

LABORATORIUM Z PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN

ĆWICZENIE NR 4

WYZNACZANIE NIEOGRANICZONEJ WYTRZYMAŁOŚCI BOKU ZĘBA NA ZMĘCZENIE STYKOWE $\sigma_{H\lim}$

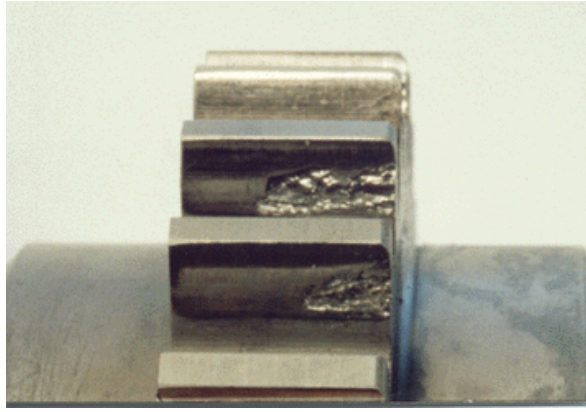
1. Cel ćwiczenia

- a) Zapoznanie się z metodą wyznaczenia nieograniczonej wytrzymałości boku zęba na zmęczenie stykowe (pitting) $\sigma_{H\lim}$ na stanowisku mocy zamkniętej;
- b) Wyznaczenie rodziny krzywych zmęczeniowych oraz wartości nieograniczonej wytrzymałości boku zęba na zmęczenie stykowe (pitting) $\sigma_{H\lim}$ dla prawdopodobieństwa zniszczenia $P = 1\%$.

2. Wprowadzenie

Zniszczenie zmęczeniowe powierzchni boku zęba jest obok złamania zmęczeniowego zęba u podstawy podstawowym czynnikiem decydującym o trwałości przekładni zębatej. Stąd oprócz odpowiedniej wartości modułu zębów (decydującego o wytrzymałości na złamanie zębów) konstruktor musi dobrać odpowiednią średnicę podziałową (lub odległość osi kół współpracujących) decydującą o wytrzymałości powierzchniowej zębów. Uszkodzenia powierzchni bocznych zębów kół zębatych, podobnie jak zmęczeniowe złamanie, mają duży wpływ na nośność i trwałość przekładni zębatych. Uszkodzenia te można sklasyfikować następująco:

- 1) zmęczenie powierzchni charakteryzujące się występowaniem bardziej lub mniej regularnych jamek różnej wielkości i głębokości, drobnych pęknięć na powierzchni zębów spowodowanych przez cykliczne obciążenia przekraczające wytrzymałość zmęczeniową materiału kół zębatych oraz przez siły tarcia związane z przetaczaniem i wzajemnym poślizgiem zębów, inicjujących powstawanie powierzchniowych lub podpowierzchniowych pęknięć;
 - a) pitting (rys. 1.1) - występujący w strefie poślizgów ujemnych (poniżej walca tocznego) w postaci powierzchniowych jamek o różnej wielkości i głębokości lecz o dość regularnym kształcie, powstałych w wyniku wykruszania się materiału, zazwyczaj o chropowatym dnie. Jamki mogą występować na jednym, kilku lub wszystkich zębach lokalnie lub na całej ich powierzchni. W określonych warunkach pracy liczba i wielkość jamek pittingowych może się zwiększać lub zmniejszać. Pitting dzieli się na nieniszczący i niszczący,



Rys. 1.1. Wgłębienia zmęczeniowe (pitting niszczący) zębów koła-próbki

- b) matowienie (porosity) - występujący najczęściej na kołach nawęglanych i hartowanych i charakteryzujący się masowym wykruszaniem bardzo drobnych cząstek materiału i mikropęknięciami (0,01 do 0,05 mm) nachylonymi pod kątem ostrym do powierzchni (w przypadku koła azotowanego skierowane są pod kątem prostym do powierzchni),
 - c) łuszczenie (flaking) - dotyczy utwardzonych powierzchni i polega na oderwaniu się od powierzchni zębów stosunkowo dużych i cienkich łusek (płatków) warstwy wierzchniej. Wyrwania mają w porównaniu z obrazem pittingu bardziej płaskie dna i kształt trójkątów skierowanych w stronę stopy zęba,
 - d) wykruszanie warstwy utwardzonej (spalling, case crushing) - uszkodzenia zmęczeniowe powstające pod powierzchnią poniżej utwardzonej warstwy (nawęglonej, azotowanej lub hartowanej powierzchniowo), grubość wykruszanego materiału jest najczęściej większa niż grubość warstwy utwardzonej. Ogólne przyczyny powstawania wykruszania są takie same jak innych uszkodzeń zmęczeniowych powierzchni, natomiast specyficznymi mogą być defekty materiałowe, niewłaściwa obróbka cieplna (np. zbyt mała grubość warstwy utwardzonej lub zbyt niska twardość rdzenia), nadmierne nagrzewanie zębów w czasie szlifowania, zbyt duże obciążenie rdzenia zęba, obciążenia uderzeniowe,
- 2) odkształcenia plastyczne - związane z przekroczeniem granicy plastyczności materiału koła zębatego, charakteryzujące się zmianami kształtu powierzchni roboczych zębów:
- a) płynięcie na zimno (cold flow) - rodzaj deformacji plastycznej polegający na rozwałcowywaniu powierzchni oraz powstawaniu wypływności na wierzchołkach i krawędziach bocznych zębów, spowodowanych wzajemnym poślizgiem zębów pod dużym naciskiem lub obciążeniem dynamicznym, czemu dodatkowo sprzyja zbyt mała twardość zębów i niewystarczające smarowanie, czasem może wystąpić na kołach zębach kół nawęglonych i hartowanych,
 - b) marszczenie (rippling) - faliste odkształcenia (występujące okresowo), ułożone prostopadle do kierunku poślizgu i nadające tym powierzchniom kształt łuski rybiej,
 - c) wgniecenia - (indentations) - płytkie wgłębienia o gładkim dnie tworzące się na powierzchni zęba, większe wgniecenia mogą być przyczyną odkształceń zębów prowadzących do interferencji,

