1.1).

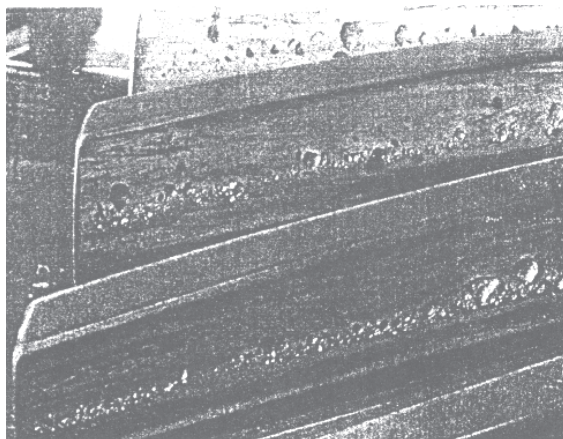
W przypadku gdy szczelina wypełniona olejem zostaje za każdym obrotem naj-pierw przymknięta, a następnie poddana naciskowi, następuje powiększanie jej rozmiarów aż do powstania wykruszenia. Istnieją przypuszczenia, dotąd nie potwierdzone w badaniach, że mikropęknięcie zmęczeniowe może także powstać pod powierzchnią w punkcie największego wyężenia materiału (punkt Bielajewa na głębokości  $h = 0,39$  a [23, 56] (rys. 5.1) szerokości pola odkształcenia) i propagować ku powierzchni. Z chwilą jej osiągnięcia zaczyna działać opisany wyżej mechanizm w szczelinie odpowierzchniowej.



Rys. 1.1. Mechanizm powstania pittingu



Rys. 1.2. Kształt i kierunek wykruszeń na boku zęba koła a) czynnego, b) biernego



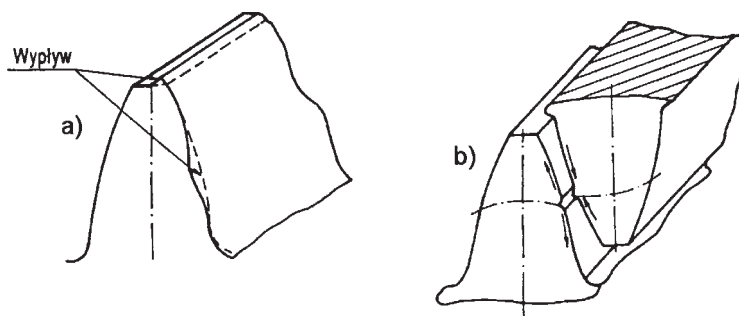
Rys. 1.3. Obraz uszkodzenia przez pitting zębów smarowanych olejem

Przyjmując ten schemat powstawania wykruszeń można łatwo wytłumaczyć ich umiejscowienie, ich ukierunkowanie (rys. 1.2 i 1.3), korzystny wpływ dodatniej korekcji zębów na nośność przekładni i inne. Dotyczy to prawidłowo wykonanej i złożonej przekładni, gdyż wadliwe wykonanie i montaż może zmienić warunki pracy zębów i przedstawiony tu obraz uszkodzeń.

### 1.1.2. Odształcenia plastyczne i utrata zarysu

Uszkodzenie to polega na zgnioście powierzchni roboczej w następstwie nacisków przekraczających granicę plastyczności materiału koła. Przy dużej różnicy twardości kół objawia się wypływ materiału na wierzchołku i na czole zęba. Traci on przy tym swój zarys (rys. 1.4a).

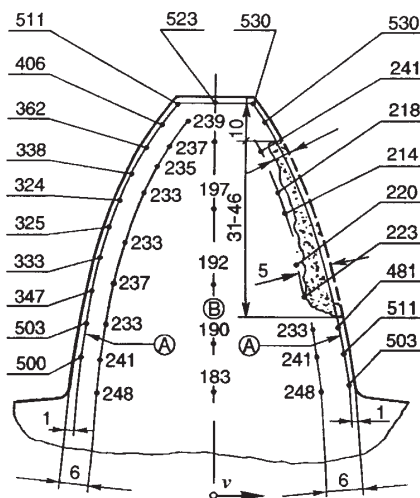
W przypadku współpracy obu kół „miękkich” przekroczenie nacisków może spowodować płynięcie materiału i utworzenie (w strefie działania największych nacisków i sił tarcia) rowka na zębie czynnym i garbu na zębie biernym (rys. 1.4b).



