

Marek Gawliński

**Lokalne
warunki styku
a opory tarcia
elastomerowych
wargowych pierścieni
uszczelniających**



MAREK GAWLIŃSKI

LOKALNE WARUNKI STYKU
A OPORY TARCIA
ELASTOMEROWYCH WARGOWYCH
PIERŚCIENI USZCZELNIAJĄCYCH



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
WROCLAW 2004

Recenzenci
Karol Grudziński
Janusz Plutecki

Redaktor
Alicja Kordas

Korekta
Maria Izbicka

Projekt okładki
Zofia i Dariusz Godlewscy

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004

ISBN 83-7085-784-1

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 321/2004

SPIS RZECZY

WSTĘP.....	5
WYKAZ NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH OZNACZEŃ.....	7
1. PRZEDMIOT BADAŃ.....	9
2. OPORY TARCIA PARY USZCZELNIENIE WARGOWE-WAŁ W LITERATURZE.....	13
2.1. Promieniowe obciążenie wargi a opór tarcia.....	17
2.2. Modele mechanizmu uszczelniania pierścieni wargowych.....	18
2.3. Wpływ chropowatości powierzchni wału na opór tarcia uszczelnienia wargowego.....	23
2.4. Wpływ chropowatości powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi na opór tarcia.....	25
2.5. Wpływ rodzaju elastomeru na opór tarcia uszczelnienia.....	26
2.6. Podsumowanie.....	27
3. CEL PRACY.....	29
4. CHARAKTERYSTYKA STYKU WARGI Z WAŁEM W MAKROSKALI.....	31
4.1. Położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej.....	32
4.1.1. Metoda pomiaru.....	33
4.1.2. Wyniki pomiarów.....	36
4.2. Położenie obszaru styku względem powierzchni wału.....	40
4.2.1. Siła tarcia podczas osadzania uszczelnienia na wale.....	43
4.3. Rozkład nacisku stykowego w kierunku osiowym i obwodowym.....	47
4.4. Podsumowanie.....	52
5. CHARAKTERYSTYKA STYKU WARGI Z WAŁEM W MIKROSKALI.....	53
5.1. Tekstura powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi w oryginalnych uszczelnieniach.....	53
5.2. Analiza chropowatości oryginalnych powierzchni wałów.....	58
5.2.1. Chropowatość szlifowanej powierzchni wałów.....	62
5.2.1.1. Rzeczywisty styk wargi z powierzchnią szlifowanych wałów.....	71
5.2.2. Chropowatość powierzchni tłoczonych nawęglanych.....	76
5.2.2.1. Rzeczywisty styk wargi z powierzchnią tulejek nawęglanych.....	78

5.2.3. Chropowatość powierzchni tłoczonych fosforanowanych.....	79
5.3. Podsumowanie	85
6. OPÓR TARCIA USZCZELNIENIA I JEGO ZWIĄZEK Z MATERIAŁEM WARGI ORAZ Z WARUNKAMI JEJ STYKU Z WAŁEM	87
6.1. Opór tarcia uszczelnień z typoszeregu o zredukowanych wymiarach wargi ...	88
6.2. Opór tarcia uszczelnień współpracujących z wałami o powierzchni szlifowanej	90
6.2.1. Zależność oporu tarcia od rodzaju materiału wargi	102
6.2.1.1. Opór tarcia wynikający z oddziaływania adhezyjnego pomiędzy wargą a wałem	104
6.3. Opór tarcia uszczelnień współpracujących z tłoczonymi tulejkami o powierzchniach nawęglanych	110
6.3.1. Zależność oporu tarcia od rodzaju materiału wargi	111
6.4. Opór tarcia uszczelnień współpracujących z tłoczonymi tulejkami o powierzchniach fosforanowanych	112
6.5. Podsumowanie	115
7. MOŻLIWOŚCI REDUKCJI OPORU TARCIA USZCZELNIENÍ WARGOWYCH	117
7.1. Równoważna chropowatość zużytych powierzchni szlifowanych wałów	117
7.2. Chropowatość dotartych powierzchni tulejek tłoczonych nawęglanych	121
7.3. Chropowatość dotartych powierzchni tulejek tłoczonych fosforanowanych... ..	124
7.4. Wpływ tekstury powierzchni wargi na opór tarcia uszczelnienia.....	127
7.5. Podsumowanie	129
8. SYNTEZA PRACY	131
DODATEK 1 – Metoda wyznaczenia stałych reologicznych gum	135
LITERATURA.....	145
LOCAL CONTACT CONDITIONS AND FRICTIONAL LOSSES IN OIL LIP SEALS (Resume).....	149

WSTĘP

Technika uszczelniania maszyn i urządzeń stanowi obecnie ukształtowaną i dynamicznie rozwijającą się specjalność. Jej rozwój został wymuszony przez wdrożenie nowych technologii, w których procesy przebiegają przy coraz wyższym ciśnieniu i temperaturze czynnika uszczelnianego. Rozwój ten jest także stymulowany przez prawodawstwo wielu państw, które w trosce o stan środowiska i bezpieczeństwo ludzi wymusza redukcję nie tylko wycieku, ale również i emisji czynnika z dławnicy. W postępie tym uczestniczą także użytkownicy uszczelnień, którzy – aby obniżyć koszty produkcji i eksploatacji – nie godzą się na przestoje maszyn, wynikające z awarii lub z niskiej trwałości uszczelnień.

Elastomerowe uszczelnienia wargowe należą do najpowszechniej stosowanych w gospodarce, a do ich największych odbiorców należą przemysł motoryzacyjny, maszyn budowlanych, hutniczy oraz artykułów gospodarstwa domowego. Szczególnym użytkownikiem jest przemysł samochodowy; w każdym z produkowanych i użytkowanych samochodów znajduje się ponad 20 uszczelnień wargowych. Bez przesady można stwierdzić, że od niezawodności i trwałości uszczelnień zależy niezawodność samochodów. Obecnie producenci samochodów wymagają od producentów uszczelnień, aby uszczelnienia pracowały niezawodnie i bez wycieku w okresie odpowiadającym przebiegowi 200÷250 tysięcy kilometrów dla samochodów osobowych oraz 1 miliona kilometrów w przypadku dużych samochodów ciężarowych. Osiągnięcie tych wskaźników nie byłoby możliwe bez intensywnie prowadzonych badań na temat właściwości elastomerów i nowych technologii ich wykonania, tribologii par ciernych elastomer–metal, modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej elastomerów i metali oraz mechanizmu powstawania i utrzymywania warstwy smarowej w szczelinie.

W niniejszej monografii podjęto temat przyczyn powstawania oporu tarcia uszczelnienia wargowego współpracującego z wałem oraz możliwości jego zmniejszenia. Założono, że uszczelnienia wargowe i wał tworzą specyficzną parę cierną, którą powinno się charakteryzować na podstawie sposobu tworzenia się powierzchni ich styku, wynikającego z niego rodzaju styku oraz odpowiadającej mu postaci zużycia krawędzi uszczelniającej. Rzeczywiście, podczas wsuwania wału w uszczelnienia dochodzi do rozciągnięcia wargi, obrotu względem punktu styku wargi z wałem oraz do jej przemieszczania się wzdłuż powierzchni wału. Z tej złożoności odkształcania

się wargi wynika zmiennie położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wzdłuż obwodu wału. W rezultacie dochodzi do ciągłej zmiany wartości nacisku stykowego w kierunku obwodowym. Można zatem stwierdzić, że to lokalne warunki styku pomiędzy wargą a wałem będą decydowały o całkowitym oporze tarcia uszczelnienia oraz o stopniu zużycia krawędzi uszczelniającej. Warunki styku wargi z wałem można poprawić przez dobranie chropowatości powierzchni wału stosownie do właściwości i składu danego elastomeru. Korzystnie prezentuje się powierzchnia wału o anizotropowej chropowatości i o lewostronnym rozkładzie gęstości częstości rzędnych profilu. Tylko taka powierzchnia wału jest w stanie wywołać równomierne zużycie wargi w sytuacji zmienności wartości nacisku stykowego. Opór tarcia małeje, gdy warstwa wierzchnia krawędzi uszczelniającej przypomina warstwę ciała porowatego. Obniżenie oporu tarcia prowadzi nie tylko do znacznego zwiększenia trwałości uszczelnienia, ale również – w skali globalnej – do zaoszczędzenia znacznych ilości energii. Przemysł samochodowy w Europie produkuje około 15 milionów samochodów rocznie. Jeżeli przyjąć, że będziemy w stanie obniżyć opory tarcia wszystkich uszczelnień zainstalowanych w samochodzie o zaledwie 10 W, to przy 15 milionach produkowanych samochodów oznacza to zaoszczędzenie energii równoważnej 150 MW. Jeszcze większą ilość energii można zaoszczędzić zastępując stare uszczelnienia nowymi w eksploatowanych samochodach.



W monografii tej zawarto wyniki badań własnych oraz badań prowadzonych przez autora na zlecenia Zakładu Produkcji Uszczelnień Technicznych „Inco-Veritas”, Bruss Dichtungstechnik GmbH – Niemcy, Chicago Rawhide Industries – USA oraz GKN – Polska.

Składam serdeczne podziękowania kierownictwu tych firm za wieloletnią współpracę, moim Kolegom i Współpracownikom za współudział w przeprowadzanych badaniach oraz tym wszystkim, którzy bardzo życzliwie mnie wspierali.

Marek Gawliński

WYKAZ NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

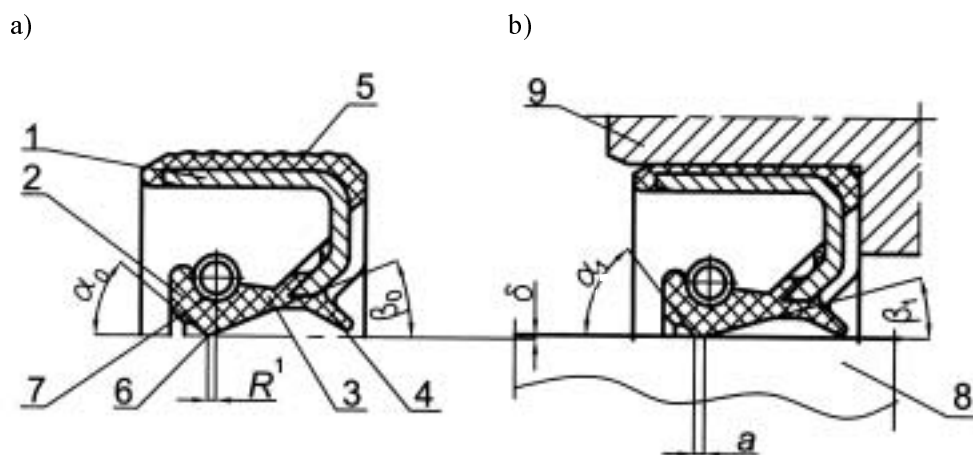
a	– szerokość styku wargi z wałem; $\times 10^{-3}$ m
A	– nominalna powierzchnia styku wargi z wałem; $\times 10^{-6}$ m ²
A_r	– rzeczywista powierzchnia styku wargi z wałem; $\times 10^{-6}$ m ²
d	– średnica wału; $\times 10^{-3}$ m
f	– wypadkowy współczynnik tarcia
f_a	– składowa adhezyjna współczynnika tarcia
f_d	– składowa deformacyjna współczynnika tarcia
h	– grubość warstwy smarowej; $\times 10^{-6}$ m
I_t	– ilość energii zaabsorbowanej przez uszczelnienie; J
J	– stopnie jasności
K	– stała charakteryzująca pracę uszczelnienia przy danej jego zabudowie,
M_t	– moment tarcia; N·m
N_t	– moc tarcia; W
$p_{r\ sr}$	– średnia wartość rzeczywistego nacisku; N/m ²
p_c	– nominalna wartość nacisku; N/m ²
P_r	– promieniowe obciążenie wywierane przez wargę na wał; N
\bar{r}	– średni promień nierówności powierzchni wału; $\times 10^{-6}$ m
v	– prędkość liniowa powierzchni wału; m/s
ε	– względne zbliżenie do profilu powierzchni
η	– lepkość dynamiczna oleju; Pa·s
$\operatorname{tg} \psi$	– tangens kąta strat wewnętrznych w gumie
ω	– prędkość kątowa wału; rad/s
σ	– standardowe odchylenie rozkładu rzędnych profilu; $\times 10^{-6}$ m

1. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań były elastomerowe wargowe pierścienie uszczelniające. Uszczelnienia te (rys. 1.) mają kilka charakterystycznych cech, spośród których wymienione zostaną tutaj tylko trzy:

- są to uszczelnienia stykowe,
- mają one ukształtowaną krawędź uszczelniającą,
- wystarczy osadzić je na wale, aby otrzymać obciążenie obszaru styku wargi z wałem.

Każde z tych uszczelnień wraz ze współpracującym z nim wałem, w obecności czynnika uszczelnianego, tworzy kinematyczną parę cierną.



Rys. 1. Wargowy pierścień uszczelniający: a) w stanie swobodnym, b) w stanie zamontowanym:

- 1 – metalowy wkład usztywniający, 2 – wargę uszczelniającą, 3 – stopa wargi,
4 – wargę pyłochronną, 5 – uszczelnienie spoczynkowe, 6 – krawędź uszczelniająca,
7 – sprężyna dociskowa, 8 – wał, 9 – gniazdo

Wargę uszczelniającą 2 jest elastomerowa powłoka o zmiennym przekroju w kierunku osiowym. Uszczelnienie osadza się w gnieździe korpusu 9 z określonym wcis-

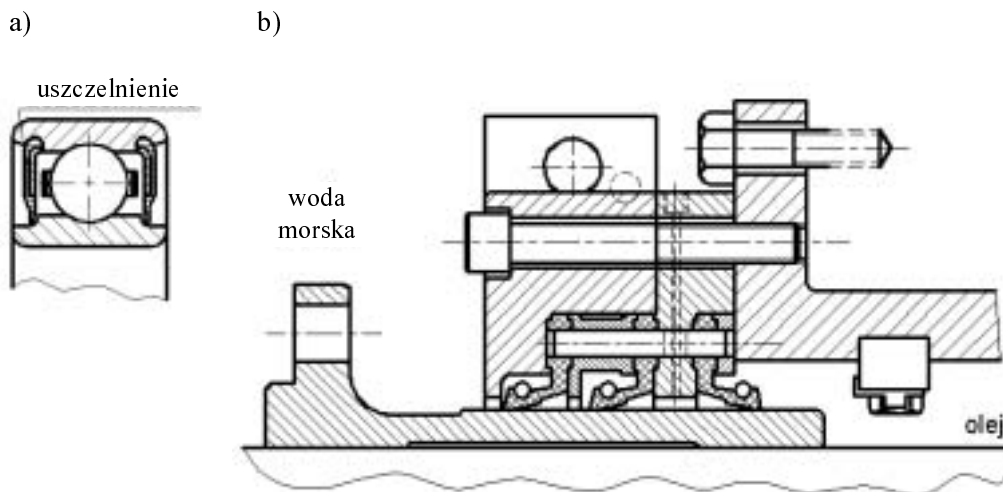
kiem, dzięki czemu zapewnia się szczelność oraz jego trwałe ustawienie względem korpusu. Wargę uszczelniającą 2 ulega rozciągnięciu wraz ze sprężyną 7 po nasadzeniu uszczelnienia na wał 8; dodatkowo stopa 3 wargi ulega pewnemu ugięciu. W rezultacie odkształcenia wargi i sprężyny powstaje siła promieniowa P_{pr} dociskająca wargę do wału. Dochodzi również do ukształtowania się powierzchni styku szerokości a wargi z wałem.

Wargę uszczelniającą 2 i pyłochronną 4 oraz uszczelnienie spoczynkowe 5 wykonuje się, w zależności od przewidywanych warunków pracy, z gumy nitrylowej (NBR), z gumy nitrylowej uwodornionej (HNBR), akrylowej (ACM), silikonowej (VMQ), fluorowej (FKM) oraz politetrafluoroetyleny (PTFE). Uszczelnienia wykonane z tych materiałów autor monografii badał zarówno na stanowiskach badawczych, jak i w warunkach polowych.

Wargowe pierścienie uszczelniające, podobnie jak inne uszczelnienia stykowe, spełniają następujące zadania:

- chronią otoczenie przed wyciekami czynnika uszczelnianego z wnętrza maszyny (rys. 1b),
- chronią wnętrze maszyny (urządzenia) przed negatywnym oddziaływaniem środowiska (rys. 2a),
- oddzielają od siebie obszary wypełnione różnymi płynami (rys. 2b).

Są one powszechnie stosowane do uszczelniania dróg wycieku wzdłuż wałów i osi samochodów osobowych i ciężarowych, maszyn budowlanych i rolniczych, urządzeń hutniczych oraz w sprzęcie gospodarstwa domowego.



Rys. 2. Rozwiązania konstrukcyjne węzłów uszczelniających:
a) ochrona wnętrza łożyska tocznego, b) separacja dwóch płynów

Uszczelnienia te, zależnie od wykonania, pracują w szerokim zakresie parametrów eksploatacyjnych:

- temperatura $-50\text{ °C} \leq T_{ot} \leq 170\text{ °C}$ (200 °C)
- rodzaj czynnika uszczelnianego smary, oleje, płyny hydrauliczne, woda, para wodna itp.
- ciśnienie czynnika uszczelnianego próżnia $\leq p \leq 10,0\text{ MPa}^*$
- prędkość liniowa wału $v \leq 30\text{ m/s}$ (50 m/s)
- promieniowe bicie wału $\varepsilon \leq 0,5\text{ mm}$

Dopuszczalny wyciek czynnika z uszczelnienia może być przedmiotem umowy pomiędzy producentem uszczelnienia a użytkownikiem. W odniesieniu do uszczelnień pracujących w różnych węzłach ruchowych samochodu wymaga się prawie całkowitej szczelności, chociaż norma [53] podaje, że wyciek nie powinien przekraczać w okresie 240-godzinnego testu następujących wartości:

Klasa szczelności	Maksymalny wyciek	
	z 1 uszczelnienia	z 12 uszczelnień
	g	
1	1	3
2	2	6
3	3	12

Konstruowanie uszczelnienia to ciągle poszukiwanie kompromisu pomiędzy wymaganiem wysokiego poziomu szczelności a niskim oporem tarcia i odpowiednią trwałością.

Trwałość uszczelnień wału korbowego silników spalinowych powinna odpowiadać przebiegowi 200 000 km, a trwałość uszczelnień półosi samochodów ciężarowych – ponad 1 mln kilometrów.

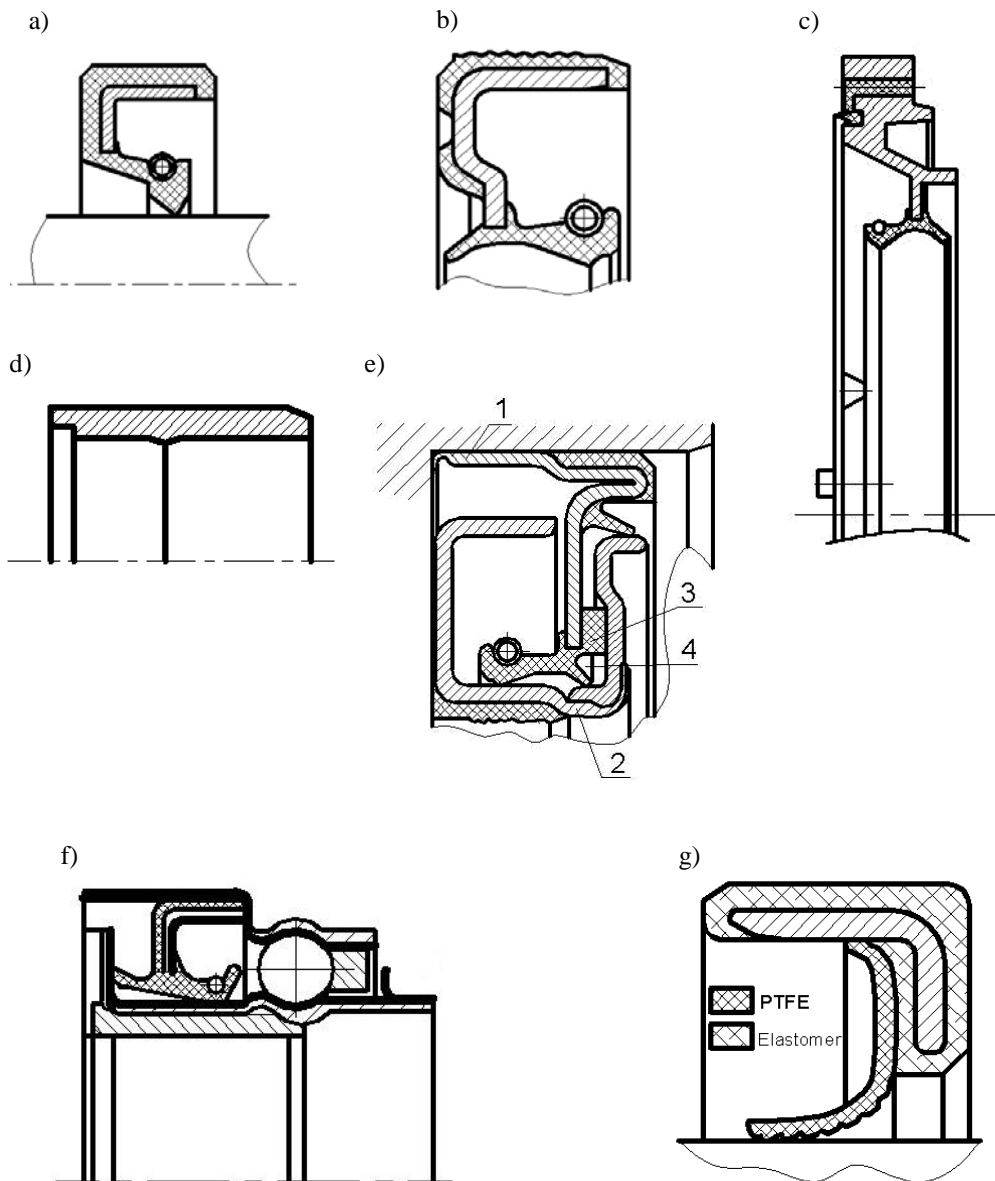
Nieustające zainteresowanie tego typu uszczelnieniami wynika przede wszystkim z:

- ich niskiej ceny,
- możliwości zamontowania uszczelnienia w bardzo ograniczonej przestrzeni,
- ich stosunkowo wysokiej trwałości.



W niniejszej monografii przedstawiono wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych oraz analiz i ekspertyz uszczelnień przedstawionych na rysunku 3. Uszczelnienia te pracowały wyłącznie w olejach syntetycznych.

* Uszczelnienia wargowe pracujące w układzie wspomagania układu kierowniczego samochodu.



Rys. 3. Badane konstrukcje uszczelnień wargowych:

- a) uszczelnienie o tradycyjnym profilu wargi, b) uszczelnienie o ściętej wardze (tzw. mikroprofil),
 c) mikrowarga zwulkanizowana z aluminium pokrywą, d) tłoczona tulejka fosforanowana
 do współpracy z uszczelnieniem wargowym, e) uszczelnienie wargowe o konstrukcji zintegrowanej
 do węzła łożyskowego półosi ciężarówki; 1 – obudowa uszczelnienia obracająca się wraz z kołem,
 2 – nieruchoma tuleja, 3 – odbojnik utrzymujący dystans w czasie montażu pomiędzy obiema częściami
 uszczelnienia, 4 – objętość wypełniona smarem stałym, f) zintegrowane uszczelnienie wargowe półosi
 samochodu osobowego, g) uszczelnienie z wargą z PTFE

2. OPORY TARCIA PARY USZCZELNIENIE WARGOWE–WAŁ W LITERATURZE

Ilość energii niezbędnej do pokonania oporu tarcia powstającego w obszarze styku uszczelnienia wargowego z wałem jest najczęściej stosowanym, oprócz klasy szczelności, wskaźnikiem jakości pracy uszczelnienia. Pokonanie oporów tarcia zespołu uszczelnień współpracujących z wałem korbowym, wałkiem rozrządu, wałkami przekładni oraz z osiami kół w samochodach osobowych produkowanych w roku 1940 wymagało doprowadzenia 1,5 kW dodatkowej mocy [57]. Obecnie podobny zespół uszczelnień zużywa 350 W, w tym samo uszczelnienie wału korbowego – 90÷120 W przy prędkości obrotowej 5 000 obr/min i temperaturze oleju 150 °C w misce olejowej. Pomimo tej znacznej redukcji opór tarcia jest nadal duży i sprawia, że obciążenie cieplne jednostki powierzchni styku wargi z wałem jest jednym z najwyższych w znanych autowaleniach ciernych parach kinematycznych maszyn i urządzeń. W uszczelnieniu wykonanym z gumy fluorowej o średnicy wargi 85 mm, w którym szerokość styku wargi z wałem $a = 0,06$ mm, obciążenie cieplne wynosi 7,5 W/mm² w przypadku prędkości obrotowej i temperatury oleju wymienionych powyżej [14]. Dla porównania można podać, że obciążenie cieplne elektrycznego urządzenia grzewczego dochodzi zaledwie do 2,8 W/mm². Im większe jest obciążenie cieplne styku wargi z wałem, tym wyższa jest temperatura. Upper stwierdził, że zwiększenie temperatury oleju o 10 °C ponad dopuszczalną temperaturę dla danego rodzaju gumy powoduje spadek trwałości uszczelnienia o 40÷50% [75]. Obniżenie temperatury oleju w misce olejowej nie jest możliwe, dlatego redukcja ilości energii traconej na pokonanie oporu tarcia jest prawie jedynym sposobem obniżenia temperatury w obszarze tarcia powierzchni wargi i wału.

Brink założył, że trwałość t uszczelnienia wargowego zależy od ilości energii I_t , jaką jest ono w stanie zaabsorbować w całym okresie eksploatacji w oleju o danej temperaturze T [3]

$$t = \frac{I_t}{N_t} = \frac{I_t}{KM_t\omega}. \quad (1)$$

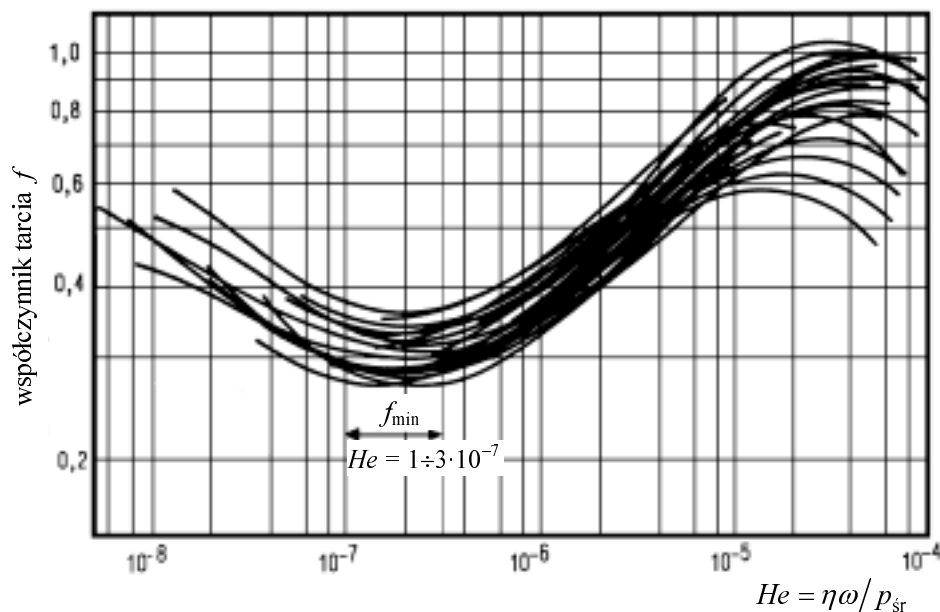
Miarą oporu tarcia na styku wargi-wał jest moment tarcia

$$M_t = \frac{\eta v A r}{h}. \quad (2)$$

Po podstawieniu wzoru (2) do równania (1), i uproszczeniu, otrzymano

$$t = \frac{I_t h}{K_1 D^3 \omega^2 a}. \quad (3)$$

Ze wzoru (3) wynika, że zwiększenie oporu tarcia na styku wargę-wał, przy stałych I_t oraz T , prowadzi do zmniejszenia trwałości uszczelnienia. Wzór ten jest empiryczny, dlatego stosowanie go do oceny czasu pracy uszczelnienia wymaga doświadczalnego określenia dopuszczalnej wartości absorbowanej energii. Znajomość wartości I_t dla uszczelnienia wzorcowego umożliwia, zdaniem Brinka, prognozowanie trwałości uszczelnień wykonanych z tego samego materiału i geometrycznie do niego podobnych. Do obliczenia momentu tarcia (2) przyjęto, że pomiędzy powierzchniami wargi i wału występuje tarcie płynne. Założenie to skłoniło wielu badaczy do tego, aby wyrażać współczynnik tarcia uszczelnienia o wał w zależności od liczby Herseya $He = \eta\omega/p_{sr}$ (rys. 4) [43, 55].



Rys. 4. Zależność współczynnika tarcia f od liczby Herseya dla różnych wargowych pierścieni uszczelniających

Z analizy wykresu (rys. 4.) wynikają dwa zasadnicze wnioski:

1. Tej samej liczbie He mogą odpowiadać różne wartości współczynnika tarcia.
2. Przy dużych wartościach liczby He (obszar tarcia płynnego w łożyskach ślizgowych) wartość współczynnika tarcia znacznie przewyższa jego wartość przy tarcu granicznym.

Różne wartości współczynnika tarcia, jakie uzyskiwali badacze przy $He = \text{const}$, mogą wynikać zarówno z błędnego oszacowania szerokości styku wargi z wałem oraz obciążenia, jakie wargę wywiera na wał, jak i z nieuwzględnienia wzajemnego oddziaływania na siebie stykających się nierówności powierzchni wału i wargi. Brak jest obecnie metody oceny szerokości styku i obciążenia wału przez wargę w czasie eksploatacji uszczelnienia; zwykle do obliczeń przyjmuje się wartości tych wielkości wyznaczone przed zamontowaniem uszczelnienia w urządzeniu. Stwierdzono również, że w przypadku uszczelnień wykonanych z różnych gum i pracujących w warunkach uznawanych za typowe dla tarcia płynnego otrzymywano znacznie różniące się wartości współczynnika tarcia. Na tej podstawie sformułowano wniosek, że w uszczelnieniu, oprócz tarcia płynnego, muszą występować również inne rodzaje tarcia [41].

Badania własne autora [65] wydają się potwierdzać ten wniosek; podczas oceny wysokości warstwy smarowej metodą pojemnościową stwierdzano zawiązywanie się warstwy smarowej grubości do $1,5 \mu\text{m}$ oraz częste jej przerywanie. Podczas zaniku warstwy smarowej dochodziło do bezpośredniego styku powierzchni wału i wargi. Nadmiernie wysokie wartości współczynnika tarcia występujące w przedziale dużych wartości liczby Herseya niektórzy badacze przypisują bardzo dużym naprężeniom stycznym w warstwie smarowej. Przyjmuje się, że grubość warstwy smarowej może być równa $0,04 \div 0,1 \mu\text{m}$; przy tej grubości gradient prędkości w warstwie smarowej ma dużą wartość, i dlatego naprężenie styczne – zgodnie z wyrażeniem $\tau \cong \eta(v/h)$ – ma też dużą wartość. Warstwa smarowa o podanej grubości może występować tylko lokalnie w szczelinie pomiędzy odpowiednio ukształtowanymi nierównościami na powierzchni wału i wargi [77, 78].

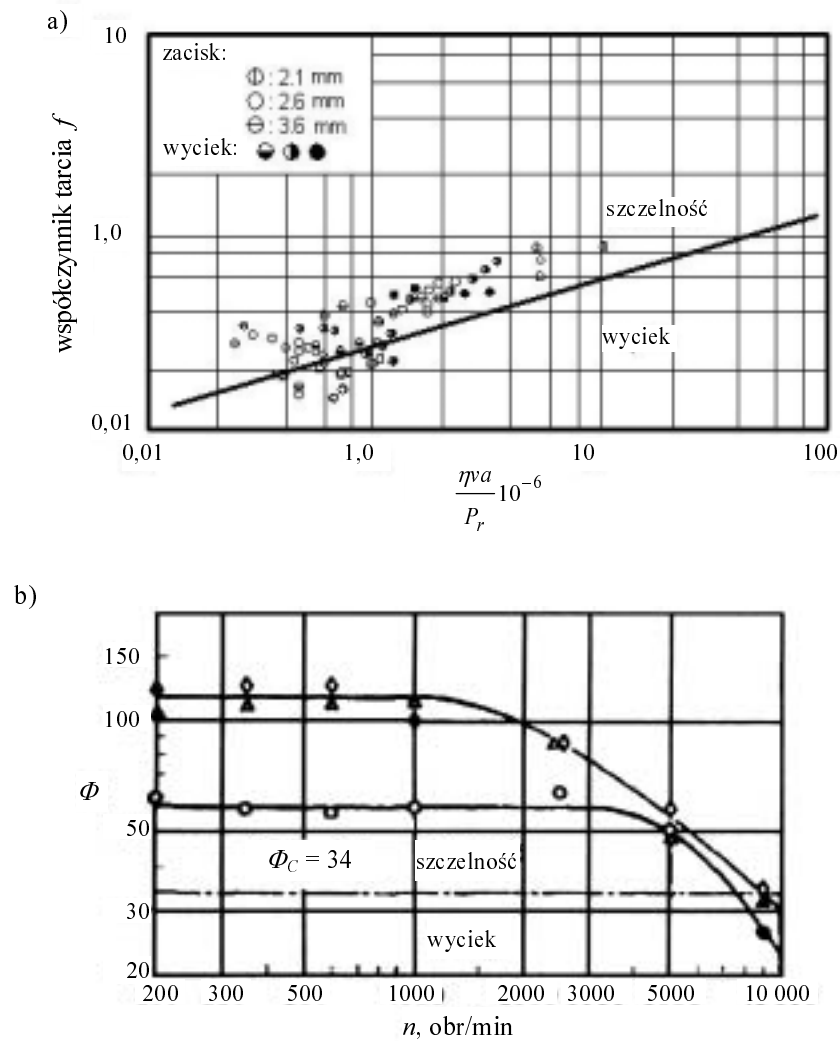
Stwierdzono, że w przypadku dużych wartości liczby Herseya współczynnik tarcia uszczelnienia można określić wzorem [67]

$$f = \Phi \left(\frac{\eta v a}{P_r} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

Współczynnik Φ charakteryzuje warunki smarowania wargi i oblicza się go ze wzoru (4). Może on stanowić kryterium szczelności – dla uszczelnień wykonanych z gumy nitrylowej $\Phi_s \approx 34$ [35]. Uszczelnienie jest szczelne wówczas, gdy wartość współczynnika Φ jest większa od jego wartości krytycznej $\Phi > \Phi_c$.

Z analizy wykresu na rysunku 5a wynika, że uszczelnienia pracujące bez wycieku charakteryzują się na ogół wyższym współczynnikiem tarcia. Często zdarza się, że wartość współczynnika tarcia może być jednakowa zarówno dla uszczelnienia pracującego z wyciekami, jak i bez niego. Oznacza to, iż o wycieku i o oporze tarcia mogą decydować lokalne zakłócenia występujące podczas styku współpracujących powierzchni. Część wpływu należy przypisać również deformacjom nierówności na powierzchni wargi, wynikającym z obecności naprężenia stycznego w warstwie smarowej. Za taką interpretacją wykresu, przedstawionego na rysunku 5b, przemawia

zależność współczynnika Φ od właściwości lepkosprężystych gumy oraz od chropowatości powierzchni wału i wargi [35, 43].



Rys. 5. Wartość współczynnika tarcia uszczelnień szczelnych i nieszczelnych (a) oraz zależność wartości współczynnika Φ od prędkości obrotowej wału (b)

Zmniejszenie wartości współczynnika Φ wraz ze zwiększeniem prędkości obrotowej wału przypisuje się lepkosprężystości gumy. Podatność sprężysta gumy J' maleje wraz ze zwiększeniem częstości odkształcania gumy

$$\Phi = 2C \left(\frac{0,5d}{h_{\max}} \right)^{1/3} \left(\frac{h_{\max}}{\lambda} \right)^{2/3} \exp \left(\frac{\beta P_{\text{sr}} J' \lambda}{h_{\max}} \right),$$

gdzie:

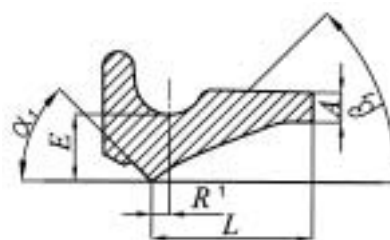
$h_{\max} \equiv R_s$,

$\lambda \equiv S_m$,

C, β – stałe.

2.1. PROMIENIOWE OBCIĄŻENIE WARGI A OPÓR TARCIA

Promieniowe obciążenie wargi P_{pr} wynika z jej rozciągnięcia na wale, z ugięcia stopy uszczelnienia oraz z działania sprężyny dociskowej, innymi słowy – materiał, z którego wykonano wargę, oraz jej makrogeometria determinują to obciążenie. Współczesny profil przekroju wargi uszczelniającej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Profil przekroju wargi uszczelniającej z zaznaczonymi podstawowymi wymiarami

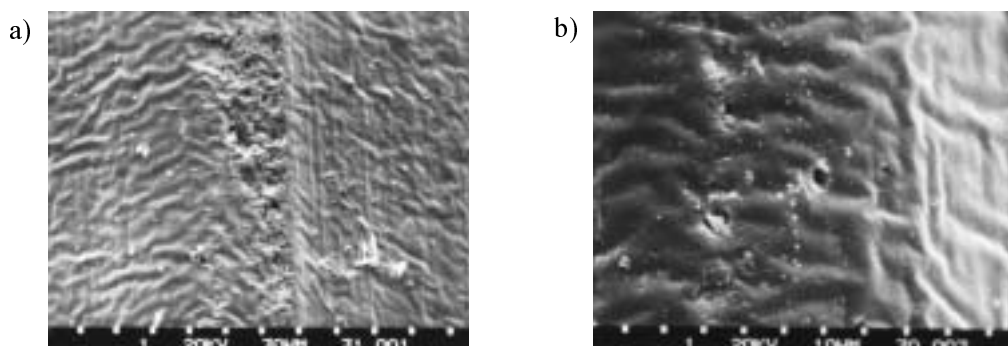
Kąt pochylenia α boku wargi po stronie olejowej wynosi $40 \div 50^\circ$, kąt pochylenia β boku po stronie powietrznej – $18 \div 25^\circ$ (rys. 1), a promień zaokrąglenia krawędzi uszczelniającej $r = 50 \div 120 \mu\text{m}$. Szerokość styku wargi z wałem, oprócz wymienionych już parametrów geometrycznych – zacisku wargi na wale i odległości sprężyny R^1 – zależy od miejsca styku wargi z wałem. Przyjmuje się, że rozciągnięcie wargi na wale $\delta = 0,5 \div 1,8 \text{ mm}$ na stronę, a odległość osi sprężyny $R^1 = 0,2 \div 0,7 \text{ mm}$ od miejsca styku w stronę atmosfery [2, 19]. Dzięki przyjętemu kształtowi wargi rozkład nacisku stykowego jest asymetryczny, a jego maksymalna wartość przypada w okolicy $1/3$ szerokości styku wargi z wałem, licząc od strony cieczy. Udział sprężyny w całkowitym obciążeniu wywieranym przez wargę na wał wynosi $0,5 \div 0,75 P_{\text{pr}}$. Promieniowe obciążenie P_{pr} , które wargę wywiera na powierzchnię wału, jest całkowitą siłą nacisku, wynikającą z rozciągnięcia wargi oraz sprężyny. Za niekorzystną kombinację cech geometrycznych w uszczelnieniu uważa się przyjęcie dużego zacisku wargi wraz ze znacznym obciążeniem od działania sprężyny [71]. Na ogół zaleca się zmniejszać promieniowe obciążenie wargi. Brown uznaje P_{pr} za główny parametr decydujący

o zużyciu wargi i wału [4], a Molitor podaje, że po dwukrotnym zmniejszeniu obciążenia odnotowano 46% spadek zużycia wargi [44]. Johnston stwierdził istnienie dużego rozrzutu siły tarcia towarzyszącego zmianie obciążenia promieniowego przy stałej prędkości obrotowej wału, poza tym odnotowuje brak zależności momentu tarcia M_t od P_{pr} [40].

Autor wraz z Konderlą przeprowadził optymalizację typoszeregu uszczelnień wargowych [14]. Z analiz wynikało, że obciążenie promieniowe można było zmniejszyć o połowę (z 40 N do 18 ± 20 N). W wyniku działań optymalizacyjnych osiągnięto znaczącą redukcję oporu tarcia uszczelnień, z tym że w niektórych geometrycznie podobnych uszczelnieniach opory tarcia były większe niż przeciętne. Poszukując przyczyn tych odchyłek, autor stwierdził, że zarówno w uszczelnieniu swobodnym, jak i zamontowanym na wale występuje odchylenie krawędzi uszczelniającej od płaszczyzny prostopadłej do osi wału i przechodzącej przez dowolny punkt na krawędzi [22].

Odchylenie powierzchni styku od hipotetycznej płaszczyzny może oznaczać zmienność warunków styku wargi z wałem w kierunku obwodowym i być przyczyną braku związku pomiędzy obciążeniem a oporem tarcia.

Podczas badań uszczelnień wargowych stwierdzono ponadto, że w jednym i tym samym uszczelnieniu część obwodu krawędzi uszczelniającej uległa zużyciu, a pozostała nie wykazywała żadnych śladów zużycia (rys. 7.). To spostrzeżenie świadczy o tym, że przyczyn tego nierównomiernego zużycia należy poszukiwać także w zmienności warunków styku wargi z wałem w kierunku obwodowym [22].



Rys. 7. Mikrofotografie powierzchni krawędzi uszczelnienia wargowego:
a) z widocznymi śladami zużycia, b) bez śladów zużycia

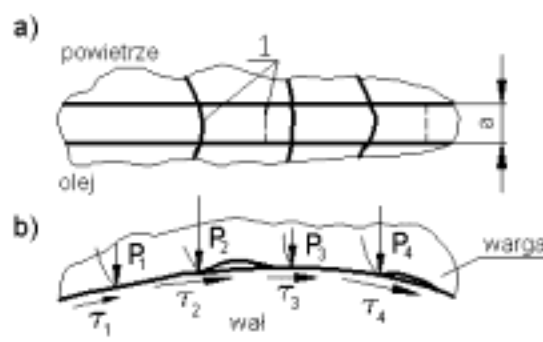
2.2. MODELE MECHANIZMU USZCZELNIANIA PIERŚCIENI WARGOWYCH

Bez zrozumienia mechanizmu utrzymywania cieczy w szczelinie i powstrzymywania jej przed wyciekaniem na stronę atmosferyczną bardzo trudno jest konstruować

uszczelnienia o możliwie niewielkich oporach tarcia. Z tego przekonania wynika znaczna liczba badań, jakie temu zagadnieniu poświęca się ostatnio na świecie. Brak powszechnie akceptowanej teorii uszczelniania pierścieni wargowych wynika przede wszystkim z ogromnych trudności prowadzenia obserwacji w obszarze styku o szerokości około 0,1 mm przy bardzo ograniczonym do niego dostępie. Ponadto znaczną przeszkodą w opracowaniu teorii jest duża liczba zmiennych parametrów decydujących o tym, czy uszczelnienie będzie szczelne czy też nie.

O ile utworzenie się warstwy smarowej pomiędzy powierzchnią wału i wargi jest stosunkowo łatwe do wyjaśnienia, o tyle mechanizm utrzymywania tej warstwy w obszarze powierzchni styku napotyka nadal na trudności. Aby warstwa smarowa mogła utworzyć się pomiędzy współpracującymi powierzchniami, musi w niej dojść do powstania ciśnienia hydrodynamicznego na tyle wysokiego, aby mogło ono zrównoważyć obciążenie wargi. Przyjmuje się, że w zbieżnych mikroszczelinach, utworzonych z nierówności na powierzchni wału i wargi wchodzących w styk, dochodzi do powstania ciśnienia hydrodynamicznego przy określonej prędkości obrotowej wału [7].

Na temat utrzymania tej warstwy w szczelinie i niedopuszczenia do jej wycieku na stronę atmosferyczną istnieje wiele hipotez. Jedną z pierwszych zaproponował Teaste, zakładając, że w początkowym okresie ruchu wału, pod wpływem siły tarcia, wargę zostaje wychylona w stopniu zależnym od jej sztywności. Następnie zostaje przemieszczona warstwa wierzchnia krawędzi uszczelniającej. Odcinki powierzchni wargi, wzdłuż których będą działały większe wartości naprężeń stycznych (τ_2 , τ_4 na rys. 8.), będą rozciągane. Ponieważ długość powierzchni styku wargi z wałem nie może ulec zmianie, dlatego odcinki krawędzi uszczelniającej obciążone mniejszymi naprężeniami stycznymi (τ_1 , τ_3) będą ściskane. Naprężenie ściskające działające w kierunku obwodowym będzie przeciwdziałać naprężeniu normalnemu, co musi doprowadzić do powstania rowków na powierzchni krawędzi uszczelniającej [73].



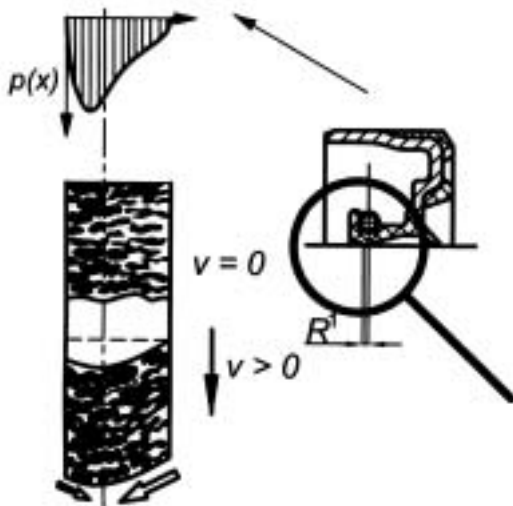
Rys. 8. Mechanizm tworzenia powierzchni pofalowanej na krawędzi uszczelniającej:

- a) widok powierzchni styku od strony wału,
- b) widok od strony olejowej; 1 – krawędź rowka

Stopień szczelności zależy od długości oraz od kąta pochylenia rowków w obszarze wlotu (od strony olejowej) i wylotu (od strony atmosferycznej) ze szczeliny. Autor niniejszej pracy wykazał, że do powstania takich rowków może dojść w sytuacji zmienności wartości obciążenia promieniowego P_{pr} w kierunku obwodowym [13]. W uszczelnieniu wykonanym z gumy o stosunkowo dużym module sprężystości $E = 9,4$ MPa zmienność obciążenia, wyrażona przez stosunek jego maksymalnej do minimalnej wartości, powinna wynosić $P_{pr \max}/P_{pr \min} = 1,4 \div 1,5$. Z przeprowadzonych pomiarów [1] wynika, że przeciętna zmienność obciążenia promieniowego po obwodzie uszczelnienia zawiera się w granicach $P_{pr \max}/P_{pr \min} = 1,1 \div 1,3$.

