

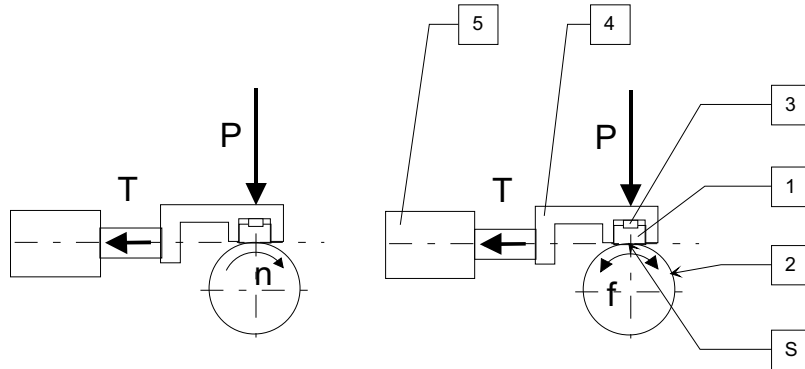
## 8. Wpływ dodatku uszlachetniającego do oleju na parametry pracy przekładni

Procesy związane z zatarciem przekładni, związane są ze współczynnikiem tarcia pomiędzy dwoma współpracującymi kołami wskutek poślizgu międzyzębnego kół. Tarcie jest przyczyną powstawania źródła ciepła na powierzchni zębów i w określonych warunkach powoduje występowanie zacierania przekładni. Do badań wpływu dodatków do olejów przekładniowych, wytypowano dodatek o nazwie Ceramizer producenta VIDAR z Warszawy.

Ceramizacji powierzchni metalowych polega na wytworzeniu warstwy ceramiczno-metalowej na metalowych powierzchniach tarcia w częściach maszyn i urządzeń w czasie ich normalnej eksploatacji. Poprzez narostowe tworzenie warstwy ceramiczno-metalowej Ceramizer regeneruje i odbudowuje trące się metalowe powierzchnie, integrując się trwale z metalem na poziomie molekularnym. Wytworzona warstwa ceramiczno-metalowa jest twarda, trwała, posiada niski współczynnik tarcia, znakomicie odprowadza ciepło i jest odporna na wysokie temperatury i obciążenia mechaniczne. Warstwa ta wypełnia, pokrywa i wyrównuje mikrodefekty i deformacje powierzchni trących się detali. Na skutek wysokiej lokalnej temperatury (ponad 900 °C), powstającej w miejscach lokalnego tarcia, następuje "topnienie" cząsteczek Ceramizera. "Stopione" cząsteczki Ceramizera, charakteryzują się wysokim stopniem adhezji z metalem, przenoszą cząsteczki metalu zawarte w oleju lub smarze w zużyte miejsca (selektywne przenoszenie), gdzie występuje podwyższona temperatura, spowodowana tarciami i tam dyfundują. W tych miejscach połączone cząsteczki metalu i Ceramizera (dyfundując), odbudowują powierzchnie, tworząc warstwę ceramiczno-metalową. W rezultacie dyfuzji Ceramizera z metalową powierzchnią, polepsza się struktura siatki krystalicznej metalu i tym samym utwardza i wypełnia się warstwa wierzchnia (powstaje trwała nie rozerwalna ceramiczno-metalowa warstwa ochronna).

Własności styku tarciovego smarowanego olejem z dodatkiem środka Ceramizera zostały wstępnie przebadane na testerze typu Rolka –Klocek T-05 produkcji ITE w Radomiu. Tester T-05 ze skojarzeniem rolka-klocek służy do oceny właściwości smarnych smarów plastycznych, olejów i smarów stałych oraz odporności na zużycie podczas tarcia metali i tworzyw sztucznych, a także do badania odporności na zacieranie powłok niskotarciowych nanoszonych na wysokoobciążone elementy maszyn. Tester pozwala na przeprowadzenie badań zgodnie z metodami określonymi w normach amerykańskich : ASTM D 2714, D 3704, D 2981 i G 77. Dzięki zastosowaniu rozwiązań konstrukcyjnych i wyposażeniu urządzenia, testy można przeprowadzić w styku ślizgowym smarowanym

lub suchym, o ruchu postępowym lub oscylacyjnym z możliwością regulacji prędkości poślizgu i amplitudy. Badany styk może być skoncentrowany lub rozłożony. Zasada działania urządzenia testowego została pokazana na rys.7.10.