- 3) zużycie (wear) - ubytek materiału spowodowany tarciem między współpracującymi powierzchniami zębów lub ścieraniem powierzchni przez stałe zanieczyszczenia oleju;
- a) zużycie dogładzające (normalne) - powierzchnie boczne zębów tracą swoją pierwotną strukturę, wygładzają się a czasem przyjmują lustrzaną postać, przez co nie pogarsza się trwałość i zdolność do pracy pary kół a wręcz polepszają się warunki pracy (np. utrzymanie ciągłej warstewki oleju na powierzchni współpracujących zębów,
 - b) zużycie umiarkowane - matowienie powierzchni roboczych zębów a następnie zmiana ich zarysu i zwiększenie się luzu bocznego występujące po stosunkowo dużym czasie pracy w warunkach tarcia granicznego lub przy obecności drobnych zanieczyszczeń w oleju (wtedy zużycie ściernie), jeszcze bez widocznego pogorszenia się własności eksploatacyjnych przekładni,
 - c) zużycie zwiększone - podobne do umiarkowanego, ale rozwijające się znacznie szybciej, z kolei szybsza zmiana zarysu i luzu bocznego prowadzą do zwiększenia obciążenia dynamicznego, które dodatkowo przyspieszają zużycie. W tym przypadku para kół traci wymagane własności eksploatacyjne w krótszym czasie od założonego.
 - d) zarysowanie (scratching) - powstaje na powierzchniach roboczych zębów w postaci równoległych rys (z gładkim dnem) biegnących w kierunku wzajemnego poślizgu zębów z powodu twardych cząstek znajdujących się w oleju,
 - e) zużycie interferencyjne - powstaje w okolicach wierzchołka i podstawy zęba w postaci śladów zeszkobania materiału z powodu złej geometrii zarysów lub zbyt dużej odchyłki odległości osi,
 - f) zużycie korozyjne - uszkodzenie w postaci zmian zabarwienia powierzchni o charakterze ciągłym lub plamistym, czasem z towarzyszącymi płytkimi wgłębieniami, wywoływane przez chemiczne składniki lub zanieczyszczenie oleju (korozja chemiczna) oraz wibracje (fretting korozja),
 - g) zatarcie - uszkodzenie powierzchni w postaci pasm (wgłębień) biegnących w kierunku zgodnym z kierunkiem wzajemnego poślizgu zębów, Zatarcie można podzielić na:
 - ◆ lokalne (scratching), liniowe wgłębienia (o nieregularnym rozstawie i długości) występują tylko w niektórych miejscach powierzchni zęba,
 - ◆ zatarcie wstępne (nacięcia - scoring) - w przeciwieństwie do zatarcia lokalnego rozprzestrzenia się nieprzerwanie do wierzchołka zęba albo do początku lub końca zazębienia przy podstawie, charakteryzuje się gładkim dnem wgłębienia, w przypadku progresywnego rozwoju prowadzi do intensywnego usuwania materiału, szczególnie w miejscach o dużych prędkościach poślizgu (przy wierzchołku i stopie zęba). Wystąpienie tego rodzaju zużycia jest spowodowane przez obce ciała i wierzchołki nierówności współpracujących zębów złośliwych wgłębienia, które z kolei w czasie zazębienia pogłębiają proces zacierania. Jest to wtedy wstępne stadium zatarcia właściwego,
 - ◆ zatarcie właściwe (scuffing) - występuje w postaci chropowatych bruzd i wyrw o zmiennej głębokości i długości, powstałych na skutek szczepiania się cząstek materiału (zgrzewania tarcowego) a następnie ich rozrywania przy braku filmu olejowego (czyli metalicznym styku między zębami)

spowodowanego przez wysokie naciski (wynikające z nierówności powierzchni i niewłaściwego przylegania), duże prędkości poślizgu i wysoką temperaturę (zatarcie gorące) albo przez bardzo niskie prędkości poślizgu (zatarcie zimne).