Podobny model mechanizmu zatrzymywania czynnika uszczelnianego w szczelinie przedstawił w swojej dysertacji Kammüller [42]. Różnica w stosunku do hipotezy,

jaka zaproponował Teaste, polega jedynie na tym, że Kammüller założył istnienie mikrofal (mikropęknięć) na powierzchni oryginalnej krawędzi uszczelniającej i przyjął, że biegną one w kierunku osiowym (rys. 9).



Rys. 9. Deformacja mikrofal wywołana naprężeniem stycznym w warstwie smarowej podczas pracy uszczelnienia

Z kształtu wargi wynika, iż po jej nasadzeniu na wałek dojdzie do powstania asymetrycznego rozkładu nacisku stykowego $p(x)$. Na podstawie wyników pomiarów można wnioskować, że maksymalna wartość nacisku przypada w odległości około 1/3 szerokości styku, licząc od strony olejowej. W warunkach ruchu wału dojdzie do deformacji mikrofal (mikropęknięć) stosownie do rozkładu naprężenia stycznego w warstwie smarowej, odpowiadającego rozkładowi nacisku stykowego.

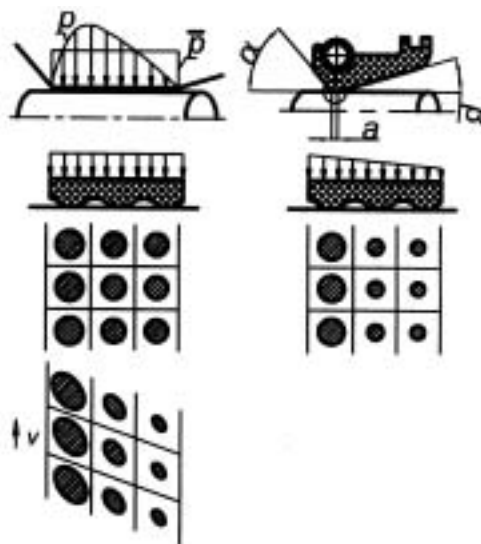
Przy odpowiednim pochyleniu odcinka mikrofal, usytuowanego po stronie atmosferycznej obszaru styku, dojdzie do zawrócenia warstwy smarowej w stronę olejową. Uszczelnienie, w którym wystąpi opisany mechanizm, będzie pracowało bez wycieku. Salant wykazał analitycznie, że uszczelnienie, w którym wystąpiła styczna deformacja mikrofal, pracuje bez wycieku; podał również optymalne wartości wysokości i podziałki mikrofal oraz ich pochylenia w stosunku do tworzącej wargi [61, 62, 63].

Śluszność teorii Kammüllera zależy od istnienia takiego asymetrycznego rozkładu nacisku stykowego w kierunku wzdłużnym, przy którym zdeformowany odcinek mi-

krofali po stronie powietrznej będzie znacznie dłuższy od odcinka po stronie olejowej. Gabelli wykazał, że po dotarciu się wargi współpracującej z wałem następuje wyrównanie się wartości nacisku stykowego na prawie całej szerokości styku [8]. Okazało się, że uszczelnienia te również pracowały bez wycieku. Wynika z tego, że uzyskanie szczelności nie jest uwarunkowane asymetryczną deformacją stycznej warstwy wierzchniej krawędzi uszczelniającej. Założenie o występowaniu na powierzchni oryginalnej wargi mikropęknięć (zamiast mikrofal) regularnie rozłożonych na powierzchni krawędzi uszczelniającej nieczęsto potwierdza praktyka. Stwierdzono, że mikrorowki, sztucznie naniesione na powierzchnię krawędzi uszczelniającej wargi, zostały szybko starte w czasie pracy uszczelnienia [39]. Pozostały jedynie bardzo krótkie ich odcinki po stronie atmosferycznej, w miejscu, gdzie wartość nacisku stykowego jest już bardzo mała.

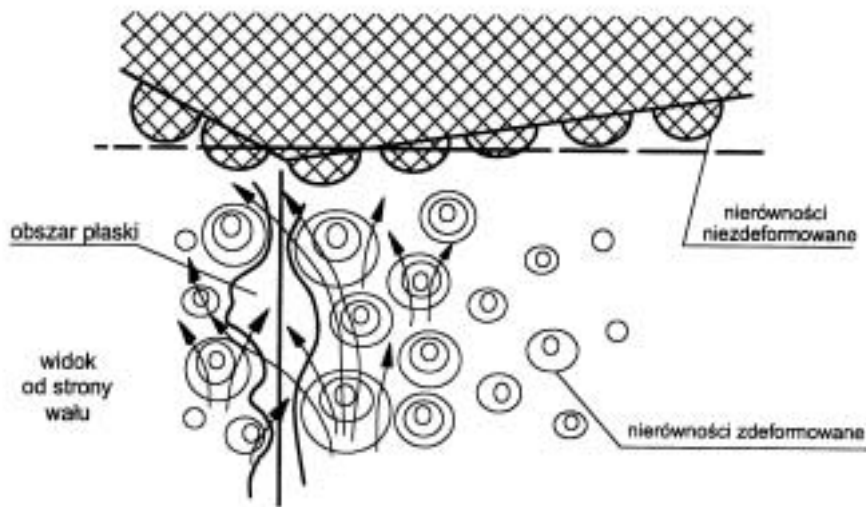
Horve stwierdził, że uszczelnienia o gładkiej powierzchni krawędzi uszczelniającej znacznie częściej pracowały z wyciekami aniżeli uszczelnienia o powierzchni pokrytej mikronierównościami [36]. Z kolei oddziaływanie na gładką powierzchnię wargi papierem ściernym, w celu uzyskania chropowatej powierzchni, przyniosło krótkotrwałą poprawę szczelności. Niestety, po pewnym okresie pracy uszczelnienia dochodziło znów do wygładzenia powierzchni i do zwiększenia wycieku czynnika uszczelnianego [37]. Wynika z tego, że w określonych warunkach styku wargi z wałem może dojść do wygładzenia powierzchni krawędzi uszczelniającej.

Propozycję mechanizmu uszczelniania, opartą na założeniu, iż na powierzchni wargi znajdują się mikronierówności, przedstawił Sponagel. Przyjął on, że zbiór nierówności poddany jest działaniu naprężeń stycznych (rys. 10.), które deformują poszczególne nierówności. Mikronierówności tworzą zbiór zorientowanych „mikrołpatek” zdolnych do zawrócenia czynnika na stronę olejową [68].



Rys. 10. Mechanizm uszczelniania oparty na założeniu deformacji stycznej zbioru mikronierówności na powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi

Bardzo podobny model do poprzedniego zaproponował Müller, przyjmując, że nierówności na powierzchni wargi mają postać półkul i że są one nieregularnie rozłożone – jest ich więcej po stronie atmosferycznej obszaru styku [53]. W obecności naprężeń stycznych dochodzi do deformacji nierówności i do wynikającego z tego przepływu czynnika wzdłuż boków odkształconych półkul w stronę olejową (rys. 11.).



Rys. 11. Mechanizm uszczelniania pierścienia wargowego oparty na stycznej deformacji nieregularnie rozłożonych nierówności

Jeżeli intensywność zawracania czynnika uszczelnianego ze strony powietrznej na olejową się zwiększa, to dochodzi do pogorszenia się warunków smarowania i do bezpośredniego styku części powierzchni krawędzi uszczelniającej z wałem. Ze względu na ograniczanie wartości oporu tarcia zbyt intensywne zawracanie czynnika ze strony powietrznej obszaru styku na olejową wydaje się niewskazane.

Z analiz przeprowadzonych przez Van Bavela [76] wynika, że przyjęcie przedstawionych modeli działania uszczelnień i dokonywanie na ich podstawie obliczeń prowadzi do otrzymania:

- oporu tarcia o rząd wielkości mniejszego od zmierzonych wartości,
- zbyt małej wartości średniego ciśnienia hydrodynamicznego, w porównaniu ze zmierzoną średnią wartością nacisku stykowego,
- większego natężenia przepływu czynnika ze strony powietrznej do olejowej od eksperymentalnie wyznaczonego.

Z porównania tego wyniku, że – oprócz oddziaływania hydrodynamicznego – w szczelinie musi dochodzić dodatkowo do innych oddziaływań pomiędzy współpracującymi powierzchniami wargi i wału.

2.3. WPŁYW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI WAŁU NA OPÓR TARCIA USZCZELNIENIA WARGOWEGO

Wszystkie przedstawione modele mechanizmu uszczelniania w pierścieniach wargowych budowano przy założeniu, że powierzchnia wału jest idealnie gładka. Jeżeli nawet brano pod uwagę chropowatość powierzchni wału [38], to i tak przyjmowano, że jest ona znacznie mniejsza od chropowatości powierzchni wargi.

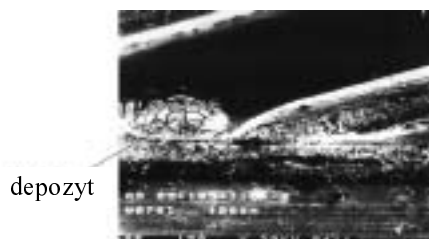
Do lat pięćdziesiątych panowała opinia, że powierzchnia wału współpracującego z uszczelnieniem wargowym powinna być polerowana, dopiero Deuring stwierdził, że polerowanie powierzchni wału prowadzi do cieplnego mikropęknięcia powierzchni wargi oraz do karbonizacji oleju [6].

Karbonizacja oleju jest skomplikowanym procesem, w którym można wyróżnić dwie fazy:

- a) chemicznej reakcji gumy z utlenionym olejem,
- b) degradacji oleju i silnego jego związania z powierzchnią gumy.

Gumę pokrywa warstwa zwęglonego oleju, z tym że wnika ona tym głębiej w gumę, im bardziej agresywne dodatki znajdują się w oleju. Warstwa ta powstaje najczęściej na stronie powietrznej wargi, usztywnia ona wargę i utrudnia powrót czynnika uszczelnianego na stronę olejową (rys. 12.).

Rys. 12. Warstwa zwęglonego oleju oraz termopęknięcia wargi po jej stronie powietrznej. Uszczelnienie pracowało w silniku spalinowym z turbodoładowaniem [24]



Symons zwrócił uwagę na wpływ odchyłki kształtu powierzchni wału na opory tarcia [69]. Badano wały o różnej liczbie fal i różnej ich amplitudzie. Oddziaływanie falistości powierzchni wału na przemieszczanie się wargi uszczelniającej rejestrowano za pośrednictwem wbitej do wargi igły adapteru stereofonicznego. Umożliwiło to rejestrację przemieszczenia wargi w kierunku promieniowym i obwodowym. Stwierdzono, że zwiększanie liczby fal przy stałej ich amplitudzie oraz amplitudy przy stałej liczbie fal powoduje spadek przemieszczenia się wargi w kierunku obwodowym. Oznacza to, że warunki smarowania pomiędzy wałem a wargą uległy poprawie, dzięki temu opór tarcia zmalał.

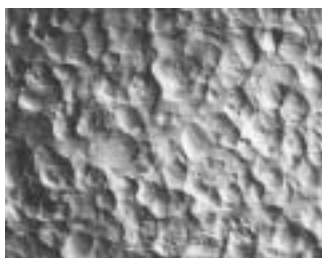
Z dwóch rodzajów przemieszczenia wargi ruch w kierunku obwodowym okazał się najbardziej zmienny; wynika to z braku ograniczeń w przemieszczaniu się. Ruch wargi w kierunku promieniowym był bardziej powtarzalny, a to za sprawą ograniczenia wynikającego z równomiernie rozłożonego obciążenia promieniowego wargi. W przypadku wystąpienia bezpośredniego (lokalnego) styku wargi z wałem może

dojść do tak zwanego ruchu *stick-slip* (przywierania i poślizgu) [31, 33]. To jest również przyczyną niestabilności ruchu wargi w kierunku obwodowym oraz okresowego wystąpienia wycieku czynnika uszczelnianego.

Kawahara charakteryzował chropowatość wału za pomocą parametrów R_t oraz S_m , przyjmując jako zalecane wartości: $R_t = 0,3 \div 0,4 \text{ } \mu\text{m}$, $S_m = 71 \div 125 \text{ } \mu\text{m}$ oraz ich iloraz $R_t/S_m = (0,24 \div 4,8) \cdot 10^{-2}$ [43].

Wpływ chropowatości powierzchni wału na opór tarcia uszczelnień wargowych najpełniej przedstawił Symons [70].

Powierzchnie szlifowanych wałów poddano obróbce polegającej na uderzaniu metalowymi kulkami zainkludowanymi w paskach nylonowych tworzących rodzaj szczotki. Mikrofotografię powierzchni wału otrzymanej po tym procesie przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Mikrofotografia powierzchni wałka poddanego po szlifowaniu uderzeniom stalowych kulek zainkludowanych w nylonowych paskach

Opór tarcia uszczelnień wykonanych z gumy poliakrylowej (ACM) współpracujących z wałami o powierzchni przedstawionej na rysunku 13. zmniejszył się 3-krotnie w porównaniu z oporem, gdy uszczelnienia te współpracowały z wałami o powierzchni szlifowanej. Oznacza to, że wierzchołki nierówności o małym pochyleniu boków i dużym promieniu zaokrąglenia zmniejszają deformację styczną gumy oraz poprawiają warunki smarowania. Z kolei badania uszczelnień z gumy silikonowej (MVQ) wykazały niewielką różnicę wartości oporów tarcia zarejestrowanych podczas współpracy z wałami o powierzchni szlifowanej i nagniatanej. Można podać dwa powody takiego rezultatu: guma silikonowa chłonie olej oraz charakteryzuje się znacznie mniejszym kątem strat wewnętrznych niż guma akrylowa. Symons pierwszy zwrócił uwagę na wpływ kształtu nierówności na opór tarcia oraz na potrzebę oceny chropowatości w kierunku obwodowym [70].

Johnston stwierdził, że tekstura powierzchni wału ma znaczący wpływ na opór tarcia i zaproponował stosowanie, zamiast powierzchni szlifowanych, powierzchni dogniatanych szklanymi kulkami lub nagniatanych rolkami. Niestety, nie podał ani parametrów chropowatości, ani ich wartości [40].

Gawliński zaproponował uwzględnienie kilku parametrów chropowatości powierzchni wału do oceny wpływu uszczelnienia wargowego na opór tarcia: średniego promienia zaokrąglenia wszystkich nierówności, skośności R_{sk} i kurtozy R_{ku} rozkładu nierówności, zredukowanej wysokości wierzchołków R_{pk} , średniej odległości pomię-

dzy wierzchołkami na średniej linii profilu S_m , średniego pochylenia profilu Δ_a oraz średniej falistości profilu λ_a . Parametry te określił dla kierunku obwodowego i poosiowego [18].

Qu w badaniach nad wpływem chropowatości powierzchni wałów na wystąpienie wycieku z uszczelnień stwierdził, że parametry R_{sk} , R_{ku} oraz R_v pozwalają odróżnić właściwą chropowatość od niewłaściwej [59]. Nie było wycieku, gdy uszczelnienia współpracowały z wałami o następujących parametrach chropowatości: $R_{sk} > -0,4$; $R_{ku} < 4,0$; $R_v < 3,8 \mu\text{m}$ oraz $R_a = 0,25 \div 0,50 \mu\text{m}$. Niestety, nie podał on, czy przeprowadzone pomiary chropowatości odnoszą się do kierunku obwodowego. W przeprowadzonej później analizie dyskryminacyjnej potwierdził istotność wpływu wymienionych parametrów na wystąpienie lub nie wycieku z uszczelnienia [60].

Stowarzyszenie Producentów Gumy (RMA) w swoim najnowszym opracowaniu podaje, że producenci wałów powinni przede wszystkim kontrolować wartości następujących parametrów: $R_a = 0,2 \div 0,4 \mu\text{m}$, $R_{pm} = 0,5 \div 1,25 \mu\text{m}$. Zalecono ponadto, by pochylenie śladu pozostawionego przez tarczę szlifierską na powierzchni wału nie przekraczało kąta $\gamma < 0^\circ \pm 0,05^\circ$ [66].

2.4. WPŁYW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI KRAWĘDZI USZCZELNIAJĄCEJ WARGI NA OPÓR TARCIA

Autorzy cytowanych prac oceniający wpływ rodzaju chropowatości powierzchni wargi koncentrowali się raczej na mechanizmie uszczelniania aniżeli na oporach tarcia. Oprócz wymienionych już prac należy wspomnieć o publikacji Thomasa na temat poszukiwania związku pomiędzy chropowatością oryginalnej i zużytej powierzchni wargi a wystąpieniem wycieku z uszczelnienia [74]. Wszystkie badane uszczelnienia pracowały na wale o szlifowanej powierzchni; jedyną podaną charakterystyką tej powierzchni była wysokość profilu $R_t \cong 0,5 \mu\text{m}$. Powierzchnie niektórych uszczelnień ulegały wygładzeniu, a inne stawały się bardziej chropowate po zaledwie 10-minutowym teście. Na podstawie analizy zebranych danych Thomas stwierdził, że chropowatość powierzchni oryginalnej nie wpływa bezpośrednio na szczelność uszczelnienia; zmierzone parametry chropowatości tej powierzchni zawierały się w granicach: $R_a = 0,32 \div 0,96 \mu\text{m}$, odwrotność średniego promienia krzywizny wierzchołków nierówności $1/\bar{r}_w = 18,9 \div 96,7 \mu\text{m}$ oraz dolin $1/\bar{r}_d = 24,9 \div 96,1 \mu\text{m}$, skośność rozkładu nierówności $R_{sk} = -1,6 \div 0,8$, a kurtoza $R_{ku} = 0,5 \div 7,8$.

W przypadku zużytej powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi najważniejszymi parametrami okazały się krzywizna profilu oraz poszczególnych nierówności, a także średnie pochylenie profilu Δ_a . Sama chropowatość jako taka miała stosunkowo nieznaczny wpływ na wystąpienie lub nie wycieku z uszczelnienia. Podkreślono jedynie znaczenie średniego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności na wyso-

kość tworzącej się warstwy smarowej oraz na stopień zwilżalności powierzchni gumy przez czynnik uszczelniany. Parametry chropowatości powierzchni zużytej były równe: $R_a = 0,20 \div 2,5 \mu\text{m}$, $1/\bar{r}_w = 15,9 \div 52,1 \mu\text{m}$, $1/\bar{r}_d = 16,5 \div 54,3 \mu\text{m}$, $R_{sk} = -0,99 \div 2,15$ oraz $R_{ku} = 0,02 \div 11,9$. W rezultacie bardzo krótkotrwałego procesu zużycia wargi wzrosła jej chropowatość – zwiększyły się: R_a , średni promień zaokrąglenia wierzchołków i dolin oraz rozrzut nierówności po wysokości profilu powierzchni.

2.5. WPŁYW RODZAJU ELASTOMERU NA OPÓR TARCIA USZCZELNIENIA

W analizowanej literaturze przedmiotu nie natrafiono na wyniki badań zmierzających do oceny wpływu rodzaju elastomeru na opór tarcia uszczelnienia wargowego współpracującego z metalowym wałem. Wydaje się, że podstawową przyczyną tego stanu rzeczy było przyjęcie przez badaczy a priori założenia o występowaniu tarcia płynnego w parze uszczelnienie–wał, a stąd o możliwym do pominięcia wpływie elastomeru na opór tarcia. W wielu publikacjach (m.in. [28]) podejmowano natomiast temat dotyczący analizy wpływu właściwości lepkosprężystych elastomerów na zdolność nadążania wargi za wałem obracającym się z biciem promieniowym.

W swojej podstawowej pracy na temat tarcia gum Grosch stwierdził, że siła zewnętrznej tarcia wynika z właściwości wewnętrznej struktury gumy [30], a więc, że współczynnik tarcia f jest proporcjonalny

$$f \sim C \operatorname{tg} \psi,$$

gdzie:

C – stała zależna od topografii powierzchni ciała twardszego,

$\operatorname{tg} \psi$ – tangens kąta strat wewnętrznych w gumie.

Persson rozwinął ten kierunek badań w odniesieniu do tarcia opon kół samochodowych po podłożu asfaltowym, stwierdzając, że podczas hamowania samochodu największy opór tarcia wystąpi przy częstotliwości ω cyklicznych deformacji powierzchni opony $\omega \sim v/\lambda$, przy której kąt strat wewnętrznych ψ będzie maksymalny [58]. Jeżeli przyjąć, że prędkość samochodu w chwili rozpoczęcia hamowania $v = 10 \div 100 \text{ m/s}$, a opisująca skalę długości jednostkowego styku opony z podłożem $\lambda = 0,1 \div 1 \text{ mm}$, to częstość $\omega = 10^4 \div 10^6 \text{ s}^{-1}$. Gumy przeznaczone na opony rzeczywiście przy tej częstości charakteryzują się największym „rozpraszaniem” energii.

Autorzy prac [52, 57] stwierdzili, że moc tracona na pokonanie oporu tarcia uszczelnień wargowych wykonanych z gumy silikonowej (MVQ) oraz fluorowej (FKM) była mniejsza niż w przypadku uszczelnień wykonanych z gumy nitylowej (NBR) lub z akrylowej (ACM). Wymienione gumy mają różne właściwości lepkosprężyste, a więc i różne wartości kątów strat wewnętrznych, przy określonej częstotliwości odkształcania. Ten wniosek zdawałby się potwierdzać tezę, że o tarcu gumy decyduje tarcie wewnętrzne.

Różnice w wartościach oporu tarcia uszczelnień wykonanych z wymienionych gum można by przypisać oddziaływaniu adhezyjnemu stykających się powierzchni [61]. Wiadomo, że współczynnik tarcia można przedstawić jako sumę dwóch składowych: adhezyjnej i deformacyjnej [47].

Autor niniejszej pracy stwierdził, podczas badania uszczelnień wargowych wykonanych z tego samego kauczuku bazowego (FKM), ale z różnymi wypełniaczami, istotne różnice pomiędzy wartościami oporu tarcia [16]. Należy podkreślić, że różne wypełniacze nie wpłynęły na zmianę wartości kąta strat wewnętrznych. To świadczyłoby o tym, że różnice oporu tarcia porównywanych uszczelnień wynikają zarówno z różnego oddziaływania adhezyjnego gum, jak i z różnej tekstury ich powierzchni. W tej sytuacji niezbędne było przeprowadzenie badań gum stosowanych do wyrobu uszczelnień wargowych zarówno pod kątem oceny składowej deformacyjnej współczynnika tarcia (Dodatek 1), jak i składowej adhezyjnej współczynnika tarcia [12].

2.6. PODSUMOWANIE

Z przedstawionej analizy literatury przedmiotu pracy można wyprowadzić następujące wnioski i stwierdzenia:

1. Uszczelnienia wargowe o gładkiej powierzchni krawędzi uszczelniającej częściej nie zachowują szczelności aniżeli te o powierzchni chropowatej. Nie wyjaśniono jednak przyczyny takiego zachowania się uszczelnień, brak jest również informacji na temat mechanizmu zużycia prowadzącego do wygładzenia lub do uczynienia powierzchni bardziej chropowatą.

2. Znaczny rozrzut wartości współczynnika tarcia wargi o wał przy stałej wartości liczby Herseya może świadczyć o tym, że na styku wargi-wał występują, oprócz tarcia płynnego, jeszcze inne rodzaje tarcia.

3. Nie odnotowano jednoznacznych zależności pomiędzy:

- zużyciem krawędzi wargi i wału a momentem tarcia,
- momentem tarcia a obciążeniem promieniowym wywieranym przez wargę na wał,
- wartościami momentu tarcia uszczelnień szczelnych i nieszczelnych.

4. Do wyjaśnienia mechanizmu uszczelniania pierścieni wargowych przyjęto modele uproszczone. Opór tarcia pierścieni działających na zasadzie zgodnej z przyjętym mechanizmem zawracania czynnika jest o rząd wielkości mniejszy, ciśnienie hydrodynamiczne jest mniejsze od średniego nacisku stykowego, a intensywność zawracania czynnika na stronę olejową jest większa niż w rzeczywistych uszczelnieniach.

5. Stwierdzono, że chropowatość powierzchni wału oddziałuje zarówno na opór tarcia, jak i na szczelność pierścienia wargowego. Nie podano jednak wartości odpowiednich parametrów chropowatości, w tym szczególnie dla kierunku obwodowego, decydujących o możliwości zredukowania oporu tarcia lub o powstaniu chropowatej powierzchni wargi.

6. Zwraca się uwagę na właściwości lepkosprężyste gumy i jej wpływ na wyciek w warunkach promieniowego bicia wału oraz łączy się te właściwości ze składową deformacyjną współczynnika tarcia. Brak jest informacji na temat składu gumy i jego wpływu na opór tarcia.

7. W żadnej pracy nie podjęto w sposób kompleksowy zagadnień związanych z powstawaniem oraz redukowaniem oporu tarcia elastomerowych uszczelnień wargowych współpracujących z wałami.

3. CEL PRACY

W monografii zawarto wyniki badań i ekspertyz opublikowanych przez autora w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych oraz poszerzono je o wybrany materiał badawczy z prac realizowanych na zamówienie producentów oraz użytkowników uszczelnień wargowych. Tematy zrealizowanych badań eksperymentalnych oraz teoretycznych tak planowano, aby dowieść słuszności następujących tez:

↳ uszczelnienie wargowe–wał to specyficzna para cierna, którą powinno się charakteryzować na podstawie:

- sposobu tworzenia powierzchni styku,
- rodzaju styku,
- postaci zużycia powierzchni krawędzi uszczelniającej,

↳ całkowity opór tarcia oraz zużycie powierzchni wargi są zdeterminowane przez lokalne warunki styku pomiędzy wargą a wałem,

↳ chropowatość powierzchni wału powinna zależeć od przewidywanych warunków styku wargi z wałem oraz od rodzaju i składu elastomeru,

↳ maksymalne zmniejszenie oporu tarcia uszczelnienia wargowego jest możliwe po jednoczesnym uwzględnieniu: odpowiedniego obciążenia promieniowego wargi do chropowatości powierzchni wału, adhezyjnego oddziaływania pomiędzy gumą a materiałem, z którego wykonano wał, oraz sztywności stycznej warstwy wierzchniej wargi.

Dowiedzenie słuszności przyjętych tez umożliwiło wyjaśnienie wielu wątpliwości, podkreślanych w literaturze przedmiotu, dotyczących rodzaju tarcia, zużycia oraz oporu ruchu, a także ułatwiło podanie dyrektyw dotyczących doboru cech konstrukcyjnych uszczelnienia wargowego oraz wału, zapewniających zredukowanie oporu tarcia.

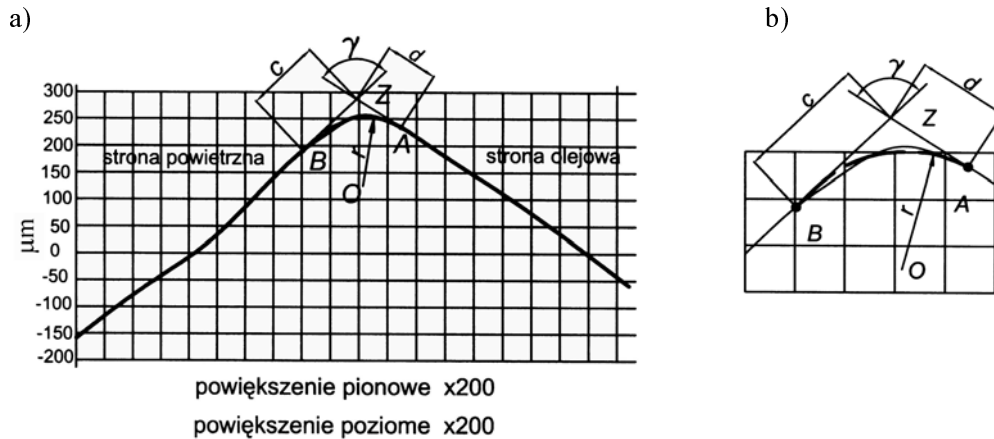
4. CHARAKTERYSTYKA STYKU WARGI Z WAŁEM W MAKROSKALI

Podczas osadzania uszczelnienia na wale dochodzi do rozciągnięcia wargi, jej obrotu względem punktu styku wargi z wałem oraz do jej przemieszczenia względem powierzchni wału. Ze złożoności tego odkształcenia wynika, że należałoby nie tylko ocenić, jak dotychczas, szerokość styku wargi z wałem, ale również sprawdzić, jakie jest położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej oraz jego położenie względem powierzchni wału. Takiej oceny dotychczas nie przeprowadzono, a to zapewne z powodu przyjęcia a priori założenia o symetrii styku względem płaszczyzny wyznaczonej przez przekrój poprzeczny wału.

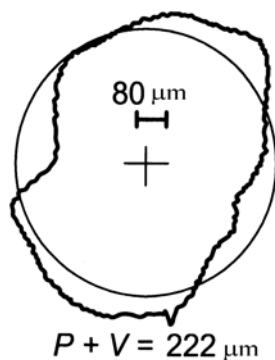
Warunki styku wargi z wałem rozpatrzono na dwóch poziomach: w makroskali – szerokość styku oraz położenie obszaru styku na wardze i względem powierzchni wału, w mikroskali – warunki styku z uwzględnieniem chropowatości obu stykających się powierzchni.

Podstawowe wielkości geometryczne krawędzi uszczelniającej wargi oceniano na podstawie jej profili, odwzorowanych za pomocą profilometru RTH Form Talysurf. W przypadku każdego uszczelnienia profile te wyznaczano w trzech miejscach (co 90°) na obwodzie wargi, przy jednakowym poziomym i pionowym powiększeniu 200 razy (rys. 14.)

Rzeczywistą krzywiznę krawędzi uszczelniającej aproksymowano odcinkiem łuku kołowego o promieniu r (rys. 14b). Krawędź uszczelniającą scharakteryzowano, podając dodatkowo stosunek odcinków $k = c/d$, będących odległością punktów styczności A, B łuku z prostymi od punktu przecięcia Z ramion kąta wierzchołkowego γ . Iloraz k jest miarą odchylenia rzeczywistej krzywizny krawędzi uszczelniającej od łuku kołowego; odnosi się go szczególnie do powietrznej strony krawędzi uszczelniającej. W grupie badanych uszczelnień mierzone wielkości geometryczne krawędzi uszczelniającej zawierały się w przedziałach: $100,1^\circ \leq \gamma \leq 101,4^\circ$; $0,06 \leq r \leq 0,08$ mm, $1,13 \leq k \leq 1,52$. Mierzone po promieniu rozciągnięcie wargi wynosiło $1,0 \leq \delta_0 \leq 1,25$ mm; lokalne zmiany rozciągnięcia wargi wynikały z odchyłki od kołowości, wyrażonej przez odległość maksymalnego i minimalnego położenia krawędzi (tzw. $P + V$) od koła zasadniczego (rys. 15.).



Rys. 14. Profil krawędzi uszczelniającej wargi i oznaczenia wybranych wielkości geometrycznych:
 a) widok ogólny, b) fragment w powiększeniu, linia ciągła – rzeczywisty profil,
 linia kreskowa – profil aproksymowany odcinkiem łuku kołowego



Zmienność odchyłki od kołowości w badanej populacji 25 uszczelnień wynosiła $0,105 \leq P + V \leq 0,526$ mm, co oznacza, że lokalne rozciągnięcie wargi może się różnić od przeciętnego rozciągnięcia o $5 \div 25\%$.

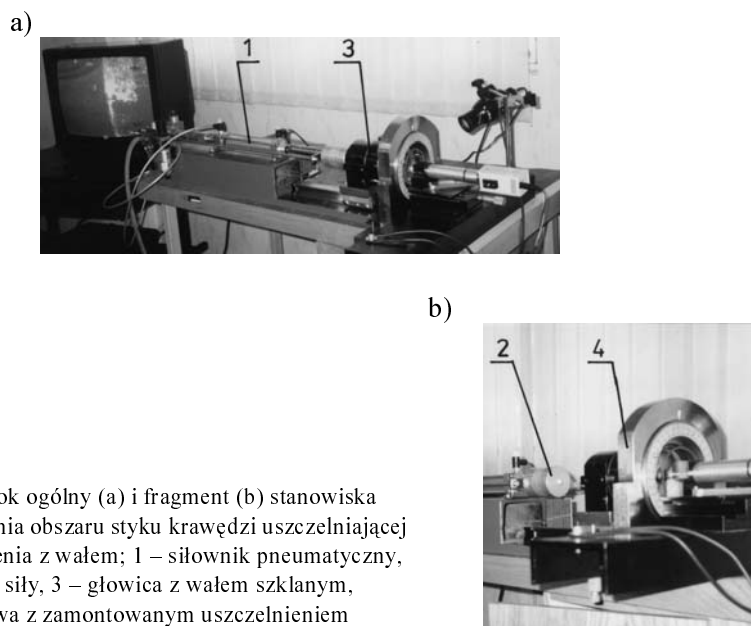
Rys. 15. Przebieg odchyłki od kołowości krawędzi uszczelniającej w jednym z badanych uszczelnień

4.1. POŁOŻENIE OBSZARU STYKU NA KRAWĘDZI USZCZELNIAJĄCEJ

Aby ocenić położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wargi należało zaprojektować i wykonać odpowiednie stanowisko badawcze oraz opracować metodę pomiaru. Główną częścią stanowiska jest głowica wraz z cylindrem szklanym symulującym wał (rys. 16).

Głowicę 3 skonstruowano tak, aby osadzony w niej szklany wałek mógł być obracany, unieruchamiany oraz by możliwa była zmiana jego bicia promieniowego. Siłownik pneumatyczny 1 przesuwa głowicę 3, osadzoną na prowadnicy kulkowej. Siłę niezbędną do wsunięcia wału szklanego w badany pierścień uszczelniający mierzono czujnikiem siły 2 o zakresie pomiarowym $0 \div 15$ N, umieszczonym pomiędzy siłowni-

kiem a głowicą. Badane uszczelnienie osadzono w specjalnej obudowie ułożyskowanej w precyzyjnym łożysku kulkowym. Dzięki takiemu rozwiązaniu uszczelnienie można obracać razem z wałem szklanym lub względem niego. Bicie poosiowe gniazda pod uszczelnienie $\leq 0,01$ mm, a maksymalne bicie promieniowe uszczelnienia względem szklanego wału $\leq 0,02$ mm.



Rys. 16. Widok ogólny (a) i fragment (b) stanowiska do oceny położenia obszaru styku krawędzi uszczelniającej wargi uszczelnienia z wałem; 1 – silownik pneumatyczny, 2 – czujnik siły, 3 – głowica z wałem szklanym, 4 – obudowa z zamontowanym uszczelnieniem

Układ optyczny¹⁾ o powiększeniu do 450 razy osadzono na stoliku mikroskopowym, umożliwiającym przesuwanie obiektywu równolegle lub prostopadle do osi uszczelnienia. Obraz obszaru styku wargi ze szklanym wałem, przesyłany na ekran monitora poprzez CCD kamerę, może być zarejestrowany na taśmie wideo.

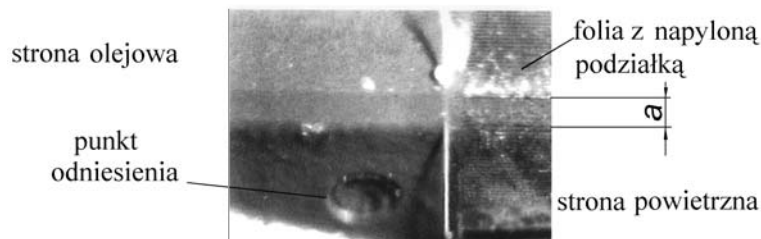
Wały o średnicy 85 i 88 mm wykonano z ołowiowego szkła kryształowego. Odchyłki od kołowości na średnicy wewnętrznej i zewnętrznej wałów wynosiły odpowiednio 10 oraz 16 μm . Chropowatość powierzchni zewnętrznej wałów $R_a = 0,004$ μm wzdłuż tworzącej oraz $R_a = 0,003$ μm w kierunku obwodowym.

4.1.1. METODA POMIARU

Metoda pomiaru polegała na wykonaniu, w trzech miejscach na obwodzie wargi, punktów odniesienia, względem których oceniano położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej. W celu pomiaru tego położenia zastosowano ultracienką i nierozciągliwą folię (Mylar, grubość $3 \div 5$ μm) z napyłoną skalą co 0,01 mm (rys. 17.). Wąs-

¹⁾ Układ optyczny skonstruował i wykonał dr J. Zarówny.

kie pasemka tej folii (szerokości 0,7 mm) przyklejano punktowo do wargi, możliwie blisko miejsca zaznaczonego punktu odniesienia. „Punktem” tym jest krawędź dołka wykonanego za pomocą promienia laserowego na wardze po jej stronie powietrznej. Moc promienia i czas ekspozycji dobierano doświadczalnie dla każdego rodzaju gumy tak, aby otrzymać wgłębienia o średnicy do 0,1 mm, leżące możliwie blisko przewidywanego obszaru styku.



Rys. 17. Obszar styku wargi z wałem.

Widoczny jest punkt odniesienia oraz (na prawo od niego) folia z napyłoną podziałką

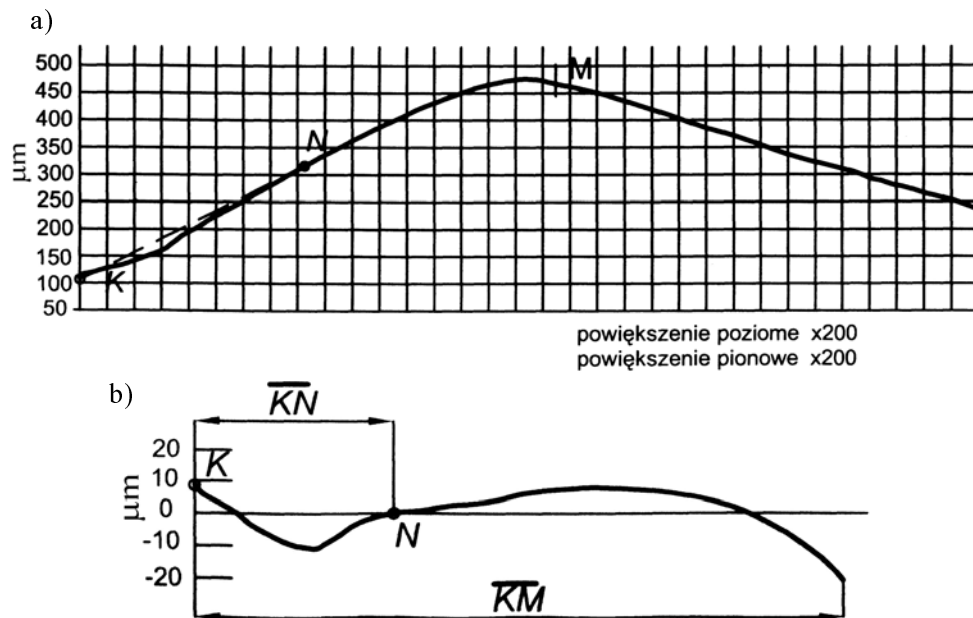
Z widocznej na ekranie monitora podziałki odczytywano odległość krawędzi styku (tej od strony powietrznej) od punktu odniesienia, a szerokość styku wargi z wałem – ze śruby mikrometrycznej, przesuając obraz styku względem linii odniesienia zaznaczonej na ekranie monitora.

Po zanotowaniu danych w trzech miejscach na obwodzie uszczelnienie demontowano, a następnie odwzorowywano profil krawędzi uszczelniającej na profilometrze. Stylus profilometru prowadzono przez środek dołka, w ten sposób otrzymywano profil wraz z „punktem”.

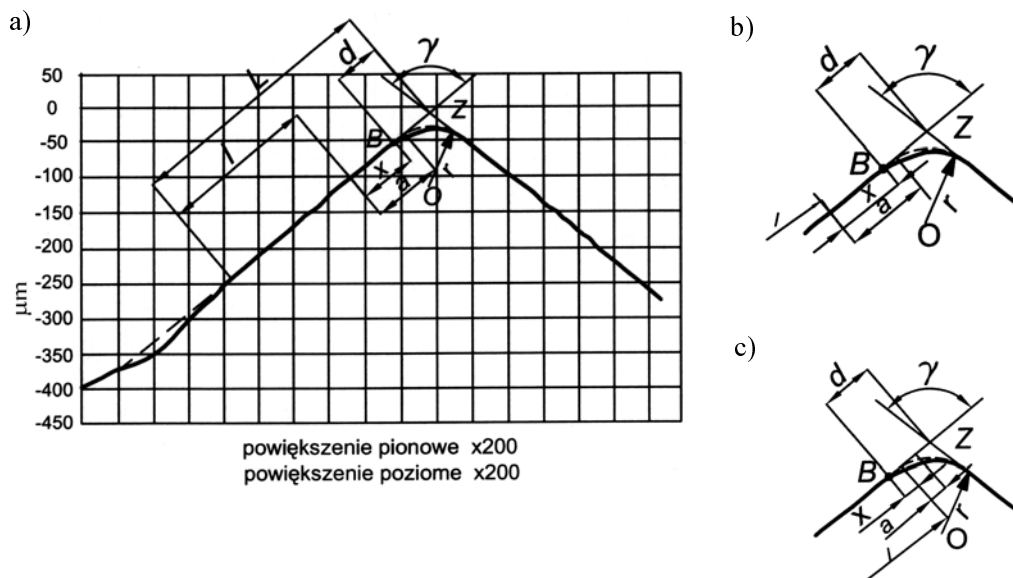
Odwzorowany profil (rys. 18a), zależnie od potrzeb, można elektronicznie obracać i powiększać w celu ułatwienia odczytu odcinka \overline{KN} (rys. 18b). Zmierzoną długość odcinka \overline{KN} – po uwzględnieniu pochylenia boku – przenoszono na poprzedni profil (rys. 18a), w celu wyznaczenia położenia punktu N . Odległość krawędzi styku od punktu N zmierzono uprzednio na stanowisku pokazanym na rysunku 17.

Położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wyrażono w zależności od szerokości styku wargi z wałem w analizowanym miejscu. W ten sposób można określić, jaka część x tego styku znajduje się na prostoliniowej części krawędzi uszczelniającej (na lewo od punktu styczności B ; $x > 0$ – rys. 19.), a jaka na krzywoliniowej (na prawo od punktu B ; $x < 0$).

Dodatnia wartość ilorazu x/a oznacza, że styk jest w części lub w całości (w przypadku $x/a = 1$) na prostoliniowej części krawędzi uszczelniającej; w przypadku ujemnej wartości x/a obszar styku znajduje się w całości na krzywoliniowej części krawędzi uszczelniającej. Zastosowano tu pewne uproszczenie: mówiąc o położeniu części obszaru styku na krzywoliniowej części krawędzi, odnosimy ją jednak do odcinka BZ .



Rys. 18. Odwzorowanie profilu krawędzi uszczelniającej, które stanowi podstawę do oceny położenia obszaru styku: a) naturalny profil krawędzi, b) elektronicznie zmodyfikowany profil krawędzi



Rys. 19. Profil krawędzi uszczelniającej wargi z oznaczonymi wielkościami mierzonymi (L, l, a) i obliczonymi (d): a) widok ogólny, b) część styku x na prostej części krawędzi, c) styk na krzywoliniowej części krawędzi

4.1.2. WYNIKI POMIARÓW

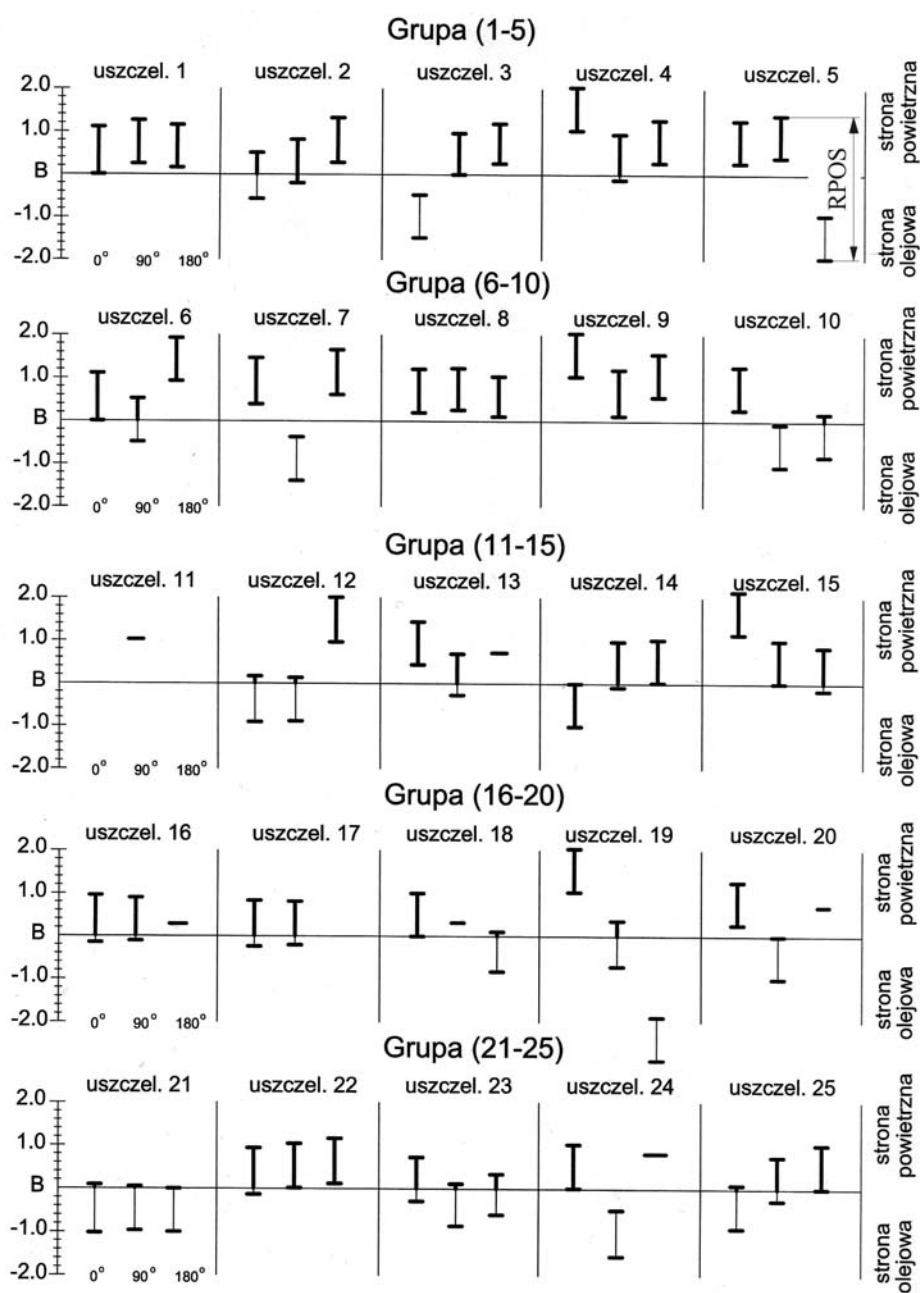
Na podstawie uzyskanej oceny położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wargi utworzono zbiorcze wykresy dla badanych uszczelnień. Zaznaczone odcinki przedstawiają jednostkową szerokość styku w danym miejscu pomiaru oraz jej położenie względem punktu B dzielącego krawędź uszczelniającą na część prostoliniową (powyżej punktu B , po stronie atmosferycznej) oraz krzywoliniową (poniżej punktu B , po stronie olejowej). Utworzono wykresy położenia obszaru styku dla uszczelnień ze zdjętą (rys. 20.) oraz z nałożoną sprężyną (rys. 21.).