Rys. 7.10 Zasada działania urządzenia testowego T-05

Uchwyt próbki 4 z wkładką półkulistą 3 stanowi samonastawne zamocowanie klocka 1, które zapewnia dobre jego przyleganie do rolki 2, a tym samym równomierne rozłożenie nacisków w styku. Dwudźwigniowy układ obciążenia pozwala na przyłożenie siły dociskającej klocek do rolki P z dokładnością 1 %. Rolka obraca się z jednostajną prędkością obrotową n lub wykonuje ruch oscylacyjny z częstotliwością f. W czasie badań rejestrowano siłę tarcia, liniowe zużycie węzła tarcia, oraz temperaturę klocka i oleju. Elementami testowymi stanowiska T-05 są próbka w postaci klocka oraz przeciwpółka – rolka. Walcowa powierzchnia obracającej się rolki wraz z płaszczyzną boczną klocka tworzą styk rozłożony o szerokości 6,35 mm.

W badaniach stosowano materiał klocka – stal ŁH15 o twardości 60 HRC, materiał rolki – stal ŁH15 o twardości 60 HRC. Wielkościami mierzonymi i obliczanymi były :

- zużycie masowe obliczane jako masy próbki klocka za pomocą wagi o rozdzielczości 0,0001 g
- zużycie objętościowe obliczane ze zużycia masowego dla gęstości klocka  $7,85 \text{ g/cm}^3$
- intensywność zużywania obliczana jako zużycie liniowe węzła tarcia w  $\mu\text{m}$  mierzone przetwornikiem przemieszczeń odniesione do drogi wyrażonej w km
- średni współczynnik tarcia liczony jako średnia wartość chwilowych rejestrowanych dla danego przedziału drogi tarcia

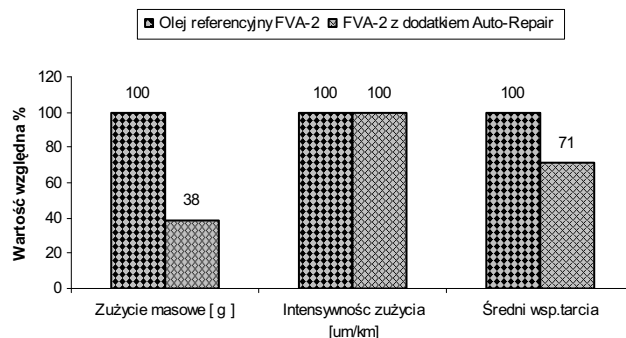
Metoda badań polega na wyznaczeniu parametrów dla oleju bazowego typu FVA-2 bez dodatku i z dodatkiem Ceramizer. Badania przeprowadzono dla obciążenia wężła 120 kg, prędkości poślizgu 0,5 m/s, drogi tarcia 10 800 m. W tabelicy 7.3 zestawiono wyniki badań dla oleju bazowego i z dodatkiem.

### Zestawienie wyników pomiarów parametrów tribologicznych

Tablica 7.3

| Lp                                      | Zużycie masowe | Zużycie objętościowe | Intensywność zużycia | Wsp. Tarcia (ustabilizowany) |
|---|----------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
|   | g              | mm <sup>3</sup>      | µm/km                |                              |
| Olej bazowy FVA-2                       |                |                      |                      |                              |
| 1                                       | 0,00185        | 0,236                | 1,35                 | 0,068                        |
| 2                                       | 0,00168        | 0,214                | 1,24                 | 0,104                        |
| Średnia                                 | 0,00177        | 0,225                | 1,30                 | 0,086                        |
| Olej FVA-2 z dodatkiem środka Ceramizer |                |                      |                      |                              |
| 1                                       | 0,00083        | 0,106                | 0,78                 | 0,031                        |
| 2                                       | 0,00075        | 0,096                | 2,11                 | 0,063                        |
| 3                                       | 0,0044         | 0,056                | 1,08                 | 0,088                        |
| Średnia                                 | 0,00067        | 0,086                | 1,32                 | 0,061                        |

Na rysunku 7.11 zestawiono procentowe porównanie uzyskanych rezultatów.