Teoretyczny kontakt między zakrzywionymi i niedopasowanymi (nieprzystającymi, niekonforemnymi) powierzchniami istnieje w postaci punktu lub linii, jak np. w przypadku styku kuli lub walca z płaszczyzną, albo parą zębów w zazębieniu. Kiedy jednak dwa ciała sprężyste są dociskane do siebie, wtedy stykają się one wzdłuż skończonej powierzchni kontaktu z powodu przemieszczeń punktów znajdujących się w strefie kontaktu. Ponieważ powierzchnie te są bardzo małe, więc naprężenia ściskające są bardzo duże. Z powodu cyklicznie powtarzających się nacisków powierzchniowych (powyżej $40 \cdot 10^5 \div 50 \cdot 10^5$ cykli) o wartości przekraczającej dopuszczalną granicę wytrzymałości zmęczeniowej, następuje powierzchniowe uszkodzenie zmęczeniowe zębów. Przyczyną wystąpienia pittingu są siły tarcia występujące w czasie przetaczania i poślizgu współpracujących zębów. Powodują one mianowicie powstawanie powierzchniowych lub podpowierzchniowych pęknięć zmęczeniowych prostopadłych do powierzchni zęba. Następnie olej włączany w te pęknięcia powoduje przyspieszenie ich rozwoju na zasadzie działania klina rozpychającego materiał. Uszkodzenie to charakteryzuje się powstawaniem dość regularnych wgłębień zmęczeniowych w postaci jamek o różnej wielkości i głębokości na czynnych powierzchniach boków zębów. Najczęściej mają one chropowate dno oraz ostre krawędzie ścian i mogą występować lokalnie lub na całej powierzchni jednego, kilku lub wszystkich zębów zębownika i koła. Zazwyczaj jednak wgłębienia zmęczeniowe powstają w miejscu wchodzenia zębów w zazębienie, czyli przy podstawie zębownika, by następnie stopniowo opanowywać powierzchnię boczną tylko do walca tocznego. Dodatkowo sąsiednie jamki mogą łączyć się w duże wgłębienia, potęgowane często wadami materiału lub nieodpowiednią obróbką cieplno-chemiczną. Z pracą kół, których zęby uległy powierzchniowemu zniszczeniu zmęczeniowemu związany jest znaczny wzrost hałasu.

Pitting dzieli się na nieniszczący (ograniczony) i niszczący [2]. Pitting nieniszczący w tych samych warunkach pracy kół zębatych po pewnym okresie czasu przestaje się rozwijać lub nawet zanika. Taki rodzaj pittingu uważa się za dopuszczalny. Przyczyną jego wystąpienia są niewielkie odchyłki zarysu wynikające z falistości lub dużej chropowatości powierzchni oraz odchyłki współosiowości kół zębatych.

Pitting niszczący rozwija się najczęściej z pittingu ograniczonego, matowości lub też powstaje bez wcześniejszych symptomów na zębach kół o wysokiej klasie dokładności i wysokiej gładkości powierzchni po znacznym okresie eksploatacji. Rozwijające się jamki pittingowe są przyczyną zmniejszania się roboczej powierzchni zębów, w wyniku czego zęby kół miękkich czyli nieobrobionych cieplnie lub cieplno-chemicznie odkształcają się plastycznie (zmniejszają swoją grubość) i łamią się. W kołach nawęglanych i hartowanych następuje propagacja pęknięć zmęczeniowych od jamek powierzchniowych w głąb zęba, co też może być przyczyną jego złamania. Dlatego też pitting, w którym liczba wgłębień zmęczeniowych rośnie przynajmniej liniowo w jednostce czasu w niezmiennych warunkach obciążenia jest niedopuszczalny.

3. Ocena wytrzymałości boku zęba na wgłębienia zmęczeniowe

3.1. Obliczanie wytrzymałości boku zęba

W projekcie normy ISO/DIS 6336 [3] przewidziano aż cztery metody obliczania wytrzymałości boku i podstawy zęba oraz współczynników obliczeniowych. Metody te oznaczono wg malejącej dokładności kolejnymi literami A, B, C i D. Ponadto w następnym wydaniu tej normy ISO zostanie dołączona kolejna metoda obliczania wytrzymałości boku i podstawy zęba wg normy AGMA.

W najdokładniejszej metodzie A współczynniki ustala się na podstawie dokładnych badań oraz równie dokładnego modelowania matematycznego rozpatrywanego układu. Jest to metoda przyszłościowa bardzo pobieżnie omówiona w projekcie normy i jako nadrzędna w stosunku do pozostałych wymaga poważnego rozpracowania. Wyczerpująco omówiona jest natomiast kolejna metoda B zalecana do dokładnego sprawdzania wytrzymałości raczej już wykonanych prototypowych przekładni zębatych. Metoda C jest już metodą przybliżoną nadającą się do obliczania kół przekładni zębatych ogólnego zastosowania przemysłowego. Najmniej dokładna metoda D odnosi się do tych przypadków, dla których jest możliwe przyjęcie dalszych uproszczeń.