Sposób interpretacji wykresu przedstawiono przykładowo dla uszczelnienia nr 4 (rys. 20.): w położeniu oznaczonym przez 0° obszar styku leży wyłącznie na prostoliniowym odcinku krawędzi uszczelniającej w odległości $1,4a$ od punktu B , w położeniu oznaczonym przez 90° – odcinek obszaru styku o szerokości $0,8a$ jest usytuowany na części prostoliniowej oraz w położeniu oznaczonym przez 180° cały obszar styku rozpoczyna się na odcinku prostoliniowym w odległości $0,2a$ od punktu B . Okazuje się, że obszar styku wargi z wałem na krawędzi uszczelniającej, dla większości uszczelnień ze zdjętą sprężyną, przypada na części prostoliniowej (po tzw. stronie powietrznej) wargi.

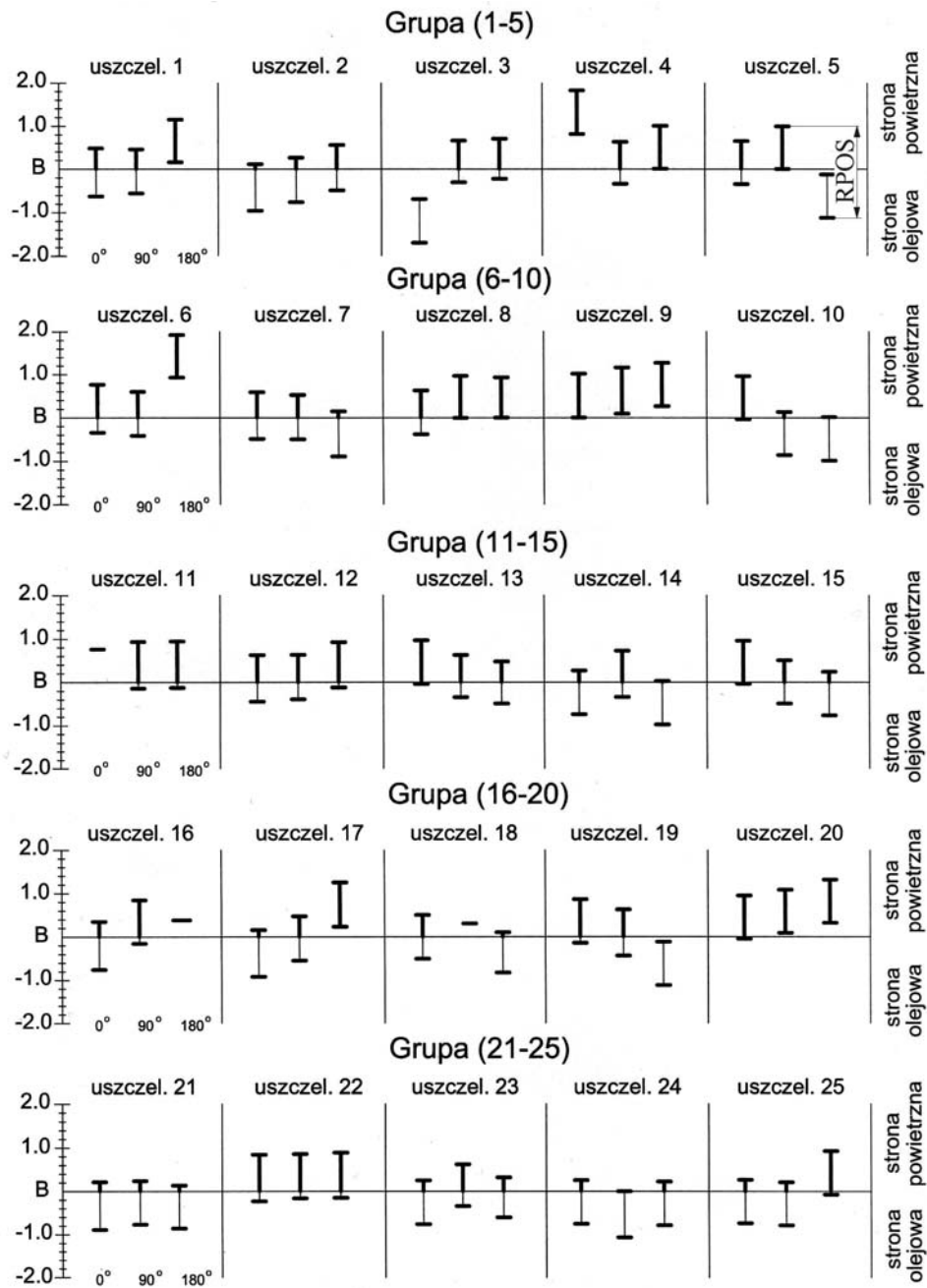
W uszczelnieniach z założoną sprężyną obszar styku w większości badanych uszczelnień przesuwają się w stronę odcinka krzywoliniowego wargi (rys. 21.).

Wartość rozstępu pomiędzy dwoma skrajnymi położeniami obszaru styku na krawędzi uszczelniającej może stanowić kryterium podobieństwa warunków styku w porównywanych uszczelnieniach. Na przykład uszczelnienie nr 5 (rys. 21.), w którym rozstęp położenia obszaru styku (RPOS) jest równy 2,4-krotnej szerokości styku, nie jest podobne do uszczelnienia nr 22, w którym praktycznie położenie obszaru styku jest symetryczne względem osi uszczelnienia (RPOS = $0,2a$). Występowanie RPOS w większości badanych uszczelnień oznacza, że nie można zakładać w jakichkolwiek analizach symetrii warunków styku względem osi uszczelnienia, a stąd również i symetrii rozkładu nacisku na szerokości styku. Nacisk na części prostoliniowej krawędzi uszczelniającej będzie się różnił, zarówno co do wartości, jak i rozkładu, od nacisku występującego na części krzywoliniowej. Sprężyna dociskowa odgrywa pozytywną rolę nie tylko dlatego, że stabilizuje wartość siły promieniowej, ale także dlatego, że przyczynia się do zmniejszenia wartości RPOS. W uszczelnieniach bez sprężyny rozstęp położenia wynosił od $0,3a$ do prawie $5a$, a w uszczelnieniach ze sprężyną jego maksymalna wartość nie przekracza $2,5a$. Bezwzględna wartość RPOS można zmniejszyć przez zmniejszenie szerokości styku wargi z wałem; na przykład zmniejszając promień krzywizny krawędzi uszczelniającej. Posmarowanie powierzchni wargi olejem zmniejsza nieco RPOS i siłę tarcia występującą podczas osadzania uszczelnienia na wale.

Przyczyn braku symetrii styku wargi z wałem względem osi uszczelnienia poszukiwano w położeniu krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniu przed nałożeniem go na wał. Na rysunku 22. pokazano położenie krawędzi uszczelniającej w wybranych uszczelnieniach względem płaszczyzny odniesienia, przechodzącej umownie przez punkt 0° krawędzi i prostopadłej do osi wału.



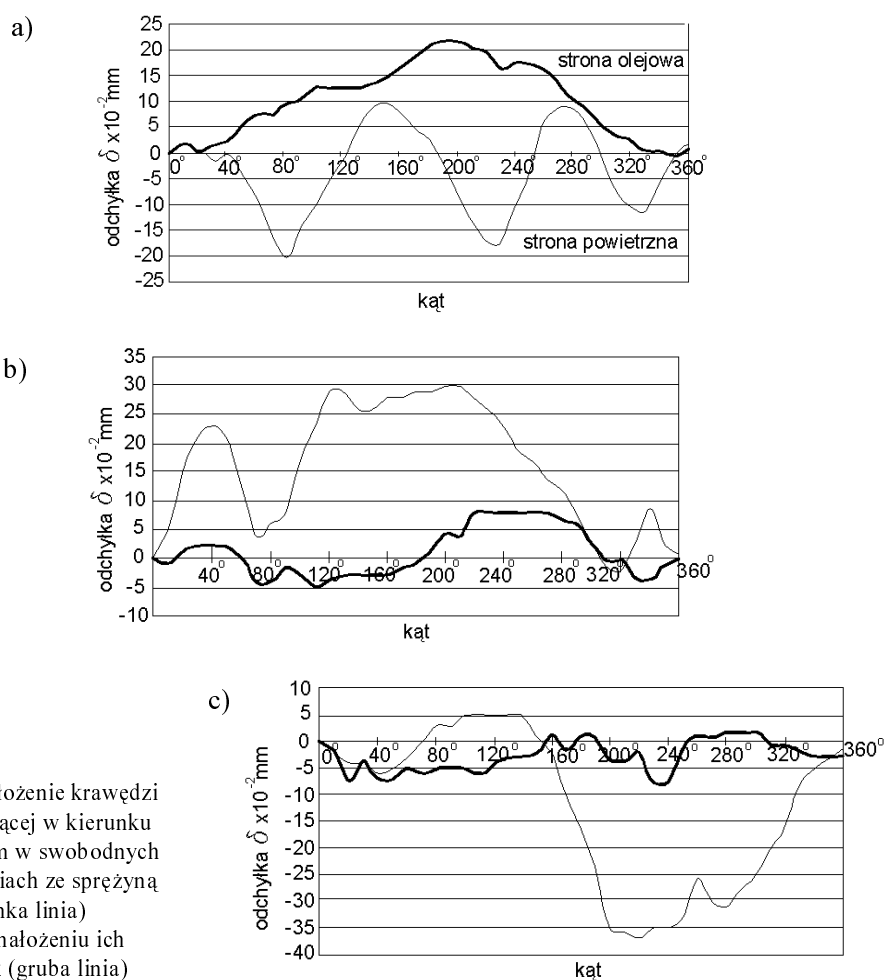
Rys. 20. Względne położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach bez sprężyny dociskowej; warga sucha (gruba linia odcinka – styk po stronie powietrznej, cienka linia odcinka – po stronie olejowej) [20]



Rys. 21. Względne położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach ze sprężyną dociskową; warga sucha (gruba linia odcinka – styk po stronie powietrznej, cienka linia odcinka – styk po stronie olejowej)

Położenie krawędzi uszczelniającej w kierunku obwodowym mierzono na stanowisku przedstawionym na rysunku 16; uszczelnienie obracano względem obiektywu i odczytywano co 10° obwodu aktualne położenie krawędzi, odnosząc je do położenia odniesienia 0° . Wykresy położenia krawędzi w każdym z badanych uszczelnień (rys. 22.) budowano w ten sposób, że na osi odciętych odkładano położenie punktu pomiaru, a na osi rzędnych wartość odchylenia krawędzi. Jeżeli krawędź była odchylona w stronę olejową, to sytuowano ją powyżej osi odciętych, jeżeli przemieszczenie krawędzi biegło w stronę powietrzną – poniżej.

Z badań populacji 50 uszczelnień (od jednego producenta) wynika, że w uszczelnieniach swobodnych bez sprężyny krawędź uszczelniająca wargi jest wychylona w stronę olejową. Po nałożeniu sprężyny na uszczelnienie wychylenie krawędzi w stronę olejową zmalało lub została ona przemieszczona na stronę powietrzną.



Rys. 22. Położenie krawędzi uszczelniającej w kierunku obwodowym w swobodnych uszczelnieniach ze sprężyną (cienka linia) oraz po nałożeniu ich na wałek (gruba linia)

Po wsunięciu wału w uszczelnienia dochodziło do zmiany położenia krawędzi uszczelniającej, przy czym stwierdzono, że:

- wargę może się przemieszczać zgodnie z kierunkiem ruchu wału (rys. 22a),
- wargę może się przemieszczać w kierunku przeciwnym do ruchu wału (rys. 22b),
- część obwodu wargi może się przemieszczać zgodnie z ruchem wału, a część – przeciwnie (rys. 22c).

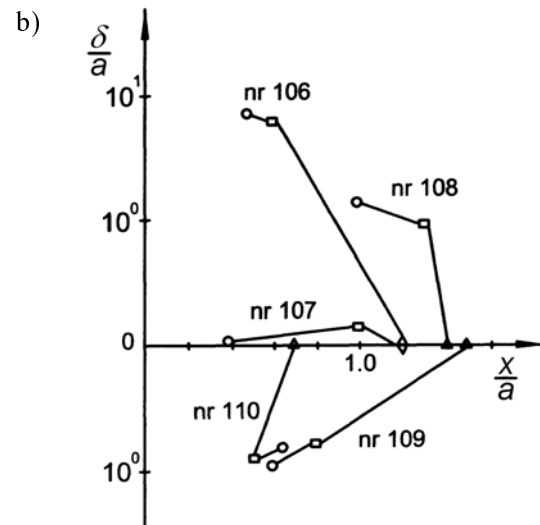
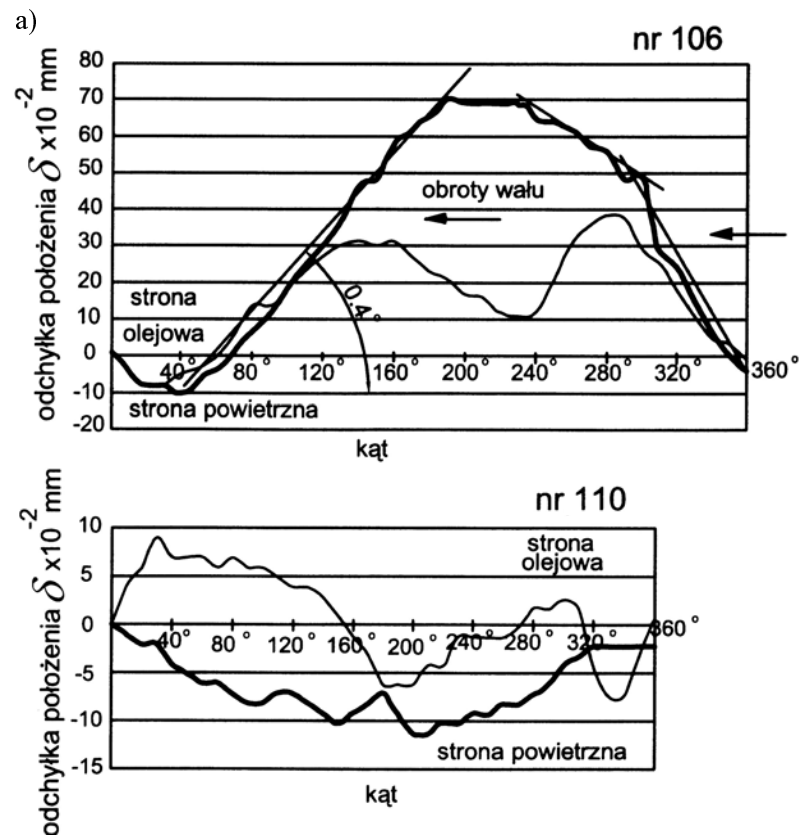
W uszczelnieniach, w których krawędź uszczelniająca była przemieszczona w stronę powietrzną, podczas instalacji wału dochodziło najczęściej do ruchu wargi zgodnego z ruchem wału. Jeżeli natomiast w uszczelnieniu swobodnym krawędź była przemieszczona w stronę olejową, to podczas instalacji wału dochodziło do ruchu wargi w kierunku przeciwnym do ruchu wału. Ten ostatni przypadek był korzystny, bowiem amplituda wychylenia krawędzi względem płaszczyzny odniesienia malała, a więc dochodziło do poprawy stopnia symetrii styku w kierunku obwodowym. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że do asymetrii warunków styku względem osi uszczelnienia dochodzi z następujących powodów:

- zmiennego położenia krawędzi uszczelniającej wargi w kierunku osiowym przed nałożeniem uszczelnienia na wał,
- przemieszczania się krawędzi wargi względem powierzchni wału podczas montażu uszczelnienia,
- wzajemnego współdziałania poszczególnych części obwodu wargi podczas ruchu wału.

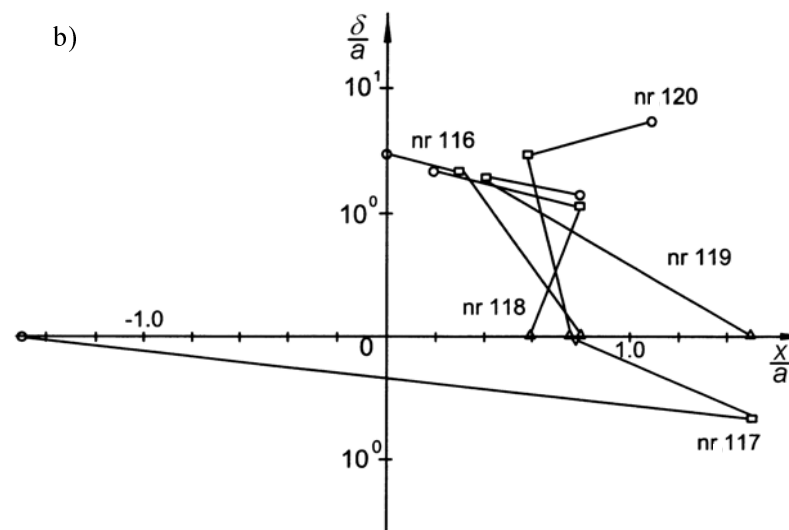
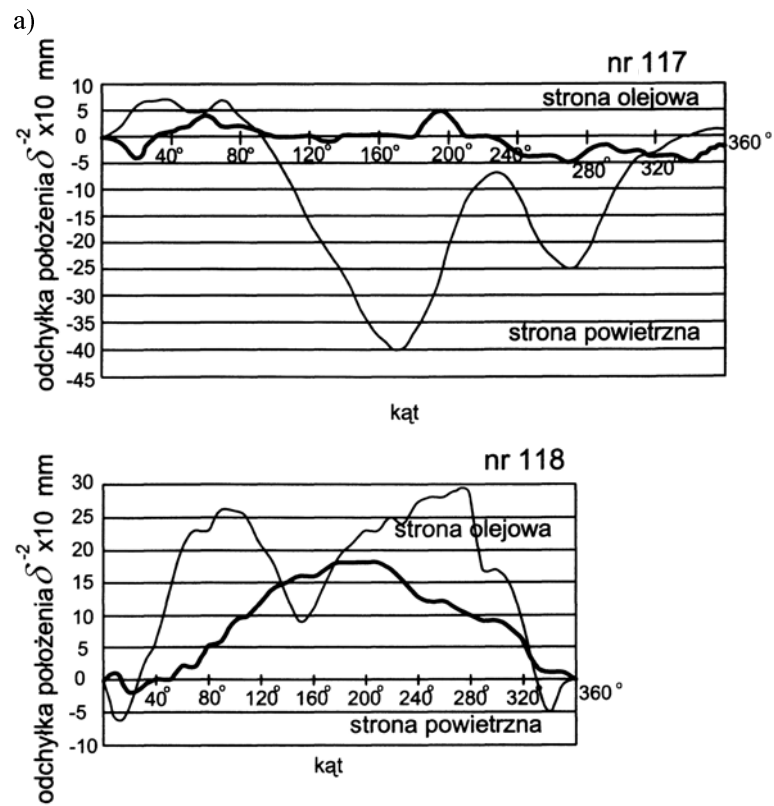
Nie można zatem twierdzić, że im bardziej wargę swobodnego uszczelnienia przesunięta jest w stronę olejową, tym większe jest prawdopodobieństwo, że obszar styku wystąpi na prostoliniowej części krawędzi uszczelniającej, z dala od punktu styczności *B*. Położenie obszaru styku zależy bowiem w dużym stopniu od kinematyki ruchu wargi względem wału.

4.2. POŁOŻENIE OBSZARU STYKU NA POWIERZCHNI WAŁU

Na podstawie analizy warunków styku wargi z wałem stwierdzono potrzebę sprawdzenia położenia obszaru styku na powierzchni wału. 25 uszczelnień badano na opisanym już stanowisku, a ich wyniki przedstawiono na wykresach (np. na rysunkach 23. i 24.) [23]. Na osi rzędnych podano wartości wychylenia wargi względem płaszczyzny prostopadłej do osi wału i przechodzącej przez punkt styku wargi z wałem oznaczonym przez 0° ; wartości te odniesiono do szerokości styku wargi z wałem w danym miejscu. Z kolei na osi odciętych odłożono względne położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wargi.



Rys. 23. Położenie krawędzi uszczelniającej oraz obszaru styku w uszczelnieniach wykonanych z gumy FKM S-490:
 a) położenie krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach nr 106 oraz 110, b) położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w funkcji przemieszczenia na powierzchni wału

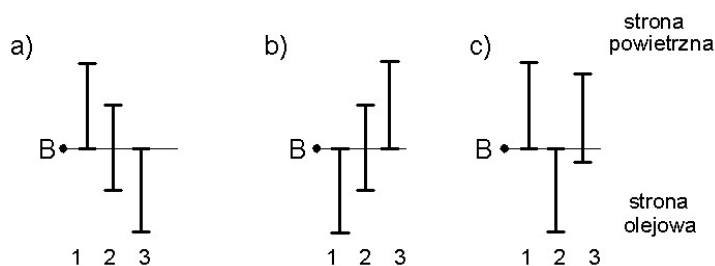


Rys. 24. Położenie krawędzi uszczelniającej oraz obszaru styku w uszczelnieniach z gumy FKM S-450: a) położenie krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach nr 117 i 118, b) położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w funkcji przemieszczenia na powierzchni wału

Na podstawie analizy bardzo wielu wykresów sformułowano następujące wnioski:

- duży rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w większości stwierdzonych przypadków koresponduje z małym przemieszczeniem wargi względem powierzchni wału (np. uszczelnienie nr 107 – rys. 23b; uszczelnienie nr 117 – rys. 24a),
- jeżeli położenie obszaru styku rozpoczyna się na części krzywoliniowej krawędzi uszczelniającej, to wartość rozstępu jest zwykle znaczna ($x/a > 2$ dla uszczelnienia nr 117 – rys. 24),
- ruchowi wargi w kierunku przeciwnym do ruchu wału odpowiada mała wartość rozstępu położenia obszaru styku (uszczelnienie nr 110 – rys. 23a, nr 118 – rys. 24a),
- przy maksymalnym przemieszczeniu wargi δ/a względem powierzchni wału pewna część obwodu wargi może być pochylona pod kątem do $0,6^\circ$ względem kierunku ruchu wału.

Obserwacja zależności szerokości styku a wargi z wałem od położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej pozwala na stwierdzenie, iż zależność taka istnieje. Okazało się, że w większości badanych przypadków szerokość styku zależała od sekwencji położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej (rys. 25.). Najmniejszą szerokość stwierdzano w punkcie 1, gdy kolejność położenia obszaru styku była taka, jak na rysunku 25a, b. W tym przypadku nie jest istotne, czy obszar styku w położeniu 0° leży na krzywo- lub prostoliniowej części krawędzi uszczelniającej.



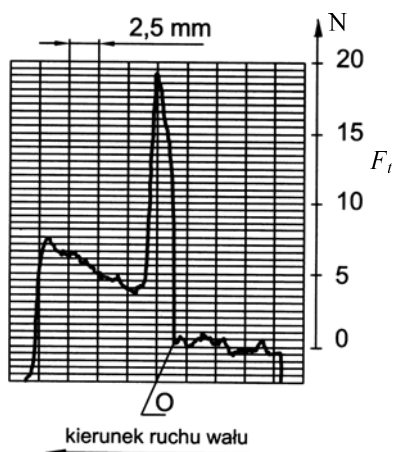
Rys. 25. Kolejność położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wargi

Jeżeli obszar styku leży w sposób odpowiadający schematowi przedstawionemu na rysunku 25c, to szerokość styku we wszystkich trzech miejscach zwykle jest taka sama. Wydaje się, że można przyjąć, że szerokość styku wargi z wałem zależy również od wzajemnego oddziaływania na siebie poszczególnych części wargi podczas wsuwania wału w uszczelnienie.

4.2.1. SIŁA TARCIA PODCZAS OSADZANIA USZCZELNIENIA NA WALE

W większości ciernych par ślizgowych zależność siły tarcia od obciążenia normalnego przebiega tak, jak zależność zmiany rzeczywistej powierzchni styku od siły normalnej. W uszczelnieniach wargowych związek ten nie występuje, a to za sprawą

złożonego procesu tworzenia się powierzchni styku wargi z wałem. Większe obciążenie promieniowe, jakie wargę wywiera na wał, nie musi oznaczać większej szerokości styku i większej siły tarcia podczas osadzania wału w uszczelnieniu. W uszczelnieniu, w którym zaobserwowano ruch wargi w kierunku przeciwnym do ruchu wału,

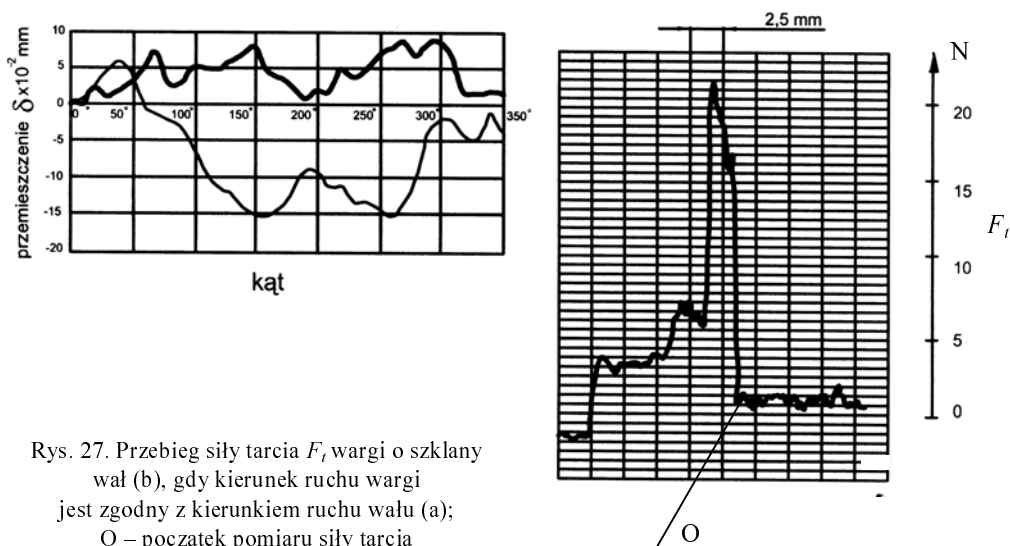


przebieg siły tarcia ma charakter rosnący (rys. 26.). Maksymalna wartość siły wynika z odkształcenia wargi na sfazowaniu krawędzi wału szklanego. Siła się zmniejsza, gdy wargę zaczyna się stykać z powierzchnią cylindryczną. Od tej chwili siła tarcia się zwiększa za sprawą ruchu wargi w stronę przeciwną do kierunku ruchu wału.

Rys. 26. Przebieg siły tarcia F_t wargi o szklany wał, gdy wargę przemieszcza się w kierunku przeciwnym do ruchu wału; O – początek pomiaru siły tarcia

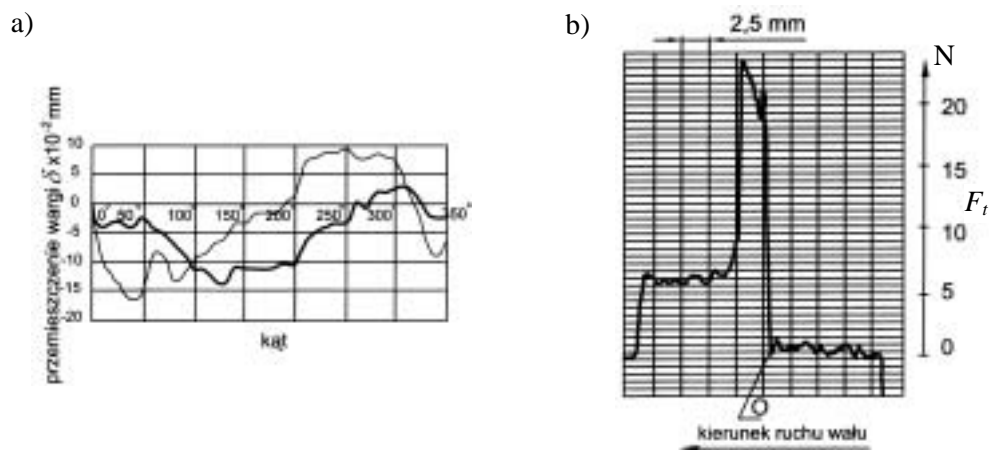
Na podstawie przebiegu siły tarcia można zatem wnosić o kinematyce wargi. Na rysunku 27. przedstawiono zmianę siły tarcia odpowiadającą przypadkowi, kiedy wargę przemieszczała się (bądź była przemieszczana przez wał) w kierunku zgodnym z ruchem wału. W tym przypadku siła tarcia wyraźnie maleje.

a)



Rys. 27. Przebieg siły tarcia F_t wargi o szklany wał (b), gdy kierunek ruchu wargi jest zgodny z kierunkiem ruchu wału (a); O – początek pomiaru siły tarcia

Jeżeli część obwodu wargi przemieszcza się w kierunku ruchu wału, a pozostała część wargi – przeciwnie do niego, to siła tarcia najpierw się zwiększa, a następnie maleje (rys. 28.).



Rys. 28. Przebieg siły tarcia F_t wargi o szklany wał (b) w sytuacji złożonego ruchu wargi względem wału (a); O – początek pomiaru siły tarcia

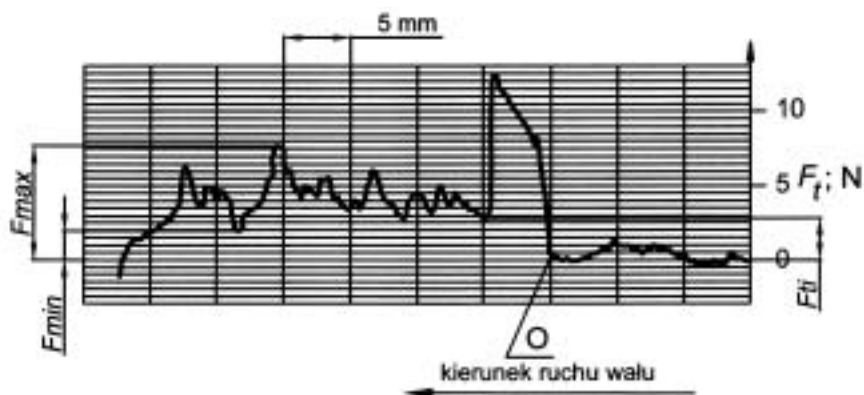
Na siłę tarcia wargi o wał szklany, oprócz kinematyki ruchu wargi, duży wpływ ma również oddziaływanie adhezyjne pomiędzy gumą a wałem. W rzeczywistości uszczelnienie wargowe współpracuje z wałem stalowym, a nie szklanym. Założono, że przebieg siły tarcia wargi o wał stalowy będzie określał, podobnie jak w przypadku wału szklanego, ruch wargi. Siłę tarcia wargi o wał charakteryzowano za pomocą wartości F_{ti} oraz współczynnika zmienności siły tarcia

$$\kappa = \frac{F_{t\max} - F_{t\min}}{F_{t\max}}$$

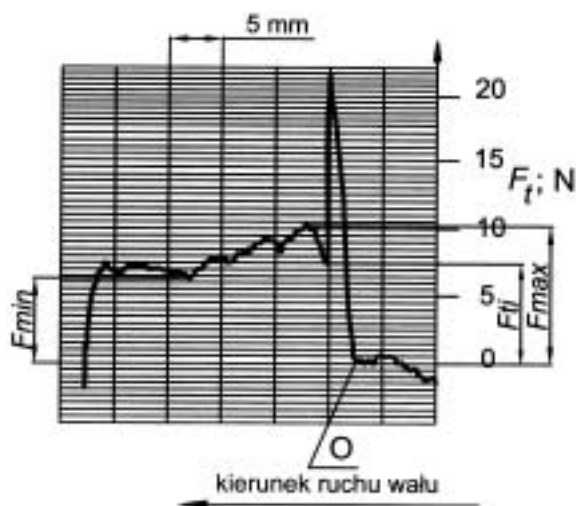
Siła F_{ti} jest siłą określoną w chwili, gdy wargę minęła sfazowanie krawędzi wału stalowego, natomiast współczynnik κ charakteryzuje zmienność siły tarcia w trakcie ruchu względnego wargi i wału.

Okazało się, że im gładziej jest powierzchnia wału stalowego, tym zmienność siły tarcia jest większa (rys. 29.÷31.); świadczy to o wystąpieniu przywierania do wału i poślizgu względem niego [34]. W przypadku wału o chropowatości powierzchni $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ współczynnik zmienności $\kappa = 0,47 \div 0,73$ (dla wału szklanego $\kappa = 0,12 \div 0,36$, zależnie od rodzaju gumy), dla wału o $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ – $\kappa = 0,11 \div 0,37$ oraz dla wału $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ – $\kappa = 0,10 \div 0,21$.

Spadek zmienności wartości siły tarcia zarejestrowany podczas wsuwania wałów stalowych o coraz większej chropowatości świadczy o tym, że oddziaływanie adhezyjne pomiędzy wargą a wałem maleje.



Rys. 29. Przebieg siły tarcia podczas osadzania w uszczelnieniu wału stalowego o chropowatości $R_a = 0,01 \mu\text{m}$; O – początek pomiaru siły tarcia

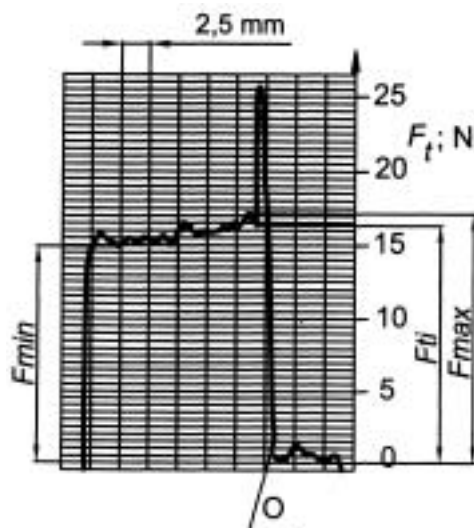


Rys. 30. Przebieg siły tarcia podczas osadzania w uszczelnieniu wału stalowego o chropowatości $R_a = 0,12 \mu\text{m}$; O – początek pomiaru siły tarcia

Siła tarcia F_{ti} wału szklanego o wargę jest zbliżona do wartości siły tarcia wału stalowego o chropowatości $R_a = 0,01 \mu\text{m}$; wraz ze wzrostem chropowatości zwiększa się wartość siły tarcia F_{ti} . Oznaczałoby to, że składowa deformacyjna siły tarcia odpowiada za wartość siły F_{ti} , składowa adhezyjna natomiast determinuje stopień zmienności κ siły tarcia.

Z analizy przytoczonych wykresów wynika, że podczas wsuwania wału stalowego o chropowatości powierzchni $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ wargę uszczelnienia przemieszczała się

w stronę przeciwną do ruchu wału (rys. 29.). W przypadku wałów o większej chropowatości powierzchni zachowanie się wargi było podobne, najpierw niewielka część obwodu musiała się przesuwać w kierunku przeciwnym do ruchu wału, a następnie dochodziło do przemieszczenia się wargi wraz z wałem (brak ruchu względnego wargi i wału) w tym samym kierunku (rys. 30. i 31.).



Rys. 31. Przebieg siły tarcia podczas osadzania w uszczelnieniu wału stalowego o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$; O – początek pomiaru siły tarcia

Większa siła tarcia towarzysząca wsuwaniu wałów stalowych może oznaczać, iż położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej różni się od znalezionej podczas wsuwania wału szklanego. Słuszność zaproponowanej metody oceny warunków styku na wale szklanym będzie można ocenić po zbadaniu profili zużytej wargi oraz położenia obszaru styku po współpracy z wałami stalowymi. Jeżeli położenie obszaru styku w uszczelnieniu oryginalnym będzie podobne do położenia śladu zużycia na krawędzi uszczelniającej, oznaczać to będzie, że przyjęta metoda umożliwia prognozowanie warunku styku w rzeczywistych warunkach pracy uszczelnienia.

4.3. ROZKŁAD NACISKU STYKOWEGO W KIERUNKU OSIOWYM I OBWODOWYM

Znajomość wartości promieniowego obciążenia wywieranego przez wargę na wał oraz szerokości styku umożliwia ocenę średniej wartości nacisku na styku wargę-wał (tab. 1).

Tabela 1. Średnie wartości nacisku na styku wargę-wał jednej partii oryginalnych uszczelnień

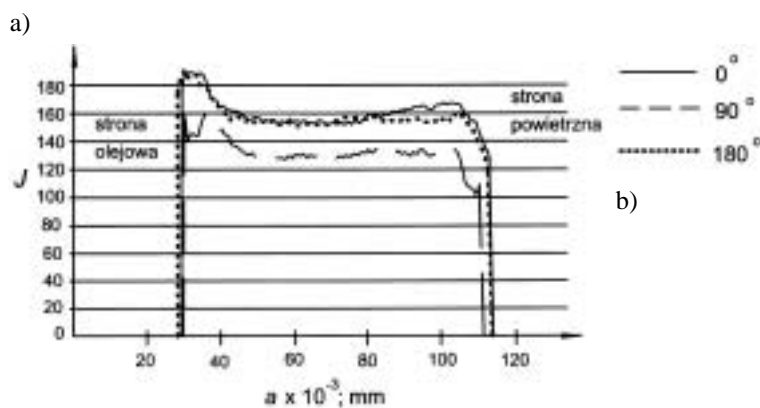
Uszczelnienie		Średni nacisk, MPa	
		bez sprężyny	ze sprężyną
Grupa	(101–105)	1,08	1,25
	(106–110)	1,43	1,86
	(111–115)	1,15	1,53
	(116–120)	1,09	1,45
	(121–125)	1,39	1,62

Osadzenie sprężyny dociskowej w uszczelnieniu spowodowało zwiększenie wartości obciążenia promieniowego o $1,7 \div 3,0$ razy, przyrost szerokości styku wargi z wałem o $1,6 \div 2,3$ raza oraz zwiększenie nacisku o zaledwie $1,2 \div 1,3$ raza w stosunku do uszczelnienia bez sprężyny. Stwierdzono, że uszczelnienia bez sprężyny często pracują z wyciekami [2], a to oznacza, w świetle powyższych danych, że nie tyle średnia wartość nacisku, ile raczej położenie obszaru styku i odpowiadająca mu miejscowa wartość nacisku decydują o jakości pracy uszczelnienia. Średnia wartość nacisku stykowego może służyć jako pierwsze przybliżenie rzeczywistej wartości nacisku w sytuacji pełnej symetrii warunków styku w kierunku obwodowym.

Tezę o wpływie rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej na brak symetrii styku i wynikającego z niego zróżnicowania wartości i rozkładu nacisku stykowego w kierunku obwodowym zweryfikowano na stanowisku przedstawionym na rysunku 16. Nacisk oceniano jakościowo na podstawie pomiaru intensywności odbitego światła przez powierzchnię styku wargi z wałem. Obraz styku wargi z wałem rejestrowano na taśmie wideo, dokładnie w tych miejscach, w których mierzono szerokość styku oraz położenie obszaru styku krawędzi uszczelniającej z wałem. Zapisane obrazy styku poddawano obróbce komputerowej. Karta wideo firmy Leutron z oprogramowaniem umożliwiła rozróżnienie stopni jasności analizowanego obrazu w skali $0 \div 250$ punktów. Im większa była wartość nacisku w danym miejscu, tym więcej było punktów rzeczywistego styku wargi z wałem. Światło padające na miejsce rzeczywistego styku ulegało rozproszeniu, dlatego im lepsze było przyleganie wargi do wału, tym mniejsza ilość światła powracała do kamery i tym niższy był poziom jasności. Po zanalizowaniu ponad 150 obrazów rozkładu stopni jasności różnych uszczelnień otrzymano informacje o charakterze rozkładu nacisku zarówno po szerokości styku wargi z wałem, jak i po obwodzie. Na każdym wykresie rozkładu stopni jasności strona olejowa styku jest na lewo, a powietrzna – na prawo.

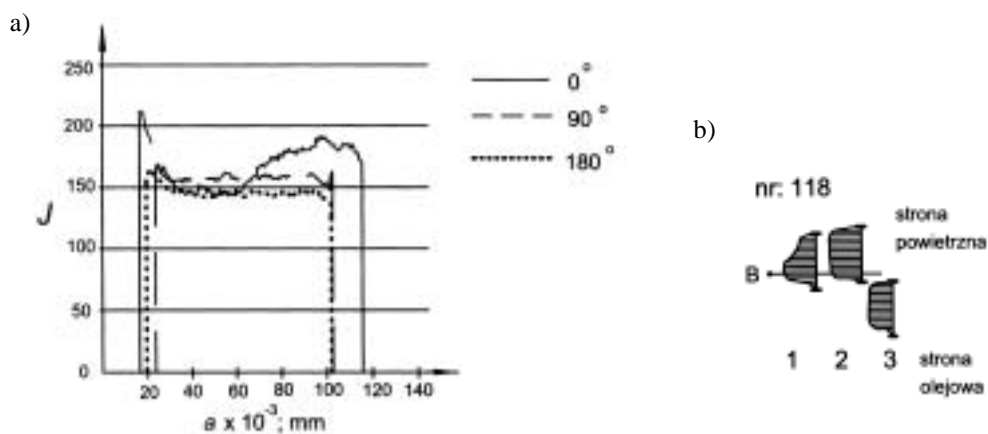
Przykładowo zilustrowano kilka rozkładów stopni jasności (rys. 32a–34a) oraz odpowiadające im hipotetyczne rozkłady nacisku stykowego (rys. 32b–34b). Te ostatnie podano wyłącznie w celu ukazania potencjalnych zmian w kształcie rozkładu nacisku stykowego. Pierwszy wykres dotyczy uszczelnienia, w którym rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej był duży, ale odchyłka położenia δ/a względem płaszczyzny przekroju wału mała. W położeniu odpowiadającym kąтови

90° występuje największa wartość nacisku stykowego, natomiast w miejscach 0° i 180° – wartość i kształt rozkładu nacisku były podobne (rys. 32.).



Rys. 32. Rozkład stopni jasności J na styku wargi-wał (a) oraz nacisku stykowego (b) w kierunku osiowym w trzech miejscach na obwodzie uszczelnienia. Uszczelnienie nr 101

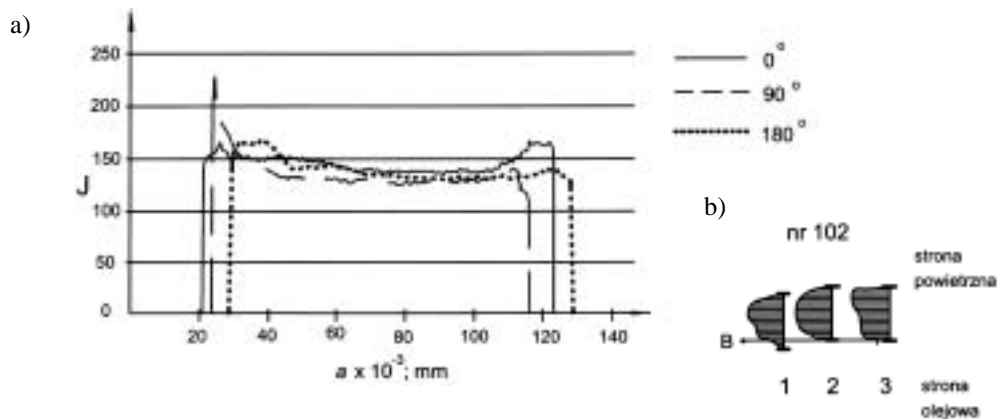
W uszczelnieniu, w którym zarejestrowano średnią wartość rozstępu położenia obszaru styku i stosunkowo duże przemieszczenie wargi względem powierzchni wału, występuje również zróżnicowanie rozkładu i wartości nacisku stykowego (rys. 33.). Widoczny jest spadek nacisku po stronie powietrznej w położeniu 0° (por. z rys. 24.).



Rys. 33. Rozkład stopni jasności J na styku wargi-wał (a) oraz nacisku stykowego (b) w kierunku osiowym w trzech miejscach na obwodzie uszczelnienia. Uszczelnienie nr 118

Trzeci przykład dotyczy uszczelnienia, w którym rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej był praktycznie pomijalny, przemieszczenie wargi wzglę-

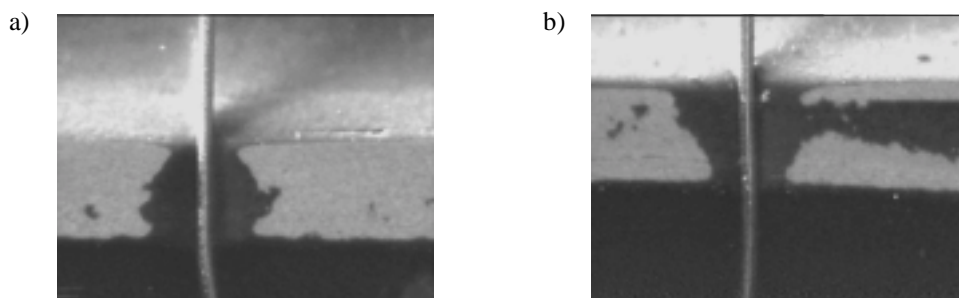
dem powierzchni wału było natomiast znaczne. Hipotetyczny rozkład nacisku jest zróżnicowany, a wartości maksymalne, choć w wąskim zakresie, różnią się w miejscach ich pomiaru (rys. 34.).



Rys. 34. Rozkład stopni jasności J na styku wargi-wał (a) oraz nacisku stykowego (b) w kierunku osiowym w trzech miejscach na obwodzie uszczelnienia.
Uszczelnienie nr 102

Wymienione rozkłady otrzymano dla uszczelnień, w których siła promieniowa była praktycznie ta sama, a wartość nacisku różniła się o 16% (tab. 1.).