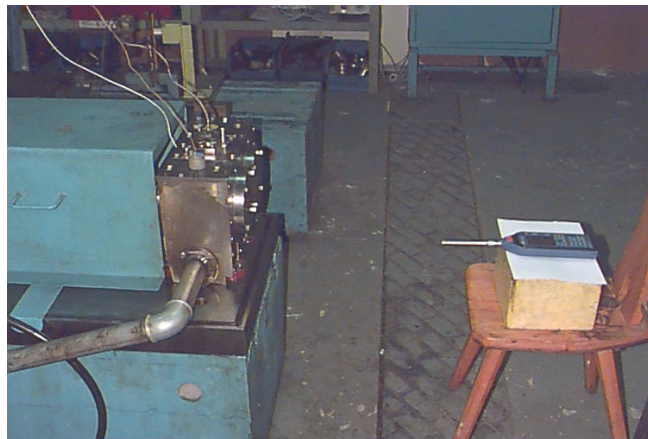
Rys.7.11 Porównanie charakterystyk tribologicznych dla oleju referencyjnego FVA-2 i oleju FVA-2 z dodatkiem Ceramizera

Wraz z obniżeniem współczynnika tarcia zmalała też temperatura klocka o 28 % w stosunku do temperatury klocka z olejem referencyjnym.

Uzyskane wyniki na testowym urządzeniu należy zweryfikować dla warunków styku powstałych podczas zazębiania przekładni, oraz określić wpływ preparatu na inne parametry przekładni. Celem badań było określenie wpływu dodatku do oleju preparatu na własności dynamiczne przekładni walcowej. Według opisu mechanizmów powstawania powłoki przez producenta, dodatek środka do oleju przekładni, powoduje wytwarzanie na współpracujących powierzchniach zębów powłoki ceramiczno-metalowej, podlegającej w procesie tworzenia samdogładzaniu. Powstająca ceramiczno-metalowa powłoka wyrównuje występujące na powierzchni zębów mikropęknięcia, rysy i wyluszczenia. W efekcie wykonanej ceramizacji i silnych właściwości ściernalnych powłoki uzyskuje się prawidłowy profil zęba i znaczne obniżenie tarcia międzyzębnego. Celem badań było określenie wpływu procesów ceramizacji zachodzących na powierzchni zębów, na parametry eksploatacyjne przekładni. Mierzonymi parametrami eksploatacyjnymi przekładni były :

- temperatura oleju i korpusu przekładni
- drgania korpusu przekładni
- hałas przekładni ( ciśnienie akustyczne)
- odchyłki wykonawcze zazębienia przed i po procesie ceramizacji
- naprężenia resztkowe na powierzchni zęba przed i po procesie ceramizacji

Badania zrealizowano na stanowisku mocy zamkniętej SB-J2 przedstawionym na rysunku 7.12.



Rys.7.12. Stanowisko badawcze do testów określających wpływ ceramizacji zębów na parametry eksploatacyjne przekładni

Badania zrealizowano na trzech parach kół o parametrach konstrukcyjno - kinematycznych zestawionych w tablicy 7.4. Koła wykonane były ze stali 18HGT, nawęglane na głębokość 0,2 modułu i hartowane do twardości 56 ±2 HRC. Podczas każdego eksperymentu zębnik obciążany był każdorazowo momentem skręcającym 650<sup>+6</sup> Nm.

Do każdego testu używano świeżego oleju typ TRANSOL SP-150 z dodatkiem Ceramizera

### Parametry kół użytych do testowania

Tablica 7.4

| Rodzaj koła | Ilość zębów | Moduł mm | Wsp. Przekrycia $\varepsilon$ | Kąt zarysu $\alpha$ | Korekcja x | Szerokość kół | Obroty 1/min |
|-------------|-------------|----------|-------------------------------|---------------------|------------|---------------|--------------|
| zębnik      | 27          | 4        | 1,208                         | 20 <sup>0</sup>     | 0,0        | 16            | 1450         |
| koło        | 35          | 4        | 1,208                         | 20 <sup>0</sup>     | 0,2574     | 20            | 1119         |

W tabeli 7.5 zestawiono numery testów, numery użytych do badań kół próbek i przeciwpróbek, oraz wartości momentów obciążających zębnik.