Do oceny wytrzymałości boku zęba na wgłębienia zmęczeniowe wykorzystuje się naprężenia stykowe wg Hertza. Najpierw oblicza się nominalne naprężenia stykowe σ_{HO} w biegunie bezodchyłkowego zazębienia poddanego nominalnemu obciążeniu statycznemu, a następnie za pomocą współczynników obciążenia Z_B , Z_D , K_A , K_v , $K_{H\beta}$, $K_{H\alpha}$ przelicza się je na maksymalne naprężenie stykowe σ_H występujące w rzeczywistym zazębieniu. Oczywiście dla prawidłowo zaprojektowanej pary kół zębatych naprężenie rzeczywiste musi być mniejsze lub najwyżej równe naprężeniu dopuszczalnemu σ_{HP} .

Nominalne naprężenie stykowe σ_{HO} oblicza się z zależności:

$$\sigma_{HO} = Z_H \cdot Z_\epsilon \cdot Z_E \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot \frac{u+1}{u}} \quad (1)$$

gdzie:

Z_H - współczynnik strefy nacisku, uwzględniający krzywizny boków zęba w biegunie zazębienia i przeliczenie siły obwodowej F_t na walcu podziałowym na siłę normalną do powierzchni zęba na walcu tocznym;

Z_E - współczynnik sprężystości uwzględniający własności materiałowe, moduły sprężystości E_1 i E_2 oraz liczby Poissona ν_1 i ν_2 ;

Z_ϵ - współczynnik przyporu uwzględniający wpływ efektywnej długości linii styku na naprężenie stykowe;

Z_β - współczynnik kąta pochylenia linii zęba uwzględniający wpływ kąta pochylenia linii zęba na naprężenie stykowe;

F_t - nominalna siła obwodowa w przekroju czołowym;

b - nominalna szerokość wieńca zębatego;

$u = z_2 / z_1$ - przełożenie geometryczne.

Naprężenie stykowe σ_H wyznacza się oddzielnie dla zębniaka i koła. Dla zębniaka prostego najczęściej naprężenie stykowe σ_H jest maksymalne w wewnętrznym punkcie B jednoparowego przyporu zębniaka, a tylko w szczególnych przypadkach w biegunie zazębienia. Dla współpracującego koła prostego w zazębieniu zewnętrznym naprężenie stykowe σ_H osiąga maksymalną wartość najczęściej w biegunie zazębienia, a w szczególnych przypadkach w wewnętrznym punkcie D jednoparowego przyporu koła. W zazębieniu wewnętrznym naprężenie stykowe jest zawsze maksymalne w biegunie zazębienia.

Dla najczęściej stosowanych kół skośnych o poskokowym wskaźniku zazębienia $\varepsilon_\beta \geq 1$ naprężenia stykowe dla zębniaka i koła wyznacza się zawsze w biegunie zazębienia.

Naprężenie stykowe dla zębniaka wyznacza się ze wzoru:

$$\sigma_{H1} = Z_B \cdot \sigma_{HO} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_v \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP1} \quad (2)$$

gdzie:

K_A - współczynnik zastosowania uwzględniający zmienność obciążenia zewnętrznego w stosunku do obciążenia nominalnego;

K_v - współczynnik dynamiczny uwzględniający zwiększenie obciążenia z powodu oddziaływania wewnętrznego;

$K_{H\beta}$ - współczynnik nierównomiernego rozkładu obciążenia wzdłuż linii styku;

$K_{H\alpha}$ - współczynnik nierównomiernego rozdziału obciążenia na pary zębów w przyporze;

Z_B - współczynnik miarodajnego naprężenia dla zębniaka;

σ_{HP1} - dopuszczalne naprężenie stykowe zębniaka;

Naprężenie stykowe dla koła wyznacza się ze wzoru:

$$\sigma_{H2} = Z_D \cdot \sigma_{HO} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_v \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP2}, \quad (3)$$

gdzie Z_D - współczynnik miarodajnego naprężenia dla koła.

Naprężenie dopuszczalne wyznacza się z zależności:

$$\sigma_{HPi} = \frac{\sigma_{Hlimi} \cdot Z_{NTi}}{S_{Hlimi}} \cdot Z_L \cdot Z_{vi} \cdot Z_{Ri} \cdot Z_W \cdot Z_{Xi} = \frac{\sigma_{HG_i}}{S_{Hmini}}, \quad (4)$$

gdzie:

σ_{Hlimi} - nieograniczona wytrzymałość boku zęba na zmęczenie ($i = 1$ - zębniaka, $i = 2$ - koła);

Z_{NTi} - współczynnik trwałości odniesiony do linii Wöhlera standardowego koła-próbki i uwzględniający zwiększenie wytrzymałości na zmęczenie dla ograniczonej liczby cykli;