Metodę wyznaczania rozkładu nacisku, polegającą na pomiarze intensywności odbitego światła od obszaru styku, zweryfikowano na podstawie innej metody, w której kalibrowany drucik średnicy 0,06 mm umieszczono na wale wzdłuż tworzącej, a następnie nasunięto uszczelnienie. Drucik spowodował odsunięcie fragmentu powierzchni wargi od powierzchni szklanego wału; im większy był nacisk, tym krawędź styku wargi z wałem leżała bliżej drucika (rys. 35.).



Rys. 35. Odcisk wargi na powierzchni szklanego wału w obecności kalibrowanego drucika:
a) obraz obszaru styku położonego na krzywoliniowej części krawędzi uszczelniającej,
b) na prostoliniowej części krawędzi

Kształt odcisku wargi wskazuje, że wartość nacisku jest w pierwszym przypadku maksymalna po stronie olejowej (rys. 35a), a w drugim położeniu wargi – po stronie powietrznej (rys. 35b). Można zatem wnosić, że w pierwszym przypadku wargę uległa przemieszczeniu w stronę powietrzną, a w drugim – w stronę olejową. Podobny rezultat otrzymano po zanalizowaniu rozkładu stopni jasności w obszarze styku wargi z wałem.

Próby przypisania danej wartości nacisku odpowiadającego mu stopnia jasności zakończyły się jedynie częściowym powodzeniem. Badania prowadzono na próbkach o średnicy 1 mm, wyciętych ze stopy wargi badanych uszczelnień; wysokość próbki była równa grubości stopy. Otrzymane w ten sposób próbki stopniowo dociskano do używanego wału szklanego siłą o znanej wartości i każdorazowo rejestrowano ilość odbitego światła od powierzchni styku. W badaniu tym przyjęto, że nominalna powierzchnia styku próbki z wałem podczas obciążania była stała. Jedynie w przypadku próbek z gumy FKM, oznaczonej przez producenta uszczelnienia jako S-450, udało się ustalić następującą zależność stopni jasności J od nacisku nominalnego p_c

$$p_c = 0,1 \sqrt{\frac{140}{J}}. \quad (5)$$

Wzór (5) obowiązuje dla zakresu stopni jasności $J = 123 \div 165$ punktów. W tabeli 2. przedstawiono wyniki pomiarów.

Tabela 2. Zależności stopnia jasności od wartości nacisku p_c

Numer uszczelnienia	101		102		103	
	J	p_c MPa	J	p_c MPa	J	p_c MPa
Położenie						
0°	165	0,2	140	1,0	155	0,4
90°	130	2,1	130	2,1	150	0,5
180°	150	0,2	125	3,1	140	1,0

Z danych zawartych w tabeli 2. wynika, że w jednym i tym samym uszczelnieniu wartość nacisku zmienia się znacznie po obwodzie wargi i może osiągać lokalnie wartość do 3 MPa. Kłopoty z Ustaleniem zależności funkcyjnej stopni jasności od nacisku stykowego wynikały przede wszystkim z różnicy stopnia gładkości powierzchni krawędzi uszczelniającej i stopy. Powierzchnia krawędzi uszczelniającej ma znacznie więcej defektów, a przez to jest znacznie mniej błyszcząca niż powierzchnia stopy. Różnica stanu obu powierzchni wynika z technologii wykonania powierzchni formy pod uszczelnienie. Z kolei badania z zastosowaniem próbek wyciętych z krawędzi nie mogła być prowadzona ze względu na krzywiznę krawędzi i niemożność dokładnej oceny wartości nacisku.

4.4. PODSUMOWANIE

Z analizy wyników pomiarów obszaru styku krawędzi uszczelniającej wargi z wałem, rozpatrywanego w makroskali, wynikają następujące wnioski:

1. Opracowana metoda umożliwia ocenę położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wargi.

2. Położenie obszaru styku zarówno na krawędzi uszczelniającej, jak i względem płaszczyzny przekroju wału przechodzącej przez punkt oznaczony 0° jest zmienne w kierunku obwodowym.

3. Rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej zależy od osiowego odchylenia wargi w uszczelnieniu przed montażem oraz od kinematyki ruchu wargi względem wału.

4. Duży rozstęp położenia obszaru styku może występować przy małym osiowym przemieszczeniu wargi względem płaszczyzny prostopadłej do osi wału.

5. Uszczelnienie wargowe nie powinno być traktowane jako ciało osiowo-symetryczne, a to za sprawą zmienności położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej i wynikającego stąd zmiennego rozkładu nacisku stykowego.

6. Rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej powinien stanowić kryterium podobieństwa warunków styku pomiędzy wargą a wałem.

7. Przebieg siły tarcia towarzyszący osadzaniu wału w wardze zależy od kinematyki ruchu wargi, od materiału wału oraz chropowatości jego powierzchni. Stwierdzono, że zwiększenie chropowatości wału powoduje zwiększenie siły tarcia, natomiast wzrost składowej adhezyjnej tarcia wpływa na zmienność siły tarcia.

8. Osadzenie sprężyny w uszczelnieniu zwiększa nacisk o 30%, w porównaniu z naciskiem w uszczelnieniu bez sprężyny. Sprężyna zmniejsza wartość rozstępu położenia obszaru styku. Z tego wynika, że częstsza praca z wyciekami uszczelnień bez sprężyny jest spowodowana nie tyle niedostateczną wartością nacisku, ile zmiennością rozkładu nacisku względem osi uszczelnienia.

9. Analiza wyników pomiarów potwierdza tezę, że uszczelnienie wargowe tworzy z wałem specyficzną parę cierną, w której do powstania powierzchni styku dochodzi w rezultacie rozciągnięcia, ugięcia oraz przemieszczenia poosiowego wargi. Teoretyczne ustalenie szerokości styku, jego położenia na krawędzi uszczelniającej oraz wartości nacisku stykowego jest często niemożliwe.

5. CHARAKTERYSTYKA STYKU WARGI Z WAŁEM W MIKROSKALI

Z analizy styku wargi z wałem rozpatrywanego w makroskali wynika, że wartość nacisku może się znacznie zmieniać na obwodzie krawędzi uszczelniającej. Ta zmienność jest przyczyną zróżnicowania warunków styku w mikroskali, a więc styku rozpatrywanego na poziomie nierówności powierzchni. Zależnie od wartości nacisku dochodzi do powstania styku nienasyconego lub nasyconego [51]. Styk nienasycony pomiędzy wałem a wargą to taki, podczas którego tylko część nierówności powierzchni wału styka się z powierzchnią krawędzi uszczelniającej. Styk nasycony charakteryzuje się tym, że wszystkie nierówności powierzchni wału stykają się z wargą. Ze względu na znaczne różnice w wartościach twardości i modułu sprężystości stali i gumy przyjęto tutaj, iż to nierówności powierzchni wału wnikają w powierzchnię krawędzi uszczelniającej. Należy zatem oczekiwać, że w jednym i tym samym uszczelnieniu będzie dochodziło do chwilowego tworzenia się zarówno styku nienasyconego, jak i nasyconego, zależnie od obciążenia wywieranego przez dany odcinek wargi na powierzchnię obracającego się wału.

Chropowatość powierzchni wału oraz krawędzi uszczelniającej wargi jest, oczywiście, równie ważna jak nacisk w tworzeniu każdego z dwóch typów styku. W celu wykazania wpływu chropowatości powierzchni wału lub tulejki na warunki styku z wargą analizowano powierzchnie szlifowane, tłoczone nawęglane oraz tłoczone fosforanowane. Wymienione technologie wykonania powierzchni są najczęściej stosowanymi podczas produkcji wałów i osi oraz tulejek współpracujących z uszczelnieniami wargowymi.

5.1. TEKSTURA POWIERZCHNI KRAWĘDZI USZCZELNIAJĄCEJ WARGI W ORYGINALNYCH USZCZELNIENIACH

Powierzchnia obracającego się wału oddziałuje na wargę poprzez bardzo ograniczony obszar styku w kierunku osiowym. W warstwie wierzchniej krawędzi uszczel-

niającej następuje kumulacja skutków tarcia, z tym że stopień obciążenia tymi skutkami poszczególnych odcinków obwodu wargi będzie różny, w zależności od warunków styku. W rezultacie dochodzi do przyspieszenia procesu starzenia się gumy, jej twardnienia, spadku wartości modułu sprężystości, zmęczenia cieplnego powierzchni oraz do zużycia ściernego powierzchni krawędzi uszczelniającej. Proces tarcia pomiędzy wargą a wałem zdecydowano się zatem oceniać na podstawie charakteru zużycia krawędzi uszczelniającej.

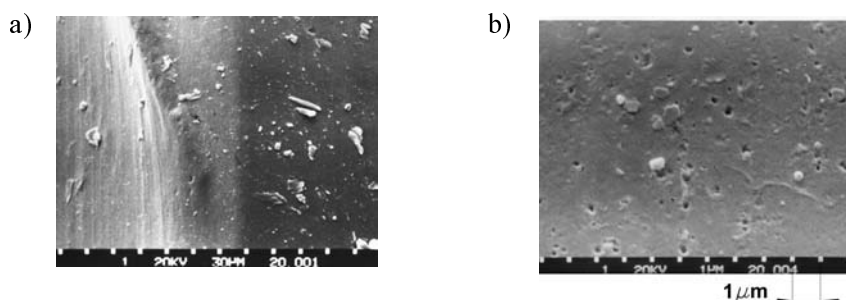
Tekstura powierzchni wargi powinna być taka, aby proces zatrzymywania czynnika uszczelnianego w szczelinie był możliwy. Można zatem postulować, aby pożądaną teksturę miała oryginalna powierzchnia wargi lub by ta tekstura została ukształtowana w procesie jej zużywania się. W tym ostatnim przypadku znaczącą rolę będzie odgrywać chropowatość powierzchni wału. Zużycie nierówności powierzchni wału będzie świadectwem ich bezpośredniego styku z krawędzią uszczelniającą. Stopień zużycia powierzchni wału po jego obwodzie powinien być stały; zależy on od najbardziej niekorzystnych – na danym odcinku obwodu – warunków styku wargi z wałem. Wynika z tego, że procedura badań powinna przewidywać ocenę tekstury powierzchni zarówno uszczelnienia, jak i wału z nim współpracującego. Dopiero wówczas można wnosić o przyczynach zużycia wargi.

Do obserwacji krawędzi uszczelniającej pobierano próbki z dwóch przeciwległych miejsc na średnicy wargi zarówno z niepracujących, jak i pracujących uszczelnień. Obserwacje wycinków z uszczelnień niepracujących prowadzono w celu zidentyfikowania typowych rodzajów tekstury krawędzi uszczelniającej. Każdą próbkę analizowano od strony krawędzi uszczelniającej oraz od strony przelomu pod elektronowym mikroskopem skaningowym stereoscan 180.

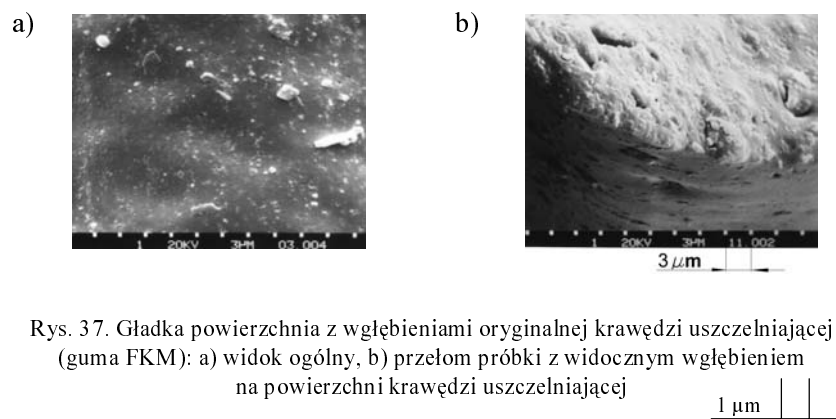
W pierwszym okresie badań nad uszczelnieniami wargowymi próbki nacinano skalpelem, a następnie analizowano na tym przekroju teksturę powierzchni oraz jej przejście z wnętrza materiału do warstwy wierzchniej. Wkrótce zorientowano się, że ostrze skalpela pozostawiało na przekroju ślad, który zaciemniał strukturę gumy. W czasie późniejszych badań próbki nacinano częściowo od strony rowka pod sprężynę, schładzano w ciekłym azocie, a następnie zginano, by doprowadzić je do pęknięcia. W ten sposób otrzymywano przelomy o takiej strukturze gumy, jaką ma ona w rzeczywistości. W podpisach pod prezentowanymi zdjęciami słowo przekrój oznacza, że powierzchnie otrzymano po nacięciu wargi skalpelem, a słowo przelom – po złamaniu próbki.

Z analizy zdjęć próbek, wyciętych z ponad kilkudziesięciu różnych uszczelnień wargowych, wynika, że istnieje kilka typowych tekstur oryginalnych powierzchni krawędzi uszczelniającej, zależnych od składu mieszanki i typu elastomeru oraz od parametrów procesu technologicznego podczas produkcji uszczelnień. W uszczelnieniach wykonywanych metodą wtrysku gumy do formy powierzchnia krawędzi uszczelniającej jest bardzo często gładka (rys. 36.). Na takiej powierzchni brak jest jakichkolwiek mikropęknięć lub mikrowystępów. Aby proces uszczelniania mógł wystąpić, powierzchnia ta w okresie dotarcia musi ulec zużyciu.

Drugim charakterystycznym rodzajem powierzchni wargi jest powierzchnia gładka z płytkimi owalnymi wgłębieniami o wymiarze dłuższej osi $6 \div 15 \mu\text{m}$ (rys. 37.). Gdzieś tam widoczne są cząstki gumy lub wypełniaczy przyklejone do powierzchni. Na przełomie próbki (rys. 37b) powierzchnia krawędzi jest widoczna od spodu. Na pierwszym planie zdjęcia widoczne jest wgłębienie; liczba wgłębień zwiększa się w stronę powietrzną wargi (w lewą stronę zdjęcia).



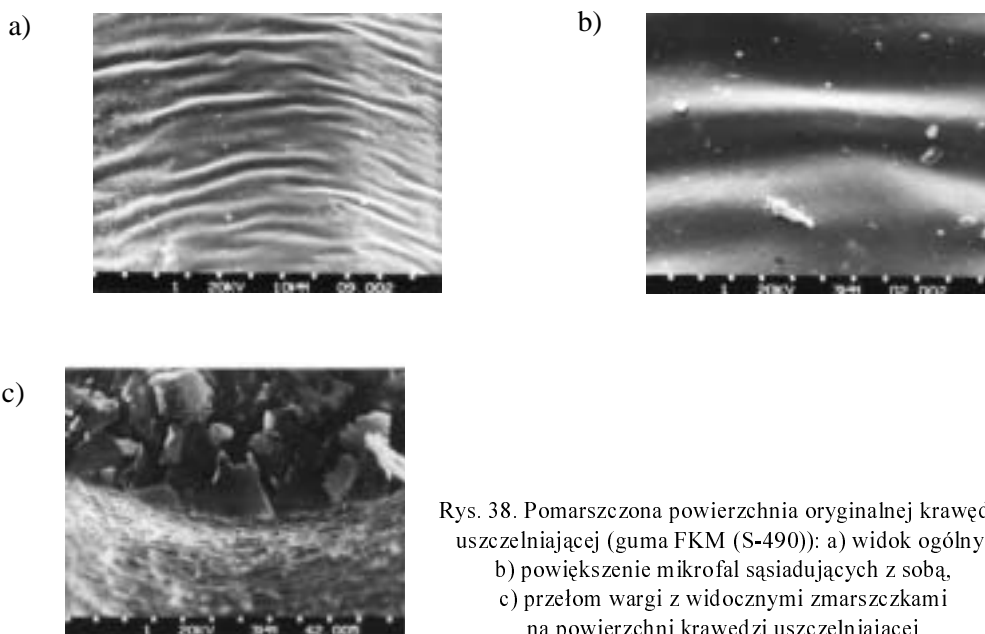
Rys. 36. Gładka powierzchnia oryginalnej krawędzi uszczelniającej (warga wykonana z gumy FKM (S-450)): a) widok ogólny, b) fragment powierzchni. Miarę długości zapisano w postaci działek na dole zdjęć; wymiar odcinka: a) $30 \mu\text{m}$ oraz b) $1 \mu\text{m}$



Rys. 37. Gładka powierzchnia z wgłębieniami oryginalnej krawędzi uszczelniającej (guma FKM): a) widok ogólny, b) przełom próbki z widocznym wgłębieniem na powierzchni krawędzi uszczelniającej

Dosyć często spotykane są powierzchnie pomarszczone. Zmarszczki tworzą mikrofałę biegnące wzdłuż tworzącej wargi. Zwykle mikrofałę te odchylają się od tworzącej na pochylonych powierzchniach wargi zarówno po jej stronie powietrznej, jak i olejowej (rys. 38.). Skuteczność uszczelniania zależy od położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej oraz od kierunku ruchu wału. Jeżeli wał będzie się poruszał w kierunku od spodu do góry zdjęcia, a obszar styku będzie przypadał po stronie prostoliniowej krawędzi uszczelniania (po lewej stronie zdjęcia), to można oczekiwać, że proces zawracania czynnika na stronę olejową będzie intensywny. Sytuacja powinna

się zmienić, ze szkodą dla procesu uszczelniania, gdyby kierunek ruchu wału był przeciwny. Z analizowanych zdjęć wynika, że podziałka fali zmienia się od 6 do 18 μm , a wysokość fali od 1 do 5 μm . Często na powierzchni z mikrofalami znajdują się wgłębienia podobne do tych przedstawionych na rysunku 37a.



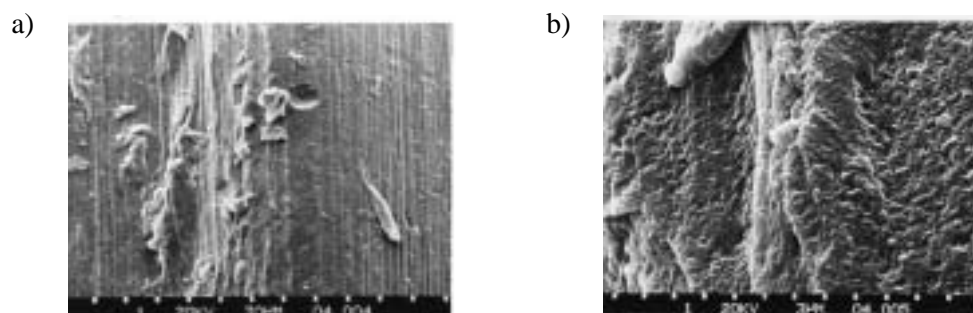
Rys. 38. Pomarszczona powierzchnia oryginalnej krawędzi uszczelniającej (guma FKM (S-490)): a) widok ogólny, b) powiększenie mikrofal sąsiadujących z sobą, c) przełom wargi z widocznymi zmarszczkami na powierzchni krawędzi uszczelniającej

Przełom wargi (rys. 38c) wskazuje, że tekstura powierzchni wnętrza gumy odpowiada pofalowaniu krawędzi uszczelniającej. Obecność mikrofal wynika najprawdopodobniej z deformacji warstwy wierzchniej, wywołanej schładzaniem się gumy wewnątrz wargi. Warstwa wierzchnia wargi ulega schłodzeniu wcześniej, dlatego pod wpływem skurczu gumy wewnątrz wargi dochodzi do pofalowania się jej powierzchni.

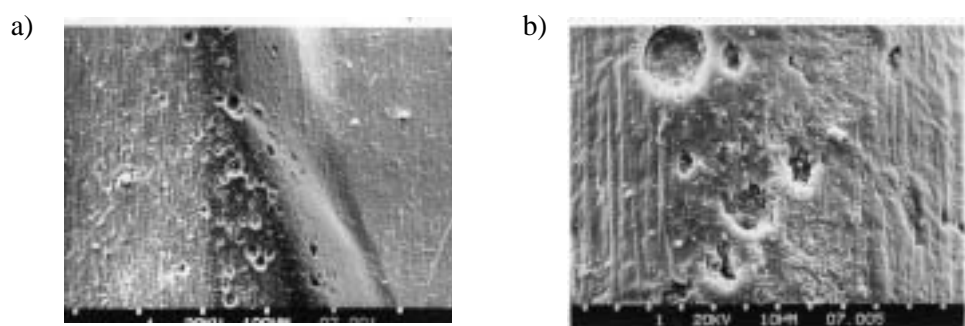
Często na powierzchni krawędzi uszczelniającej znajdują się tzw. „narośla”. Są to cząstki gumy, które przywarły do powierzchni, oraz cząstki wypełniaczy. Jeżeli forma była niedokładnie wykonana lub regenerowana, to na powierzchni krawędzi uszczelniającej wyraźnie widać ślady pozostawione przez narzędzie na powierzchni formy (rys. 39a).

W uszczelnieniach wykonanych z gumy silikonowej (MVQ) typowa jest obecność jamek na powierzchni krawędzi uszczelniającej (rys. 40.). Wynikają one z pewnej porowatości tej gumy.

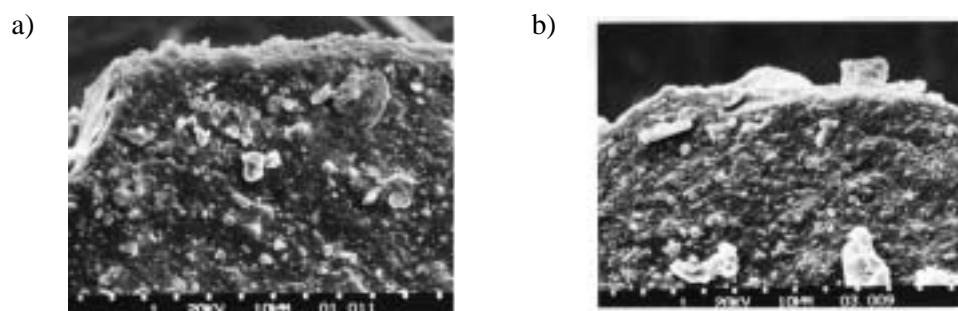
Średnica jamek zmienia się od 10 do 40 μm , a ich głębokość nie przekracza 10 μm . Występy znajdujące się na oryginalnej powierzchni krawędzi uszczelniającej nie przekraczają na ogół wysokości $10 \div 12 \mu\text{m}$ (rys. 41b).



Rys. 39. Oryginalna krawędź uszczelniająca wargi z gumy NBR wykonana metodą tłoczenia:
a) narośla i ślady po narzędziu, b) fragment krawędzi uszczelniającej

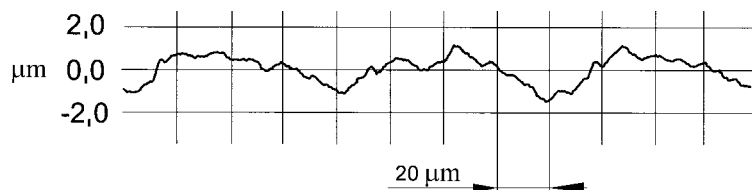


Rys. 40. Oryginalna krawędź uszczelniająca wargi wykonanej z gumy MVQ:
a) obecność jamek na powierzchni, b) powiększenie fragmentu krawędzi uszczelniającej



Rys. 41. Przełomy krawędzi uszczelniającej dwóch różnych uszczelnień wykonanych z gumy FKM: a)
fragment krawędzi po stronie olejowej, b) środkowa część krawędzi uszczelniającej

Mikroprofil krawędzi uszczelniającej wyznaczono na profilometrze Taylor Hobson za pomocą stylusa łopatkowego. Profilogram ukazuje powierzchnię falistą o amplitudzie $2\div 4\ \mu\text{m}$ i okresie około $80\ \mu\text{m}$ (rys. 42.).



Rys. 42. Profil powierzchni krawędzi uszczelniającej w kierunku obwodowym oryginalnego uszczelnienia wykonanego z gumy FKM

W podsumowaniu należy stwierdzić, że nie znaleziono oryginalnej powierzchni krawędzi uszczelniającej pokrytej mikropęknięciami lub występami nierówności w postaci półkul, jak zakładano to w pracach [42, 53, 68]. Stwierdzono natomiast, że dosyć często występuje powierzchnia pokryta zmarszczkami (mikrofalami); ich obecność jest postulowana w modelu Kammüllera [42].

Wymiary mikrofal potwierdzają założenia przyjmowane w obliczeniach przez Salanta [62]. Oryginalna powierzchnia krawędzi uszczelniającej jest gładka dla większości z badanych uszczelnień. Oznacza to, że ich powierzchnia musi ulec zużyciu ściernemu, bowiem tylko uszczelnienia o powierzchni pokrytej mikronierównościami pracują bez wycieku [35].

5.2. ANALIZA CHROPOWATOŚCI ORYGINALNYCH POWIERZCHNI WAŁÓW

Przyjęto tezę, iż to właśnie chropowatość powierzchni wału współpracującego z uszczelnieniem wargowym determinuje w danych warunkach styku:

- zużycie i teksturę powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi,
- opór tarcia uszczelnienia,
- styczne odkształcenie warstwy wierzchniej krawędzi uszczelniającej oraz zdolność do tworzenia się warstwy smarowej,
- ilość czynnika smarnego wypełniającego mikrowgłębienia na powierzchni.

W celu uzasadnienia tej tezy należało do scharakteryzowania chropowatości powierzchni wybrać takie parametry, które wpływają na przebieg zużycia, oporu tarcia oraz szczelności, a jednocześnie zmieniają swoją wartość wraz z tym procesem. Wybrano [15] następujące parametry, które charakteryzują:

- cechy wysokościowe profilu: R_a , R_{pk} , R_{vk} , R_t ,
- cechy wzdłużne profilu: S , S_m , λ_a ,
- kształt wierzchołków oraz kształt profilu: \bar{r} , Δ , Δ_a ,
- rozkłady statystyczne rzędnych profilu: R_{sk} , R_{ku} , b , v oraz promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności.

W tabeli 3. podano wybrane parametry chropowatości powierzchni oraz przypisano im hipotetyczny wpływ na procesy zachodzące na powierzchniach wału i wargi.

Tabela 3. Parametry chropowatości powierzchni wałów

Parametr	Potencjalny wpływ
R_a – średnie arytmetyczne odchylenia profilu	na zużycie ściernie powierzchni wargi
R_{pk} – zredukowana wysokość wzniesień profilu	na rzeczywistą powierzchnię styku pomiędzy wałem a wargą, na zużycie wargi
R_{vk} – zredukowana głębokość dolin	na zdolność powierzchni do zakumulowania czynnika smarowego
R_t – maksymalna wysokość profilu	na stan naprężenia w warstwie wierzchniej krawędzi uszczelniającej; występuje w ilorazie R_t/\bar{r} , na rodzaj zużycia
S_m – średni odstęp chropowatości na linii średniej	na częstość odkształcania powierzchni krawędzi uszczelniającej
λ_a – średnia długość fali profilu	na warunki smarowania, parametr wyraźnie zmienia wartość wraz ze zużyciem się powierzchni wału
Δ_a – średnie arytmetyczne pochylenie profilu	na położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej, parametr wyraźnie zmienia wartość wraz ze zużyciem się powierzchni wału
Δ – kompleksowy parametr chropowatości	na sztywność warstwy wierzchniej powierzchni wału, na zużycie na opór tarcia
R_{sk} – skośność (współczynnik asymetrii rozkładu nierówności)	na rzeczywistą powierzchnię styku wargi z wałem tworzenie się warstwy smarowej
R_{ku} – eksces	na rzeczywistą powierzchnię styku
\bar{r} – średni promień zaokrąglenia wierzchołków nierówności wału	na rodzaj zużycia powierzchni wargi na typ styku wargi z wałem tworzenie się warstwy smarowej

Chropowatość powierzchni mierzono za pomocą profilometru Taylor Hobson Talylround laser 3D w trzech miejscach na obwodzie, zarówno w kierunku osiowym, jak i obwodowym. W przypadku wałów z powierzchnią szlifowaną pomiaru chropowatości dokonywano na dwóch poziomach, tj. w odległości równej 1/3 długości wału, licząc od obu czoł wału. Charakterystykę profilu powierzchni profilometr zapisywał w dwóch plikach binarnych o rozszerzeniach nazwy *. par oraz *. mod. Producent profilometru dostarczył program conv-dep.exe, który tłumaczy pliki binarne na postać tekstową.

W celu określenia promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności powierzchni opracowano program Profil w języku systemu Matlab. Mikronierówności powierzchni wałów modelowano za pomocą półkul, a ich krzywiznę aproksymowano odcinkiem łuku kołowego. Średnią wartość promienia wyznaczano z zależności

$$r_{sra,c} = \frac{1}{n} \sum \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)_i^2 \right]^{3/2}}{\left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)_i^{-1}, \quad (6)$$

w której:

r_{sra} – średni promień wierzchołków na profilu obliczony w kierunku osiowym,

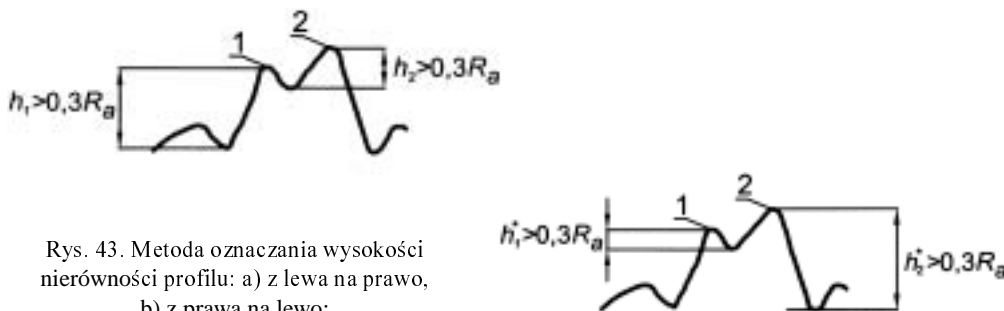
r_{src} – jak wyżej, z tym że dla kierunku obwodowego.

Średnia wartość promienia wszystkich nierówności znajdujących się na powierzchni wału równa się średniej geometrycznej promieni wyznaczonych w kierunku osiowym i obwodowym

$$\bar{r}_{sr} = \sqrt{r_{sra} r_{src}}. \quad (7)$$

Do obliczeń promienia zaokrąglenia brano tylko te nierówności, których wysokość względem sąsiedniej doliny jest równa (większa) $0,3R_a$. Z tego założenia wynika, że wybór danej nierówności będzie zależał od tego, z której strony profil będzie oceniany. Na przykład nierówność 1 (rys. 43.) spełnia warunek $h_1 \geq 0,3R_a$, gdy profil powierzchni jest analizowany od lewej ku prawej stronie, zostałaby natomiast odrzucona, gdyby analizę prowadzić w kierunku przeciwnym – $h_1^* < 0,3R_a$. Dlatego przyjęto, że program analizuje i oblicza średnie promienie r_{srl} oraz r_{srr} dla obu kierunków przemieszczania się wzdłuż profilu. Średnia wartość dla profilu bez rozpatrywania kierunku przemieszczania się (wzdłuż profilu) stanowi średnią arytmetyczną

$$r_{sra} = 0,5(r_{srla} + r_{sra}) \quad \text{oraz} \quad r_{src} = 0,5(r_{srlc} + r_{src}).$$



Rys. 43. Metoda oznaczania wysokości nierówności profilu: a) z lewa na prawo, b) z prawa na lewo;

1, 2 – rozpatrywane wierzchołki nierówności

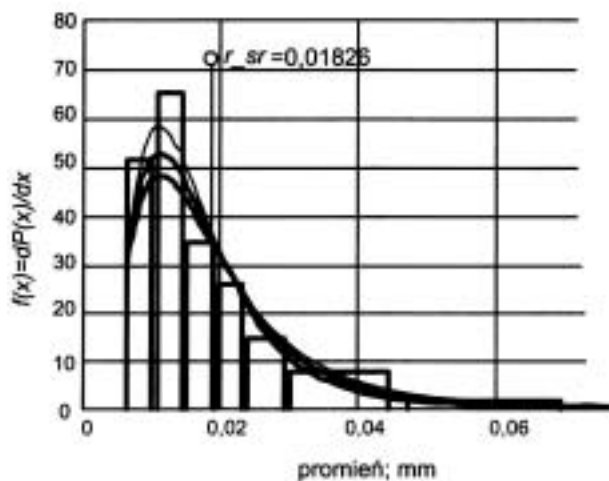
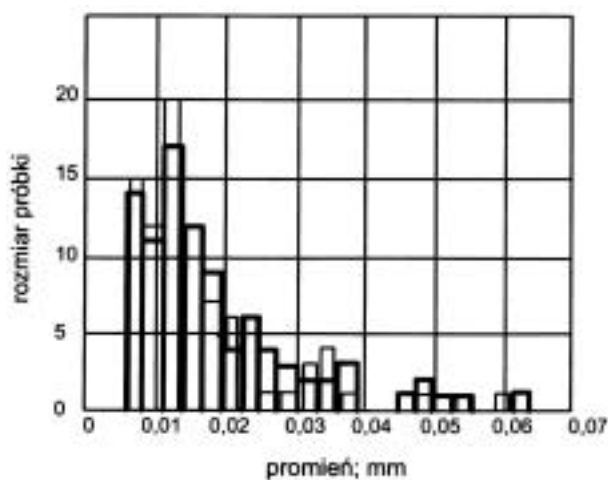
Program Profil, analizując dane przesłane z profilometru, podaje również:

- rozkłady i statystyki promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności na powierzchni w kierunkach osiowym i obwodowym, tj. histogram, gęstość rozkładu,

funkcję rozkładu prawdopodobieństwa (dystrybuanta) oraz rozkład wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków w funkcji względnego zbliżenia h/R_t do profilu,

- współczynniki b , v aproksymacji górnej części krzywej nośności ($\eta = b \varepsilon^v$),
- wartości kompleksowego parametru chropowatości [46] $\Delta = \frac{R_t}{\bar{r} b^{1/v}}$.

Stwierdzono, że zarówno histogram, jak i funkcja rozkładu gęstości wartości promieni mogą być aproksymowane za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego (LN) (rys. 44.).



a)

Rys. 44. Histogram (a) oraz rozkład częstości gęstości wartości promieni (b).

Wał $R_a = 0,32 \mu\text{m}$, kierunek osiowy – linia cienka – kierunek od lewej do prawej strony profilu, linia gruba – na odwrót

Zmienna wielkość, na przykład promień krzywizny wierzchołka nierówności, podlega LN rozkładowi wtedy, kiedy jej naturalny logarytm podlega rozkładowi normalnemu ($x = \ln r$). Zagadnienie sprowadza się zatem do określenia rozkładu $r = e^x$.

Przyjęto następujące parametry charakteryzujące LN rozkład:

mediana r_{med} ,

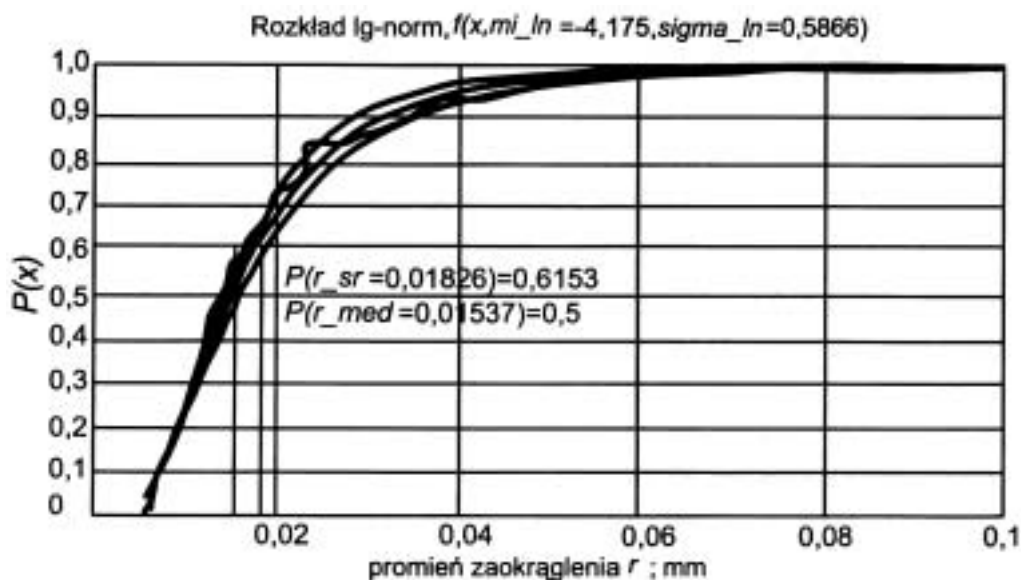
wartość średnia promienia $r_{śred}$,

współczynnik wariacji zmiennej $V_r^2 = \exp(\sigma_{\ln r}^2) - 1$,

gdzie: $\sigma_{\ln r}^2$ – wariancja rozkładu LN oraz współczynnik skośności $\gamma_1 = 3V_r + V_r^3$.

Ponieważ $\sigma_{\ln r}^2$, γ_1 oraz iloraz $r_{śred}/r_{med}$ zależą od współczynnika wariacji V_r , można zatem powiedzieć, że im większa jest wartość V_r , tym większy jest rozrzut wartości zmiennej r .

Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa $P(r)$ informuje o prawdopodobieństwie wystąpienia danej wartości promienia. Z rysunku 45. wynika, iż prawdopodobieństwo, że wartość promienia będzie mniejsza/równa jego wartości średniej wynosi 0,62.



Rys. 45. Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa dla LN rozkładu
(wał o $R_a = 0,32 \mu\text{m}$, kierunek osiowy)

5.2.1. CHROPOWATOŚĆ SZLIFOWANEJ POWIERZCHNI WAŁÓW

Oceniano chropowatość powierzchni 18 stalowych wałów, hartowanych do twardości 60 HRC; wały te później współpracowały z uszczelnieniami wargowymi. W sumie przeanalizowano ponad sto profili powierzchni. Wartości parametrów chropowatości podano w tabelach 4.–7.; literą A zaznaczono wiersze, w których zawarto wartości parametrów dla pomiarów w kierunku osiowym, literą C – w kierunku obwodowym.

Tabela 4. Parametry chropowatości powierzchni niepracujących wałów w kierunku osiowym A i obwodowym C

Wał		R_a	R_t	R_{pk}	R_{vk}	S	S_m	Δ_a	λ_a
		μm						deg	μm
$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	A	0,11	0,99	0,12	0,25	13	26,9	1,4	0,49
	C	0,08	0,56	0,11	0,13	29	159	0,6	0,84
$R_a = 0,32 \mu\text{m}$	A	0,39	3,0	0,36	0,76	13,9	33,7	2,4	1,0
	C	0,19	1,4	0,22	0,12	32	179	1,0	1,2
$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	A	0,66	5,6	0,56	1,3	15,5	38,7	2,9	1,4
	C	0,26	2,4	0,38	0,28	33	130	1,3	1,3

Tabela 5. Statystyczne parametry chropowatości powierzchni niepracujących wałów w kierunku osiowym A i obwodowym C

Wał		R_{sk}	R_{ku}	r_l	r_p	r_{sr}	\bar{r}	b	v	Δ
		μm								
$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	A	$-4,1 \div 0,1$	2,9–44	56	57	56	163	2,2	1,9	$3,4 \cdot 10^{-3}$
	C	$-0,8 \div 1,6$	3,3	487	466	477		1,1	1,3	$3,2 \cdot 10^{-3}$
$R_a = 0,32 \mu\text{m}$	A	$-0,61 \div 0,16$	3,1	20	20	20	67	1,1	1,5	$3,1 \cdot 10^{-2}$
	C	$-0,66 \div 0,61$	2,8	247	202	224		0,4	1,3	$2,7 \cdot 10^{-2}$
$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	A	$-1,0 \div 0,02$	4,0	15	15	15	37	1,6	1,7	$1,1 \cdot 10^{-1}$
	C	$-0,97 \div 1,2$	3,6	82	98	90		0,7	1,2	$1,0 \cdot 10^{-1}$

Z analizy danych zawartych w tabelach 4. i 5. wynika, że chropowatość powierzchni szlifowanych jest anizotropowa ze względu na prawie wszystkie parametry przyjęte do oceny. Parametry wysokości R_a , R_t , R_{pk} , R_{vk} mają wartości większe dla kierunku osiowego aniżeli dla obwodowego. Odwrotnie jest z wartością średniego odstepu nierówności S_m , który ma znacznie większą wartość w kierunku obwodowym niż osiowym. Mniejsze wartości parametrów wynikają z niewielkiego zróżnicowania profilu powierzchni szlifowanej w kierunku obwodowym. Miarą tego zróżnicowania profilu jest również pochylenie profilu Δ_a , im mniejsza jest jego wartość, tym bardziej prostoliniowy jest profil.

Wraz ze wzrostem chropowatości (od $R_a = 0,12$ do $R_a = 0,63 \mu\text{m}$) zwiększają się odpowiednio wartości prawie wszystkich rozpatrywanych parametrów. Za miarę anizotropii ζ powierzchni przyjęto stosunek wartości Δ_a dla obu kierunków pomiaru:

wał	$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	0,32 μm	0,63 μm
	$\zeta = \frac{\Delta_{aA}}{\Delta_{aC}} = 2,3$	2,4	2,2

Otrzymane wyniki wskazują, że w przypadku powierzchni szlifowanych o różnej chropowatości współczynnik anizotropii pozostaje praktycznie stały.

Analiza parametrów statystycznych chropowatości powierzchni szlifowanych wskazuje na różne usytuowanie rzędnych profilu względem linii średniej (R_{sk}) w kierunku obwodowym i osiowym. Oznacza to, że podczas ruchu wału tylko pewna część wierzchołków biegnących w kierunku obwodowym będzie się stykała z powierzchnią krawędzi wargi. Wartości ekscesu R_{ku} są do siebie zbliżone (z wyjątkiem powierzchni wału o $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ dla kierunku osiowego) i wskazują, że rozkład rzędnych jest zbliżony do normalnego ($R_{ku} = 3,0$). Na rozrzut rzędnych profilu po jego wysokości wskazuje również wartość parametru b ; im mniejsza jest jego wartość, tym bardziej nieregularny – zwłaszcza w górnej części profilu – jest rozkład rzędnych.

Średni promień zaokrąglenia \bar{r} wierzchołków nierówności maleje wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni. Stosunek wartości wysokości profilu R_t zmierzonych w kierunku obwodowym do promienia \bar{r} wynosi:

wał	$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	$R_a = 0,32 \mu\text{m}$	$R_a = 0,63 \mu\text{m}$
	$\frac{R_t}{\bar{r}} = \frac{0,6}{163} = 0,004;$	$\frac{1,4}{67} = 0,02;$	$\frac{2,4}{37} = 0,07.$

Największe odkształcenia warstwy wierzchniej krawędzi uszczelniającej wargi zarówno w kierunku normalnym, jak i stycznym do powierzchni wystąpią zatem we współpracy z najbardziej chropowatym wałem $R_a = 0,63 \mu\text{m}$.

Kompleksowy parametr chropowatości Δ ma praktycznie taką samą wartość zarówno dla profilu w kierunku osiowym, jak i obwodowym. Z tego względu autor niniejszej pracy postanowił ocenić przydatność tego parametru do oceny chropowatości zużytej powierzchni wału po współpracy z uszczelnieniem wargowym. Ślad pozostawiony przez wargę na powierzchni wału ma szerokość od 0,1 do 0,3 mm; na tym odcinku ocena chropowatości w kierunku osiowym jest niemożliwa, bowiem długości odcinka elementarnego dla chropowatości $R_a = 0,025 \pm 0,4 \mu\text{m}$ oraz $R_a = 0,4 \pm 3,2 \mu\text{m}$ wynoszą odpowiednio 0,25 i 0,8 mm [55].

Normy zalecają ocenę chropowatości na odcinku pomiarowym równym 5 odcinkom elementarnym. Na podstawie zatem oceny wartości parametru Δ dla zużytej powierzchni w kierunku obwodowym można będzie wnioskować o zmianie chropowatości w kierunku osiowym, wychodząc ze wspomnianej równości $\Delta_A = \Delta_C$.

Dane o rozkładzie promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności na szlifowanych powierzchniach badanych wałów zamieszczono w tabeli 6.

Tabela 6. Parametry charakteryzujące rozkład promieni nierówności powierzchni szlifowanych w kierunkach osiowym A i obwodowym C

Wał		Parametry rozkładu					
		$P(r)$	r_{med}	$r_{śred}$	$\sigma_{ln r}$	V_r	γ_1
		–	μm			–	
$R_a = 0,12 \mu m$	A	0,60	42÷59	50÷73	0,50÷0,65	0,53÷0,73	1,74÷2,55
	C	0,60	340÷630	430÷710	0,40÷0,70	0,49÷0,80	1,31÷2,89
$R_a = 0,32 \mu m$	A	0,60	15÷18	18÷23	0,52÷0,64	0,56÷0,72	1,85÷2,52
	C	0,63÷0,74	110÷210	170÷320	0,85÷1,33	1,03÷2,22	4,17÷17,60
$R_a = 0,63 \mu m$	A	0,59÷0,63	11÷16	13÷20	0,46÷0,60	0,52÷0,76	1,70÷2,75
	C	0,58÷0,71	54÷74	88÷122	0,83÷1,11	1,00÷1,56	4,00÷8,51

Z analizy danych zawartych w tabeli 6. wynika, że:

- prawdopodobieństwo $P(r)$, że promień krzywizny będzie mniejszy (równy) od średniej wartości promienia $r_{śred}$ nie zależy od chropowatości; zanotowano jedynie większe wartości $P(r)$ dla kierunku obwodowego w przypadku bardziej chropowatych powierzchni,

- praktycznie brak anizotropii w rozkładzie promieni zaokrąglenia dla najgładszej powierzchni (prawie te same wartości $\sigma_{ln r}$, V_r , γ_1),

- charakter rozkładu promieni zaokrąglenia jest bardzo podobny dla wszystkich chropowatości powierzchni w kierunku osiowym ($\sigma_{ln r} \approx const$, $V_r \approx const$, $\gamma_1 \approx const$),

- istnieje zróżnicowanie rozkładu promieni zaokrąglenia w kierunku obwodowym; wartości parametrów $\sigma_{ln r}$, V_r oraz γ_1 zmieniają się wraz ze wzrostem chropowatości.

Program Profil oblicza rozkład wartości promieni w zależności od zbliżenia. Na wykresach (rys. 46.–48.) przedstawiono ten rozkład dla analizy profilu powierzchni od lewej do prawej strony (linia gruba) oraz od prawej do lewej strony (linia ciągła cienka).