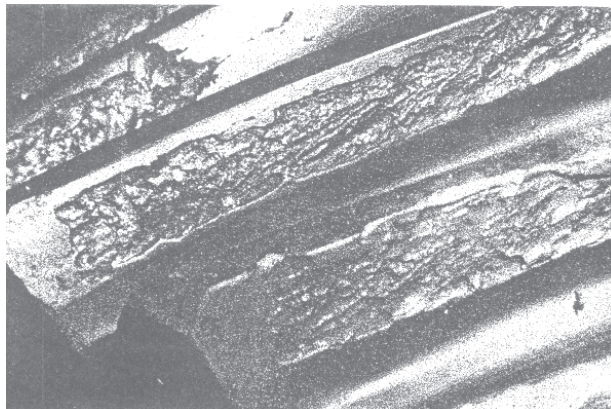
Rys. 1.4. Deformacja plastyczna zębów: a) odształcenie plastyczne zęba, b) wpływ materiału na skutek przekroczenia granicy plastyczności

Płynięcia nie obserwuje się na zębach utwardzonych powierzchniowo, zwłaszcza cementowanych i azotowanych.

Uszkodzenia plastyczne obserwuje się także przy zębach hartowanych powierzchniowo, gdy grubość warstwy zahartowanej jest zbyt mała<sup>1)</sup> i materiał zębów (kół) nie był uprzednio poddany właściwemu ulepszeniu cieplnemu. Proces uszkodzenia zębów polega na „załamaniu” się zbyt cienkiej warstwy hartowanej na miękkim podłożu, co przedstawiono na rysunkach 1.5 i 1.6 [39].



**Rys 1.5.** Załamanie żle zahartowanej powierzchniowo warstwy wierzchniej po stronie czynnej zęba i rozkład twardości (HB); A i B – strefy pomiaru twardości na długości zęba, moduł  $m_n = 32$  mm [39]



**Rys. 1.6.** Obraz uszkodzenia (wykruszenia) zębów hartowanych powierzchniowo ze stali 38HGM bez uprzedniego ulepszenia cieplnego,  $m_n = 32$  mm [39]

<sup>1)</sup> Wymaganą grubość warstwy zahartowanej (także nawęglonej) można wyznaczyć według wzorów (2.1) i (2.2).

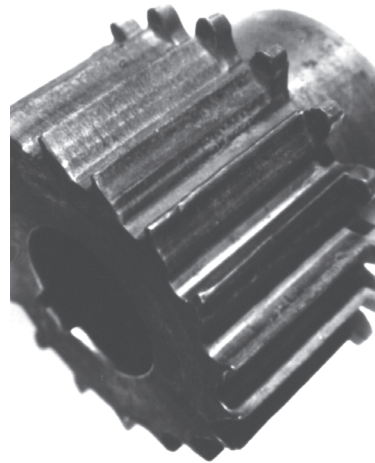
### 1.1.3. Złamanie u podstawy

Złom polega na odpadnięciu całego zęba lub – częściej – jego części. Może być zmęczeniowy lub doraźny. Pierwszy na skutek nadmiernych cyklicznych naprężeń, drugi spowodowany chwilowym przeciążeniem (nadwyżką dynamiczną) i przekroczeniem naprężeń krytycznych u podstawy zęba. Uszkodzenie to jest szczególnie niebezpieczne, gdyż w przeciwieństwie do poprzednio opisanych, eliminuje natychmiast przekładnię z ruchu, powodując przerwę w ciągu napędowym. Ten wzgląd zadecydował o podwyższeniu w obliczeniach 1,5÷2,5-krotnie rzeczywistego współczynnika bezpieczeństwa w porównaniu z jego odpowiednikiem na naprężenia stykowe od docisku.

### 1.1.4. Wytarcie

Wytarciem nazywa się równomierne zużycie ściernie boków zębów kół współpracujących (rys. 1.7). Najczęściej spowodowane jest zawiesiną utworzoną przez olej lub smar półstały i drobne cząsteczki zanieczyszczeń (pył, kurz, ubytki własne z trących się powierzchni). Wytarciu ulegają zazwyczaj przekładnie wolnoobrotowe (a więc bez możliwości powstania klina olejowego nawet przy obfitym smarowaniu w kąpielu), otwarte (nieobudowane), smarowane okresowo smarami stałymi lub półstałymi.

Uszkodzenie to prowadzi do złamania zęba w wyniku systematycznego zmniejszania się powierzchni przekroju niebezpiecznego\*. W przypadku trudnych warunków pracy, sprzyjających wycieraniu, konstruktor powiększa zwykle wyliczoną wartość modułu o 10÷25%.