σ_{HG_i} - graniczna wytrzyma boku zęba na wgłębienia zmęczeniowe i równa dopuszczalnemu naprężeniu stykowemu σ_{HPi} przy $S_{Hmini} = 1$;

S_{Hmini} - minimalny współczynnik bezpieczeństwa ze względu na zmęczenie powierzchniowe;

Z_L - współczynnik smarowania uwzględniający wpływ środka smarowego na dopuszczalne naprężenie

stykowe;

Z_{Ri} - współczynnik chropowatości uwzględniający wpływ chropowatości powierzchni na dopuszczalne naprężenia stykowe;

Z_{vi} - współczynnik prędkości obwodowej;

Z_w - współczynnik kojarzenia materiału uwzględniający zwiększenie wytrzymałości miękkiego koła stalowego współpracującego z kołem stalowym utwardzonym;

Z_{Xi} - współczynnik wielkości uwzględniający wpływ wymiarów zęba na dopuszczalne naprężenie stykowe.

Dopuszczalne naprężenia σ_{HP} wyznacza się oddzielnie dla zębniaka i koła dla zakresu statycznej wytrzymałości boku zęba σ_{HPS} , dla zakresu ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej σ_{HPN} oraz dla zakresu nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej boku zęba σ_{HPlim} .

3.2. Wyznaczanie nieograniczonej bazowej wytrzymałości zmęczeniowej boku zęba

W projekcie normy ISO 6336/5 zaleca się, w zależności od stosowanej metody obliczeń wytrzymałości kół zębatych (metoda A, B, C lub D wg ISO 6336/1 i 6336/2 lub metoda wg AGMA), także kilka metod wyznaczania wartości nieograniczonej wytrzymałości boku zęba na zmęczenie stykowe. Są to mianowicie następujące metody:

- 1) metoda A - oparta na badaniach ruchowych kół zębatych, których wymiary są równe lub bliskie wymiarom kół stosowanych w przekładni oraz warunki tych badań są identyczne lub zbliżone do warunków eksploatacji obliczanej przekładni,
- 2) metoda B - oparta na badaniach ruchowych standardowych kół-próbek w standardowych warunkach badawczych (czyli na stanowiskach mocy zamkniętej), prowadzona jest dla trzech różnych stopni jakości materiału na koła zębate: ME, MQ oraz ML,
- 3) metoda B_R - prowadzona na stanowiskach rolkowych z uwzględnieniem poślizgów (co do wielkości i kierunku) występujących przy współpracy zębów kół zębatych, jednak wyniki badań nadają się głównie do porównawczej oceny powierzchniowej wytrzymałości zmęczeniowej materiałów na koła zębate.

Nieograniczona wytrzymałość boku zęba na zmęczenie stykowe (stykowa wytrzymałość zmęczeniowa) σ_{Hlim} jest maksymalną wartością trwale przenoszonych naprężeń kontaktowych bez powstawania uszkodzeń zmęczeniowych. Wg projektu normy ISO/DIS 6336/5 przyjmuje się początek zakresu nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (tzw. liczbę bazową cykli N_{Hlimb}) zależną od rodzaju materiału. I tak dla stali do ulepszania cieplnego ($R_m \geq 800 \text{ MPa}$), żeliw sferoidalnych (perlitycznych i bainitycznych), żeliw ciągliwych czarnych (perlitycznych), stali do nawęglania nawęglonych, stali konstrukcyjnych i żeliw sferoidalnych hartowanych płomieniowo lub indukcyjnie bazowa liczba cykli $N_{Hlimb} = 5 \cdot 10^7$, podczas gdy dla żeliw szarych, sferoidalnych (ferrytycznych), stali azotowanych i węgloazotowanych $N_{Hlimb} = 2 \cdot 10^6$.

Określenie stykowej wytrzymałości zmęczeniowej boku zęba (nieograniczonej wytrzymałości) σ_{Hlim} polega na wyznaczeniu największego naprężenia w biegunie zazębienia, nie wywołującego progresywnego wzrostu pittingu na zębach koła zębatego po upływie bazowej liczby cykli N_{Hlimb} . Dodatkowo zakłada się kryterium zużycia boku zęba wywołane powstaniem pittingu o wymiarze $A = 2\%$ czynnej powierzchni boków wszystkich nie hartowanych zębów współpracującej pary kół zębatych lub $A = 0,5\%$ czynnej powierzchni boków wszystkich

hartowanych zębów współpracującej pary kół zębatych lub $A = 4\%$ powierzchni boku jednego zęba.