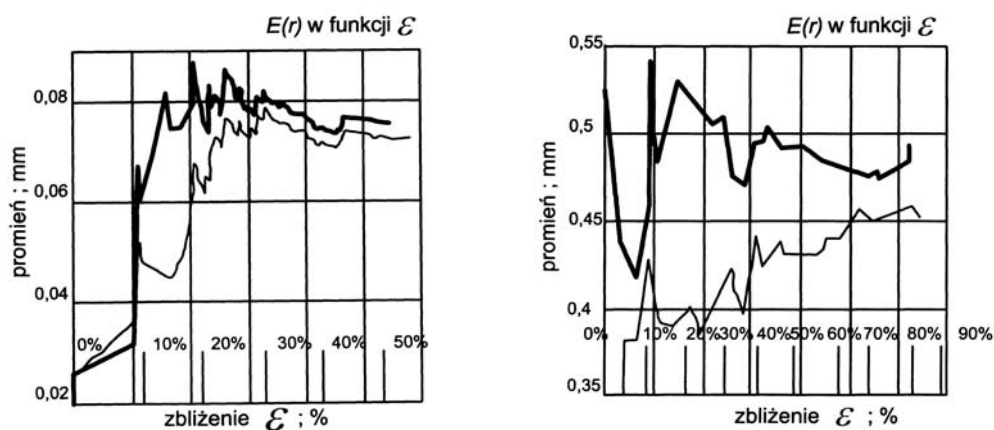
Z analizy wszystkich krzywych rozkładu wartości promieni zaokrąglenia w zależności od zbliżenia do profilu wynikają następujące prawidłowości:

- nierówności o promieniu zaokrąglenia wierzchołka bliskim średniemu promieniowi stykają się z powierzchnią krawędzi wargi przy wzajemnym względnym zbliżeniu $10\% < \varepsilon < 20\%$ do profilu ($10\div 20\%$ wysokości R_t profilu) niezależnie od chropowatości powierzchni. Wniosek ten dotyczy jedynie kierunku osiowego;

- z rozkładu wartości promieni nierówności dla profili powierzchni wyznaczonych w kierunku obwodowym widać, że stabilizacja wartości promienia występuje przy zbliżeniu $20\% < \varepsilon < 30\%$ w przypadku wszystkich badanych wałów,

- wały o chropowatości powierzchni $R_a = 0,12 \mu m$ nie mają nierówności o małym promieniu przy zbliżeniu $\varepsilon < 10\%$, wały o $R_a = 0,32 \mu m$ przy zbliżeniu $\varepsilon < 10\%$ mają nierówności o promieniach znacznie mniejszych od promienia o średniej wartości, wały zaś o $R_a = 0,63 \mu m$ przy tym zbliżeniu mają na swej powierzchni nierówności o różnej wartości promieni.

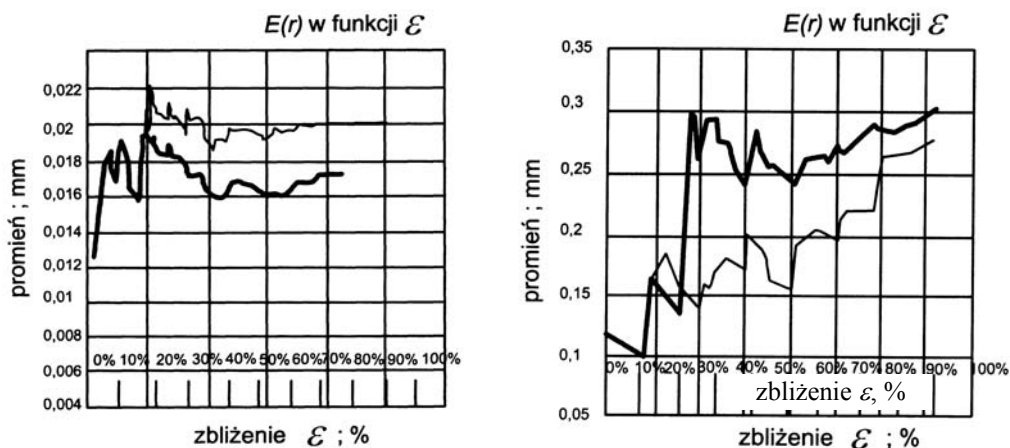
Wynika z tego, że warunki styku wargi z wałem są bardzo zróżnicowane w kierunku obwodowym w początkowym okresie pracy uszczelnienia. Ponadto zależą one od kierunku ruchu wału. Stwierdzono bowiem (rys. 45.–47.), że większe wartości promieni występują przy ocenie profilu – od lewej ku jego prawej stronie. Te różnice wartości promieni wynikają z technologii wykonania powierzchni i powinny maleć w miarę zużycia powierzchni.



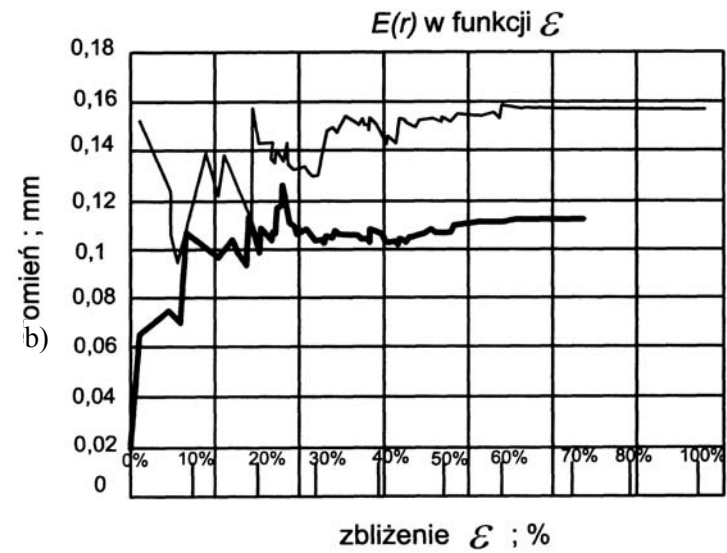
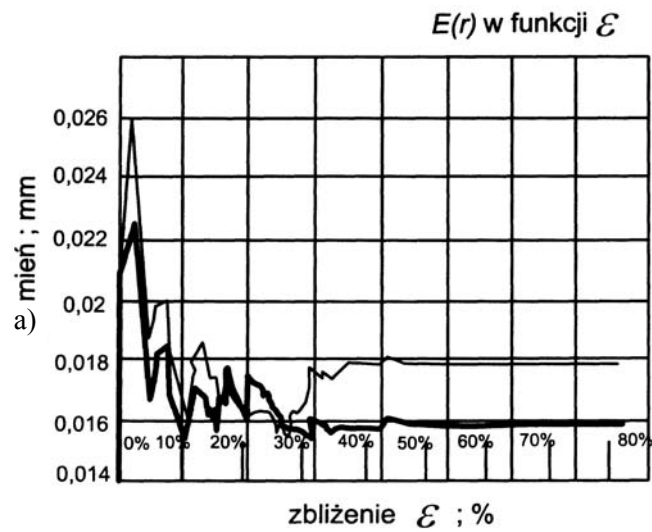
Rys. 46. Rozkład wartości promieni zaokrąglenia nierówności powierzchni w zależności od stopnia zbliżenia ε do profilu dla wału o średnim arytmetycznym odchyleniu profilu $R_a = 0,12 \mu\text{m}$:
a) w kierunku osiowym, b) w kierunku obwodowym

a)

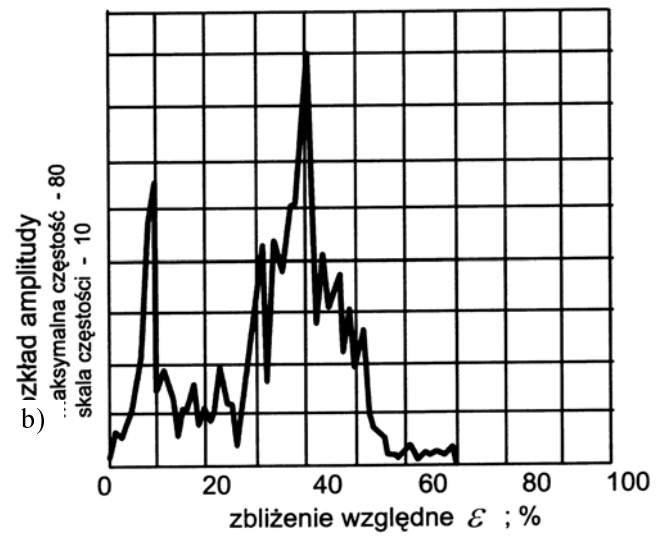
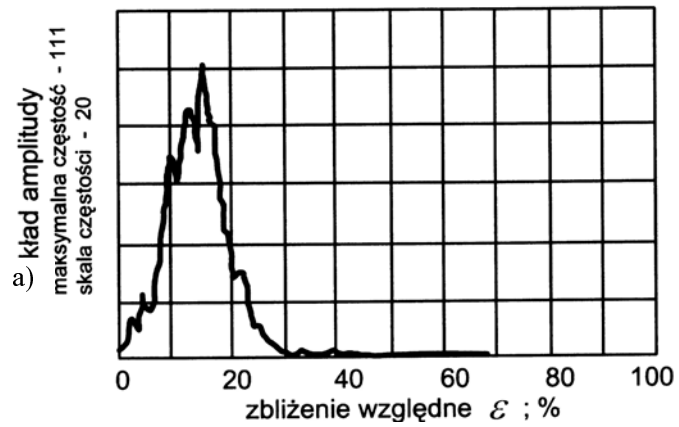
b)



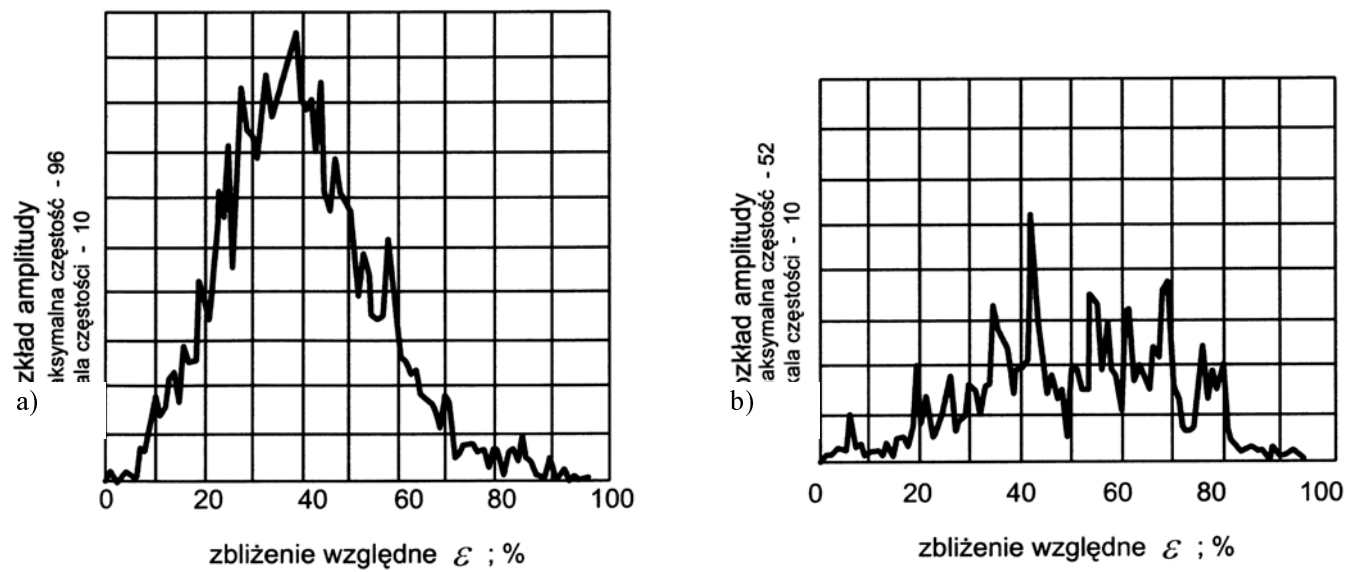
Rys. 47. Rozkład wartości promieni zaokrąglenia nierówności powierzchni wału w zależności od stopnia zbliżenia ε do profilu, $R_a = 0,32 \mu\text{m}$: a) w kierunku osiowym, b) w kierunku obwodowym



Rys. 48. Rozkład wartości promieni zaokrąglenia nierówności powierzchni wałka w zależności od stopnia zbliżenia \mathcal{E} do profilu, $R_a = 0,63 \mu\text{m}$:
 a) w kierunku osiowym, b) w kierunku obwodowym

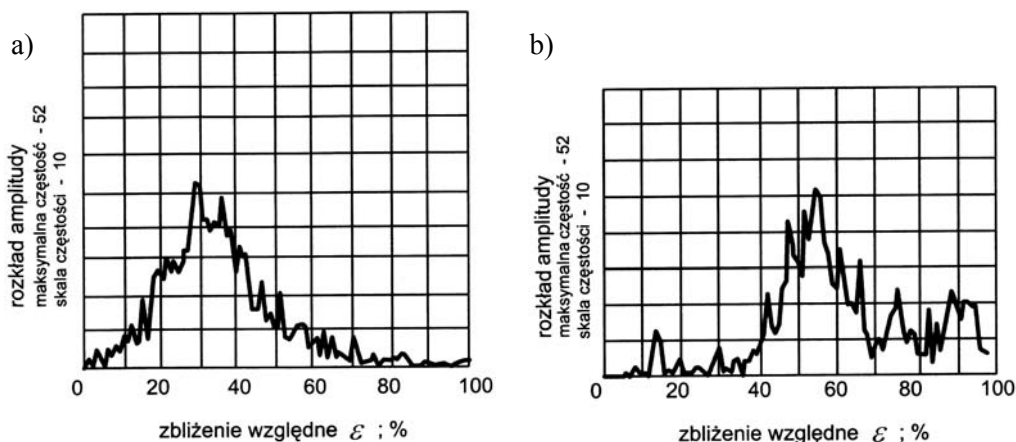


Rys. 49. Typowe rozkłady częstotać rzędnych profilu dla powierzchni szlifowanej o chropowatości $R_a = 0,12 \mu\text{m}$: a) w kierunku osiowym, b) w kierunku obwodowym



Rys. 50. Typowe rozkłady częstotać rzędnych profilu dla powierzchni szlifowanej o chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$:
a) w kierunku osiowym, b) w kierunku obwodowym

Rozrzut rozkładu wartości promieni zaokrąglenia nierówności potwierdza rozkład rzędnych profilu (rys. 49.–51.). W kierunku osiowym rozkład ten ma kształt rozkładu normalnego, a rzędne maksymalnie często występują przy małych wartościach zbliżenia do profilu (rys. 49a–51a); szczególnie jest to widoczne na powierzchni najgładszych wałów. Rozkład rzędnych profilu w kierunku obwodowym charakteryzuje się natomiast albo rozmyciem (rys. 49b), albo przesunięciem maksymalnej częstości w stronę większych wartości zbliżenia $\varepsilon > 40\%$ do profilu (rys. 51b).



Rys. 51. Typowe rozkłady częstości rzędnych profilu dla powierzchni szlifowanej o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$: a) w kierunku osiowym, b) w kierunku obwodowym

Ta nieciągłość rozkładu nierówności w kierunku obwodowym jest zasadniczą przyczyną braku warunków dla wystąpienia styku nasyconego. Zgodnie z informacjami podanymi w pracy [5] styk nasycony występuje przy zbliżeniu względnym

$$\varepsilon_{\text{kryt}} = \frac{1}{(bv)^{1/v-1}} \quad (8)$$

W przypadku powierzchni wałów o chropowatości rozpatrywanej w kierunku osiowym styk nasycony z gładką powierzchnią krawędzi uszczelniającej wystąpi przy następującym zbliżeniu względnym:

wał	$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	$0,32 \mu\text{m}$	$0,63 \mu\text{m}$
	$\varepsilon_{\text{kryt}} = 0,20$	$0,37$	$0,24$

Dla profili powierzchni wałów wyznaczonych w kierunku obwodowym do styku nasyconego może natomiast dojść – zgodnie ze wzorem (8) – w przypadku po-

wierzchni o $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ przy zbliżeniu $\varepsilon_{\text{kryt}} = 0,30$; dla powierzchni o wyższych chropowatościach do styku nasyconego z powierzchnią krawędzi wargi nie dojdzie. Brak możliwości osiągnięcia stanu nasyconego wynika jedynie z przyjętego – podczas wyprowadzania wzoru (8) – założenia, że istnieje ciągły rozkład wierzchołków nierówności po wysokości profilu. W rzeczywistości do styku nasyconego dojdzie również w przypadku profilu rozpatrywanego w kierunku obwodowym, ze względu na małą wysokość nierówności R_t i dużą wartość średniego odstepu chropowatości S_m .

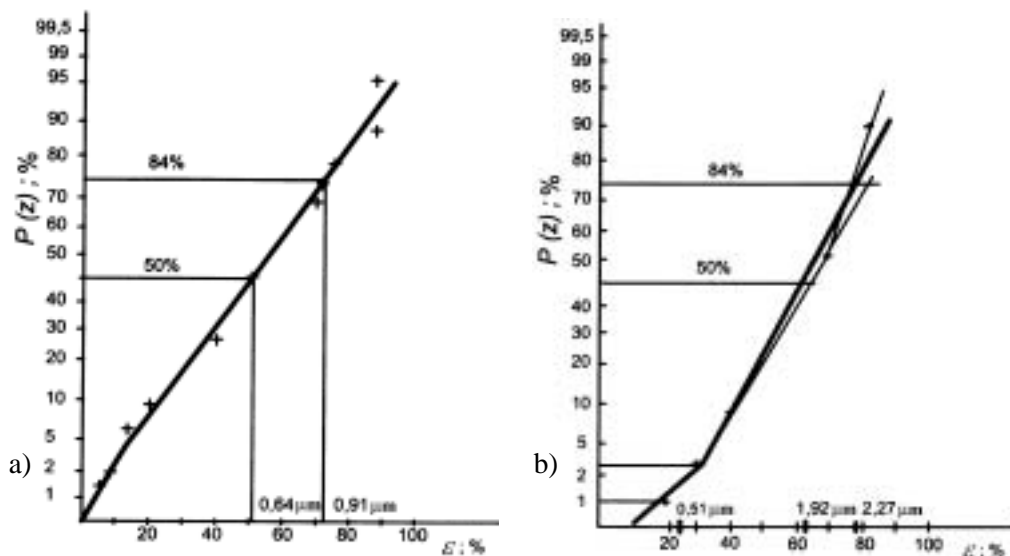
5.2.1.1. RZECZYWISTY STYK WARGI Z POWIERZCHNIĄ SZLIFOWANYCH WAŁÓW

Podane wartości parametrów chropowatości powierzchni wałów (tab. 4.–6.) umożliwiają analizę jakościową warunków styku wargi z wałem. Demkin w zaproponowanej przez siebie metodzie oceny powierzchni styku stosuje niektóre z wymienionych w tabelach parametry [5]. Słabością tej metody jest niemożność oceny rzeczywistego styku wargi z profilem powierzchni wału wyznaczonym w kierunku obwodowym. Trudności te wynikają przede wszystkim z założenia poczynionego przez Demkina, że wierzchołki nierówności, które modelowano za pomocą półkul, powinny się ze sobą stykać. W rzeczywistości profile powierzchni szlifowanych biegnące w kierunku obwodowym są bardzo zróżnicowane zarówno po wysokości, jak i po długości profilu. Z tego względu zdecydowano się określać styk wargi z wałem na podstawie modelu statystycznego chropowatości; oparto się tutaj częściowo na pracy Greenwooda [29].

Z przeprowadzonej przez autora analizy rozkładów gęstości częstości rzędnych profili wyznaczonych w kierunku obwodowym dla powierzchni szlifowanych wynika, że dominują w zasadzie dwa rozkłady: prawo- i lewostronne. Te ostatnie przeważają w przypadku powierzchni o większej chropowatości. Prawostronny rozkład (rys. 49.) charakteryzuje się tym, że częstość występowania rzędnych jest stosunkowo duża przy niewielkim już zbliżeniu ε do profilu. W rozkładzie lewostronnym (rys. 51b) jest na odwrót – częstość występowania rzędnych przy zbliżeniu równym nawet $\varepsilon = 0,3$ jest bardzo mała. Zdarza się, że skośność R_{sk} może mieć tę samą wartość dla obu wspomnianych rozkładów. Można stąd wysnuć fałszywy wniosek, że skoro wartości R_{sk} są podobne, to podobne będą warunki styku [59]. Parametr R_{sk} informuje o położeniu mody względem linii średniej profilu, o podobieństwie warunków styku można więc w tym przypadku mówić jedynie przy dużych wartościach zbliżenia ε do profilu. Przy małym zbliżeniu do profilu warunki styku dla powierzchni o prawo- i lewostronnym rozkładzie będą różne. W celu wykazania tego należy stwierdzić jaki jest rzeczywisty rozkład rzędnych dla obu rozkładów. Dystrybuanty wyznaczone przez profilometr przedstawiono na siatce o podziałce normalnej na osi rzędnych (rys. 52.).

Z wykresu wynika, że dla powierzchni szlifowanych o prawostronnym rozkładzie rozkład rzędnych jest normalny po całej wysokości profilu (rys. 52a). Dla rozkładu lewostronnego (rys. 52b) przedstawiona dystrybuanta składa się z dwóch odcinków

prostoliniowych pochyłonych pod różnymi kątami. Punkt przecięcia obu odcinków ma współrzędne nieprzekraczające dla badanych powierzchni: prawdopodobieństwo $P(z) \leq 8\%$ oraz $\varepsilon \leq 0,4$.



Rys. 52. Rozkład prawdopodobieństwa rzędnych profilu powierzchni szlifowanych dla kierunku obwodowego: a) $R_a = 0,32 \mu\text{m}$, $R_t = 1,3 \mu\text{m}$, b) $R_a = 0,63 \mu\text{m}$, $R_t = 3,2 \mu\text{m}$

Pojawienie się drugiego (górnego) odcinka dystrybuanty świadczy o tym, że górna część profilu ma inny rozkład rzędnych. Rozkład ten może być również rozkładem normalnym, ale o innej wartości średniej i odchylenia standardowego σ' ; dla powierzchni szlifowanych zwykle $\sigma' < \sigma$. Leefe nazywa taki rozkład bigaussowskim i uważa, że jest on typowy wyłącznie dla powierzchni zużytych lub oryginalnych otrzymanych w rezultacie zastosowania dwóch operacji, na przykład, szlifowania i późniejszego docierania [49]. W rozpatrywanym tu przypadku rozkład binormalny stwierdzono dla tych wszystkich oryginalnych powierzchni szlifowanych, dla których rozkład gęstości częstości był rozkładem lewostronnym. Wynika z tego, że powierzchnia krawędzi uszczelniającej może stykać się – zależnie od wartości nacisku – z górną częścią profilu lub z górną i z zasadniczą częścią profilu. Podstawowym zadaniem jest więc wyznaczenie nacisku stykowego, od którego zależeć będzie powierzchnia rzeczywistego styku wargi z wałem. Podczas rozwiązywania tego zadania założono, że powierzchnia krawędzi uszczelniającej wargi jest gładka (rys. 36b), a jej styk z powierzchnią jest stykiem sprężystym.

Średnią powierzchnią A rzeczywistego styku wargi z wałem przy wzajemnym zbliżeniu $\alpha = z - d$ (rys. 53.) oblicza się ze wzoru [29]

$$A = n_o \int_d^{\infty} f_1(\alpha) \varphi(z) dz, \quad (9)$$

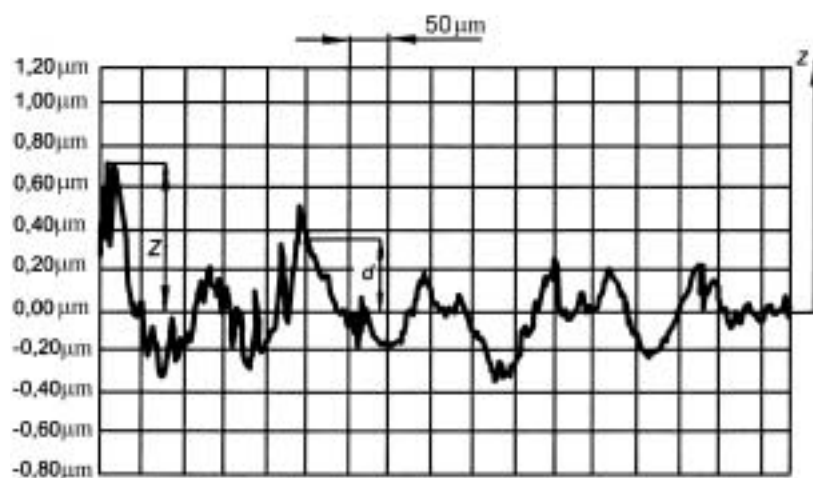
w którym:

n_o – liczba nierówności przypadających na jednostkę powierzchni,

$f_1(\alpha)$ – funkcja opisująca powierzchnię styku pojedynczej nierówności z wargą,

$\varphi(z)$ – funkcja gęstości częstości rzędnych profilu,

d – odległość powierzchni wargi od średniej linii profilu powierzchni wału.



Rys. 53. Profil powierzchni wału w kierunku obwodowym z podstawowymi oznaczeniami

Funkcję $f_1(\alpha)$ dla styku sprężystego opisano zależnością

$$f_1(\alpha) = \pi \bar{r} \alpha, \quad (10)$$

w której \bar{r} – średnia wartość promienia wszystkich nierówności na powierzchni wału.

Podobnie zapisuje się zależność na obliczenie średniego obciążenia L rzeczywistego styku wargi z wałem

$$L = n_o \int_d^{\infty} f_2(\alpha) \varphi(z) dz, \quad (11)$$

gdzie:

$$f_2(\alpha) = \frac{4}{3} E'(\bar{r})^{0.5} \alpha^{1.5}, \quad (12)$$

$E' = E/(1 - \nu^2)$, E – moduł sprężystości gumy,

ν – współczynnik Poissona; dla gumy $\nu = 0,5$.

Po wprowadzeniu równań (10) i (12) do wzorów (9) i (11), te ostatnie można zapisać:

$$A = \pi n_o \bar{r} \int_d^{\infty} (z-d) \varphi(z) dz,$$

$$L = \frac{4}{3} n_o E' \bar{r}^{0.5} \int_d^{\infty} (z-d)^{1.5} \varphi(z) dz.$$

Powyższe równania sprowadza się do postaci znormalizowanej przez wprowadzenie zmiennych $\bar{z} = z/\sigma$ oraz $h = d/\sigma$:

$$A = \pi n_o \bar{r} \int_h^{\infty} (\bar{z}-h) \varphi(\bar{z}) d\bar{z}, \quad (13)$$

$$L = \frac{4}{3} n_o E' \bar{r}^{0.5} \int_h^{\infty} (\bar{z}-h)^{1.5} \varphi(\bar{z}) d\bar{z}. \quad (14)$$

Całkę w obu równaniach można ogólnie zapisać jako

$$F(h, \rho) = \int_h^{\infty} (\bar{z}-h)^n \varphi(\bar{z}) d\bar{z}. \quad (15)$$

Parametr ρ można w uproszczeniu wyznaczyć przez określenie na profilogramie zarówno liczby przecięć N_o profilu przez jego linię średnią, jak i liczby wierzchołków N_w na jednostce długości

$$\rho = (N_w/N_o)^2.$$

Z analizy profilogramów szlifowanych powierzchni wałów wynika, że wartość parametru ρ dla kierunku obwodowego zawiera się w przedziale $0,3 \leq \rho \leq 0,4$. Dla profili wyznaczonych w kierunku osiowym – $\rho > 2,5$.

Po podzieleniu stronami równań (14) i (13) otrzymuje się wzór określający rzeczywistą wartość nacisku stykowego

$$\bar{p} = \frac{4}{3\pi} E' \left(\frac{\sigma}{\bar{r}} \right)^{0.5} \frac{F_{1.5}(h, \rho)}{F_1(h, \rho)}. \quad (16)$$

Obliczone wartości ilorazu $\frac{F_{1.5}(h, \rho)}{F_1(h, \rho)}$ dla $\rho = 0,4 = \text{const}$ oraz dla h zawartego

w przedziale $0 \leq h \leq 3$ są następujące:

h	0	0,5	1,0	2,0	3,0
$F_{1.5}/F_1$	3,5	2	1,5	0,9	0,7

Zmiana wartości tego ilorazu jest duża, co oznacza, że w miarę oddalania się od średniej linii profilu (rys. 53.) wartość nacisku będzie znacznie maleć.

Z analizy profili powierzchni wyznaczonych w kierunku obwodowym wynika, że iloraz odchylenia standardowego σ rzędnych i średniego promienia zaokrąglenia \bar{r} wszystkich wierzchołków wynosi dla szlifowanych powierzchni wałów

$$2,5 \cdot 10^{-2} \leq \left(\frac{\sigma}{\bar{r}} \right)^{0,5} \leq 1,2 \cdot 10^{-1}.$$

Do obliczenia wartości nacisku stykowego niezbędna jest jeszcze znajomość modułu sprężystości gumy. Załóżmy, że uszczelnienie wykonano z gumy fluorowej o symbolu S-490, dla której $E_{\infty} = 4,8$ MPa (tab. D1.1, Dodatek 1), stąd

$$E' = \frac{E_{\infty}}{1-\nu^2} = 6,4 \text{ MPa}.$$

Nacisk niezbędny do wgłębienia nierówności o rozkładzie prawo- i lewostronnym w krawędź uszczelniającą na odległość $h = 0$ oraz $h = 1$ od średniej linii profilu wyniesie:

Powierzchnia	\bar{p} ; MPa	
	$h = 1$	$h = 0$
Wał $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ rozkład prawostronny	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-1}$
Wał $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ rozkład lewostronny	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-1}$

Różnica w wartościach nacisku stykowego wynika głównie z różnych wartości ilorazu $(\sigma/\bar{r})^{0,5}$ dla poszczególnych topografii powierzchni wałów. Rozkład rzędnych wpływa zarówno na nacisk, jak i na głębokość penetracji wierzchołków nierówności powierzchni wału w wardze gumowej. Po spadku nacisku z $6,0 \cdot 10^{-1}$ do $2,6 \cdot 10^{-1}$ MPa głębokość zagłębienia nierówności zmniejszy się z 0,54 do 0,2 μm dla powierzchni o prawostronnym rozkładzie gęstości częstości rzędnych. W przypadku natomiast powierzchni z lewostronnym rozkładem rzędnych po ponad dwukrotnym spadku nacisku zagłębienie nierówności zmieniło się z 1,6 do zaledwie 1,2 μm . Oznacza to, że nierówności powierzchni wału będą – pomimo dwukrotnego spadku nacisku na obwodzie uszczelnienia – wgłębiały się w jego wargę uszczelniającą.

Przyjęcie przez Greenwooda założenia o stałości wartości promienia wszystkich nierówności ($\bar{r} = \text{const}$) jest przyczyną spadku wartości nacisku obliczonego na podstawie równania (16) w miarę odsuwania powierzchni wargi od środkowej linii profilu. W rzeczywistości coraz wyżej położone wierzchołki mają zwykle mniejsze pro-

mienie zaokrąglenia. Stwierdzono (p. 5.2.1), że stabilizacja wartości promieni na poziomie wartości średniej \bar{r} występuje dla profili rozpatrywanych w kierunku obwodowym przy zbliżeniu równym $0,2 \leq \varepsilon \leq 0,3$. Dla rozpatrywanych powyżej chropowatości powierzchni wałów o parametrach $R_a = 0,32$ oraz $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ oznacza to, że poniżej przedziałów $0,26 \div 0,39 \mu\text{m}$ oraz $0,64 \div 0,96 \mu\text{m}$ będą występowały nierówności o promieniach mniejszych niż średnie wartości \bar{r} przyjęte do obliczeń. Można przyjąć, że w tym przypadku wartości ilorazu $(\sigma/r)^{0,5} > (\sigma/\bar{r})^{0,5}$.

5.2.2. CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI TŁOCZONYCH NAWĘGLANYCH

Z uszczelnień kompaktowych (rys. 3f) wymontowano tulejki, które były wałami współpracującymi z nimi uszczelnień wargowych. Tulejki te były tłoczone, a ich powierzchnia nawęglana; w rezultacie twardość powierzchni wynosiła 56 HRC. Wartości parametrów chropowatości prezentowane w tabelach 7. i 8. są średnimi z 36 pomiarów.

Tabela 7. Parametry chropowatości powierzchni oryginalnych tulejek tłoczonych nawęglanych

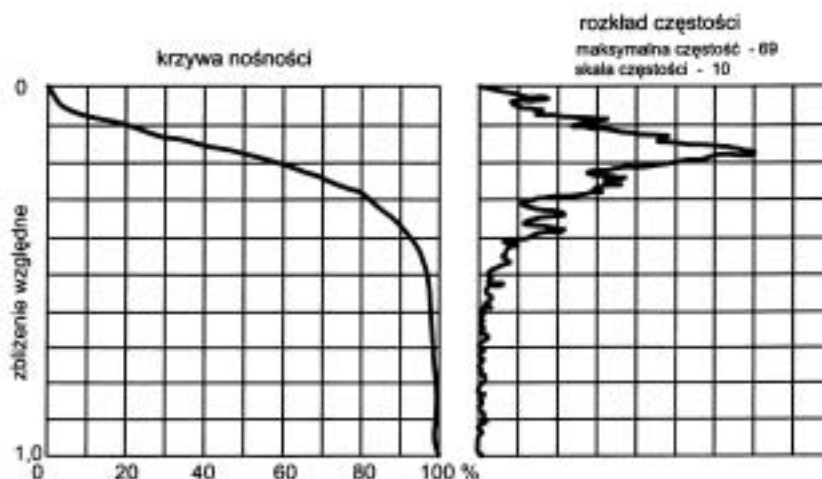
Tulejka	R_a	R_t	R_{pk}	R_{vk}	S	S_m	Δ_a	λ_a	
	μm						deg	μm	
Typ C	A	0,25	2,9	0,19	0,88	23	56	2,0	0,80
	C	0,29	2,7	0,13	0,80	22	55	2,2	0,90

Tabela 8. Statystyczne parametry chropowatości powierzchni oryginalnych tulejek tłoczonych nawęglanych

Tulejka	R_{sk}	R_{ku}	r_l	r_{pr}	\bar{r}_{sr}	\bar{r}	b	v	Δ	
	–			μm			–			
Typ C	A	-2,2	9,0	99	98	99	95	9,6	1,9	$1,0 \cdot 10^{-2}$
	C	-1,4	6,2	93	92	92		3,7	1,6	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Po podsumowaniu wyników pomiarów można stwierdzić, że powierzchnie tulejek są izotropowe, ze względu na prawie wszystkie parametry przyjęte do oceny. Wartości odpowiednich parametrów odpowiadają parametrom różnych szlifowanych powierzchni, na przykład R_{pk} ma podobną wartość do jego odpowiednika dla najgładszej powierzchni, a pochylenie profilu Δ_a jest podobne do pochylenia profilu powierzchni szlifowanej o chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$.

Charakterystyczną cechą powierzchni tulejek jest położenie większości rzędnych powyżej średniej linii profilu (rys. 54.). Oznacza to, że nawet przy niewielkiej wartości nacisku na styku warg–wał można oczekiwać styku nasyconego oraz możliwości wystąpienia adhezyjnego zużycia powierzchni krawędzi uszczelniającej.



Rys. 54. Rozkład częstości rzędnych dla profilu oryginalnej powierzchni tłoczonej

Średnia wartość promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności wynosi $95 \mu\text{m}$, co przy wartości wysokości profilu $R_t = 2,7 \div 2,9 \mu\text{m}$ daje następującą wartość ilorazu

$$\frac{R_t}{\bar{r}} = \left(\frac{2,7}{95} - \frac{2,9}{95} \right) \cong 0,03.$$

Podobną wartość otrzymano dla wału o chropowatości powierzchni $R_a = 0,32 \mu\text{m}$.

Kompleksowy parametr chropowatości Δ dla powierzchni tłoczonej jest nieco mniejszy aniżeli dla powierzchni szlifowanej $R_a = 0,32 \mu\text{m}$.

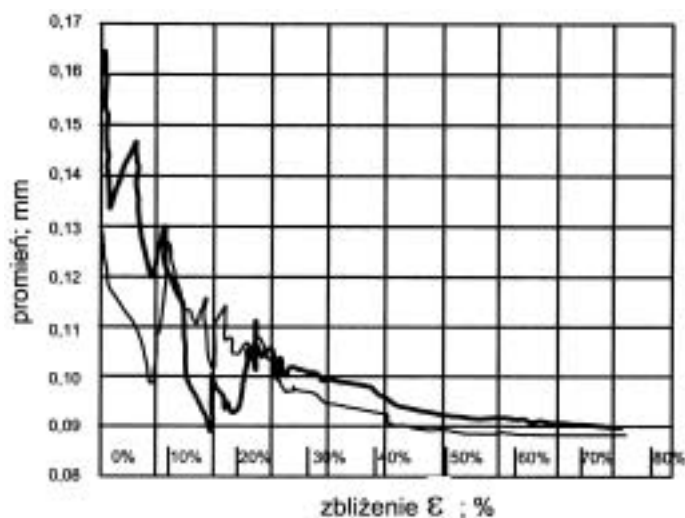
Dane o rozkładzie promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności na tłoczonych powierzchniach tulejek zawarto w tabeli 9.

Tabela 9. Parametry charakteryzujące rozkład promieni nierówności powierzchni tłoczonych nawęglanych

Tulejka	Parametry rozkładu						
	P(r)	r_med	r_śred	$\sigma_{ln r}$	V_r	γ_1	
	–	μm			–		
Typ C	A	0,64	77	99	0,71	0,81	2,96
	C	0,62	77	94	0,63	0,70	2,44

Z analizy przedstawionych danych wynika, że charakterystyczną cechą tych powierzchni jest występowanie wierzchołków o promieniu zaokrąglenia większym (równym) od średniej wartości przy względnym zbliżeniu do profilu nie przekraczającym $\varepsilon \leq 10\%$.

Warto również podkreślić brak większych różnic w wartościach promieni ocenianych przy ruchu stylusa profilometru od lewa do prawa profilu i na odwrót (rys. 55.).



Rys. 55. Rozkład wartości promieni zaokrąglenia nierówności w zależności od względnego zbliżenia do profilu

5.2.2.1. RZECZYWISTY STYK WARGI Z POWIERZCHNIĄ TULEJEK NAWĘGLANYCH

Z rozkładu gęstości częstości rzędnych profilu powierzchni nawęglanych (rys. 54.) wynika, że jest to rozkład prawostronny. Przebieg dystrybuanty na siatce z podziałką normalną (rys. 56.) świadczy o tym, że rozkład rzędnych jest rozkładem normalnym. Jedynie rzędne dolin profilu ($P(z) > 0,8$) mają inny rozkład, ale to nie powinno mieć wpływu na warunki styku wargi z powierzchnią tulejki.

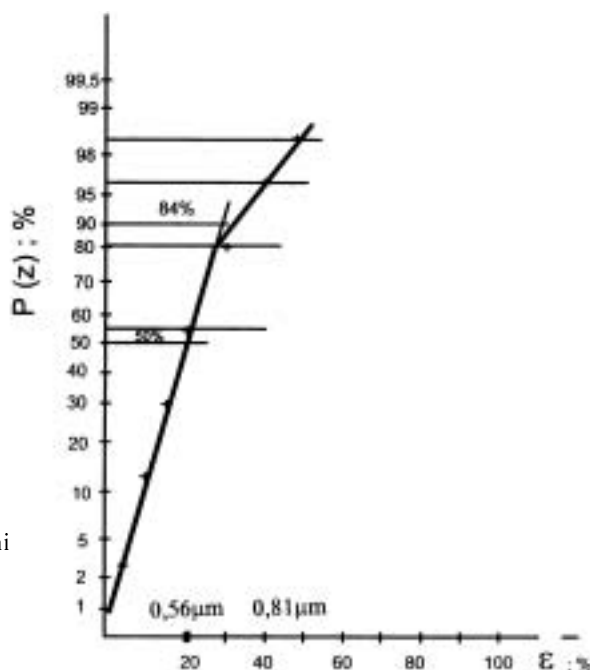
Uszczelnienia wykonano z gumy akrylowej, dla której moduł sprężystości $E_{\infty} = 5,6$ MPa (tab. D1.3, Dodatek 1). Dla analizowanej powierzchni parametr ρ równa się $\rho = 5 = \text{const}$, natomiast zmiany ilorazu $F_{1,5}/F_1$, w zależności od względnego położenia $h = d/\sigma$ powierzchni wargi od linii średniej profilu, są następujące:

h	0	0,5	1,0	2,0
$F_{1,5}/F_1$	1,4	1,1	1,0	0,8

Przy wartości ilorazu $(\sigma/\bar{r})^{0,5}$ równiej $(0,27/95)^{0,5} = 5 \cdot 10^{-2}$ należy oczekiwać następującej zmiany nacisku przy zmianie h z wartości 1 do 2:

$$\bar{p}_1 = \frac{4}{3\pi} \cdot E' \left(\frac{\sigma}{\bar{r}} \right)^{0,5} \frac{F_{1,5}}{F_1} = \frac{4}{3\pi} 7,5 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 1,6 \cdot 10^{-1} \text{ MPa},$$

$$\bar{p}_2 = 1,3 \cdot 10^{-1} \text{ MPa}.$$



Rys. 56. Rozkład prawdopodobieństwa rzędnych profilu izotropowej powierzchni tulejki nawęglanej:
 $R_a = 0,29 \mu\text{m}$, $R_t = 2,7 \mu\text{m}$

Wystarczy zwiększyć nacisk zaledwie do wartości $\bar{p}_o = 2,2 \cdot 10^{-1}$ MPa, aby ponad 50% powierzchni tulejki pozostawało w styku z krawędzią uszczelniającą. Odsunięcie wargi o $d = 2\sigma$ od linii średniej prowadzi do spadku nacisku o 40% wartości \bar{p}_o , która wydaje się być wystarczająca, aby olej miał utrudniony dostęp do obszaru styku.

5.2.3. CHROPOWATOŚĆ TŁOCZONYCH POWIERZCHNI FOSFORANOWANYCH

Oceniano tłoczone tulejki (rys. 3d), których powierzchnie zmodyfikowano w rezultacie zastosowania następującej obróbki: fosforanowania (TF), szlifowania i późniejszego fosforanowania (SF) oraz fosforanowania i późniejszego szlifowania (FS). Tulejki te zostały wykonane z niskowęglowej, nieuspokojonej stali [21]; jako tulejki regeneracyjne są one nakładane na powierzchnię zużytej części wału po współpracy z uszczelnieniem wargowym. Poprzez użycie tulejek regeneracyjnych wyeliminowano kosztowną operację demontażu i ponownej obróbki wału. Powierzchnia fosforanowana ma twardość $175 \div 210$ HB. W tabelach 10. i 11. zawarto uśrednione wartości (na podstawie 21 pomiarów) parametrów chropowatości dla każdego z rodzajów obróbki powierzchni tulejek.

W niektórych kolumnach tabeli 11. podano, zamiast średnich wartości, zakresy występowania wartości danego parametru; rozrzut wartości był zbyt duży, aby podawać wartość średnią.

Tabela 10. Parametry chropowatości powierzchni oryginalnych tulejek fosforanowanych

Tulejka		R_a	R_t	R_{pk}	R_{vk}	S	S_m	Δ_a	λ_a
		μm						deg	μm
TF	A	0,75	7,3	0,8	1,8	18	63	4,6	1,1
	C	0,7	6,9	0,7	1,4	19	56	4,5	1,0
SF	A	0,5	6,4	1,2	0,8	15	28	7,0	0,4
	C	0,5	6,7	1,6	0,7	15	43	4,9	0,7
FS	A	0,4	3,1	0,8	0,5	14	31	5,3	0,5
	C	0,3	2,6	0,6	0,4	63	250	0,55	3,1

Tabela 11. Statystyczne parametry chropowatości powierzchni oryginalnych tulejek fosforanowanych

Tulejka		R_{sk}	R_{ku}	r_l	r_{pr}	r_{sr}	\bar{r}	b	v	Δ
		μm						–		
TF	A	0,23±0,4	2,7–5,2	21,3	22	21,8	22	0,20	1,6	$3 \cdot 10^{-1} \div 2,5$
	C	-0,14 ÷ -0,68	3,3±8,0	22	23	22,3		1,7	1,9	$2,5 \cdot 10^{-1}$
SF	A	0,2±0,7	5,7	12,5	12,0	12	14,5	0,01±0,2	1,0	56÷73
	C	0,1±1,3	5,3	17,3	17,8	17,5		0,04±0,3	1,2	1,7÷6,4
FS	A	0,1±0,4	3,2	20	19,8	19,9	63	0,18	1,5	$1,5 \cdot 10^{-1}$
	C	-0,4±2,2	3,3±16,5	250	150	200		0,87	1,5	$4,5 \cdot 10^{-2}$

Każda z technologii modyfikacji powierzchni tłoczonych tulejek nadaje następujące charakterystyczne cechy chropowatości:

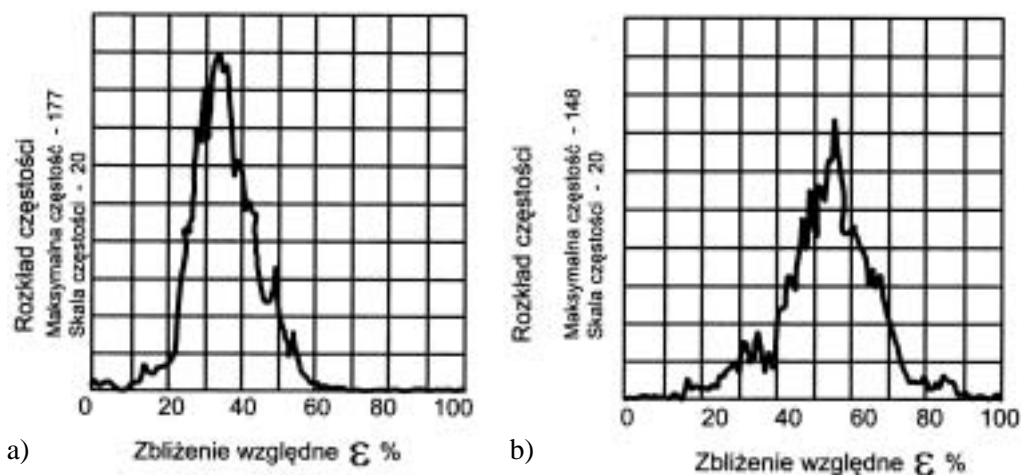
1. Powierzchniom tłoczonym i fosforanowanym:

- chropowatość powierzchni jest w pełni izotropowa o rozwiniętym profilu (duża wartość Δ_a),
- mała wartość średniego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności ($\bar{r} \cong 22 \mu\text{m}$),
- korzystny rozkład rzędnych profilu – koncentracja powyżej średniej linii profilu dla kierunku obwodowego (rys. 57a); w kierunku osiowym rozkład rzędnych profilu poniżej linii średniej (rys. 57b),
- wartość ilorazu $R_t/\bar{r} = 6,9/22 = 0,31$ wskazuje, że powinno wystąpić zużycie ściernie gumy oraz intensywne zużycie powierzchni fosforanowanej, pomimo koncentracji rzędnych powyżej linii średniej.