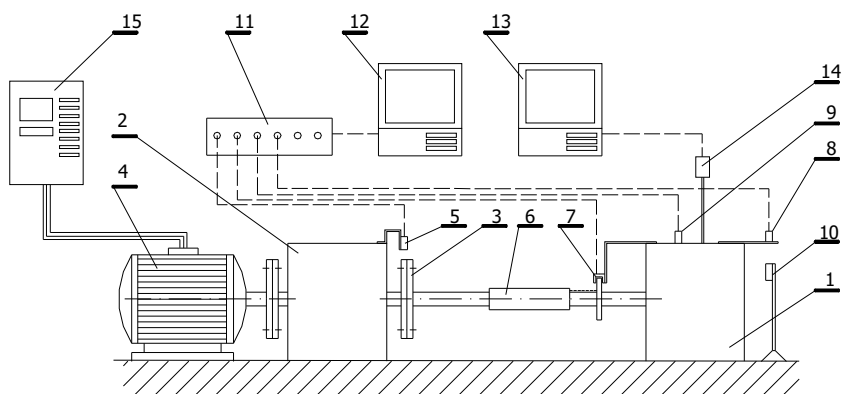
### Zestawienie numerów kół zębatych użytych do testów oraz wartości momentów obciążających zębniaki podczas prób

Tabela 7.5..

| Numer testu | Numer koła próbki | Numer koła przeciwpróbki | Moment [Nm] |
|-------------|-------------------|--------------------------|-------------|
| Test 1      | 61-03-05-18       | 62-03-01-2-05            | 653         |
| Test 2      | 61-03-05-30       | 62-03-01-2-21            | 650         |
| Test 3      | 61-03-05-05       | 62-03-01-2-21            | 656         |

Każdorazowo czas testu pomiarowego wynosił 48 godzin ( wg. producenta preparatu Ceramizer, proces ceramizacji zębów powinien nastąpić do 40 godzin pracy przekładni pod obciążeniem).

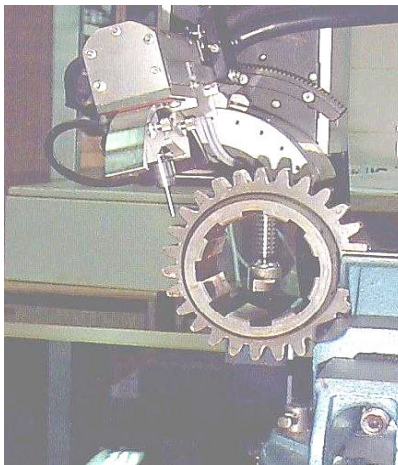
Na rysunku 7.13 pokazano schemat stanowiska pomiarowego zastosowanego do wyznaczania parametrów eksploatacyjnych przekładni. W skrzynce 1 zamocowane były koła próbki i przeciwpróbki zestawione w tabeli 2. Czujnik 8 służył do pomiarów przyspieszenia drgań korpusu przekładni. Czujniki temperatury 9, 14 mierzyły odpowiednio temperaturę korpusu przekładni i temperaturę oleju wewnątrz skrzynki. Miernik poziomu dźwięku 10 rejestrował zmian ekwiwalentnego ciśnienia akustycznego w okresie co 2 minuty. Wyniki pomiarów rejestrowane były za pomocą systemu akwizycji danych DasyLab wersja 4.0 poz. 12,13. Moment



Rys.7.13. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania parametrów eksploatacyjnych przekładni po zastosowaniu preparatu Ceramizer

skręcający wał na którym zamocowany był zębnik mierzono układem tensometrycznym 6 z telemetrycznym przekazem sygnału 7 do systemu akwizycji danych 12. Prędkość obrotową wału wejściowego przekładni badawczej 1 nastawiano za pomocą falownika 15.

Pomiar naprężeń resztkowych na powierzchni zębów zrealizowano przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego typ ASTX2002 przedstawionego na rysunku 7.14.