Tak więc miarą uszkodzenia zmęczeniowego boków jest suma stopnia uszkodzenia czynnej powierzchni wszystkich zębów zębownika A_1 i koła A_2 :

$$A = A_1 + A_2 \quad (5)$$

gdzie

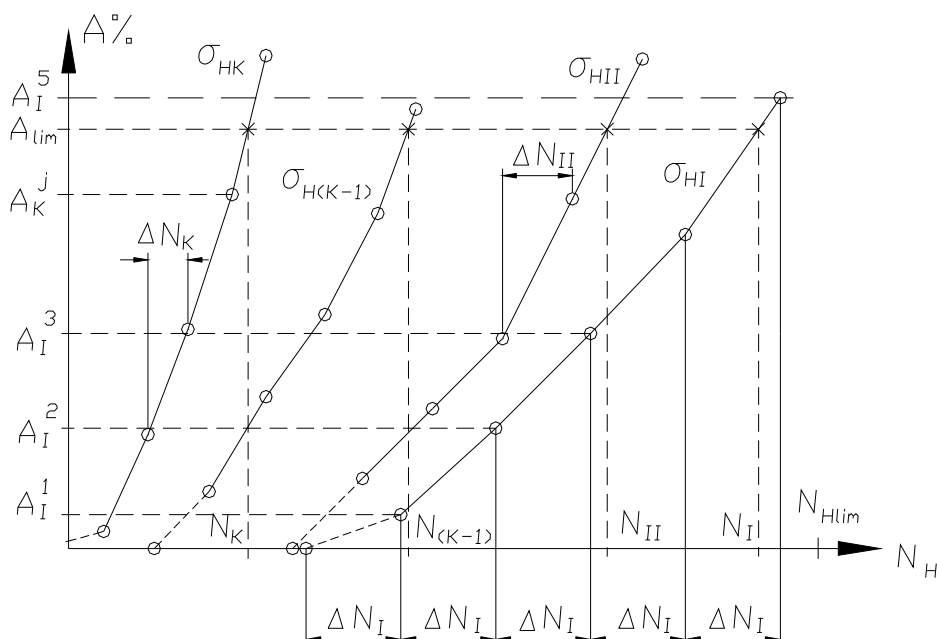
$$A_1 = \sum_{i=1}^{z_1} \frac{A_{i1} \cdot 100\%}{z_1 \cdot b_w \cdot l_{w1}} \quad (6)$$

$$A_2 = \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \cdot \sum_{i=1}^{z_2} \frac{A_{i2} \cdot 100\%}{z_2 \cdot b_w \cdot l_{w2}} \quad (7)$$

b_w - szerokość robocza zębów, l_{wi} - długość rozwinięcia czynnego zarysu zęba zębownika ($i = 1$) i koła ($i = 2$).

Proponowana metoda wyznaczania σ_{Hlim} uwzględnia ewentualny nieliniowy proces kumulacji uszkodzeń [4, 3]. Z definicji stykowej wytrzymałości zmęczeniowej boku zęba (nieograniczonej wytrzymałości) σ_{Hlim} wynika, że jest to bazowa wytrzymałość zmęczeniowa boku zęba na naprężenia kontaktowe (nieograniczona wytrzymałość bazowa), która powinna być oznaczana przez σ_{Hlimb} (tak jak w projekcie normy RWPG dotyczącej tych samych badań). Konsekwencją takiej definicji nieograniczonej bazowej wytrzymałości zmęczeniowej boku zęba σ_{Hlimb} jest uproszczona metodyka przeprowadzania prób zmęczeniowych. Wystarczy bowiem wyznaczyć doświadczalnie tylko nachyloną część wykresu Wöhlera, czyli linię odpowiadającą zakresowi ograniczonej trwałości zmęczeniowej, gdyż początek zakresu trwałości nieograniczonej wyznaczony jest przez punkt przecięcia się nachylonej części oraz prostej pionowej odpowiadającej bazowej liczbie cykli N_{Hlimb} . Tak więc próby zmęczeniowe polegające na poddaniu każdej pary kół-próbek określonego naprężeniu stykowemu (kontaktowemu) są przeprowadzane w celu wyznaczenia tylko części wykresu zmęczeniowego odpowiadającego ograniczonej trwałości.

Dla pierwszej pary można założyć poziom naprężenia odpowiadający przewidywanej wartości granicy zmęczenia σ_{Hlimb} powiększonej o $(10 \div 20)$ MPa (rys. 1.2). Dla kolejnych par kół wartości naprężeń należy dobierać w postępie geometrycznym o ilorazie $\phi \leq \sqrt{1,25}$. W czasie trwania próby należy co $\Delta N = (1 \div 10) \cdot 10^6$ cykli (w zależności od poziomu naprężenia próby i twardości boków), dokonać pomiaru powierzchni zniszczonej zmęczeniowo oraz wyniki nanieść na wykres. Badanie jednej pary kół (j -tej) trwa do momentu uzyskania stopnia uszkodzenia odpowiednio $A_j^n \approx 2\%$ lub $A_j^n \approx 0,5\%$ (zależnie od tego czy zęby są utwardzone lub nie), przy czym zalecane jest uzyskanie $A_j^n \geq 2\%$ lub $A_j^n \geq 0,5\%$ (n - kolejność pomiaru w próbie).