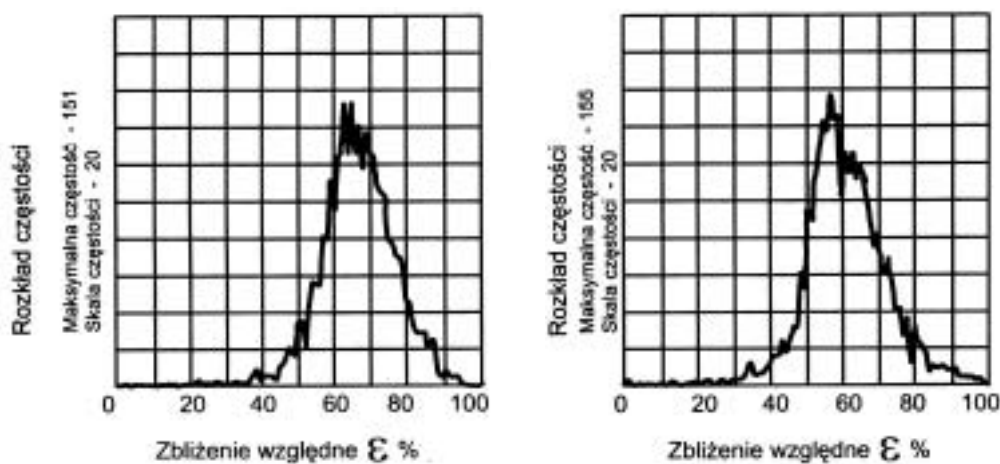
2. Powierzchniom tłoczonym szlifowanym i fosforanowanym:

- szlifowanie wprowadziło – mimo pokrycia powierzchni warstwą fosforanową – pewną anizotropię: parametr S_m jest większy w kierunku obwodowym, Δ_a jest większe w kierunku osiowym $\Delta_{a_d}/\Delta_{a_c} = 1,4$,
- zwiększyła się wysokość R_{pk} , a jednocześnie zmniejszyła głębokość dolin R_{vk} ,
- spadek wartości średniego promienia $\bar{r} \cong 14 \mu\text{m}$,
- pogorszył się rozkład rzędnych profilu; maksymalna amplituda częstości gęstości rzędnych występuje przy dużych wartościach zbliżenia względnego do profilu (rys. 58.),

- duża wartość parametru Δ oznacza, że chropowatość powierzchni jest duża,
- wartość ilorazu $R_r/\bar{r} = 6,7/14,5 = 0,46$ wskazuje, że stan naprężenia w warstwie wierzchniej krawędzi uszczelniającej będzie wysoki.



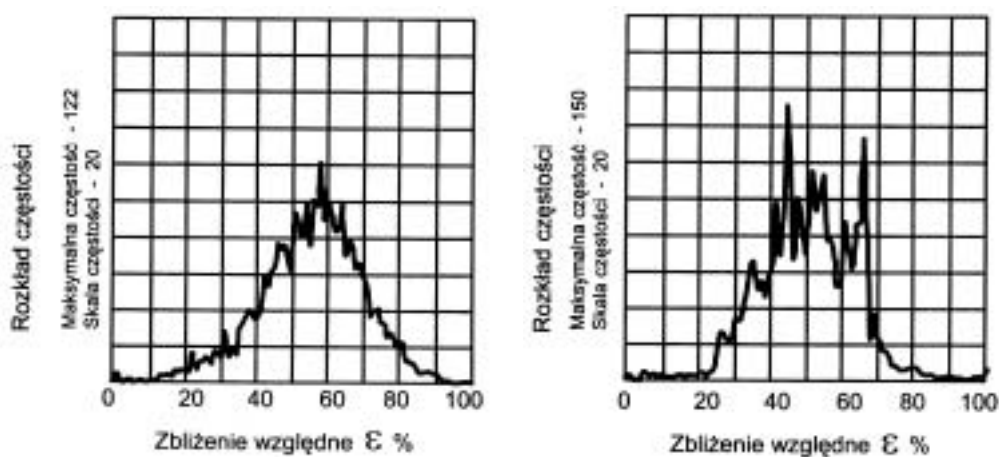
Rys. 57. Krzywa częstości amplitud rzędnych powierzchni tłoczonej fosforowanej:
a) w kierunku obwodowym, b) w kierunku osiowym



Rys. 58. Krzywa częstości amplitud rzędnych powierzchni tłoczonej szlifowanej fosforowanej:
a) w kierunku obwodowym, b) w kierunku osiowym

3. Powierzchniom tłoczonym fosforanowanym i szlifowanym:

- powierzchnia jest anizotropowa ze względu na prawie wszystkie parametry; przyjęty wskaźnik anizotropii $\Delta_{aA}/\Delta_{ac} = 9,6$ jest bardzo duży,
- spadek wartości parametru $R_{vk} = 0,4 \mu\text{m}$, a jednocześnie znaczny wzrost parametru S_m ($S_m = 250 \mu\text{m}$) może doprowadzić do drgań ciernych wargi,
- wartość ilorazu R_t/\bar{r} , chociaż najmniejsza, jest jednak znaczna ($R_t/\bar{r} = 0,05$) w porównaniu z powierzchnią tłoczoną nawęglaną,
- znaczna zmienność rozkładu rzędnych profilu dla kierunku obwodowego (rys. 59.) od położenia powyżej do położenia poniżej linii średniej profilu.



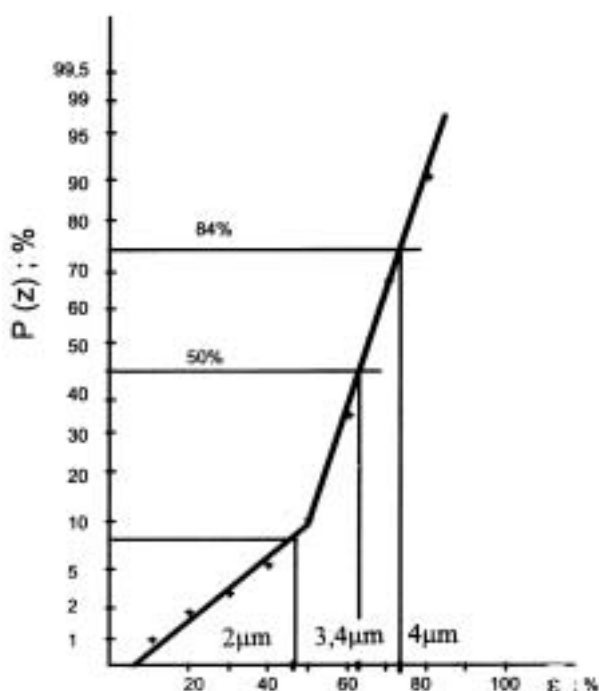
Rys. 59. Krzywa częstości amplitud rzędnych powierzchni tłoczonej fosforanowanej i szlifowanej w kierunku obwodowym dla dwóch pierścieni

Dane o rozkładzie promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności na tłoczonych fosforanowanych powierzchniach tulejek zawarto w tabeli 12.

Tabela 12. Parametry charakteryzujące rozkład promieni nierówności powierzchni tłoczonych fosforanowanych

Tulejka	Parametry rozkładu						
	$P(r)$	r_{med}	$r_{\text{śred}}$	$\sigma_{\ln r}$	V_r	γ_1	
	–	μm			–	–	
TF	A	0,62	18	22	0,63	0,70	2,44
	C	0,61	19	23	0,62	0,68	2,36
SF	A	0,60	11	12	0,42	0,44	1,39
	C	0,60	17	20	0,57	0,62	2,10
FS	A	0,61	20	24	0,60	0,66	2,28
	C	0,70	118	202	1,04	1,39	6,86

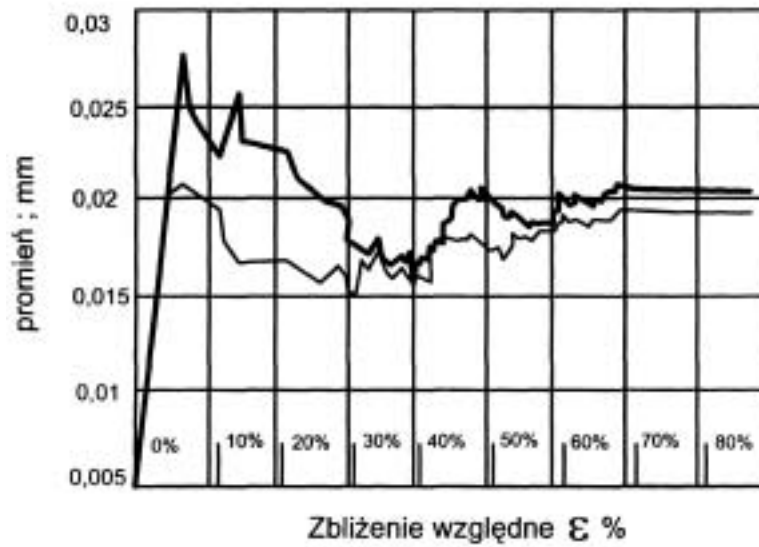
Z rozkładu wartości promieni zaokrąglenia nierówności w funkcji zbliżenia do profilu ε wynika, że średnia wartość promienia dla powierzchni tłoczonych fosforanowanych występuje powyżej $\varepsilon \geq 10\div 20\%$. Rozkład rzędnych profilu jest lekko binormalny o odchyleniu standardowym $\sigma \cong 0,67 \mu\text{m}$. Dla pierścieni tych można więc przyjąć, że iloraz $(\sigma/\bar{r})^{0,5}$ wynosi $(0,67/22)^{0,5} = 1,7 \cdot 10^{-1}$. Wartość ta jest większa od tej, jaką odznacza się szlifowana powierzchnia o największej chropowatości $1,7 \cdot 10^{-1} > 1,2 \cdot 10^{-1}$.



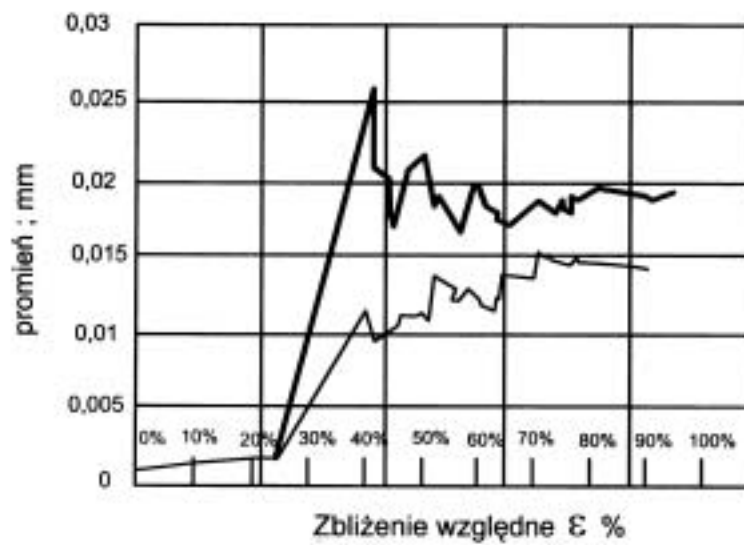
Rys. 60. Rozkład prawdopodobieństwa rzędnych profilu powierzchni tłoczonych tulejki szlifowanej i fosforanowanej
 $R_a = 0,53 \mu\text{m}$, $R_t = 5,40 \mu\text{m}$

Szlifowanie i następne fosforanowanie powierzchni prowadzi do rozwiniętego rozkładu binormalnego (rys. 60.). Należy jednak oczekiwać dużego nacisku stykowego, pomimo dużej wartości ilorazu $(\sigma/\bar{r})^{0,5}$ równego $(0,6/15)^{0,5} = 2 \cdot 10^{-1}$, bowiem wierzchołki o dużej wartości promienia występują przy bardzo małym zbliżeniu ε (rys. 61.).

Fosforanowanie i następne szlifowanie powierzchni daje powierzchnię o małej wartości ilorazu $(\sigma/\bar{r})^{0,5} = (0,35/63)^{0,5} = 7,5 \cdot 10^{-2}$. Rozkład wartości promieni w zależności od zbliżenia do profilu (rys. 62.) wskazuje, że wartości promieni nie przekraczają $100 \mu\text{m}$ dla kierunku obwodowego przy zbliżeniu $\varepsilon \leq 35\%$, stąd średnia wartość promienia wyniesie $\bar{r} = \sqrt{r_A r_C} = \sqrt{20 \cdot 100} = 45 \mu\text{m}$.



Rys. 61. Rozkład wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności powierzchni szlifowanej i fosforanowanej



Rys. 62. Rozkład wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności powierzchni fosforanowanej i szlifowanej

Ze względu na bardzo małą twardość warstwy fosforanowej zdecydowano nie rozpatrywać warunków styku i nacisku niezbędnego do oszacowania zbliżenia po-

wierzchni tulejki i wargi, bowiem zużycie nierówności wystąpi po bardzo krótkim okresie pracy.

5.3. PODSUMOWANIE

1. Istnieje kilka typowych topografii oryginalnych powierzchni krawędzi uszczelniających wargi: bardzo gładka powierzchnia, gładka z bardzo płytkimi wgłębieniami oraz powierzchnia z mikrofalami biegnącymi w kierunku osiowym.

2. Zdecydowano charakteryzować powierzchnię wałów za pomocą zarówno parametrów deterministycznych, jak i probabilistycznego rozkładu rzędnych profili i promieni zaokrąglenia wierzchołków. Za decydujący profil powierzchni dla pracy uszczelnienia wargowego uznano profile w kierunku obwodowym; są one znacznie bardziej zróżnicowane niż profile w kierunku osiowym.

3. Szlifowanie wgłębne powierzchni wałów w zakresie chropowatości $0,12 \leq R_a \leq 0,63 \mu\text{m}$ wprowadza anizotropię ze względu na wszystkie parametry przyjęte do oceny chropowatości. Wraz ze zwiększeniem chropowatości wzrasta stopień lewostronnego rozkładu gęstości częstości rzędnych, a stabilizacja wartości promienia przesuwa się w stronę większych wartości zbliżenia ε do profilu.

4. Iloraz wysokości profilu R_t do średniej wartości promienia zmienia się dla powierzchni szlifowanych w zakresie $0,004 \leq (R_t/\bar{r}) \leq 0,07$, iloraz odchylenia standardowego rzędnych profilu σ do średniego promienia – $2,5 \cdot 10^{-2} \leq (\sigma/\bar{r})^{0,5} \leq 1,2 \cdot 10^{-1}$.

5. W przypadku gładkich i średnio gładkich powierzchni zaleca się lewostronne rozkłady gęstości częstości rzędnych ze względu na potrzebę zachowania mikrostryku z powierzchnią wargi w sytuacji zmiennego rozkładu nacisku stykowego w kierunku obwodowym.

6. Powierzchnie tłoczone nawęglane oraz tłoczone fosforanowane są powierzchniami izotropowymi.

7. Cechami charakterystycznymi powierzchni tłoczonych nawęglanych są duża powtarzalność rozkładu rzędnych w kierunku obwodowym, rozkłady są izotropowe i z reguły prawostronne, a ilorazy R_t/\bar{r} oraz $(\sigma/\bar{r})^{0,5}$ wynoszą: $R_t/\bar{r} = 0,03$ i $(\sigma/\bar{r})^{0,5} = 5 \cdot 10^{-2}$. Oznacza to, że głębokość wnikania nierówności powierzchni wału w powierzchnię wargi będzie niewielka, rzeczywista powierzchnia styku wargi z wałem będzie duża, oraz że zmiana nacisku w miarę oddalania się od linii średniej profilu będzie umiarkowana.

8. Fosforanowanie tłoczonej powierzchni prowadzi do występowania lewostronnego rozkładu rzędnych o dużej wartości średniego pochylenia profilu Δ_a oraz bardzo dużej wartości ilorazu $R_t/\bar{r} = 0,31$.

9. Szlifowanie i następnie fosforanowanie powierzchni wprowadza pewną anizotropię powierzchni, zwiększenie wartości ilorazu $R_t/\bar{r} = 0,46$ oraz bardziej zdecydo-

wany lewostronny rozkład częstości rzędnych. Oznacza to, że najwyżej położone nierówności ulegną znacznemu zużyciu.

Fosforanowanie tulejki i późniejsze szlifowanie powierzchni zwiększa stopień anizotropii chropowatości, zwiększa zmienność rozkładu rzędnych w kierunku obwodowym oraz zdecydowanie zmniejsza wartość ilorazu $R_t/\bar{r} = 0,05$. Wartość ilorazu $(\sigma/\bar{r})^{0,5}$ dla powierzchni fosforanowanych zmienia się następująco:

Powierzchnia	TF	SF	FS
$(\sigma/\bar{r})^{0,5}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$

6. OPÓR TARCIA USZCZELNIENIA I JEGO ZWIĄZEK Z MATERIAŁEM WARGI ORAZ Z WARUNKAMI JEJ STYKU Z WAŁEM

Opór tarcia uszczelnień wargowych oceniano na stanowisku badawczym konstrukcji autora. Stanowisko składa się z trzech zasadniczych zespołów (rys. 63.):

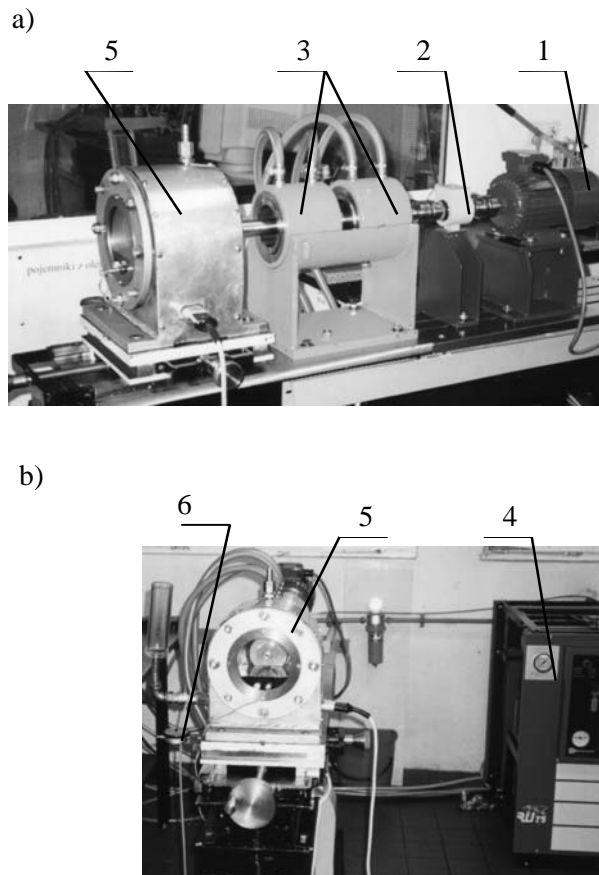
- układu napędowego,
- komory ciśnieniowej,
- układu sterująco-pomiarowego.

Układ napędowy składa się z silnika elektrycznego 1, momentomierza ze sprzęgłami 2 oraz z dwóch łożysk aerostaticznych 3. Silnik elektryczny prądu zmiennego o mocy 2,5 kW rozwija prędkość obrotową $0 \div 10\,000$ obr/min, zmienianą bezstopniowo za pomocą falownika z dokładnością regulacji do 0,01%. Stanowisko jest wyposażone w komplet momentomierzy indukcyjnych bezstykowych, pracujących w układzie mostka Wheatstone'a; w badaniach używano momentomierza firmy Hottinger o zakresie pomiarowym $0 \div 2,5$ N·m. Łożyska aerostaticzne 3 ustalają położenie wału. Powietrze, tłoczone przez sprężarkę śrubową 4, jest kierowane do zbiornika, a następnie – po odolejeniu i osuszeniu – doprowadzane do łożysk 3. Zastosowanie łożysk aerostaticznych pozwala na utrzymanie oporów własnych stanowiska na poziomie $2 \div 3$ rzędów wielkości niższych od mierzonego oporu ruchu uszczelnienia wargowego.

Komora ciśnieniowa 5 mieści w sobie uszczelnienie wargowe oraz czynnik uszczelniany. Na zewnętrznej powierzchni komory nawinięto spiralę grzałki elektrycznej o mocy 1 kW. Temperatura oleju w komorze może być regulowana z dokładnością $\pm 2,5$ °C za pomocą regulatora temperatury. Temperaturę oleju mierzono termoelementem Pt 100. Komorę ciśnieniową osadzono na dwóch prowadnicach, umożliwiających jej przesuwanie wzdłuż oraz prostopadle do osi wału. Wartości przesunięcia komory odczytywano z czujników zegarowych 6 z dokładnością do 0,01 mm.

System sterująco-pomiarowy oparto na mikroprocesorowym sterowniku programowalnym współpracującym z komputerem PC. Układ umożliwia korzystanie z kilkunastu programów badawczych. Wartości wielkości mierzonych (np. prędkość obrotowa, temperatura oleju) są konfrontowane z wartościami założonymi. W razie

wystąpienia rozbieżności są one korygowane przez odpowiednie nastawy urządzeń wykonawczych. Wszystkie wielkości pomiarowe (prędkość obrotowa wału, temperatura oleju, ciśnienie w łożyskach i komorze, moment tarcia) są cały czas rejestrowane. Zastosowany program Wizcon umożliwia graficzne przedstawienie danego wariantu badań oraz opracowanie wyników w postaci wykresów oraz tablic.



Rys. 63. Stanowisko badawcze do oceny oporu tarcia uszczelnień wargowych:
a) widok z boku, b) widok od czoła stanowiska: 1 – silnik elektryczny, 2 – momentomierz, 3 – łożyska aerostaticzne, 4 – sprężarka śrubowa, 5 – komora ciśnieniowa, 6 – czujnik zegarowy

6.1. OPÓR TARCIA USZCZELNIEŃ Z TYPOSZEREGU O ZREDUKOWANYCH WYMIARACH WARGI

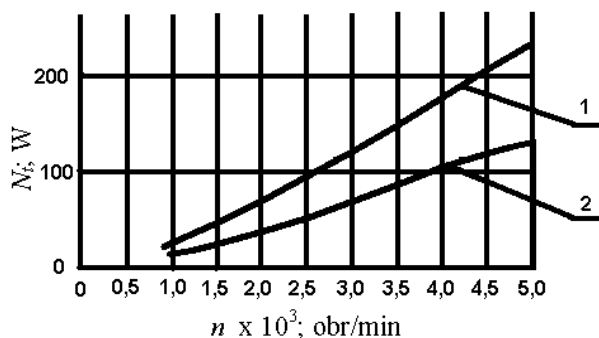
Badania nad wyznaczeniem oporu tarcia uszczelnień z typoszeregu o nazwie mikrowarga (*micro-lip*) prowadzono zgodnie ze schematem:

- dotarcie uszczelnienia przy prędkości obrotowej wału $n = 1000$ obr/min i temperaturze oleju $T = 80$ °C,
- określenie zależności momentu tarcia od prędkości obrotowej, prędkość zmieniano co 500 obr/min w przedziale 500÷5000 obr/min, czas – po którym odczytywano moment – 10 min,
- po zakończeniu pomiarów zmieniano temperaturę oleju i procedurę powtarzano.

Uszczelnienia pracowały w oleju VAT 15W40, a jego poziom w komorze sięgał osi wału. Uszczelnienia współpracowały z wałami wykonanymi ze stali 40, hartowanymi do twardości 55 HRC. Powierzchnia wałów była szlifowana ($R_a = 0,32$ μm). Uszczelnienie pracowało tylko raz w danym miejscu wału, co oznacza, że każde badane uszczelnienie współpracowało zawsze z oryginalną powierzchnią wału. Badano uszczelnienia wargowe – o powszechnie spotykanych wymiarach – tzw. konwencjonalne (AS 85×105×12 LF) oraz uszczelnienia o zredukowanych wymiarach wargi i sprężyny (AS 85×105×9 LF). Promieniowe obciążenie w obu typach uszczelnień wynosiło odpowiednio $P_{pr} = 41,6$ N i $P_{pr} = 18,8$ N. Dodatkowo promień zaokrąglenia krawędzi uszczelniającej zmniejszono ze 150 μm do 30÷60 μm, a średnicę sprężyny z $\phi 2,5 \times 0,40$ do $\phi 1,7 \times 0,28$ mm. Działania te przyniosły obniżenie mocy tarcia z 224 W do 130 W przy prędkości obrotowej wału 5000 obr/min i temperaturze oleju $T = 140$ °C (rys. 64.).

Rys. 64. Moc tarcia uszczelnień wargowych z gumy FKM (W 0707)

- 1 – AS 85x105x12 LF
- 2 – AS 85x105x9 LF, poziom oleju do osi wału



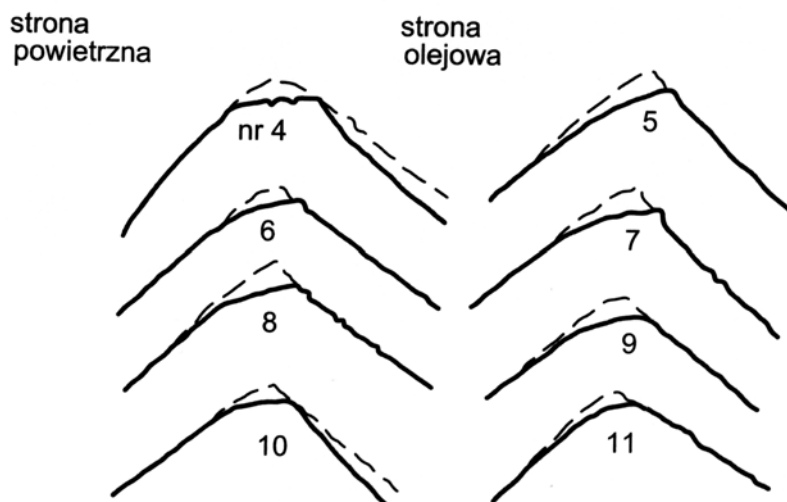
W rezultacie prawie dwukrotnego zmniejszenia oporu tarcia uzyskano obniżenie temperatury pod powierzchnią wargi, a w konsekwencji spowolniono proces starzenia się gumy [14]. Z kolei spowolnienie procesu starzenia się gumy przyniosło:

- spadek obciążenia promieniowego P_{pr} o 14% początkowej wartości, w porównaniu do 40% spadku dla konwencjonalnego uszczelnienia,
- spadek zużycia wargi z 40 do 20% początkowej wartości szerokości styku wargi z wałem.

Okazało się, że w uszczelnieniach o małej wartości promienia zaokrąglenia krawędzi uszczelniającej można uzyskać znaczącą redukcję szerokości styku wargi z wałem. Z badań wynika, że obciążenie cieplne jednostki obszaru styku o szerokości 0,03 mm w uszczelnieniu o mocy tarcia 80 W jest równoważne obciążeniu cieplnemu

powierzchni styku o szerokości 0,075 mm w uszczelnieniu o mocy tarcia 200 W [27]. W pierwszym uszczelnieniu przyrost szerokości styku wywołany zużyciem wargi o 0,02 mm doprowadził do 40% spadku obciążenia cieplnego; w porównywanym uszczelnieniu do takiego spadku doszłoby, gdyby szerokość styku wargi z wałem zwiększyła się do 0,125 mm. Stwierdzono podczas badania, że zwiększenie szerokości styku z 0,03 do 0,05 mm nastąpiło w znacznie krótszym czasie aniżeli wzrost z 0,075 do 0,125 mm, a to oznacza krótszy czas obciążenia obszaru styku jednostkowym strumieniem ciepła tarcia 10 W/mm^2 .

W czasie badań uszczelnień z mikrowargą stwierdzono, że niektóre uszczelnienia nieoczekiwanie pracowały z dużym oporem tarcia. W tamtym okresie badań jako przyczynę tego zwiększenia oporu przyjmowano tarcie pomiędzy wałem a wargą, zachodzące na prostoliniowej części krawędzi uszczelniającej. Wnioskowano o tym na podstawie profili zużytych warg (rys. 65.). Wyniki następnych badań uszczelnień wargowych doprowadziły do innej interpretacji przyczyny wzrostu oporu tarcia.



Rys. 65. Stopień zużycia krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach z mikrowargą; linia kreskowa – profil oryginalnej wargi, linia ciągła – profil zużytej wargi

6.2. OPÓR TARCIA USZCZELNIEŃ WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z WAŁAMI O POWIERZCHNI SZLIFOWANEJ

Stabilizacja oporu tarcia uszczelnienia następuje zwykle po 2÷5 godzinach pracy; wynika ona głównie ze zużycia wargi. Nie oznacza to, że proces dotarcia pary wał-warga uległ zakończeniu. Z badań wynika [9, 41], że dotarcie powierzchni

wału wymaga znacznie dłuższego okresu czasu – w przypadku stalowych wałów współpracujących z uszczelnieniami z gumy fluorowej (FKM) wynosi on 200 godzin.

Badania nad oporem tarcia uszczelnień prowadzono zatem przez okres 200 godzin na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 63. Każde z uszczelnień pracowało bez przerwy przy prędkości obrotowej wału $n = 3000$ obr/min i w oleju VAT 15W40 o temperaturze $93\text{ }^{\circ}\text{C}$. Moment tarcia był przez cały okres pracy uszczelnienia rejestrowany. Pod koniec badań wyznaczono zależność $M_T = M_T(n)$ w zakresie prędkości $500\div 5000$ obr/min. W sumie zbadano kilkadziesiąt uszczelnień wykonanych z różnych mieszanek gumy FKM. Każdy ślad pozostawiony przez wargę na wale był przypisany danemu uszczelnieniu; położenie śladu na wale było również znane, można było zatem przypisać zużycie wargi oraz moment tarcia danej – końcowej – chropowatości powierzchni wału.

Po 4 godzinach ciągłej pracy zauważono stabilizację oporu tarcia badanych uszczelnień. Stabilizacja ta wynika głównie z pewnego niewielkiego zużycia wargi. W okresie 200 godzin pracy uszczelnienia zużycie wargi się zwiększa oraz spada wartość siły P_r , którą wargę wywiera na wał. W rezultacie dochodzi do spadku średniego nacisku na styku wargi-wał. Zmianie ulega również chropowatość powierzchni wału współpracującego z danym uszczelnieniem. W tym czasie dochodzi do dotarcia powierzchni wału; jego chropowatość zmienia się z chropowatości technologicznej (początkowej) na chropowatość równowazną (optymalną). Chropowatość równowazna to taka, przy której opór tarcia uszczelnienia powinien być zbliżony do minimalnej możliwej wartości. Porównanie momentu tarcia uszczelnień po 4 godzinach badań z momentem tarcia tych samych uszczelnień po 200 godzinach pracy pozwoli ustalić tendencje zmiany oporu tarcia. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach słupkowych (rys. 66.–68.), na których wartości momentu tarcia odłożono na osi rzędnych, a na osi odciętych podano numery uszczelnień oraz oznaczenia materiału, z którego zostały one wykonane. Analiza danych prowadzi do następujących spostrzeżeń:

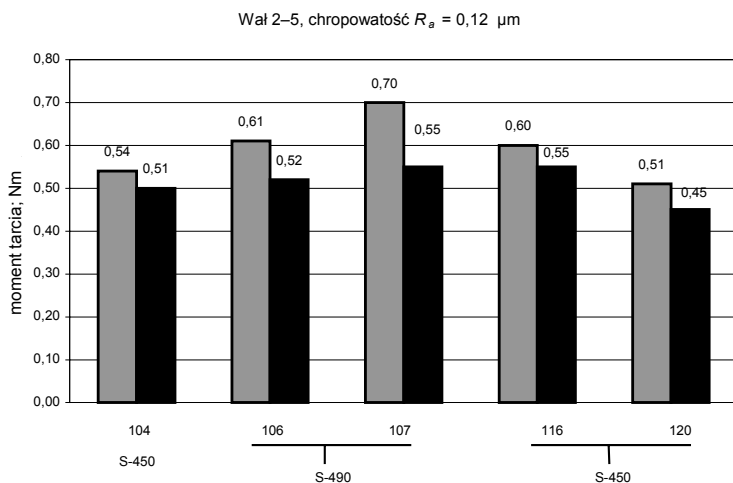
a) brak jest wyraźnej zależności momentu tarcia zarówno od chropowatości powierzchni wału, jak i od rodzaju gumy,

b) im wyższa jest wartość momentu tarcia na początku pomiaru, tym większy jest spadek $\Delta M = M_1 - M_2$ mierzonej wielkości,

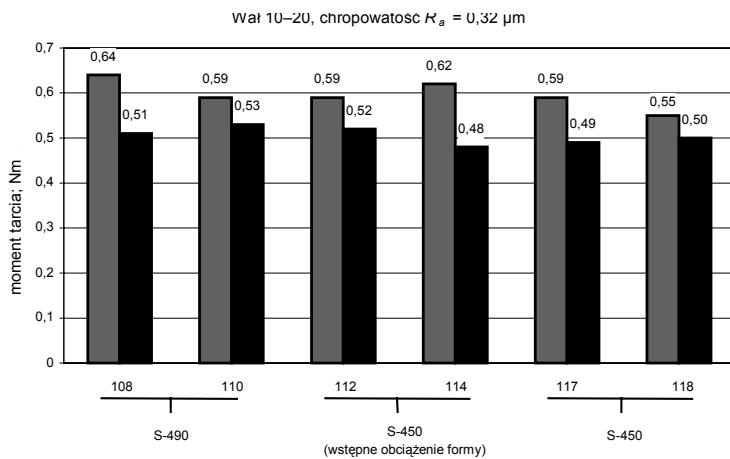
c) brak jest wyraźnej korelacji spadku wartości momentu tarcia po okresie 200-godzinnej pracy z:

- początkową wartością promieniowego obciążenia wargi oraz ze spadkiem ΔP_{pr} tego obciążenia,
- początkową wartością średniego nacisku stykowego oraz ze spadkiem Δp tego nacisku.

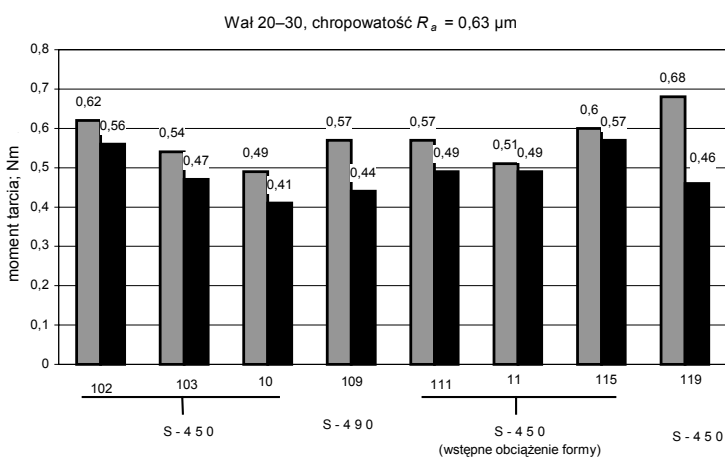
Ten brak korelacji oznacza, że mały spadek momentu tarcia może wynikać – pomimo dużego spadku wartości siły P_{pr} – z pogorszenia się warunków styku po 200-godzinnej pracy.



Rys. 66. Wartości momentu tarcia uszczelnień współpracujących z wałem o chropowości $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ po 4 (kolor szary) i 200 (kolor czarny) godzinach ciągłej pracy dla uszczelnień wykonanych z kilku odmian gumy FKM: S-450, S-490 oraz S-450 w dodatkowo obciążonej formie



Rys. 67. Wartości momentu tarcia uszczelnień współpracujących z wałem o chropowości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ po 4 i 200 godzinach ciągłej pracy (oznaczenie gum jak na rys. 66)



Rys. 68. Wartości momentu tarcia uszczelnień współpracujących z wałem o chropowości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ po 4 i 200 godzinach ciągłej pracy (oznaczenie gum jak na rys. 66)

Poniżej zamieszczono próbę wyjaśnienia tego paradoksu. Moment tarcia można zapisać

$$M = P_{pr} f \frac{d}{2}, \quad (17)$$

gdzie f – współczynnik tarcia, interpretowany tutaj bardziej jako wskaźnik warunków styku.

Znając wartości momentu tarcia i siły promieniowej na początku i końcu ocenianego okresu pracy uszczelnienia, można napisać

$$M_1 - M_2 = \Delta M = P_{pr1} f_1 \frac{d}{2} \left[1 - \frac{P_{pr2} f_2}{P_{pr1} f_1} \right]. \quad (18)$$

Ponieważ $M_2 = M_1 - \Delta M$, wzór (18) można więc doprowadzić do postaci

$$\left(1 - \frac{\Delta M}{M_1} \right) \frac{P_{pr1}}{P_{pr1} - \Delta P_{pr}} = \frac{f_2}{f_1}. \quad (19)$$

Po przekształceniu wyrażenia (19) otrzymuje się końcową postać wzoru na zmianę warunków tarcia w danym uszczelnieniu

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{1 - m}{1 - p^*}, \quad (20)$$

gdzie:

$$m = \frac{\Delta M}{M_1},$$

$$p^* = \frac{\Delta P_{pr}}{P_{pr1}}.$$

Wartości współczynników m, p^* podano w tabeli 13.

Stosunek $f_2/f_1 > 1$ oznacza taką zmianę rzeczywistych warunków styku podczas zużycia krawędzi uszczelniającej i powierzchni wału, że pomimo znaczącego spadku promieniowego obciążenia nie może dojść do dużego spadku momentu tarcia. Z kolei, gdy $f_2/f_1 < 1$, należy zakładać taką zmianę warunków styku, przy której dochodzi do dużego spadku momentu tarcia i niewielkiego zmniejszenia wartości siły promieniowej wywieranej przez wargę na powierzchnię wału.

W uszczelnieniach współpracujących z wałami o chropowatości $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ dochodzi prawdopodobnie do takiej zmiany lokalnych warunków styku, przy której $f_2/f_1 > 1$ dla większości badanych uszczelnień. W uszczelnieniach trących o powierzchnię wału o chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ warunki lokalnego styku pod koniec okresu pracy są takie, że iloraz f_2/f_1 jest najczęściej mniejszy od jednośc. Z kolei w uszczelnieniach współpracujących z wałami o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ iloraz $f_2/f_1 > 1$, co świadczy o tym, że w niektórych z uszczelnień transformacja warunków styku nie przebiega we właściwym kierunku. Dane zawarte w tabeli 13. potwierdzają

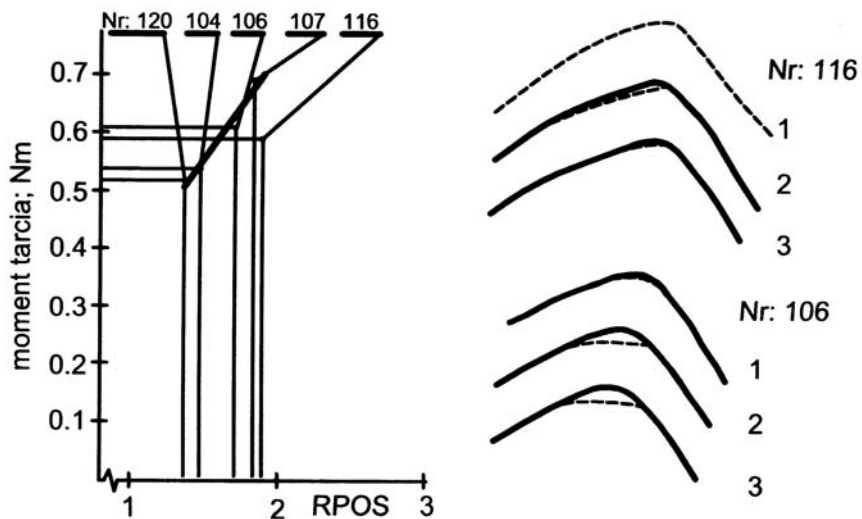
te spostrzeżenia. Pomimo na przykład dwukrotnego spadku średniego nacisku jednostkowego $\Delta p_a/p_1$ iloraz $f_2/f_1 = 1,13$, co świadczy o tym, że moment tarcia nie zależy od średniego nacisku w takim stopniu, w jakim zależy od rzeczywistych warunków styku i ich zmienności wzdłuż obwodu krawędzi uszczelniającej wargi.

Tabela 13. Wartości względne spadku momentu tarcia m , obciążenia promieniowego p^* oraz średniego nacisku $\Delta p_a/p_1$ stwierdzone dla uszczelnień pracujących przez okres 200 godzin

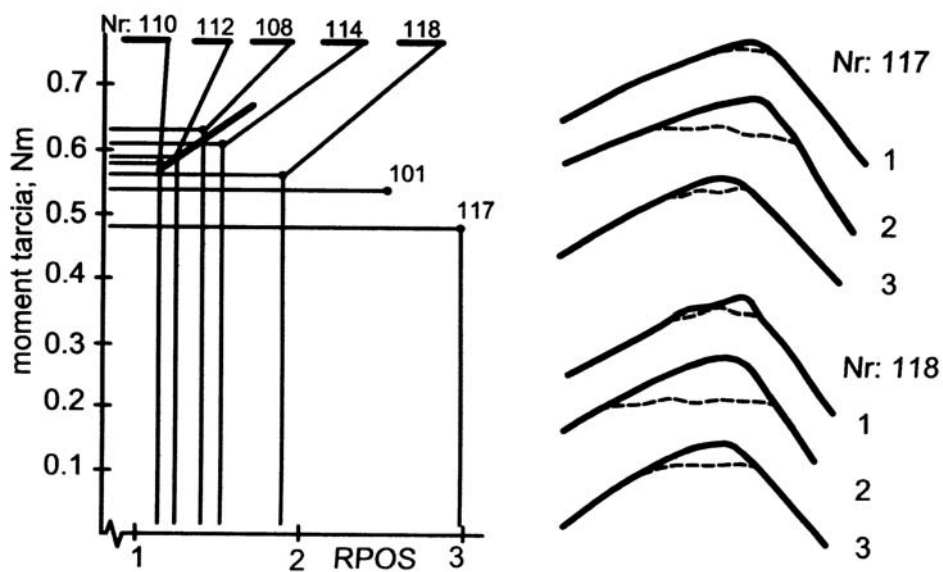
Materiał uszczelnienia	Wał $R_a = 0,12 \mu\text{m}$				Wał $R_a = 0,32 \mu\text{m}$				Wał $R_a = 0,63 \mu\text{m}$			
	m	p^*	$\frac{\Delta p_a}{p_1}$	f_2/f_1	m	p^*	$\frac{\Delta p_a}{p_1}$	f_2/f_1	m	p^*	$\frac{\Delta p_a}{p_1}$	f_2/f_1
FKM S-450	0,07	0,14	0,15	1,08	–	–	–	–	0,09	0,18	0,39	1,11
									0,16	0,14	0,10	0,98
FKM S-490	0,14	0,24	0,44	1,13	0,20	0,17	0,60	0,96	0,24	0,18	0,75	0,93
	0,20	0,26	0,51	1,08	0,10	0,20	0,82	1,13				
FKM S-450 obciąż. forma	–	–	–	–	0,11	0,09	0,39	0,98	0,05	0,04	0,46	0,99
					0,22	0,11	0,53	0,88				
FKM S-490	0,09	0,08	0,08	0,99	0,10	0,07	0,40	0,97	0,17	0,10	0,44	0,92
	0,12	0,07	0,07	0,95	0,17	0,10	0,33	0,92				

W rozdziale 4. wykazano, że w uszczelnieniach wargowych występuje rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej, powodujący zmienność wartości nacisku stykowego w kierunku obwodowym. Można zatem założyć, że brak korelacji pomiędzy na przykład momentem tarcia a spadkiem wartości siły P_{pr} wynika ze zmienności warunków styku na obwodzie wargi. W celu dowiedzenia słuszności tej tezy należy wykazać, że rozstęp położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej determinuje opór tarcia uszczelnienia. W tym celu podano wykresy (rys. 69.–71.), na których wartości momentu tarcia przypisano wyznaczonym doświadczalnie wartościom rozstępu położenia obszaru styku w poszczególnych uszczelnieniach.

Okazało się, że wyniki pomiarów momentu tarcia można aproksymować prostymi; ich przebieg wskazuje, że im większy jest rozstęp położenia obszaru styku, tym generalnie większy jest rozrzut momentu tarcia. Na wykresach podano również profile oryginalnej (linia ciągła) i zużytej (linia kreskowa) krawędzi uszczelniającej. Łatwo można zauważyć, że zwiększenie rozstępu położenia obszaru styku na pewnej części obwodu wargi nie powoduje jej zużycia (np. uszczelnienia nr: 106, 116, rys. 69.).



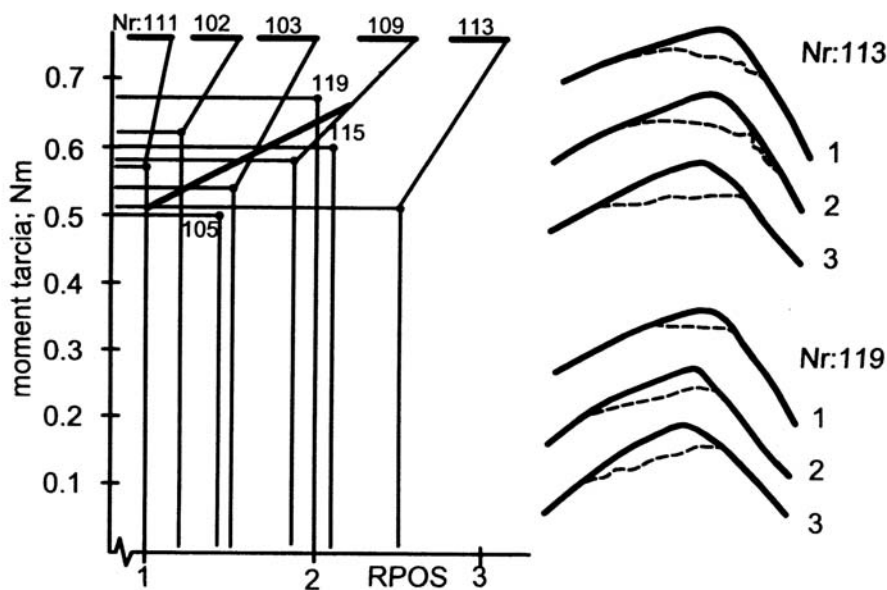
Rys. 69. Zależność momentu tarcia od rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach trących o powierzchnię o chropowatości $R_a = 0,12 \mu\text{m}$



Rys. 70. Zależność momentu tarcia od rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach trących o powierzchnię o chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$

Dalsze zwiększanie rozstępu położenia powoduje duże zmniejszenie momentu tarcia (np. uszczelnienie nr 116 – rys. 69, nr 101, 117 – rys. 70 czy nr 113 – rys. 71). Brak zużycia części obwodu wargi lub gwałtowny spadek wartości momentu tarcia może wynikać z takich warunków styku, że na części obwodu wargi dochodzi do drgań wywołanych siłami tarcia działającymi w strefie styku wargi z wałem. W tych ekstremalnych warunkach styku wargi z wałem dochodzi najczęściej do zmniejszenia wartości ilorazu $f_2/f_1 < 1$. Lokalna poprawa warunków smarowania wargi jest przyczyną spadku wypadkowej wartości momentu tarcia.