Rys. 1.7. Uszkodzenie zębów przez wytarcie

### 1.1.5. Zatarcie

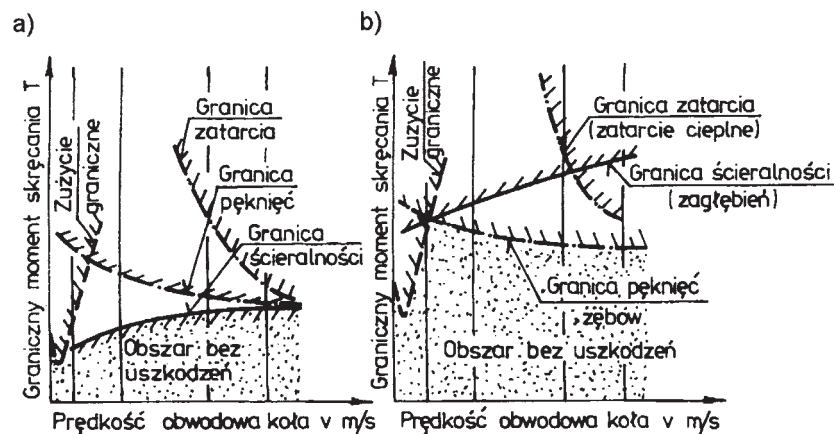
Występuje na ogół w przekładniach o znacznych prędkościach obwodowych ( $v \gtrsim 20$  m/s) i zbyt dużej różnicy twardości powierzchni roboczych współpracujących zębów. Pierwotną przyczyną zatarcia jest podwyższenie temperatury w ząbieniu, które może nastąpić w wyniku złego wykonania lub montażu, a także nieodpowiedniej eksploatacji przekładni (np. zbyt małe luzy międzyzębne, znaczne przeciążenia, użycie niewłaściwego oleju). Nadmierny wzrost temperatury powoduje zanik filmu olejowego i doprowadza do tarcia suchego powierzchni roboczych, a to z kolei do dalszego wzrostu temperatury aż do dekohezji materiału słabszego, tzn. do odrywania się jego cząstek i stapiania się z materiałem koła twardszego. W kołach o uzębieniu hartowanym wzrost temperatury powoduje początkowo przegrzanie boków zębów, obniżenie ich twardości przez odpuszczenie, a następnie może doprowadzić do zatarcia.

---

\* Wskaźnika na zginanie zębów.

## 1.2. Wskazówki wyboru warunków wytrzymałościowych

Opisane wyżej uszkodzenia potwierdzają w zupełności jakościowy wykres Dudleya dotyczący nośności przekładni w zależności od prędkości liniowej kół dla czterech rodzajów uszkodzeń (rys. 1.8). Jakkolwiek położenie poszczególnych krzywych granicznych może się zmieniać w zależności od zastosowanych materiałów, ich obróbki cieplnej, smarowania itp., to ich wzajemny układ pozostanie niezmienny.



Rys. 1.8. Nośność graniczna w zależności od prędkości: a – kół ulepszonych cieplnie, b – zębów hartowanych powierzchniowo

Posiłkując się nim i obserwacjami płynącymi z uszkodzeń możemy generalnie przyjąć następujące warunki wytrzymałościowe, decydujące o wymiarach przekładni:

– W przekładniach wolnobieżnych otwartych, ubogo smarowanych, których nośność ograniczona jest wytarciem, prowadzącym do wyłamania zęba (pkt 1.1.4), przyjmuje się kryterium nie przekroczenia naprężeń niszczących u jego podstawy [5]

$$\sigma_F \leq \frac{\sigma_{F\text{lim}}}{S_F} = \sigma_{FP} \quad (1.1)$$

oraz kryterium niedopuszczenia do plastycznego odkształcenia boku zęba

$$\sigma_{H\text{max}} \leq \frac{\sigma_{He}}{S_{He}} = \sigma_{HPe} \quad (1.2)$$

przy czym praktycznie można tu przyjąć wg [9]

$$\sigma_{HPe} = (1,6 \div 1,8)\sigma_{HP} \quad (1.2a)$$

– W przekładniach szybkobieżnych (zamkniętych, obficie smarowanych), narażonych głównie na powstanie wykruszeń powierzchniowych, przyjmuje się kryterium niedopuszczenia do powstania niszczącego pittingu [5]

$$\sigma_H \leq \frac{\sigma_{H\text{lim}}}{S_H} = \sigma_{HP} \quad (1.3)$$

oraz sprawdza się warunek na naprężenia od zginania u podstawy zęba [5] wg wzoru (1.1) i współczynnik bezpieczeństwa na zagrzanie przekładni wg zależności podanej przez Hofera [17]

$$x_t = \frac{z_1 \cdot m \cdot b}{1836 P_t} > 1 \quad (1.4)$$

gdzie:

$$P_t = 6y^2 \mu \frac{1}{z_1} \left( \frac{u \pm 1}{u} \right) P_N \text{ – moc tracona [kW]} \quad (1.5)$$

- $z_1$  – liczba zębów zębnika,
- $m; b$  – moduł i szerokość koła [mm],
- $\mu = 0,04 \div 0,1$  – współczynnik tarcia w zazębieniu<sup>1)</sup>,
- $y$  – współczynnik wysokości zęba,
- $P_N$  – moc nominalna przekładni [kW]

lub w przypadku korzystnych rozwiązań konstrukcyjnych (duże przekładnie, niskie zęby o małym module) i krótkich okresach pracy.

$$x_t > 0,7.$$

---

<sup>1)</sup> W zależności od parametrów procesu pracy i smarowania przekładni.