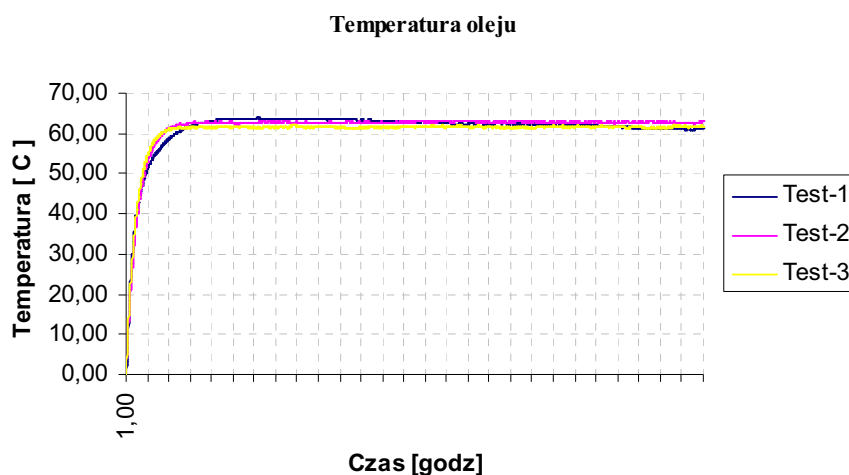


Rys.7.14. Stanowisko do wyznaczania naprężeń resztkowych na powierzchni zębów.

Pomiar odchyłek wykonawczych zębów zrealizowano przy użyciu maszyny pomiarowej Hoefler. Podczas każdego z testów pomiarowych, wyznaczano odchyłki wykonawcze dla koła przed i po ceramizacji.

Wyniki pomiarów przedstawione będą oddzielnie dla każdego z mierzonych parametrów eksploatacyjnych. Wyniki te rejestrowane były podczas trwania całego eksperymentu tj. od momentu uruchomienia przekładni, podczas procesu ceramizacji i dalej podczas pracy sceramizowanych bocznych powierzchni zębów.

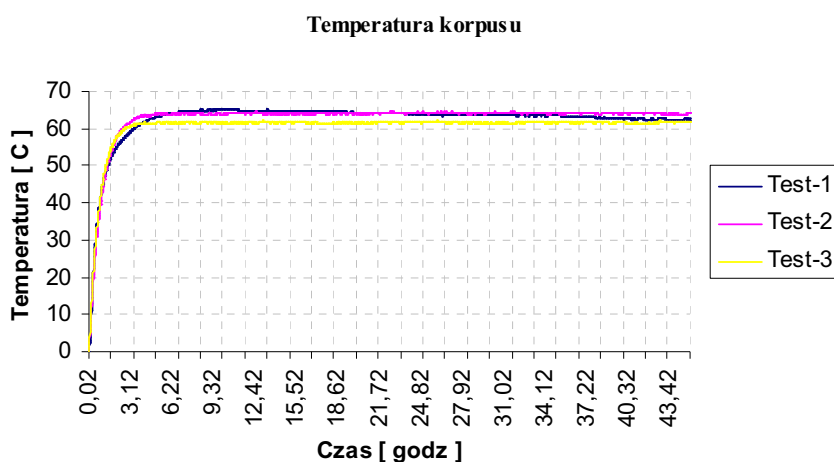
Temperaturę oleju wewnątrz przekładni i na korpusie mierzono termoparami typ J w okresie co 1 minutę podczas trwania całego testu. Na rysunku 7.15 pokazano przebiegi zmian temperatury oleju przekładniowego dla trzech testów pomiarowych.



Rys.7.15. Zmiany przyrostów temperatury oleju podczas procesu ceramizacji

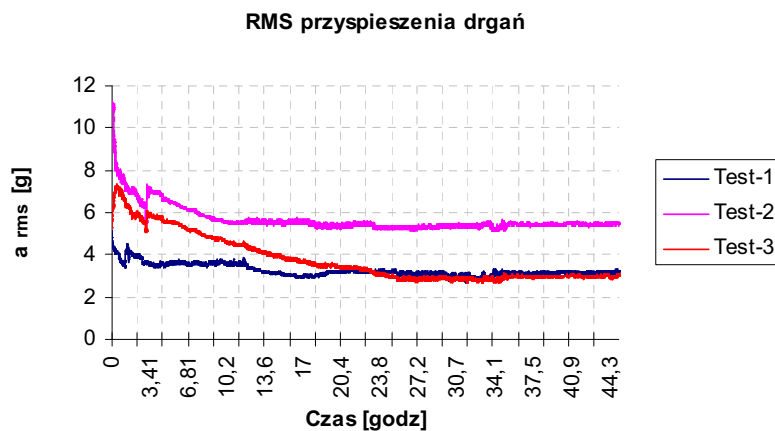
Na rysunku 7.16 pokazano zmiany temperatury korpusu przekładni dla trzech testów pomiarowych, podczas procesu ceramizacji. W obydwu przypadkach, podane wartości są to przyrosty temperatury w stosunku do temperatury otoczenia.