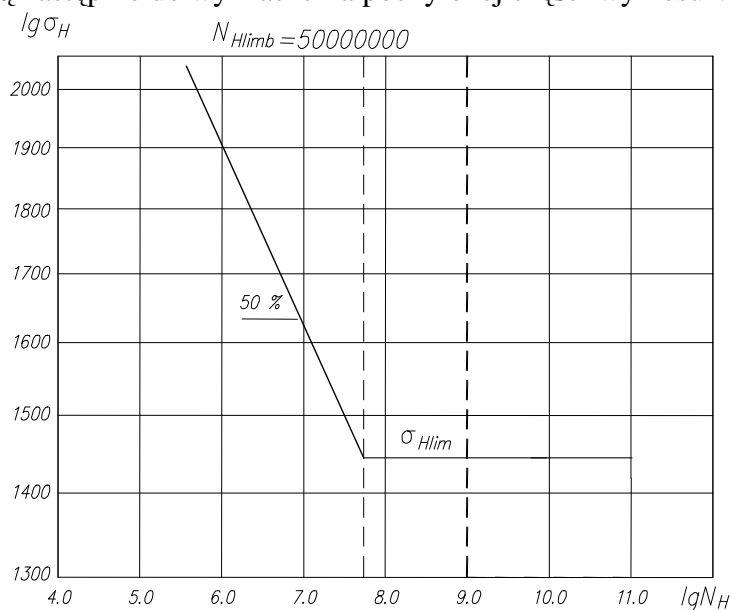


Rys. 1.2. Schemat metody badawczej σ_{Hlimb}

W tym przypadku istnieje możliwość dokładniejszego określenia liczby cykli odpowiadającej granicznemu (kryterialnemu) stopniowi zniszczenia $A = 2\%$ lub $A_j^n = 0,5\%$ za pomocą interpolacji. Konieczne jest tutaj ograniczające założenie

$$\frac{A_j^n}{A_j^{n-1}} \leq 2. \quad (8)$$

Parę kół-próbek uznaje się za dobrą do chwili, gdy pole uszkodzonej na skutek pittingu czynnej powierzchni boku jednego zęba nie przekracza 8% jego powierzchni, w przypadku kół nie hartowanych i 4% w przypadku kół utwardzonych. Otrzymane punkty z interpolacji (N_j, σ_{Hj}) wykorzystywane są następnie do wyznaczenia pochylonej części wykresu Wöhlera (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Wykres zmęzeniowy $\sigma_H - N_H$

4. Stanowisko badawcze i wymiary kół-próbek

Norma ISO/DIS 6336/5 przewiduje następujące standardowe wymiary koła-próbki i standardowe warunki robocze:

moduł $m = 3 \div 5 \text{ mm}$ ($Z_x = 1$),

kąt pochylenia linii zęba $\beta = 0^\circ$ ($Z_\beta = 1$),

odległość osi $a = 100 \text{ mm}$,

szerokość wieńca $b = 10 \div 50 \text{ mm}$,

klasa dokładności wykonania: 4 do 6 wg ISO 1328 (PN-79/M-88522),

wysokość chropowatości boku zęba $R_z = 3 \mu\text{m}$ ($Z_R = 1$),

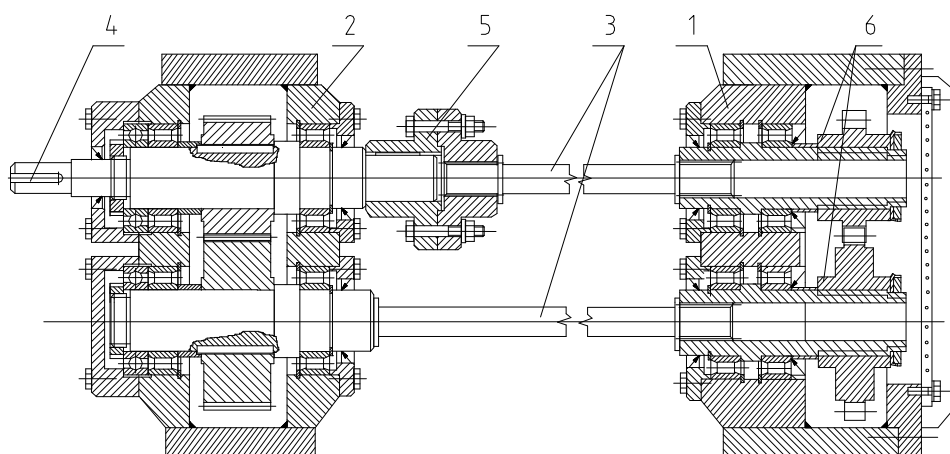
prędkość obwodowa $v = 10 \text{ m/s}$ ($Z_v = 1$),

lepkość oleju $\nu_{50} = 100 \text{ mm}^2/\text{s}$ ($Z_L = 1$),

jednakowy materiał współpracujących kół ($Z_w = 1$),

współczynniki obciążenia $K_A = K_v = K_{F\alpha} = K_{F\beta} = 1$.

Stanowisko mocy zamkniętej własnej konstrukcji spełnia powyższe warunki i dzięki temu może być wykorzystywane zarówno do badania wytrzymałości podstawy zęba na zmęczenie dla naprężeń gnących σ_{Flim} , jak i wytrzymałości boku zęba na zmęczenie.