Ostatni wykres (rys. 71.) zależności momentu tarcia od rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej uszczelnień współpracujących z najbardziej chropowatą powierzchnią wału ($R_a = 0,63 \mu\text{m}$) ma podobny charakter jak wykres na rysunku 69., z tym że w każdym uszczelnieniu stwierdza się zużycie wargi na całym obwodzie. Położenie śladu zużycia na krawędzi oraz wartość zużycia mogą być różne w danym uszczelnieniu (np. nr. 115, 119 – rys. 71), ale nie stwierdza się istnienia odcinków wargi bez zużycia.



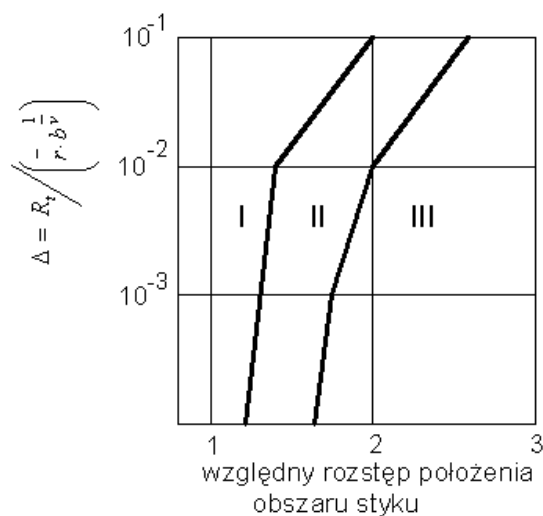
Rys. 71. Zależność momentu tarcia od rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej w uszczelnieniach trących o powierzchnię o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$

Różnice w stopniu zużycia wargi uszczelnień współpracujących z wałami o różnej chropowatości powierzchni czy obecność odcinków niezużytej wargi na obwodzie można wytłumaczyć w sposób następujący: Różnica nacisku na obwodzie uszczelnienia powoduje zmienne naprężenia styczne, wywołujące lokalne zmęczenie warstwy

wierzchniej, które – po pewnej liczbie cykli odkształcenia – doprowadza do zużycia powierzchni. Intensywność zużycia powierzchni wargi zależy od lokalnej wartości nacisku oraz od tekstury wału. Im bardziej jest chropowata powierzchnia, tym większa jest wartość ilorazu R_t/\bar{r} i tym większe naprężenie w miejscu styku nierówności wału z powierzchnią wargi przy danym nacisku nominalnym (konturowym). Nawet w przypadku małej wartości nacisku naprężenie może być dostatecznie duże do wywołania deformacji powierzchni.

Powierzchnie bardziej chropowate charakteryzują się ponadto mniejszym odstępem chropowatości S_m na linii średniej, a to oznacza zwiększenie częstotliwości odkształcenia lokalnego warstwy wierzchniej przez nierówności. Zmienność naprężeń stycznych zwiększa się wraz ze wzrostem rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej. Może dojść do wywołania drgań lub przechylenia się wargi, wzdłuż tworzącej na pewnym odcinku wargi, do poprawy warunków smarowania i w rezultacie do lokalnego braku zużycia powierzchni.

W celu wykazania słuszności takiego mechanizmu używania się wargi zbudowano bardzo prosty wykres (rys. 72.) w współrzędnych: chropowatość powierzchni wału–rozstęp położenia obszaru styku. Wykres ten utworzono z danych o rozstępie położenia obszaru styku w konkretnych uszczelnieniach (rys. 21. i 22.) oraz o profilach (wyznaczonych w trzech miejscach na obwodzie) zużytych krawędzi uszczelniających (rys. 69.–71.).



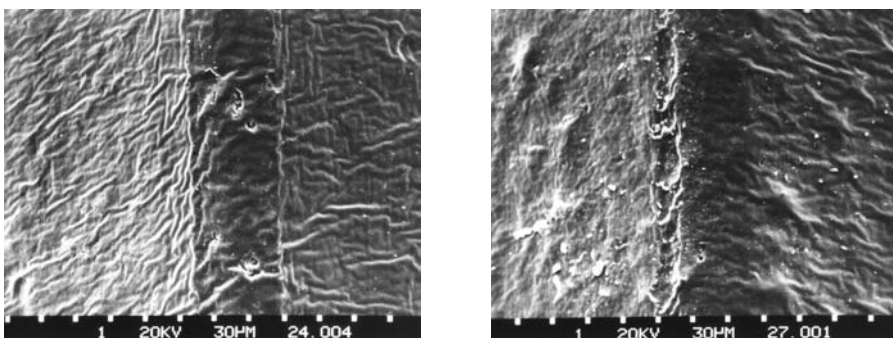
Rys. 72. Zależność zużycia wargi od chropowatości powierzchni wału oraz od rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej

Pierwszy obszar (I) dotyczy pracy uszczelnień, w których zmienność lokalnych naprężeń stycznych jest zbyt mała – przy danej chropowatości wału – by wpływać

na zróżnicowanie procesu zużywania się wargi na obwodzie. Szerokość tego obszaru zwiększa się wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni wału. Drugi obszar (II) dotyczy uszczelnień, w których zmienne styczne naprężenia mogą doprowadzić do lokalnych drgań lub do przechylenia się jakiegoś odcinka wargi. Ślad zużycia jest obecny na całym obwodzie uszczelnienia, z tym że stopień zużycia i położenie zużytego obszaru na wardze mogą się zmieniać w jednym i tym samym uszczelnieniu.

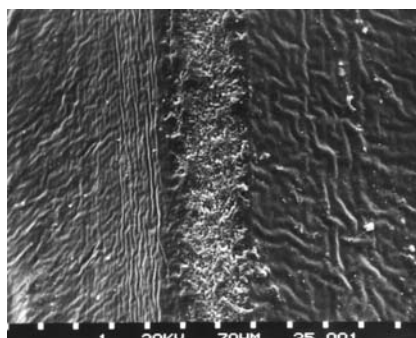
Trzeci obszar wykresu (III) obejmuje uszczelnienia, w których rozstęp położenia obszaru styku jest większy od $1,6a$. Zmienność nacisku i odpowiadająca jej zmienność naprężeń stycznych jest tak duża, że na pewnym odcinku obwodu nie dochodzi do zużycia powierzchni oraz następuje wyraźny spadek momentu tarcia. Wynika z tego, że uszczelnienia o znacznym rozstępie położenia obszaru styku (np. większym od dwóch szerokości styku wargi z wałem) powinny współpracować z wałem o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ i większej.

Sprawdzenie pod mikroskopem skaningowym krawędzi uszczelniającej uszczelnień pracujących przez okres 200 godzin potwierdza wpływ rozstępu położenia obszaru styku na zużycie wargi. Na przykład uszczelnienie nr 106 z gumy FKM (S-490), o następujących cechach charakterystycznych: rozstęp położenia obszaru styku $RPOS = 1,7$ szerokości styku wargi z wałem (II obszar – rys. 72.), maksymalne odchylenie powierzchni styku na powierzchni wału $\delta/a = 6,8$, promieniowe obciążenie $P_{pr} = 41,3 \text{ N}$, współpracowało z gładkim wałem o $R_a = 0,12 \mu\text{m}$. Wskaźniki zmiany momentu tarcia i promieniowego obciążenia wynosiły: $m = 0,14$; $p^* = 0,24$; $f_2/f_1 = 1,13$. Iloraz $f_2/f_1 > 1$ wskazuje, że warunki styku nie były korzystne. Po oględzinach dwóch próbek wyciętych z przeciwległych miejsc wargi stwierdzono, że na pewnej części obwodu (rys. 73.) znajduje się kilka przypadkowo rozrzuconych miejsc wskazujących na pewne zużycie wargi, natomiast na przeciwległej powierzchni (rys. 74.) ślad zużycia jest dobrze rozwinięty.

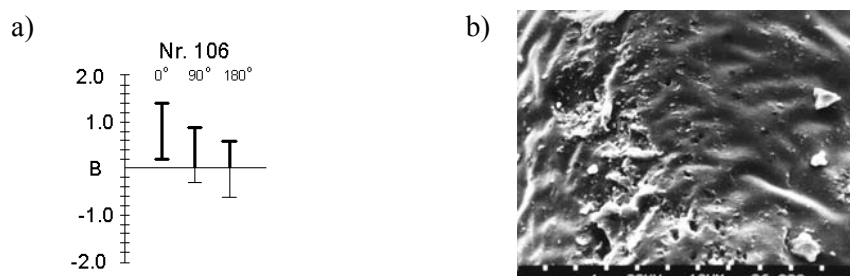


Rys. 73. Krawędź uszczelniająca wargi uszczelnienia po 200 godzinach pracy na wale o chropowatości $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ z przypadkowo rozłożonymi śladami zużycia. Uszczelnienie nr 106, guma FKM (S-490)

Rys. 74. Krawędź uszczelniająca z dobrze rozwiniętym zużyciem powierzchni. Uszczelnienie nr 106



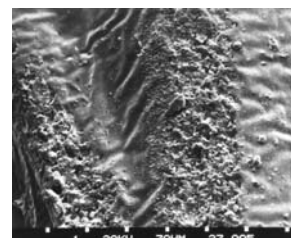
Większość zużytej powierzchni znajduje się na prostoliniowej części krawędzi uszczelniającej (lewa strona zdjęcia rys. 75b), co potwierdza, iż pozycja obszaru styku na krawędzi uszczelniającej przy współpracy z wałem stalowym jest podobna do pozycji zajmowanej na wale szklanym.



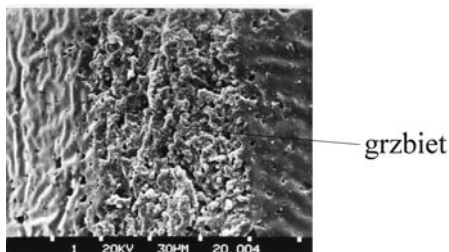
Rys. 75. Korelacja położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej ze zużyciem wargi:
 a) położenie obszaru styku wyznaczone na szklanym wale w trzech miejscach na obwodzie,
 b) ślad zużycia na wardze (po stronie powietrznej) dla fragmentu wargi w miejscu oznaczonym 0°

Podobnie zachowuje się uszczelnienie nr 118, które współpracowało z wałem o chropowatości powierzchni $R_a = 0,32 \mu\text{m}$. Charakterystyka tego uszczelnienia jest następująca: RPOS = 1,9 szerokości styku (II obszar), $\delta/a = 2,1$; $P_{pr} = 36,6 \text{ N}$, $m = 0,10$; $p^* = 0,07$ oraz $f_2/f_1 = 0,97$. Fragment zużytej krawędzi uszczelniającej przedstawiono na rysunku 76.

Rys. 76. Fragment krawędzi uszczelniającej z dobrze rozwiniętym zużyciem powierzchni. Uszczelnienie nr 118

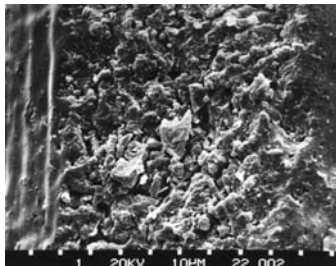


Podczas analizy obrazu zużycia tej próbki znaleziono dwa obszary o różnej głębokości zużycia. Obszary te są rozdzielone grzbietem, biegnącym pod pewnym kątem do tworzącej (rys. 77.). Różny stopień zużycia wynika prawdopodobnie z poosiowego przemieszczenia krawędzi względem powierzchni wału oraz z przechylenia się wargi względem punktu jej styku z wałem.



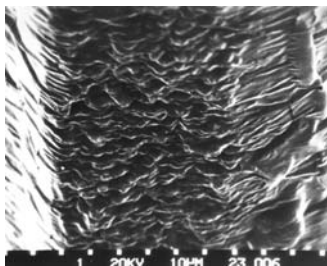
Rys. 77. Równomierny ślad zużycia krawędzi po stronie powietrznej oraz słabiej rozwinięty po stronie olejowej krawędzi uszczelniającej.
Uszczelnienie nr 118

Ślad zużycia powierzchni po przeciwległej stronie wargi przedstawiono na rysunku 78. Zużycie jest równomierne na całej analizowanej powierzchni.



Rys. 78. Powierzchnia o dobrze rozwiniętym zużyciu.
Uszczelnienie nr 118, próbka wycięta z przeciwległej strony wargi

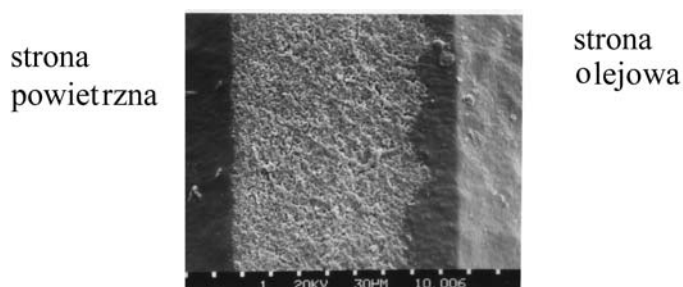
Przełom próbki wskazuje, że tekstura zużytej powierzchni odzwierciedla przebieg mikrofal usytuowanych na oryginalnej powierzchni wargi (rys. 79).



Rys. 79. Zużyta krawędź uszczelniająca widziana od spodu wraz z przełomem wargi. Strona powietrzna na prawo.
Uszczelnienie nr 118

Zwiększenie chropowatości wału powinno, zgodnie z przewidywaniami, prowadzić do zwiększonego jego zużycia. Zanalizowano uszczelnienie o stosunkowo ma-

łym, jak na wał o chropowatości powierzchni $R_a = 0,63 \mu\text{m}$, rozstępie położenia obszaru styku $R_{POS} = 1,9$ szerokości styku (I obszar), ale o przemieszczeniu krawędzi względem powierzchni wału w stronę powietrzną: $\delta/a = -0,9$. Obciążenie promieniowe $P_{pr} = 41,3 \text{ N}$; $m = 0,24$; $p^* = 0,18$ oraz $f_2/f_1 = 0,93$. Otrzymano dobrze rozwinięte zużycie wału, z tym że linia styku wargi z wałem po stronie olejowej jest falista (rys. 80.). Falisty przebieg linii styku wargi z wałem sugeruje, iż wargę podlegała drganiom lub przechyleniom.

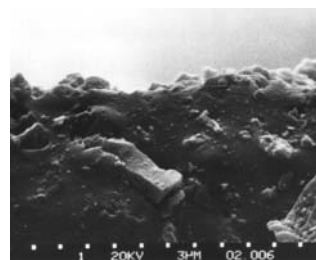


Rys. 80. Falisty przebieg linii styku wargi z wałem po stronie olejowej uszczelnienia.
Uszczelnienie nr 109

Podczas przemieszczenia fragmentu wargi na powierzchni wału w stronę powietrzną uszczelnienia dochodzi do styku na krzywoliniowej części krawędzi uszczelniającej. Tym należy tłumaczyć, że iloraz f_2/f_1 jest mniejszy od jedności.

Przełom wargi zużytego uszczelnienia na wał o chropowatości powierzchni $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ wskazuje, że głębokość dolin na profilu nie przekracza $10 \mu\text{m}$ (rys. 81.).

Rys. 81. Profil fragmentu jw. krawędzi uszczelniającej;
strona olejowa wargi



Z przedstawionego fragmentu prac wynika, że rozstęp obszaru styku na krawędzi uszczelniającej, a także przemieszczenie osiowe krawędzi na powierzchni wału decydująco wpływają na opór tarcia i zużycie powierzchni. Zachowanie równomiernych warunków tarcia na obwodzie wargi przy wzroście wartości rozstępu położenia wymaga dobrania wału o większej chropowatości. Potwierdzono, że występuje brak korelacji pomiędzy spadkiem momentu tarcia a spadkiem wartości obciążenia promieniowego lub średniego nacisku, a jego podstawową przyczyną jest zmienność warunków styku na obwodzie wargi.

6.2.1. ZALEŻNOŚĆ OPORU TARCIA OD RODZAJU MATERIAŁU WARGI

Składowa deformacyjna współczynnika tarcia jest zdeterminowana, jak już wspomniano (p. 3.5), przez wewnętrzne tarcie w gumie. Nierówności powierzchni wału wywołują, podczas ruchu względem wargi, okresowe deformacje fragmentów warstwy wierzchniej krawędzi uszczelniającej. Częstość tych deformacji zależy od wymiarów lokalnych obszarów styku wargi z wałem oraz od prędkości liniowej v wału. We współczesnych samochodach osobowych prędkość liniowa wału zmienia się zwykle w przedziale $0 \leq v \leq 22$ m/s. Przyjęto, że lokalny obszar styku zależy od promieni zaokrąglenia nierówności oraz od ich rozkładu po wysokości i długości profilu powierzchni wału. Dla prawostronnego rozkładu gęstości częstości rzędnych średnia wartość promienia występuje przy mniejszym zbliżeniu względnym do profilu aniżeli dla rozkładu lewostronnego. Do zbliżenia powierzchni gumy do linii średniej profilu powierzchni wału wymagany nacisk wynosi około $7,3 \cdot 10^{-1}$ MPa. Jeżeli rozkład gęstości jest prawostronny, to nacisk ten będzie niższy i dla wału o parametrze $R_a = 0,32$ μm wynosi $\bar{p} = 2,4 \cdot 10^{-1}$ MPa. Średnia wartość nacisku w badanych uszczelnieniach wynosi około 1 MPa. Można zatem założyć, że prawie wszystkie nierówności powierzchni wału będą się stykały z powierzchnią krawędzi uszczelniającej wargi; najwyżej położone wierzchołki nierówności wgłębią się w powierzchnię gumy na głębokość h równą co najmniej 3σ . Promień obszaru lokalnego styku można obliczyć ze wzoru $r^* \approx \sqrt{2\bar{r}h}$ i na tej podstawie można oszacować częstość odkształcenia $\omega \approx v/2r^*$. Wyniki obliczeń częstości odkształcenia lokalnych obszarów styku dla prędkości liniowej wału $v = 13,2$ m/s (odpowiada ona prędkości obrotowej $n = 3000$ obr/min podczas badania uszczelnień na wałach szlifowanych $\phi 88$ mm) przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Częstości odkształcenia lokalnych obszarów styku w zależności od zbliżenia wargi do wału

Częstość \ Promień	Wał					
	$R_a = 0,12 \mu\text{m}$		$R_a = 0,32 \mu\text{m}$		$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	
	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$
$2r^*, \text{m}$	$\sim 20 \cdot 10^{-6}$	$\sim 11 \cdot 10^{-6}$	$\sim 20 \cdot 10^{-6}$	$\sim 11 \cdot 10^{-6}$	$\sim 18 \cdot 10^{-6}$	$\sim 10 \cdot 10^{-6}$
ω, s^{-1}	$\sim 7 \cdot 10^5$	$\sim 1,2 \cdot 10^6$	$\sim 7 \cdot 10^5$	$\sim 1,2 \cdot 10^6$	$\sim 7,3 \cdot 10^5$	$\sim 1,3 \cdot 10^6$

Z analizy podanych wyników wpływają dwa bardzo ważne stwierdzenia:

1. W jednym i tym samym uszczelnieniu wartość częstości odkształcenia obszaru styku może się zmieniać o rząd wielkości. Taka sama sytuacja wystąpi przy zmieniającym obciążeniu po obwodzie uszczelnienia, kiedy dojdzie do zmiennej penetracji nierówności powierzchni wału w wargę.

2. Wystarczy znormalizować zbliżenia powierzchni wału do powierzchni wargi uszczelniającej, aby otrzymać tę samą – niezależnie od wartości promienia zaokrąglenia \bar{r} nierówności – częstość odkształcania. Innymi słowy – jeżeli dla każdego z różnych profili powierzchni wałów udałooby się zapewnić zbliżenie równe odpowiadającemu mu odchyleniu standardowemu σ , to częstość odkształcania lokalnych obszarów styku będzie taka sama.

Dla podanego zakresu zmienności częstości $7 \cdot 10^5 \leq \omega \leq 1,3 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ kąt strat wewnętrznych wynosi w przypadku gumy:

- FKM S-450 $\psi = 2,5 \div 3^\circ$,
- FKM S-490 $\psi = 3,5 \div 4,2^\circ$.

Należy zwrócić uwagę (Dodatek 1), że zarówno wartość kąta strat wewnętrznych, jak i modułu sprężystości gumy zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Dlatego badania gum, z których wykonuje się uszczelnienia wargowe prowadzono w temperaturze otoczenia, 100 oraz 140 °C. Z zestawienia widać, że struktury gum S-450 i S-490 muszą się różnić, skoro wraz z podniesieniem się temperatury spadek wartości kąta ψ dla gumy S-490 jest znacznie większy aniżeli dla gumy S-450. Składową deformacyjną współczynnika tarcia można wyrazić w sposób następujący: $f_d \approx C \operatorname{tg} \psi$. Na tej podstawie można oszacować wpływ rodzaju gumy na opór tarcia uszczelnienia. W przypadku dwóch uszczelnień wykonanych z różnych gum wystarczy je kolejno skojarzyć z jednym i tym samym wałem, a następnie zbadać. Z obliczeń wynika, że zmiana gumy S-490 na S-450 prowadzi do 10-procentowego zwiększenia oporu tarcia ($f_{d2}/f_{d1} = \operatorname{tg} \psi_2 / \operatorname{tg} \psi_1 = 3,2/2,9 = 1,1$) w temperaturze 100 °C.

Powstaje zatem pytanie dotyczące możliwości obniżenia oporu tarcia uszczelnień wargowych: czy dochodzić do niego poprzez opracowanie nowej mieszanki gumy czy też poprzez dobór chropowatości powierzchni wału, odpowiednio do właściwości danej gumy? Ten drugi sposób jest zdecydowanie prostszy, pod warunkiem znajomości charakterystyk $E(\omega)$ oraz $\psi(\omega)$ w różnych temperaturach. Przyjmuje się, że uszczelnienia wargowe mogą rozpoczynać pracę przy temperaturze ujemnej do -40 °C [17], po czym eksploatowane są w przedziale temperatury 120÷150 °C. Podczas przeprowadzonych badań zakres temperaturowy ograniczono do przedziału 90÷140 °C.

Przed przystąpieniem do wyboru optymalnej, ze względu na opór tarcia, chropowatości powierzchni wału, należy ustalić typowy zakres prędkości obrotowej wału korbowego; z obserwacji wynika, że wynosi on 2500÷3500 obr/min. Znajomość średnicy wału umożliwi ocenę liniowej prędkości v . Na podstawie wzoru na częstość odkształcania lokalnych obszarów styku można wyznaczyć wymiar liniowy obszaru styku nierówności powierzchni wału z wargą – $2r^* = v/\omega$, gdzie $\omega < \omega_c$, przy której $\operatorname{tg} \psi$ jest największy w danym przedziale temperatury. Ponadto należy założyć anizotropię chropowatości i przyjąć, że rozkład gęstości częstości rzędnych powinien być lewostronny dla kierunku obwodowego. Rozkłady te są najczęściej rozkładami binormalnymi (p. 5.2.1.1), każdy o właściwym dla siebie odchyleniu standardowym, zazwyczaj $\sigma' < \sigma$ (σ' – odchylenie standardowe dla górnej części profilu).

Ze wzoru $r^* \approx \sqrt{2\bar{r}h}$ należy określić średni promień \bar{r} wszystkich nierówności na powierzchni wału. Należy zadbać, aby część nierówności w górnej warstwie profilu miała takie promienie zaokrąglenia, by spełnione było stwierdzenie ustalone w tym rozdziale, a mianowicie: $\sigma'/r = \sigma'/\bar{r}$, bowiem wówczas opór tarcia przy wgłębieniu kolejnych nierówności będzie taki sam.

W podanym algorytmie postuluje się przyjęcie lewostronnego rozkładu gęstości częstości rzędnych dla kierunku obwodowego. Postulat ten wynika z potrzeby zapewnienia zużycia krawędzi uszczelniającej na całym obwodzie wargi. Profil powierzchni z lewostronnym rozkładem amplitud rzędnych charakteryzuje się występowaniem niewielkiej liczby najwyższych wierzchołków poprzedzielanych dolinami (rys. 53.). Siła, z jaką warga oddziałuje na powierzchnię wału, powoduje, że krawędź uszczelniająca wypełni wiele z tych dolin i że wraz ze wzrostem tej siły będzie się zwiększał nacisk w miejscu styku wargi z wałem. Na opór tarcia uszczelnienia wpływać będzie zatem, oprócz składowej deformacyjnej, również składowa adhezyjna współczynnika tarcia.

6.2.1.1. OPÓR TARCIA WYNIKAJĄCY Z ODDZIAŁYWANIA ADHEZYJNEGO POMIĘDZY WARGĄ A WAŁEM

Zdecydowano składową adhezyjną współczynnika tarcia wyznaczyć eksperymentalnie dla gum FKM S-450 oraz S-490. Punktem wyjścia była teoria molekularno-mechaniczna Kragielskiego [47], w której związek pomiędzy naprężeniem stycznym τ_n a rzeczywistym naciskiem stykowym p_r w warunkach oddziaływania adhezyjnego wyrażono

$$\tau_n = \tau_o + \beta p_r, \quad (21)$$

gdzie:

τ_o – naprężenie styczne przy braku nacisku stykowego,

β – piezowspółczynnik charakteryzujący zmiany naprężenia stycznego przy zmianie nacisku.

Po podzieleniu obu stron równania (21) przez p_r otrzymano

$$\frac{\tau_n}{p_r} = f_a = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta. \quad (22)$$

Stałe τ_o oraz β można określić, gdy znane są z doświadczenia co najmniej dwie wartości składowej adhezyjnej współczynnika tarcia f_a . Do określenia f_a skorzystano z tribometru jednokulowego. Konstrukcję i metodę wyznaczenia f_a szczegółowo opisano w pracy [25]. Poniżej ograniczono się do analizy otrzymanych wyników.

Składową adhezyjną współczynnika tarcia obliczono ze wzoru

$$f_a = \frac{\tau_n}{p_{r\text{śr}}} = \frac{3}{4} \frac{TL}{Nr^*}, \quad (23)$$

w którym:

T – siła styczna mierzona podczas obrotu stalowej kulki ściskanej obustronnie przez krążki wykonane z danej gumy,

L – ramię wywołujące obrót kulki,

N – siła normalna przyłożona do krążków gumowych,

r^* – promień odcisku kulki w próbce gumowej.

Założono, iż gładkość powierzchni stalowej kulki jest tak duża, że jakkolwiek składową deformacyjną tarcia pochodzącą od penetracji nierówności kulki w próbki gumowe można pominąć. Wyniki pomiarów podano w tabeli 15.

Tabela 15. Podstawowe dane do obliczenia stałych τ_o oraz β

Wielkości	Guma				
	S-450			S-490	
	obciążenie				
	10 N	15 N	20 N	10 N	20 N
r^* , mm	2,60	2,94	3,35	2,18	2,72
f_a	0,76	0,64	0,64	0,57	0,46
p_{rSt} , MPa	0,47	0,56	0,57	0,68	0,86

Po odjęciu stronami równania (22) dla każdej z wartości f_a otrzymano

$$f_{a10} - f_{a15} = \tau_o \left(\frac{1}{p_{r10}} - \frac{1}{p_{r15}} \right),$$

zatem

• dla gumy S-450	$\tau_o = 0,35$ MPa $\beta = 0,02$
• dla gumy S-490	$\tau_o = 0,36$ MPa $\beta = 0,04$

Pewną niespodzianką mogą być praktycznie te same wartości τ_o w przypadku obu porównywanych gum. Z tabeli 15. wynika, że składowa adhezyjna współczynnika tarcia f_a dla gumy S-450 jest znacznie wyższa aniżeli dla gumy S-490. Różnice te można tłumaczyć tym, że stosowany nacisk w przypadku gumy S-450 przewyższa jej granicę plastyczności, dlatego powyżej nacisku $N = 15$ N współczynnik f_a nie zmienia swojej wartości. Należy zauważyć, że na ogół wartość składowej adhezyjnej współczynnika tarcia f_a zmniejsza się wraz ze wzrostem nacisku stykowego. Taka sytuacja będzie występować przy styku wargi z wałem, jeżeli ten styk rozpatrywać dla profilu o rozkładzie lewostronnym.

Oddziaływanie adhezyjne pomiędzy powierzchniami stali i gumy w obecności warstwy smarowej wyraźnie się osłabiło. Zmierzone wartości współczynnika tarcia na tribometrze jednokulowym wyniosły:

• dla gumy S-450	$0,08 \leq f_b \leq 0,10$
• dla gumy S-490	$0,07 \leq f_b \leq 0,09$

Są to wartości typowe dla tarcia granicznego ($f_b \approx 0,10$) oraz mieszanego ($f_b \equiv f_m < 0,08$) [34].

Współczynnik tarcia przy tarcu granicznym można określić ze wzoru

$$f_b = \alpha \frac{\tau_n}{p_{sr}} + (1 - \alpha) \frac{\tau_b}{p_{sr}}, \quad (24)$$

w którym:

α – udział powierzchni, na której występuje bezpośredni styk obu ciał,

τ_b – napężenie styczne w warstwie smarowej.

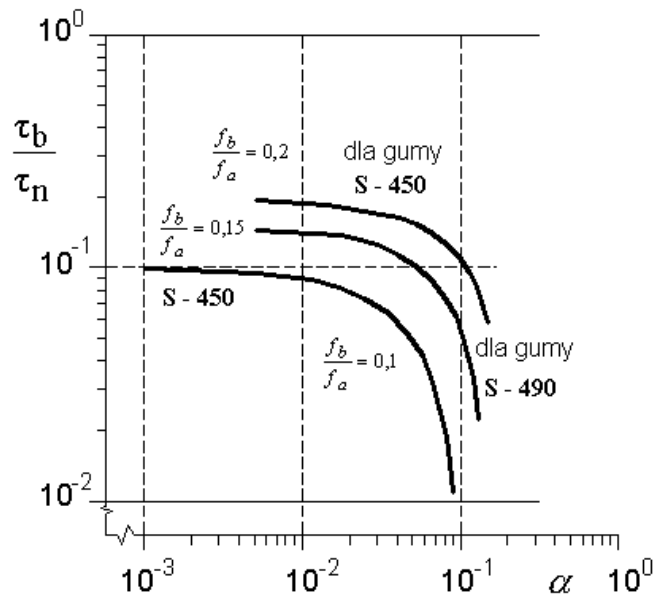
Równanie to należy przekształcić, aby móc określić α lub τ_b na podstawie znanych wartości f_b , τ_n i p_{sr} . Przekształcenie przeprowadza się w ten sposób, że za p_{sr} podstawia się iloraz τ_n/f_a

$$f_b = \alpha f_a + (1 - \alpha) \frac{\tau_b}{\tau_n} f_a.$$

Po podzieleniu obu stron równania przez f_a otrzymano

$$\frac{f_b}{f_a} = \alpha + (1 - \alpha) \frac{\tau_b}{\tau_n}. \quad (24a)$$

Graficzną interpretację równania (24a) przedstawiono na rysunku 82.



Rys. 82. Wartość ilorazu τ_n/f_a w zależności od udziału α powierzchni bezpośredniego styku

Przebieg krzywych $f_b/f_a = \text{const}$ wskazuje na to, że udział powierzchni α , na której występuje bezpośredni styk obu powierzchni, może być większy dla gumy S-490 niż dla S-450, gdyż ta pierwsza może pracować przy wyższym nacisku stykowym. Innymi słowy – gdy $\alpha \cong 3\%$ całkowitej powierzchni przylegania, dla gumy S-490 otrzymuje się nieco większą wartość ilorazu τ_b/f_n niż dla gumy S-450 w przypadku pokrycia smarem prawie 99,8% powierzchni.

Dla powierzchni smarowanych kulki i próbek gumowych z gum S-450 i S-490 otrzymano następujące wyniki:

- dla gumy S-450 $f_b/f_a = 0,13$,
- dla gumy S-490 $f_b/f_a = 0,15 \div 0,17$

Po przyjęciu $f_b = 0,08 = \text{const}$, obliczonych wartości τ_n ze wzoru (21) dla gum S-450 i S-490 oraz odpowiadających im wartości składowej adhezyjnej f_a możliwe będzie oszacowanie wartości części powierzchni wału α , na której występuje bezpośredni styk współpracujących elementów. Pod każdym względem lepiej prezentuje się guma o słabszym oddziaływaniu adhezyjnym ze stałą.

W celach porównawczych badano uszczelnienia ze sprężyną i bez sprężyny na wale o polerowanej powierzchni ($R_a = 0,01 \mu\text{m}$).

Badania prowadzono na czystych oraz smarowanych olejem VAT 15W40 uszczelnieniach, przy prędkości obrotowej $n \approx 90 \text{ obr/min}$ i w czasie 20 sekund. Mała prędkość obrotowa wału $\phi 88 \text{ mm}$ oraz bardzo krótki czas pracy wynikały z konieczności

zachowania stałej temperatury. Badania prowadzono wyłącznie w temperaturze otoczenia na stanowisku przedstawionym na rysunku 63.

Składową adhezyjną współczynnika tarcia obliczono ze wzoru

$$f_a \approx \frac{2M}{P_r d}, \quad (25)$$

w którym:

M – mierzony moment oporu tarcia, N·m,

P_r – promieniowe obciążenie wału przez wargę, N,

d – średnica wału, m.

Dla czystych i suchych powierzchni wału i uszczelnień otrzymano wartości podane w tabeli 16.

Tabela 16. Wyniki badania suchych uszczelnień na bardzo gładkim wale

Zmienne	Uszczelnienia			
	ze sprężyną		bez sprężyny	
	S-450	S-490	S-450	S-490
p_{sr} , MPa	1,45	1,62	1,72	1,17
f_a	1,47	1,07	1,98	1,17
k	6,0	4,6	9,6	5,1

Wartości τ_o i β , wyznaczone w poprzednich testach, oraz f_a zastosowano do obliczenia wartości współczynnika k , który charakteryzuje warunki styku pomiędzy wargą a wałem

$$f_a = k \frac{\tau_o}{p_r} + \beta. \quad (26)$$

Z obliczeń wynika, że współczynnik k zmienia się w zakresie $k \cong 5 \div 6$ dla uszczelnień ze sprężyną oraz $k \cong 5 \div 10$ dla uszczelnień bez sprężyny. Wyniki opisywanych badań potwierdzają wcześniejsze stwierdzenia, a mianowicie:

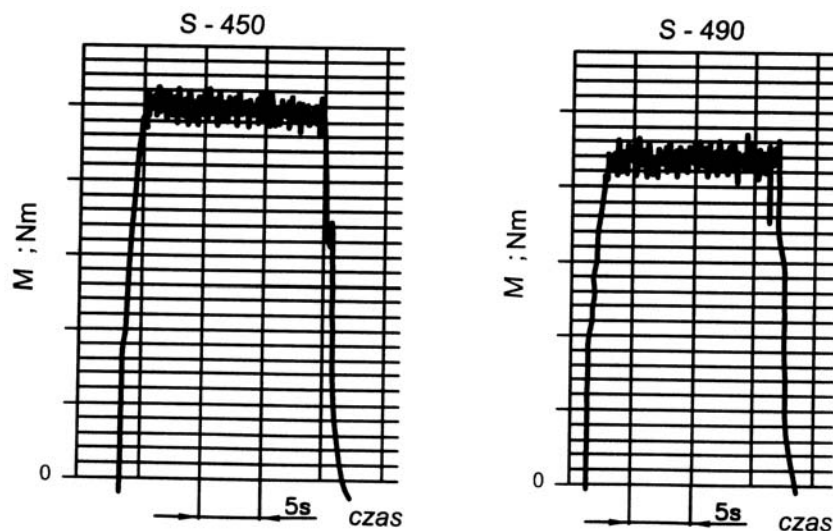
- guma S-490 wykazuje mniejsze oddziaływanie adhezyjne ze stałą,
- porównanie wartości współczynnika k dla uszczelnień ze sprężyną oraz bez niej ponownie świadczy o tym, że sprężyna poprawia warunki styku wargi z wałem.

Na rysunku 83. przedstawiono przebieg momentu tarcia uszczelnienia pracującego na bardzo gładkim wale.

Podczas badania uszczelnień posmarowanych olejem na posmarowanym bardzo gładkim wale otrzymano zaskakujące wyniki (tabela 17.).

Tabela 17. Wartości momentu tarcia zwilżonych uszczelnień na zwilżonym bardzo gładkim wale

Zmienne	Uszczelnienia			
	ze sprężyną		bez sprężyny	
	S-450	S-490	S-450	S-490
M, Nm	1,3	1,1	1,0	0,94
f_b	0,87	0,73	1,16	1,15



Rys. 83. Moment tarcia w czasie pracy uszczelnienia ze sprężyną (a) oraz bez niej (b) na bardzo gładkim wale $R_a = 0,01 \mu\text{m}$. Powierzchnie wału i wargi czyste i suche

Wartości współczynników tarcia wskazują, że pomimo smarowanych powierzchni wargi i wału trudno mówić o tym, aby tarcie graniczne występowało na styku obu powierzchni. Ponadto różnica pomiędzy współczynnikami tarcia dla suchych i smarowanych powierzchni świadczy zaledwie o 30÷40% spadku. Na podstawie wzoru (24a) można ocenić, na pewnym poziomie ufności, część powierzchni α , na której dominuje oddziaływanie adhezyjne

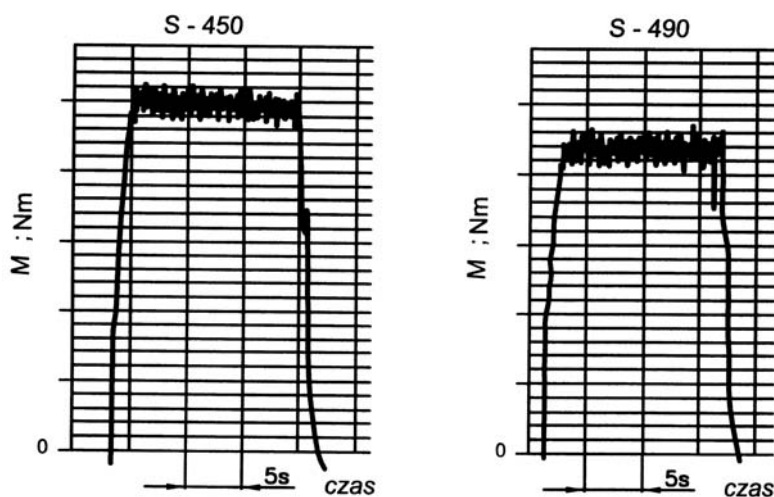
$$f_{\text{lub}} = f_a \alpha + (1 - \alpha) f_b.$$

Po przyjęciu, jak poprzednio, $f_b = 0,10 = \text{const}$ współczynnik α wynosi

α	uszczelnienia	
	S-450	S-490
	56%	65%

Z porównania wynika, że pomimo niewielkiego udziału smarowanej powierzchni (30÷35%) dla gumy S-490 całkowity współczynnik tarcia jest mniejszy niż dla uszczelnień wykonanych z gumy S-450. Przykładowe wykresy momentu tarcia przedstawiono na rysunku 84.

Podczas badań prowadzonych w podwyższonej temperaturze nad wyznaczeniem składowej adhezyjnej współczynnika tarcia wykazano, że stała τ_0 dla suchych powierzchni zmniejsza swoją wartość do 0,24 oraz 0,26 MPa odpowiednio dla gum S-450 i S-490.



Rys. 84. Moment tarcia uszczelnień wykonanych: a) z gumy S-450 oraz b) z gumy S-490. Uszczelnienia ze sprężynami, powierzchnie smarowane olejem VAT 15 W 40, wał bardzo gładki $R_a = 0,01 \mu\text{m}$

Podczas tych samych badań, tylko ze smarowanymi próbkami, otrzymano dosyć nieoczekiwane rezultaty – współczynnik tarcia był zbliżony do wartości składowej adhezyjnej współczynnika tarcia f_a wyznaczonej dla suchych powierzchni. Można tutaj podać, w charakterze próby wyjaśnienia, dwie interpretacje tego zjawiska:

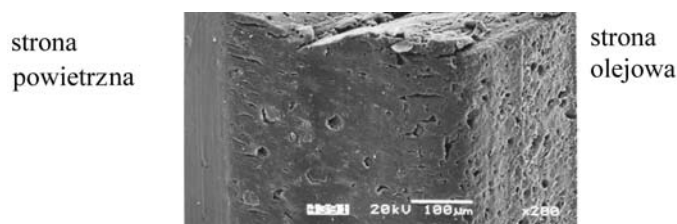
- olej w temperaturze ~ 93 °C penetruje w głąb warstwy wierzchniej i zmienia jej właściwości (plastyfikacja),
- wytrzymałość warstwy smarowej o niskiej lepkości jest niewielka i dlatego w styku obciążonym udział α jest duży.

6.3. OPÓR TARCIA USZCZELNIEŃ WSPÓLPRACUJĄCYCH Z TŁOCZONYMI TULEJKAMI O POWIERZCHNIACH NAWĘGLANYCH

Badane uszczelnienia o średnicy wargi ϕ 26,5 mm współpracowały przez 50 godzin z walcowanymi tulejkami o powierzchniach nawęglanych przy prędkości obrotowej $n = 1500$ obr/min w oleju Tutela 2C80/s o temperaturze 93 °C. W uszczelnieniach tych nie można było, ze względu na ich budowę (rys. 3f), sprawdzić położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej oraz na powierzchni wału. (Wyjęcie uszczelnienia powoduje częściowe zniszczenie tulejki.) Warunki styku wargi z wałem oszacowano na podstawie profilu zużytej wargi oraz tekstury zużytej powierzchni krawędzi uszczelniającej.

Stwierdzono, iż średnia wartość momentu tarcia zmieniała się w zakresie od 0,2 do 0,37 N·m, co przy prędkości obrotowej wału 1500 obr/min daje jednostkową moc tarcia $2,6 \div 4,9$ W/mm² [26]. Jest to bardzo duża wartość, jeżeli porównać ją z mocą tarcia uszczelnienia z gumy FKM $\sim 5,8$ W/mm², ale pracującego przy dwukrotnie większej prędkości obrotowej. Uszczelnienia wykonano z gumy akrylowej (ACM).

Z przeprowadzonych analiz wycinków wargi pod mikroskopem skaningowym wynika, że zużyte powierzchnie krawędzi uszczelniającej są bardzo gładkie (rys. 85.).



Rys. 85. Widok od spodu zużytej powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi współpracującej z powierzchnią nawęglaną tulejki tłoczonej

Na 1/3 szerokości zużytej wargi zarówno po jej stronie powietrznej, jak i olejowej występują poprzeczne mikropęknięcia. Są to typowe pęknięcia powierzchni, wynika-

jące z obciążenia cieplnego oraz nadmiernych naprężeń stycznych prowadzących do zmęczenia warstwy wierzchniej. Usytuowanie się mikropęknięć na obu skrajnych obszarach styku wargi z wałem świadczy o niedostatecznym smarowaniu oraz o koncentracji nacisku właśnie w tych miejscach. W strefie środkowej obszaru styku nacisk musiał być znacznie mniejszy.

Takie adhezyjne zużycie wargi można było przewidywać po analizie tekstury powierzchni tulejki (p. 5.2.2.1). Stwierdzono bowiem, że rozkład gęstości częstości rzędnych profilu jest prawostronny, koncentracja rzędnych jest duża, co sprawia, że znaczna jest rzeczywista powierzchnia styku wargi z wałem. Jeżeli dodać do tego małe wartości parametru R_{pk} i ilorazu $R_t/\bar{r} \approx 0,03$, to okaże się, że wystąpił styk nasycony oraz bardzo utrudniony dostęp oleju do obszaru styku, ze względu na brak możliwości kapilarnego podsiąkania oleju. Pewnym rozwiązaniem byłoby zastosowanie gumy o dużej liczbie cząstek wypełniaczy lub o takiej teksturze powierzchni tulejki, przy której wartość ilorazu R_t/\bar{r} była większa.

Głębokość wnikania nierówności nie przekracza $h = 0,54 \mu\text{m}$ przy stosunkowo wysokim nacisku stykowym. W rezultacie naprężenia styczne są zbyt małe, aby doszło do usuwania z powierzchni cząstek wypełniaczy.

6.3.1. ZALEŻNOŚĆ OPORU TARCIA OD RODZAJU MATERIAŁU WARGI

Uszczelnienia wykonano z gumy akrylowej (ACM), która charakteryzuje się stosunkowo niewielką wartością kąta strat wewnętrznych (Dodatek 1, tab. 1.3) oraz dużą wartością oddziaływania adhezyjnego ze stalą ($\tau_o \approx 0,36 \text{ MPa}$ [12]). Maksymalna wartość kąta ψ występuje przy częstości odkształcania $\omega_c = 10^4 \text{ s}^{-1}$.

Uszczelnienia współpracowały z tłoczoną powierzchnią nawęglaną o izotropowej chropowatości. Rozkład gęstości częstości rzędnych zazwyczaj jest prawostronny, a średnia wartość promienia $\bar{r} = 95 \mu\text{m}$. Odległość od najwyższego wierzchołka nierówności do linii średniej profilu powierzchni nie przekracza z reguły $2\sigma \approx 0,54 \mu\text{m}$. Z przeprowadzonych obliczeń wynika (p. 5.2.2.1), że powierzchnia gumy wypełni doliny profilu na głębokość 2σ już przy niewielkim nacisku $2,2 \cdot 10^{-1} \text{ MPa}$. Średnia wartość nacisku wyznaczonego na podstawie pomiaru siły zacisku wargi P_r oraz szerokości styku wargi z wałem $p = 1,1 \text{ MPa}$. Należy oczekiwać, że dla powierzchni izotropowej rzeczywista wartość nacisku nie będzie się zwiększała wraz ze wzrostem obciążenia wargi, a to za sprawą zwiększania się liczby nowych miejsc styku (coraz to nowe nierówności wchodzi w styk z wargą).