Analiza wykresów pokazuje, że podczas procesów ceramizacji nie obserwuje się znaczących zmian temperatury, w obszarze ustalonego przepływu ciepła ( linia pozioma ). Tylko w przypadku testu 1 ( wg. rys.7.15 i 7.16) zaobserwowano wyraźny spadek temperatury oleju jak również temperatury korpusu przekładni szczególnie w końcowej fazie testu. Duża bezwładność cieplna przekładni, może spowodować bardzo duże opóźnienia w zmianach temperatury za równo oleju jak i skrzynki przekładniowej, czego rezultatem jest niewykrywalna zmiana temperatur podczas ustalonego przepływu ciepła.



Rys.7.16. Zmiany przyrostów temperatury skrzynki przekładniowej podczas procesu ceramizacji

Podczas procesu ceramizacji bocznej powierzchni zębów, mierzona była amplituda skuteczna przyspieszenia drgań. Na rysunku 7.17 pokazano zmiany wartości amplitudy skutecznej przyspieszenia drgań, dla trzech testów.



Rys.7.17. Przebieg wartości amplitudy skutecznej drgań podczas procesu ceramizacji bocznej powierzchni zębów

Analiza wykresów wskazuje wyraźnie na zmniejszanie się poziomów drgań korpusu przekładni, podczas procesów ceramizacji. Wyraźnie wyodrębniona jest strefa czasowa w której następują procesy tworzenia się



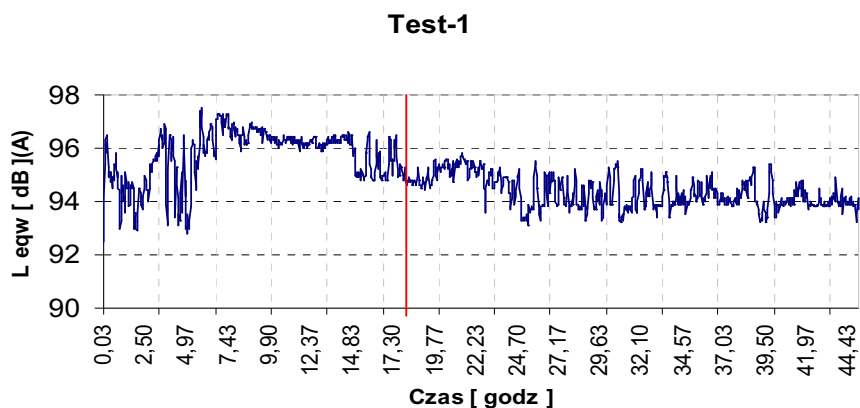
warstwy i docieranie się powierzchni kół. Po tym procesie poziomy drgań się stabilizują, oscylując wokół stałej wartości. Jeśli przyjmujemy za wyjściowy poziom amplitud drgań w początkowym czasie współpracy kół, to w efekcie końcowym uzyskamy prawie dwukrotne obniżenie amplitudy drgań. W tabeli 7.6 zestawiono średnie wartości amplitud skutecznych przyspieszenia i prędkości drgań, w pierwszej i ostatniej godzinie eksperymentu.

### Porównanie amplitud skutecznych drgań

Tablica 7.6

| Numer testu | $A_{RMS}$ [g]<br>1 godzina | $A_{RMS}$ [g]<br>Ostatnia godzina | Wskaźnik obniżenia drgań | $V_{RMS}$ [mm/s]<br>1 godzina | $V_{RMS}$ [mm/s]<br>ostania godzina | Wskaźnik obniżenia drgań |
|-------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Test-1      | 8,56                       | 5,47                              | 1,57                     | 3,49                          | 2,24                                | 1,56                     |
| Test-2      | 4,0                        | 3,17                              | 1,26                     | 1,63                          | 1,30                                | 1,26                     |
| Test-3      | 6,88                       | 3,08                              | 2,27                     | 2,82                          | 1,22                                | 2,32                     |

Mierzonym parametrem hałasu przekładni było ekwiwalentne ciśnienie akustyczne w okresie dwóch minut przy zastosowaniu filtra typ A. Pomiar hałasu zrealizowano przy użyciu miernika poziomu hałasu typu SVAN-912E klasy I, z możliwością ciągłej rejestracji wyników. Na rysunku 7 pokazano wyniki pomiaru hałasu dla testu 1 pomiarowego.