Rys. 1.4. Stanowisko mocy zamkniętej

5. Literatura

1. Moyer Ch. A., Oberflächenschäden an Verzahnungen und Wälzlagern; Antriebstechnik 32, 11, 1993, 34-43.
2. PN-67/M-88506 – Przekładnie zębate. Zużycie i uszkodzenia oraz PN-90/M-88506 – Uszkodzenia kół zębatach
3. Obliczenia sprawdzające wytrzymałość kół zębatach walcowych - Projekt normy PN-ISO 6336

4. Drewniak J., Tytyk A., Metoda wyznaczania powierzchniowej wytrzymałości zmęczeniowej zębów kół zębatach, Zeszyty Naukowe P. Rz. 79, Mechanika z. 27, XV Sympozjon PKM 1991, str. 75-77
5. Drewniak J., Tomaszewski J., Badanie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów na koła zębata wg zaleceń normy ISO/DIS 6336/5, cz. 2, Wyznaczanie nieograniczonej wytrzymałości podstawy zęba na zmęczenie dla naprężeń stykowych $\sigma_{H\lim}$. Zeszyty Naukowo-Techniczne OBR REDOR, Bielsko-Biała, 2000
6. Jaśkiewicz Z., Wąsiewski A., Przekładnie walcowe, Wyd. KiŁ, Warszawa 1992
7. Drewniak J.: Komputerowo wspomagane projektowanie przekładni zębatach, Wyd. Filii PŁ w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2000.

6. Instrukcja ćwiczenia

Wyznaczenie nieograniczonej wytrzymałości boku zęba na zmęczenie stykowe σ_{Hlim} dla dowolnego prawdopodobieństwa zniszczenia P przeprowadza się wg następujących punktów:

- a) zapoznanie się z założeniami badań (materiał kół-próbek, obróbka cieplno-chemiczna, dokładność badań) – wpisanie danych do formularza pomiarowego, zapoznanie się z zasadą działania stanowiska mocy zamkniętej, zapoznanie się z instrukcją BHP na stanowisku, przygotowanie stanowiska do badań (sprawdzenie stanu kół zębatach w skrzynce zamykającej i łożysk tocznych, wałków, śrub mocujących, wymiana oleju w skrzynkach badanej i napędzającej),
- b) planowanie badań zgodnie z podrozdziałem 4 ćwiczenia nr 2,
- c) przyjęcie wartości naprężeń poszczególnych poziomów, np. dla kół-próbek wykonanych ze stali 17HNM: $\sigma_5 = 2600 \text{ MPa}$, $\sigma_1 = 1400 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 1700 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 2000 \text{ MPa}$, $\sigma_4 = 2300 \text{ MPa}$, obliczenie momentów napinających sprzęgło stanowiska odpowiadających naprężeniom poszczególnych poziomów (program komputerowy MOMENT),
- d) rozdział całkowitej liczby próbek na poszczególne poziomy (określenie v_i) – równomierny ($v_i = 0,2$ dla $i = 1, \dots, 5$) lub nierównomierny symetryczny,
- e) przeprowadzenie badań zmęczeniowych kół próbek począwszy od poziomu najniższego do poziomu najwyższego, zapisywanie wyników badań w tabeli 1 formularza pomiarowego,
- f) opracowanie statystyczne wyników pomiarów (tabela 2) i wykreślenie krzywych zmęczeniowych w ujęciu probabilistycznym, zweryfikować obliczenia wykorzystując program komputerowy WÖHLER,
- g) opracowanie formularza pomiarowego, analiza uzyskanych wyników i opracowanie wniosków z badań.

4. Opracowanie statystyczne wyników badań

Tabela 3. Tabela pomocnicza

σ_i	N_i	x_i	y_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})y_i$	Y_i	$y_i - Y_i$
Suma			XXXX			XXX	XXX
$\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 =$				$\sum_{i=1}^m (y_i - Y_i)^2 =$			

Obliczenia pozostałe:

- ✓ wykreślenie wykresu pomocniczego w układzie osi współrzędnych stopień zniszczenia – liczba cykli $A_j^n \% - N_H$
- ✓ równanie doświadczalnej linii regresji:
- ✓ przedział ufności dla teoretycznej linii regresji:
- ✓ wyznaczenie równań kwantylnej krzywej zmęczeniowej dla $P = 0,01$:
- ✓ wyznaczenie nieograniczonej wytrzymałości podstawy zęba na zmęczenie dla naprężeń gnących $\sigma_{H\lim}$ odpowiadającej prawdopodobieństwu zniszczenia $P = 0,01$ oraz $P = 0,5$:
- ✓ wykreślenie wykresu zmęczeniowego w ujęciu probabilistycznym:
- ✓ weryfikacja wyników obliczeń

Data wykonania badania:

Imię i nazwisko

Podpis

Wykonawca badań:

Zatwierdzający:

Opracował: J. Drewniak