Rys.7.18 Zmiana ekwiwalentnego ciśnienia akustycznego hałasu przekładni dla trzech testów pomiarowych

Analizując wyniki pomiarów, można wyróżnić dwie strefy : pierwsza strefa charakteryzująca się wyraźną tendencją odzwierciedlającą proces ceramizacji bocznej powierzchnię zębów powodujący obniżenie poziomu

hałasu, oraz drugi obszar ustabilizowanej wartości poziomu hałasu oscylującego wokół wartości średniej. W tabeli 7.5 pokazano wyniki obliczeń średniej wartości ciśnienia akustycznego w obszarze na lewo i prawo od czerwonej linii pokazanej na rys.7.18

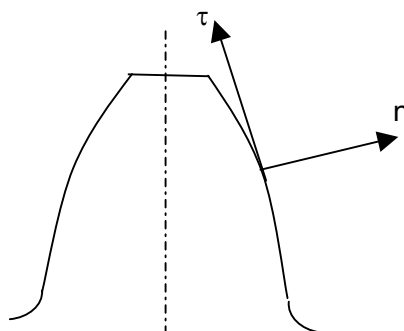
### Porównawcze wyniki pomiaru ciśnienia akustycznego

Tabela 7.5.

| Numer testu | Strefa lewa<br>$L_{eqw}$ [dB(A)] | Strefa prawa<br>$L_{eqw}$ [dB(A)] | Obniżenie ciśnienia<br>$\Delta L_{eqw}$ [dB(A)] |
|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| Test -1     | 95,47                            | 94,16                             | 1,31  |
| Test -2     | 92,98                            | 90,92                             | 2,06  |
| Test -3     | 93,72                            | 92,48                             | 1,26  |

Pomiar naprężeń resztkowych wykonano dla koła próbki numer 61-03-05-30, dla zębów o numerach 1,5,10,15,20,15 na flance prawej. Pomiar wykonano dla zębów po szlifowaniu i po procesie ceramizacji.

W tabeli 7.6 zestawiono wyniki pomiarów naprężeń resztkowych w kierunku stycznym do zarysu zęba wg. rysunku 7.19.




Rys.7.19. Kierunek pomiaru naprężeń resztkowych  $\tau$ - naprężenia styczne do zarysu zęba  $n$ - naprężenia normalne do zarysu

Analizując wpływ ceramizacji na wartość naprężeń resztkowych, należy stwierdzić, że proces ten jest obojętny na wartość naprężeń resztkowych. Uzyskane zmiany wartości naprężeń resztkowych przed i po procesie ceramizacji są analogiczne jak dla koła pracującego w oleju bez dodatku preparatu.

## Wyniki pomiarów naprężeń resztkowych na powierzchni zębów

Tablica 7.6.

| Nr. zęba  | 1<br>MPa         | 5<br>MPa        | 10<br>MPa        | 15<br>MPa        | 20<br>MPa       | 25<br>MPa     |
|--|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|---------------|
| Po szlifowaniu, nawęglaniu i hartowaniu  | -606,3 ±<br>12,9 | -608,5 ±<br>4,8 | -608,6 ±<br>13,9 | -610,2 ±<br>±6,6 | -737,4 ±<br>6,5 | -632,9 ±<br>8 |
| Po ceramizacji   | -534 ±13         | -549 ±8,0       | -613 ±1,9        | -614 ±6,3        | -500 ±16,3      | -488 ±14,5    |

Zaobserwowane zmiany wartości naprężeń, są wynikiem procesów relaksacyjnych, lub mieszczą się w granicy błędu pomiarowego. Należy stwierdzić, że obojętność procesu ceramizacji na wartość naprężeń resztkowych jest cechą korzystną dla preparatu, gdyż wprowadzenie ujemnych naprężeń resztkowych w procesie nawęglania i hartowania powoduje zwiększenie wytrzymałości powierzchniowej i na zmęczeniowe zginanie podstawy zęba. Każdy proces zmniejszający wartości ujemnych naprężeń resztkowych, w tym przypadku byłby niekorzystny, obniżający wytrzymałość zębów.

Pomiary odchyłek wykonawczych zazębienia, dla kół przed i po procesie ceramizacji, każdorazowo wyznaczano dla zębów o numerach 1,5,10,15. Pomiary odchyłek wykonawczych dla zębów po procesie ceramizacji wykonano na czynnej długości zębów, z pominięciem strefy dolnej wejścia w przypór wierzchołka zęba koła w stopę zębniaka.

Analiza porównawcza odchyłek wykonawczych zazębienia po procesie ceramizacji pokazuje znaczny wpływ tego procesu na kształtowanie się wierzchołków zębów. Prawdopodobnie twarda powłoka ceramiczna, powoduje znaczne ścieranie się wierzchołków zębów zębniaka, co w konsekwencji uzyskuje się taki sam efekt jak podczas modyfikacji zarysu głowy zęba (porównanie wykresów do wyznaczania odchyłki zarysu zęba  $F_{\alpha}$ , przed i po ceramizacji).

Wpływ dodatku do oleju przekładni zębatej o zębach skośnych przeanalizowano w stanowisku badawczym opisanym w rozdziale 6. Proces ceramizacji powierzchni, zrealizowano poprzez dodatek ceramizera do oleju i pracę przekładni pod obciążeniem znamionowym 50 godzin. Po tym okresie wyznaczono temperaturę masową bocznej powierzchni zęba i porównano z temperaturą masową uzyskaną dla zębów bez warstwy ceramicznej. W tablicy 7.7 zestawiono wyniki pomiarów z obliczonymi wielkościami ciepła powstającego na powierzchni zębów.

## Porównanie parametrów cieplnych zazębienia przed i po procesie ceramizacji

Tablica 7.7

| Bez ceramizacji pow. zębów |                           |                            |                     | Po procesie ceramizacji |                           |                            |                     |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|
| Przyrost temp. masowej     | Przyrost temp. zazębienia | Przyrost ciepła zazębienia | Współczynnik tarcia | Przyrost temp. masowej  | Przyrost temp. zazębienia | Przyrost ciepła zazębienia | Współczynnik tarcia |
| <sup>0</sup> C             | <sup>0</sup> C            | W                          |                     | <sup>0</sup> C          | <sup>0</sup> C            | W                          |                     |
| 9,2                        | 13,5                      | 162,8                      | 0,035               | 6,3                     | 10,1                      | 119,9                      | 0,024               |

Uzyskane wyniki obniżenia wartości współczynnika tarcia dla uzyskane dla przekładni, są porównywalne z wynikami uzyskanymi za pomocą urządzenia T-05.

Głównymi obserwowalnymi efektami tworzenia się powłoki ceramicznej na powierzchni zęba są :

1. Preparat Ceramizer ma znaczący wpływ na poziom drgań przekładni. Obserwuje się prawie dwukrotne zmniejszenie parametrów drgań takich jak amplituda skuteczna prędkości i przyspieszenia
2. Procesowi zmniejszenia drgań, towarzyszy też obniżenie poziomu hałasu- ekwiwalentnego poziomu ciśnienia akustycznego. W skali logarytmicznej wielkość ta wynosi średnio o 1,6 dB(A).
3. W procesie ceramizacji nie zachodzi zjawisko obniżania wstępnych ujemnych naprężeń reszkowych, wywołanych hartowaniem, co jest bardzo korzystnym zjawiskiem. Ceramizacja nie wpływa bezpośrednio na obniżenie odporności zęba na powierzchniowe zużycie bocznej powierzchni zęba jak również na zmęczeniowe pękanie podstawy zębów.
4. Dzięki bardzo wysokiej wartości powierzchniowej twardości, powłoka ceramiczna ułatwia i przyspiesza procesy zużycia ( docierania się zębów). Znaczące tego efekty obserwuje się na wierzchołku zazębienia. Obserwowany efekty tego procesu, porównywalne są do modyfikacji zarysu wierzchołka zęba.
5. Po procesie ceramizacji zmniejsza się współczynnik tarcia międzyzębnego o ok. 30 %. Znacząco spada również zużycie masowe o ok. 60 %.