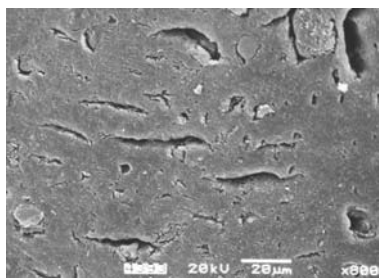
W przypadku zbliżenia wargi do linii średniej profilu powierzchni wału promień obszaru lokalnego styku $r^* \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, co prędkości liniowej wału $v = 2,2 \text{ m/s}$ daje częstość odkształcania $\omega = \frac{2,2}{2 \cdot 10^{-5}} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. Dla rozkładu normalnego i izotropowego można przyjąć, że współczynnik $C \approx 1$, stąd składowa deformacyjna współ-

czynnika tarcia wyniesie $f_d \approx C \operatorname{tg} \psi = 1 \cdot \operatorname{tg} 2,3^\circ = 0,04$ w temperaturze 100 °C. Obliczona wartość całkowitego współczynnika tarcia na podstawie pomiaru momentu tarcia oraz siły promieniowego zacisku wargi

$$f = \frac{2M}{P_r d} = \frac{2 \cdot 0,11}{12,7 \cdot 0,028} = 0,62.$$

Świadczy to o zdecydowanym udziale oddziaływania adhezyjnego w całkowitym oporze tarcia uszczelnienia.

Wygładzona powierzchnia zużytej krawędzi uszczelniającej wargi oraz obecność w gumie cząstek wypełniaczy sugerują, że występowało zużycie adhezyjne. Stosunkowo duża wartość średniego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności oraz niewielka głębokość wgłębiania się tych nierówności w powierzchnię krawędzi uszczelniającej były przyczyną pozostawania w gumie cząstek wypełniaczy. Gładka powierzchnia gumy świadczy z kolei o tym, że smarowanie wargi było ograniczone. Nominalne naprężenie styczne na styku wargi–wał mogło osiągać wartość $\tau_n \geq 0,5$ MPa. Naprężenia te występujące w miejscach rzeczywistego styku mają charakter okresowo zmienny. W rezultacie mogło dojść do pojawienia się mikropęknięć na powierzchni wargi (rys. 86.).



Rys. 86. Powiększenie mikropęknięć na powierzchni krawędzi uszczelniającej. Widoczne nieliczne cząsteczki wypełniaczy

6.4. OPÓR TARCIA USZCZELNIEŃ WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z TŁOCZONYMI TULEJKAMI O POWIERZCHNIACH FOSFORANOWANYCH

Badano uszczelnienia o wymiarze AS 88.1×105×11LF, wykonane z gumy FKM w odmianach W0781 i W0792 (Dodatek 1, tab. 1.1). Uszczelnienia współpracowały z tłoczonymi tulejkami, których powierzchnie poddano następującym operacjom technologicznym: fosforanowaniu (TF), szlifowaniu i fosforanowaniu (SF) oraz fosforanowaniu i szlifowaniu (FS). Czas pracy uszczelnień wynosił 24 godziny, czynnikiem uszczelnianym był olej Shell 1736 o temperaturze 100 oraz 140 °C.

Średnią moc tarcia po 24 godzinach pracy uszczelnień oraz odpowiadające jej obciążenie cieplne krawędzi uszczelniającej podano w tabeli 18.

Tabela 18. Moc niezbędna do pokonania oporu tarcia uszczelnień współpracujących z tłoczonymi tulejkami o powierzchniach fosforanowanych

Temperatura czynnika		Tulejka	Moc tarcia		
			obciążenie cieplne powierzchni ^{*)}		
			TF	SF	FS
Guma W0781	$T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		194 W 8,8 W/mm ^{2*})	177 W 8 W/mm ²	163 W 6,6 W/mm ²
	$T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$		177 W 7,5 W/mm ²	152 W 6,8 W/mm ²	147 W 6,2 W/mm ²
Guma W0792	$T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$		244 W 11 W/mm ²	197 W 9,5 W/mm ²	180 W 7,6 W/mm ²
	$T = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$		199 W 9 W/mm ²	177 W 8,8 W/mm ²	161 W 6,9 W/mm ²

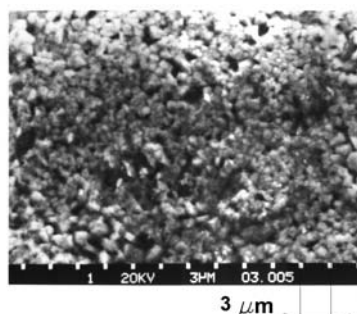
^{*)} Moc tarcia przypadająca na jednostkę powierzchni styku wargi z wałem.

Zarówno struktura gumy (rys. 90b), jak i prawdopodobnie skład wypełniaczy są przyczyną większych oporów tarcia uszczelnień wykonanych z gumy W0792, w porównaniu z uszczelnieniami z gumy W0781.

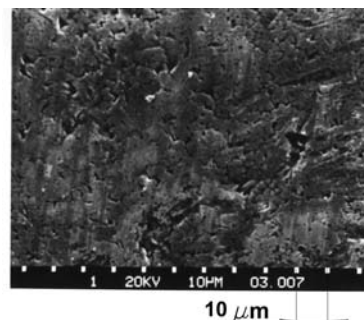
Najmniejszy opór tarcia uszczelnień z gumy W0781 oraz W0792 współpracujących z tulejkami o powierzchni fosforanowanej i szlifowanej (FS) wynika z anizotropii chropowatości, falistości profilu w kierunku obwodowym (λ_a); dużej wartości parametru S_m oraz z niewielkiej wartości ilorazu $R_t/\bar{r} = 0,05$.

Pewna część energii doprowadzona do pary ciernej uszczelnienie-wał jest wydatkowana na usuwanie i wygładzanie ziaren soli fosforanowych oraz na zużycie ściernie powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi. Teksturę powierzchni oryginalnej oraz zużytej podczas pracy tulejki tłoczony fosforanowanej przedstawiono na rysunku 87. Zużyciu uległa również warg; ślad styku wargi jest dobrze rozwinięty (rys. 88).

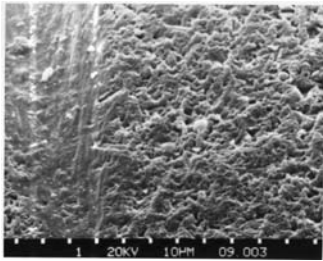
a)



b)

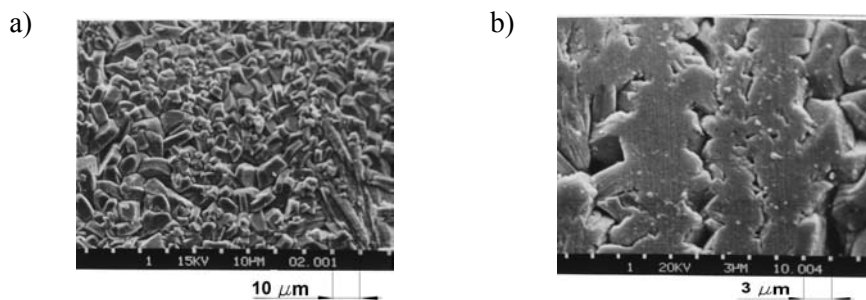


Rys. 87. Tekstura powierzchni tłoczony fosforanowanej: a) oryginalna, b) zużyta powierzchnia po 24 godzinach pracy



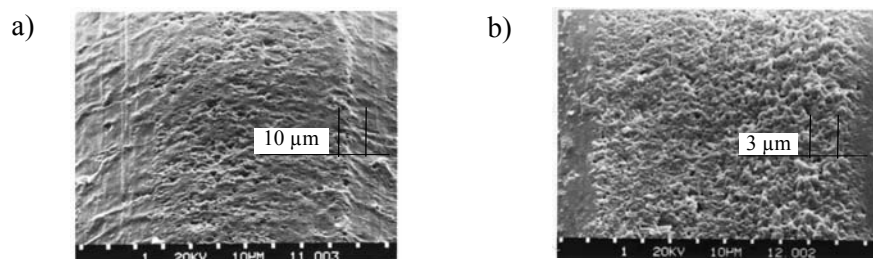
Szlifowanie tulejki spowodowało, że ziarna tworzące się w czasie procesu fosforanowania są wyraźnie ukształtowane i ukierunkowane zgodnie z kierunkiem szlifowania (rys. 89a). Po dotarciu otrzymano gładką powierzchnię w miejscach, gdzie wargę stykała się z tulejką (rys. 89b).

Rys. 88. Fragment dotartej powierzchni wargi z gumy W0781



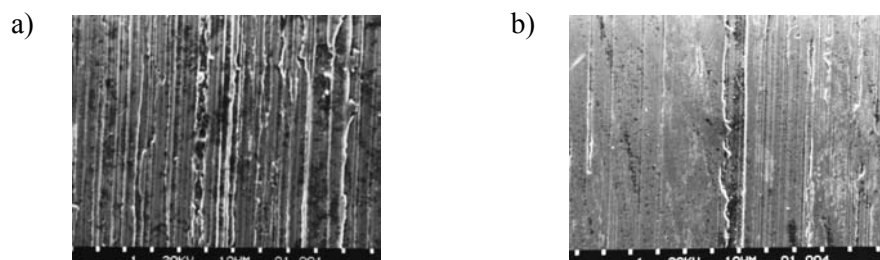
Rys. 89. Tekstura powierzchni szlifowanej fosforanowanej:
a) oryginalna i b) zużyta powierzchnia

Zmniejszenie oporu tarcia uszczelnienia współpracującego ze szlifowaną powierzchnią fosforanowaną należy przypisać pewnej anizotropii chropowatości, szczególnie w odniesieniu do parametru Δ_a , większej wartości R_{pk} oraz rozkładowi rzędnych profilu poniżej linii średniej ($R_{sk} > 0$). Z wartości dwóch ostatnich parametrów wynika, iż pomiędzy wargą a tulejką styk będzie nienasycony, a podsiąkanie kapilarne oleju w szczelinę będzie znaczne. Pomimo wysokiej wartości ilorazu $R_t/\bar{r} = 0,46$ zużycie powierzchni warg wykonanej z odpornej na zużycie gumy W0781 jest nieznaczne (rys. 90a). Oznacza to, że prędko dochodzi do wygładzenia krawędzi ziaren soli fosforanu. Krawędź uszczelniająca wykonana z gumy W0792 ulega wyraźnemu zużyciu, mimo podobnych warunków pracy (rys. 90b).



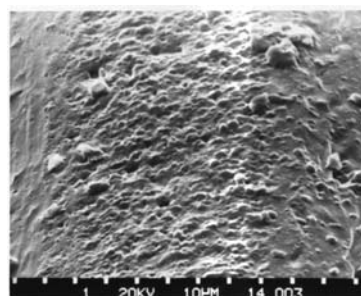
Rys. 90. Tekstura zużytej krawędzi uszczelniającej wargi wykonanej z gumy W0781, b) W0792

O ile na powierzchni tulejek szlifowanych warstwa fosforanowa zatarła ślady i anizotropię tekstury pozostawionej przez ściernicę, o tyle szlifowanie powierzchni uprzednio fosforanowanej wprowadza wyraźnie ukształtowane ślady obróbki (rys. 91a). Ślady te ulegają częściowemu zatarciu po współpracy z wargą (rys. 91b).



Rys. 91. Powierzchnia tulejki fosforanowanej i szlifowanej:
a) oryginalna i b) dotarta powierzchnia

Gładkość powierzchni tulejki w kierunku obwodowym sprawia, że powierzchnia wargi wykonana z gumy W0792 charakteryzuje się niezbyt rozwiniętym zużyciem adhezyjnym (rys. 92).



Rys. 92. Tekstura zużytej powierzchni wargi wykonanej z gumy FKM W0792 po współpracy z tulejką fosforanowaną i szlifowaną

6.5. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy wyników badań dotyczących oporów tarcia uszczelnień oraz ich związków z warunkami styku wargi z wałem sformułowano następujące wnioski:

1. Znacznie zmniejszono opór tarcia uszczelnień wargowych z opracowanego typu szeregu geometrycznie podobnych uszczelnień w rezultacie zmniejszenia szerokości styku wargę-wał oraz prawie dwukrotnego zmniejszenia obciążenia P_{pr} .

2. Stwierdzono brak zdecydowanych relacji pomiędzy oporem tarcia a chropowatością powierzchni wału, obciążeniem wywieranym przez wargę na wał oraz rodzajem gumy, z której wykonano uszczelnienia. Ten brak relacji przypisuje się dominującemu wpływowi zmiennych po obwodzie lokalnych warunków styku wargi z wałem.

3. Wykazano, że istnieje związek pomiędzy momentem tarcia a rozstępem położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej wargi. Wraz ze zwiększeniem rozstępu dochodzi do asymetrii warunków styku na obwodzie wargi, a w rezultacie do spadku momentu tarcia. Zwiększenie rozstępu położenia obszaru styku powoduje, zależnie od chropowatości powierzchni wału, nierównomierne zużycie krawędzi uszczelniającej.

4. W razie występowania rozstępu położenia obszaru styku na krawędzi wargi należy zastosować wał o anizotropii chropowatości powierzchni oraz o lewostronnym układzie gęstości częstości rzędnych profilu w kierunku obwodowym. Zalecane wartości ilorazów: $R_t/\bar{r} \geq 0,02$ oraz $\sigma\bar{r} \geq 2,5 \cdot 10^{-2}$.

5. W rezultacie zmienności rozkładu wartości nacisku stykowego wzdłuż obwodu wargi dochodzi, w jednym i tym samym uszczelnieniu, do zmiany częstości odkształcania obszarów lokalnego styku z wałem nawet o jeden rząd wielkości. Wynika to ze zmienności wgłębiania się nierówności powierzchni wału w krawędzi uszczelniającej wargi.

6. Wykazano, że utrzymanie stałości ilorazu $\sigma\bar{r} = \text{const}$ dla dowolnej chropowatości powierzchni, otrzymanej w rezultacie szlifowania wgłębnego wału, zapewnia tę samą częstość odkształcania lokalnych obszarów styku wargi z wałem. W ten sposób wystąpi ta sama wartość składowej deformacyjnej współczynnika tarcia.

7. Stwierdzono, że wartości charakterystyk $E(\omega)$, $\text{tg } \psi(\omega)$ maleją wraz ze wzrostem temperatury dla większości gum, z których wykonuje się uszczelnienia wargowe. Podobnie, składowa adhezyjna współczynnika tarcia maleje wraz ze zwiększeniem zarówno temperatury, jak i nacisku stykowego. Pokrycie powierzchni próbek olejem zdecydowanie zmniejsza oddziaływanie adhezyjne w temperaturze otoczenia oraz umiarkowanie w temperaturze podwyższonej.

8. Zmniejszenie oporu tarcia uszczelnień wargowych jest możliwe przez dobór chropowatości powierzchni, stosownie do właściwości gumy, z której wykonano uszczelnienia:

- promień zaokrąglenia nierówności powinien być tak dobrany, aby częstość $\omega = v/(2\sqrt{2\bar{r}h})$ odkształcania lokalnych obszarów była mniejsza lub znacznie większa od częstości, przy której kąt strat wewnętrznych dla danej gumy osiąga maksimum,
- rozkład gęstości częstości rzędnych profilu powierzchni wału powinien być lewostronny w kierunku obwodowym. Przy takim rozkładzie dochodzi do zwiększenia nacisku stykowego przy wzroście obciążenia wargi, a to prowadzi do spadku wartości składowej adhezyjnej współczynnika tarcia.

9. Badanie składowej adhezyjnej na tribometrze jednokulowym wydaje się wskazane na etapie przygotowania składu mieszanki danego elastomeru. Umożliwi ono wybranie mieszanki odznaczającej się najmniejszym oddziaływaniem adhezyjnym ze stałą.

10. Do zużycia adhezyjnego powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi dochodzi podczas jej współpracy z powierzchnią wału o chropowatości izotropowej, z prawostronnym rozkładem gęstości rzędnych profilu oraz z niewielką wartością ilorazu R_t/\bar{r} . Dochodzi do wygładzenia powierzchni wargi, do powstania mikropęknięć i w rezultacie do wycieku oleju.

11. Dużą wartość ilorazu $R_t/\bar{r} > 0,3$ można dopuścić jedynie w przypadku powłok miękkich, takich jak fosforanowane. W krótkim czasie dochodzi do zużycia ściernego powierzchni wargi, zapewniającego – zależnie od składu mieszanki – uzyskanie powierzchni porowatej. Szlifowanie powierzchni po uprzednim jej fosforanowaniu jest niewskazane, gdyż powoduje to, że powierzchnię cechuje zbyt mała wartość ilorazu R_t/\bar{r} .

7. MOŻLIWOŚCI REDUKCJI OPORU TARCIA USZCZELNIEŃ WARGOWYCH

Okres dotarcia dwóch powierzchni pozostających w ruchu względnym jest – ze względów energetycznych – przejściem ze stanu nieustalonego do ustalonego [79, 81]. Dotarte powierzchnie osiągają strukturę i stan fizyczny, przy których energia potencjalna jest minimalna. Chropowatość takich powierzchni nazwano optymalną lub równoważną w danych warunkach pracy [46]. Wynika z tego, że podczas współpracy dwóch powierzchni o równoważnych chropowatościach opór tarcia oraz ich zużycie powinny być minimalne. Jest to bardzo ważne stwierdzenie, bowiem oznacza ono, iż wystarczy wykonać powierzchnie o parametrach odpowiadających parametrom chropowatości równoważnej, aby skrócić okres dotarcia do kilku zaledwie godzin oraz by obniżyć opór tarcia i zużycie wargi uszczelnienia. W konsekwencji jest to sposób na wydajne zwiększenie trwałości uszczelnienia.

7.1. RÓWNOWAŻNA CHROPOWATOŚĆ DOTARTYCH POWIERZCHNI SZLIFOWANYCH WAŁÓW

Z wielu przeprowadzonych testów wynika, że do ukształtowania się chropowatości równoważnej szlifowanych wałów dochodzi po około 200-godzinnej współpracy z uszczelnieniem wargowym. Czas ten należałoby wydłużyć w tych parach, w których dochodzi do szybkiego spadku nacisku, w wyniku zużycia wargi i zmiany właściwości gumy. Ocenę chropowatości śladu zużycia pozostawionego przez wargę na powierzchni wału należy prowadzić w kierunku obwodowym. Oszacowanie chropowatości w kierunku osiowym praktycznie jest niemożliwe, ze względu na bardzo małą szerokość śladu. Zmianę wartości zmierzonych parametrów chropowatości dotartych powierzchni przedstawiono w tabelach 19.–21.

Na podstawie porównania wyników pomiarów zawartych w tabelach 4. i 5. oraz w 19. i 20. można stwierdzić, że zmiana chropowatości z technologicznej (oryginalnej) do równoważnej polega przede wszystkim na:

- zwiększeniu wysokości profilu R_t powierzchni najgładszej oraz zmniejszeniu R_t dla pozostałych,

- zmniejszeniu pochylenia profilu Δ_a oraz zwiększeniu falistości λ_a dla wszystkich powierzchni,
- zmniejszeniu parametru S_m dla powierzchni o $R_a = 0,12$ oraz $0,32 \mu\text{m}$ oraz zwiększeniu S_m dla powierzchni najbardziej chropowatej,
- poprawie rozkładu rzędnych profilu; dla powierzchni dotartej rzędne leżą powyżej średniej linii ($R_{sk} < 0$, a parametr b uległ zwiększeniu), ponadto zwiększyła się koncentracja rzędnych (wzrost parametru R_{ku}).

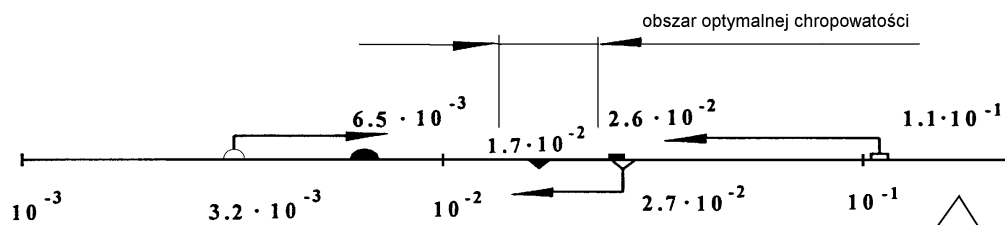
Tabela 19. Wartości parametrów chropowatości dotartych powierzchni szlifowanych wałów wyznaczone w kierunku obwodowym

Wał	R_a	R_t	R_{pk}	R_{vk}	S	S_m	Δ_a	λ_a
	μm						deg	μm
$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	0,09	0,66	0,11	0,08	22	94	0,37	1,5
$R_a = 0,32 \mu\text{m}$	0,18	1,14	0,18	0,14	28	149	0,46	2,5
$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	0,27	1,66	0,37	0,40	38	230	0,53	3,2

Tabela 20. Statystyczne parametry chropowatości dotartych powierzchni szlifowanych wałów wyznaczone w kierunku obwodowym

Wał	R_{sk}	R_{ku}	r_l	r_p	r_{sr}	\bar{r}	b_{sr}	v_{sr}	Δ
	-		μm				-		
$R_a = 0,12 \mu\text{m}$	$-0,54 \div -0,06$	$2,02 \div 6,55$	205	196	200	112	0,86	1,55	$7 \cdot 10^{-3}$
$R_a = 0,32 \mu\text{m}$	$-0,65 \div -0,04$	$2,24 \div 4,16$	212	202	207	69	0,95	1,48	$1,7 \cdot 10^{-2}$
$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	$-1,28 \div -0,03$	$2,05 \div 5,62$	201	197	199	59	1,13	1,46	$2,6 \cdot 10^{-2}$

Najbardziej interesujące jest jednak to, że średni promień zaokrąglenia nierówności, wyznaczony w kierunku obwodowym, zmierza do jednej – niezależnie od wartości początkowej – wartości równej $r_{sr} \cong 200 \mu\text{m}$. Oznacza to, że wartość promienia nierówności na najgładszej powierzchni uległa ponad dwukrotnemu zmniejszeniu, a na najbardziej chropowatych powierzchniach – dwukrotnemu wzrostowi. Zmiana wartości średniego promienia \bar{r} wszystkich nierówności powierzchni zużytych powoduje zmianę wartości kompleksowego parametru chropowatości Δ , która zmierza do optymalnej wartości $\Delta = 1,0 \div 1,7 \cdot 10^{-2}$. Tendencje tych zmian w przypadku poszczególnych chropowatości powierzchni oryginalnych przedstawiono na poglądowym wykresie (rys. 93.).



Rys. 93. Zmiany wartości parametru Δ wywołane docieraniem powierzchni

Z wykresu tego wynika, że parametr Δ zużytego śladu na powierzchni najgładszej i najbardziej chropowatej nie w pełni osiągnął wartość optymalną. Jest to konsekwencją zmiany warunków styku pomiędzy wargą a wałem w czasie pracy, a w tym przede wszystkim spadkiem wartości nacisku stykowego. Przeprowadzono więc dodatkowe badania, dzięki którym wykazano, że po okresie 280÷340 godzin ciągłej pracy pary uszczelnienie wargowe–wał parametr Δ dla wymienionych powierzchni osiągnął podaną optymalną wartość.

Zmiana rozkładu rzędnych profilu oznacza podobną zmianę rozkładu promieni nierówności po wysokości profilu. Porównanie parametrów charakteryzujących rozkład promieni nierówności na powierzchniach początkowej i dotartej przeprowadzono na podstawie danych zawartych w tabelach 6. i 21.

Tabela 21. Wartości parametrów charakteryzujących rozkład promieni nierówności dotartych powierzchni wałów wyznaczone w kierunku obwodowym

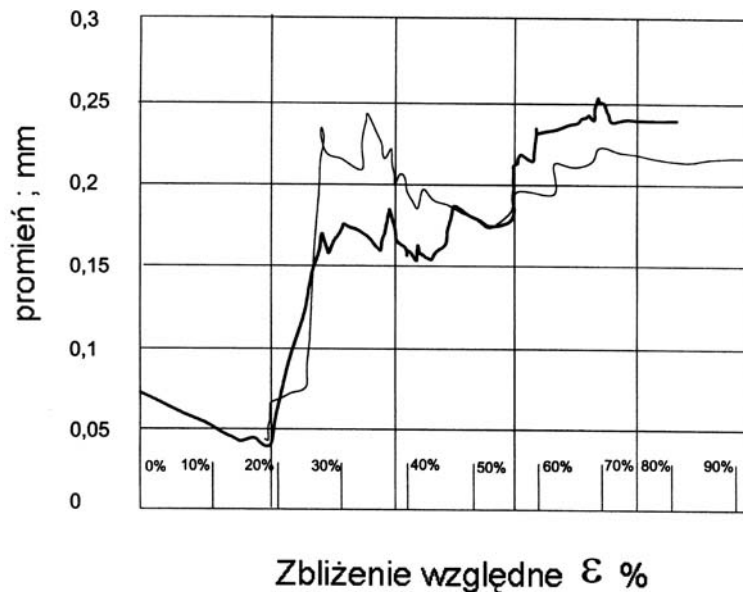
Wał	Parametry rozkładu					
	P(r)	r_{med}	$r_{śred}$	$\sigma_{ln r}$	V_r	γ_l
	–	μm			–	
$R_a = 0,12 \mu m$	0,56÷0,63	100÷240	110÷300	0,44÷0,67	0,46÷0,75	1,5÷2,7
$R_a = 0,32 \mu m$	0,60÷0,68	100÷230	120÷280	0,60÷0,63	0,66÷0,69	2,3÷2,4
$R_a = 0,63 \mu m$	0,65÷0,72	70÷230	120÷240	0,88÷1,04	1,4÷1,1	4,6÷6,9

Modyfikacja rozkładu promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności prowadzi do niewielkiego spadku wartości wariancji rozkładu $\sigma_{ln r}$ oraz do większej zmiany wariancji V_r i skośności γ_l rozkładu promieni. Zmiany te wynikają z zużycia przypadkowych nierówności (zadziory) oraz z uporządkowania rozkładu nierówności.

Z analizy wykresów rozkładu wartości promieni nierówności – w zależności od zbliżenia do profilu – wynika, że wartość średnią uzyskiwano przy mniejszej wartości zbliżenia ε (przykładowy wykres przedstawiono na rysunku 94.).

Profil powierzchni wału podczas docierania się zmienia się w taki sposób, że różnice pomiędzy wartościami promieni wyznaczonych w dwóch kierunkach (od lewej do prawej i na odwrót) maleją. Oznacza to, że w przypadku powierzchni o chropowatości równoważnej kierunek obrotów wału praktycznie nie będzie miał wpływu na zużycie krawędzi uszczelniającej. Dzięki zwiększeniu się częstości występowania rzędnych profilu powyżej jego średniej linii doszło do wystąpienia styku nasyconego w kierunku obwodowym, szczególnie w przypadku powierzchni bardziej chropowatych:

chropowatość wału R_a , μm	0,12	0,32	0,63
zbliżenie krytyczne ε_{kryt}	0,59	0,49	0,34



Rys. 94. Zmiana wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności na dotartej powierzchni wału o chropowatości początkowej $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ w zależności od względnego zbliżenia do profilu

Obecność styku nasyczonego w kierunku obwodowym to zasadnicza różnica pomiędzy oryginalnymi szlifowanymi powierzchniami a dotartymi. Poniżej podano zasadnicze parametry równowaznej (optymalnej) chropowatości [9] powierzchni szlifowanej wałów przewidywanych do współpracy z uszczelnieniami wargowymi wykonanymi z gum fluorowych:

$$R_{tc} = 0,9 \div 1,1 \mu\text{m} \quad \bar{r} = 50 \div 70 \mu\text{m} \quad \frac{R_{tc}}{\bar{r}} \cong 0,01 \div 0,03 \quad 0,03 \leq \left(\frac{\sigma}{\bar{r}}\right)^{0,5} \leq 0,08$$

$$b = 0,9 \div 1,1 \quad v_{sr} = 1,5 \quad \Delta = (1,0 \div 1,7) \cdot 10^{-2}$$

W wyniku zmiany wartości średniego promienia zaokrąglenia wierzchołków nierówności oraz standardowego odchylenia rzędnych od linii średniej profilu dochodzi do następującej zmiany częstości odkształcania lokalnych obszarów styku (tab. 22.).

Tabela 22. Częstości odkształcania obszaru styku przez chropowatość równowazną

Chropowatość \ Częstość	Wał					
	$R_a = 0,12 \mu\text{m}$		$R_a = 0,32 \mu\text{m}$		$R_a = 0,63 \mu\text{m}$	
	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$
$2r^*$, m	$17 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$	$39 \cdot 10^{-6}$	$54 \cdot 10^{-6}$	$44 \cdot 10^{-6}$
ω , s^{-1}	$0,8 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^6$

Z zestawienia tego wynika, że dla powierzchni równoważnej częstość drgań praktycznie nie zależy, z wyjątkiem najgładszej powierzchni, od głębokości wgłębienia się nierówności w powierzchnię wargi. Oznacza to, że w sytuacji utrzymującego się zmiennego nacisku w kierunku obwodowym częstość odkształcania w poszczególnych odcinkach wargi będzie taka sama.

7.2. CHROPOWATOŚĆ DOTARTYCH POWIERZCHNI TULEJEK TŁOCZONYCH NAWĘGLANYCH

Wartości analizowanych parametrów chropowatości zużytych powierzchni tulejek tłoczonych i nawęglanych przedstawiono w tabelach 23.–25. Okazało się, iż do utworzenia się powierzchni o chropowatości równoważnej nie mogło dojść, a to z powodu nieodpowiedniej chropowatości powierzchni początkowych oraz tekstury gumy akrylowej. Izotropowość chropowatości, prawostronny rozkład gęstości częstości rzędnych i duża ich koncentracja ($R_{ku} \gg 3$), bardzo mała wartość zredukowanej wysokości wzniesień R_{pk} oraz niewielka wartość ilorazu $R_t/\bar{r} \leq 0,03$ sprawiły, że przy gładkiej powierzchni krawędzi uszczelniającej wystąpiło tarcie graniczne lub suche oraz rozwinięte zużycie adhezyjne (rys. 86.). Samoorganizacja powierzchni dotartych polega przede wszystkim na:

- zmniejszeniu średniego arytmetycznego odchylenia profilu R_a i pochylenia profilu Δ_a oraz zwiększeniu fali profilu λ_a i odległości między nierównościami na linii średniej S_m ,
- na dalszym spadku wartości skośności rozkładu rzędnych R_{sk} oraz dalszym wzroście ekscesu R_{ku} ,
- na zwiększeniu średniego promienia \bar{r} zaokrąglenia wierzchołków nierówności i ich wygładzeniu do otrzymania zwierciadlanej powierzchni.

Tabela 23. Parametry chropowatości dotartych powierzchni tulejek tłoczonych nawęglanych

Tulejka	R_a	R_t	R_{pk}	R_{vk}	S	S_m	Δ_a	λ_a	
	μm						deg	μm	
Numery uszczelnień	C1	0,14	2,4	0,13	0,37	50	111	0,61	1,4
	C2	0,28	6,8	0,45	1,7	63	152	0,84	2,1
	C3	0,16	3,6	0,12	0,74	58	98	0,85	1,2
	C4	0,17	3,3	0,19	0,47	44	87	0,94	1,1

Tabela 24. Parametry statystyczne chropowatości dotartych powierzchni tulejek tłoczonych nawęglanych

Tulejka	R_{sk}	R_{ku}	r_l	r_p	r_{sr}	\bar{r}	b_{sr}	v_{sr}	Δ	
	–		μm				–			
Numery uszczelnień	C1	–1,6	11,3	1419	1260	1340	357	2,4	1,9	$7,3 \cdot 10^{-3}$
	C2	–1,3	19,8	1208	1231	1220	340	–	–	–
	C3	–3,3	25,7	1355	1128	1242	343	4,9	2,0	$8,8 \cdot 10^{-3}$
	C4	–1,8	16,6	1580	1421	1501	378	8,8	1,7	$3,8 \cdot 10^{-3}$

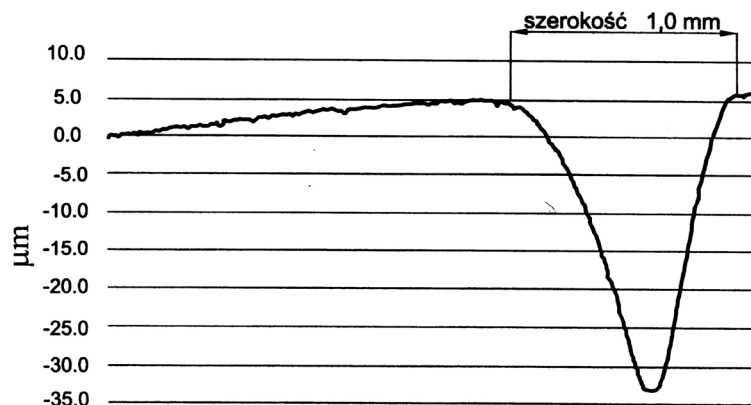
Tabela 25. Wartości parametrów charakteryzujących rozkład promieni nierówności dotartych powierzchni tulejek nawęglanych

Tulejka	Parametry rozkładu						
	P(r)	r_med	r_śred	$\sigma_{ln r}$	V_r	γ_1	
	–	μm			–		
Numery uszczelnień	C1	0,63	986	1220	0,65	0,73	2,57
	C2	0,60	1162	1293	0,46	0,48	1,55
	C3	0,62	1102	1315	0,51	0,54	1,78
	C4	0,62	1152	1209	0,43	0,46	1,48

Zmiany tekstury powierzchni tulejek prowadzą do spadku częstości odkształcania lokalnych obszarów styku; częstość ta jest zbliżona do częstości, przy której składowa deformacyjna współczynnika tarcia ma wartość maksymalną.

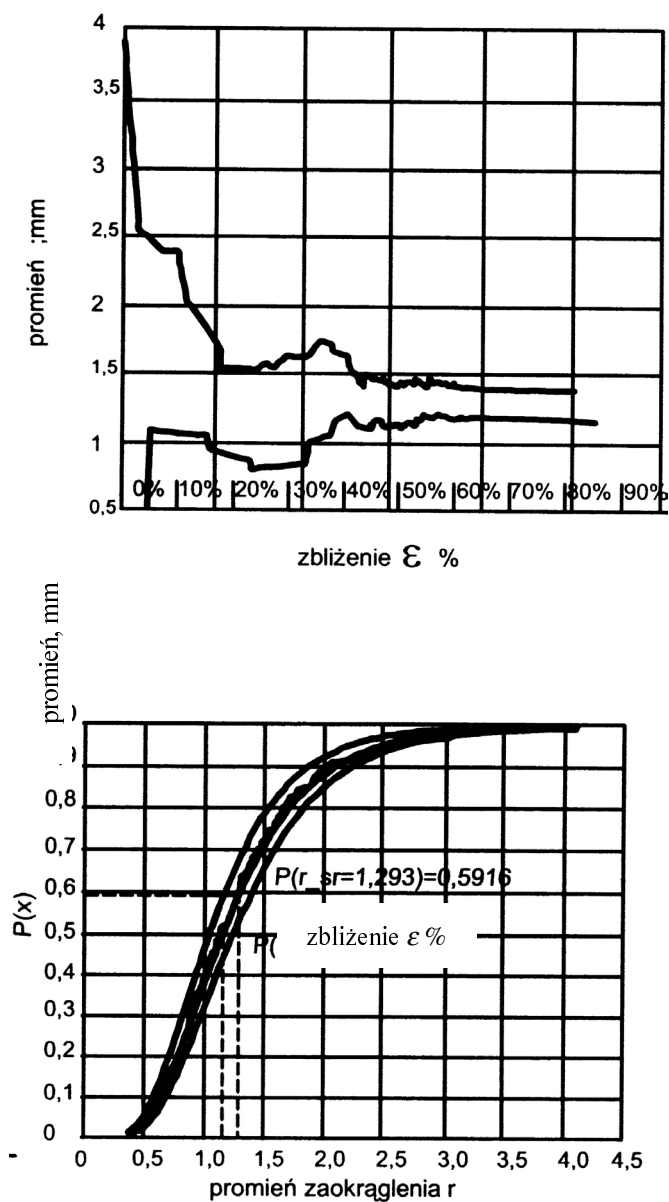
	$h = 3\sigma$	$h = 1\sigma$
$2r^*$, m	$17 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
ω , s^{-1}	$0,8 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$

Procesowi temu towarzyszy, niestety, skrawanie powierzchni tulejki, pomimo bardzo dużej twardości. Powstaje szeroki ślad zużycia o głębokości ($40 \div 60 \mu\text{m}$, rys. 95.) i w rezultacie dochodzi do zwiększonego wycieku czynnika uszczelnianego.



Rys. 95. Krytyczne zużycie powierzchni tłoczonej i nawęglanej wymontowanej z uszczelnienia. Uszczelnienie poddano próbom połowym, przebieg 9000 km

Do utworzenia chropowatości równoważnej powierzchni mogłoby dojść w sytuacji współpracy z uszczelnieniem wykonanym z mieszanki o odpowiedniej liczbie cząstek wypełniaczy. Rozkład tych cząstek powinien zapewniać ciągle odtwarzanie się porowatej warstwy wierzchniej krawędzi uszczelniającej.



Rys. 96. Rozkład wartości promieni w zależności od zbliżenia względnego do profilu (a) oraz dystrybuanta (b)

Zwiększenie wartości zarówno promienia zaokrąglenia \bar{r} wierzchołków nierówności, jak i parametru b wpłynęło na zmniejszenie wartości kompleksowego parametru Δ

oraz ilorazu $R_t/\bar{r} = 0,009$. Oznacza to, że styk nasycony wargi z wałem jest możliwy przy niezmiernie małym nacisku. Osiągnięcie styku nasyconego wymaga następującego zbliżenia względnego obu powierzchni: $\varepsilon_{\text{kr}} = 0,02 \div 0,2$. W porównaniu z chropowatością powierzchni oryginalnych zbliżenie, przy którym wystąpi styk nasycony, zwiększyło się w kilku przypadkach dla powierzchni zużytych.

Stosownie do zmiany rozkładu rzędnych profilu zmienił się rozkład wartości promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności. Przede wszystkim zmniejszył się współczynnik wariancji zmiennej V_r oraz współczynnik skośności rozkładu γ (tab. 25.). Pomimo zmniejszenia się rozrzutu wartości promieni nastąpiło ich zróżnicowanie zależnie od kierunku ruchu stylusa profilometru (rys. 96.). Utworzenie się pewnej falistości powierzchni zużytego śladu jest przyczyną owych różnic wartości promienia; jego wartość zależy bowiem od odległości pomiędzy wierzchołkiem nierówności a doliną poprzedzającą ten wierzchołek. Dla jednego kierunku ruchu stylusa głębokości dolin są większe aniżeli dla kierunku przeciwnego.

Stabilizacja wartości promieni następuje już przy 10% zbliżeniu względnym, a prawdopodobieństwo tego, że promień będzie mniejszy/równy średniej wartości promienia wynosi prawie 60%.

7.3. CHROPOWATOŚĆ DOTARTYCH POWIERZCHNI TULEJEK TŁOCZONYCH FOSFORANOWANYCH

Wartości analizowanych parametrów chropowatości dotartych tulejek tłoczonych i fosforanowanych przedstawiono w tabelach 26.–28.

Tabela 26. Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni dotartych tulejek fosforanowanych wyznaczone w kierunku obwodowym

Tulejka	R_a	R_t	R_{pk}	R_{vk}	S	S_m	Δ_a	λ_a
	μm						deg	μm
TF	0,67	6,4	0,62	1,5	25	98	3,0	1,4
SF	0,30	3,4	0,34	0,66	20	61	2,3	0,8
FS	0,20	1,8	0,27	0,27	51	247	0,35	3,6

Tabela 27. Statystyczne parametry chropowatości dotartych powierzchni tulejek fosforanowanych wyznaczone w kierunku obrotowym

Tulejka	R_{sk}	R_{ku}	r_l	r_p	r_{sr}	\bar{r}	b_{sr}	v_{sr}	Δ
	–		μm				–		
TF	-0,6 ÷ -0,13	3,7	47	48	47	32	2,9	1,9	$1,1 \cdot 10^{-1} \div 5 \cdot 10^{-2}$
SF	-0,76	6,0	39 ÷ 126	40 ÷ 131	39 ÷ 129	26 ÷ 48	4,8	2,3	$1,7 \cdot 10^{-2} \div 3,8 \cdot 10^{-2}$
FS	0,52	4,2	202	217	210	65	0,5	1,4	$2,6 \cdot 10^{-2} \div 7 \cdot 10^{-3}$

Z analizy danych przedstawionych w tabelach 26. i 27. wynika następująca postać zużycia powierzchni fosforanowanych:

- a) powierzchnie tulejek tłoczonych fosforanowanych (TF):
- parametry R_a , R_t , R_{pk} , R_{vk} nie uległy zmianie w rezultacie procesu zużycia. Wskazuje to na rekonstrukcję powierzchni polegającą na „wyłuskiwaniu” kryształów soli fosforanowych, a następnie na pewnym ścieraniu tych kryształów przez powierzchnię krawędzi uszczelniającej wargi,
 - wzrost wartości parametrów S_m oraz λ_a wskazuje na zużycie ściernie powierzchni; spadek wartości pochyleń profilu Δ_a świadczy o zmniejszaniu się stopnia rozwinięcia profilu,
 - położenie rzędnych względem średniej linii profilu nie uległo zmianie, natomiast nastąpiło poszerzenie rozkładu rzędnych (spadek wartości R_{sk}) i w rezultacie doszło do wzrostu wartości współczynnika b ,
 - nastąpiło pewne wygładzenie powierzchni i wzrost wartości parametru Δ ;
- b) powierzchnie tulejek tłoczonych szlifowanych i fosforanowanych (SF):
- wartości parametrów R_a , R_t , R_{pk} oraz Δ_a uległy spadkowi,
 - zdecydowanie poprawił się rozkład rzędnych profilu; wpłynęło to na wzrost wartości współczynnika b ,
 - promień zaokrąglenia nierówności wzrósł, z tym że występuje rozrzut jego wartości zależnie od grubości warstwy fosforanowej,
 - kompleksowy parametr chropowatości Δ zdecydowanie zmalał, co świadczy o wygładzeniu powierzchni;
- c) powierzchnie tulejek tłoczonych fosforanowanych, a następnie szlifowanych (FS):
- odnotowano niewielki spadek wartości parametrów R_a , R_t , R_{pk} oraz Δ_a ,
 - parametr S_m nie zmienił swojej wartości, co świadczy o tym, że reprezentuje on powierzchnię szlifowaną, a nie fosforanowaną,
 - wyraźnie pogorszył się rozkład rzędnych profilu, świadczy to o tym, że nierówności warstwy fosforanowanej uległy zużyciu i praktycznie mamy do czynienia z metalową powierzchnią szlifowaną,
 - promień zaokrąglenia nierówności nie uległ zmianie, a jego wartość odpowiada optymalnej dla powierzchni szlifowanych wałów (tab. 21.).

Wartość ilorazu R_t/\bar{r} dla zużytych powierzchni tulejek fosforanowanych wynosiła:

	TF	SF	FS
R_t/\bar{r}	0,2	0,13±0,07	0,03

Proces dotarcia został zakończony dla pary wargi–tulejka fosforanowana szlifowana; w przypadku pozostałych tulejek, a szczególnie dla tulejek TF, będzie zachodziło dalsze zużycie ściernie krawędzi uszczelniającej. Porównanie wartości ilorazu

R_t/\bar{r} dla powierzchni oryginalnych i dotartych wskazuje, że do największej zmiany doszło na powierzchni tulejek SF. Wartość tego ilorazu dla dotartych powierzchni zużytych tulejek SF i FS równa jest $\frac{R_{tc}}{\bar{r}} = 0,01 \div 0,03$, a więc jest zbliżona do wartości typowej dla szlifowanych powierzchni wałów stalowych.

Częstość odkształcania lokalnych obszarów styku wargi z powierzchnią dotartych tulejek fosforanowanych jest następująca:

Promień Częstość	Tulejki fosforanowane					
	TF		SF		FS	
	3σ	1σ	3σ	1σ	3σ	1σ
$2r^*$, m	$26 \cdot 10^{-6}$	$14 \cdot 10^{-6}$	$16 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
ω , s ⁻¹	$0,5 \cdot 10^6$	$0,9 \cdot 10^6$	$0,8 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$	$0,7 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^6$

Częstość ta jest większa od częstości, dla której składowa deformacyjna współczynnik tarcia osiąga maksymalną wartość.

Przy danym rozkładzie rzędnych po wysokości profilu dotartej powierzchni względne krytyczne zbliżenie powierzchni, przy którym dojdzie do styku nasyconego, wynosi:

	TF	SF	FS
ϵ_{kryt}	0,15	0,16	–

Rozkład rzędnych nierówności profilu powierzchni tulejek fosforanowanych szlifowanych jest na tyle niekorzystny, że w tym przypadku styk nasycony nie może wystąpić. Rozkład rzędnych uległ poprawie na powierzchniach tulejek TF i SF, pogorszeniu natomiast uległ w przypadku powierzchni tulejek FS. Wynika to prawdopodobnie ze starcia warstewki fosforanowej i odsłonięcia powierzchni stalowej.

Dane o rozkładzie promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności na powierzchniach tulejek walcowanych i fosforanowanych przedstawiono w tabeli 28.

Tabela 28. Wartości parametrów charakteryzujących rozkład promieni zaokrąglenia nierówności dotartych powierzchni tulejek fosforanowanych wyznaczone w kierunku obwodowym

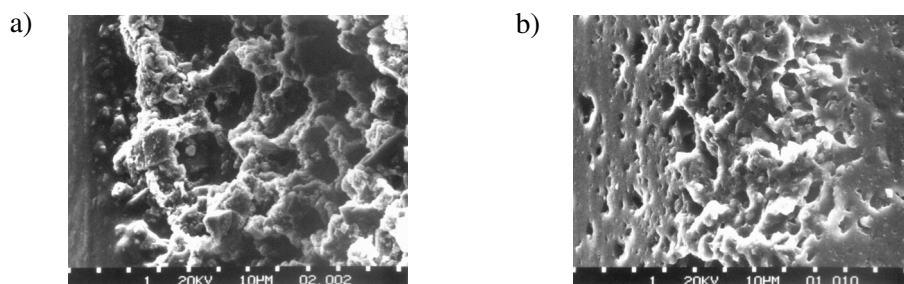
Tulejka	Parametry rozkładu					
	$P(r)$	r_{med}	$r_{\acute{s}red}$	$\sigma_{ln r}$	V_r	γ
	–	μm			–	
TF	0,60	17	19	0,47	0,50	1,63
SF	0,61	18	20	0,16	0,48	1,57
FS	0,61	108	38	0,70	0,80	2,15

Z porównania danych przedstawionych w tabelach 14. i 28. wynika, że dla powierzchni dotartych rozkład wartości promieni charakteryzuje się mniejszą wariancją

zmiennej i rozkładu oraz współczynnikiem skośności. Wartości średnie promienia występują już przy zbliżeniu względnym 10% do profilu dla powierzchni tłoczonych i fosforanowanych, natomiast dla powierzchni SF oraz FS sytuacja się zmienia – wartości średnie promienia występują przy zbliżeniach $\varepsilon \geq 20\%$.

7.4. WPŁYW TEKSTURY POWIERZCHNI WARGI NA OPÓR TARCIA USZCZELNIENIA

Podczas rozpatrywania styku pomiędzy wargą a wałem w mikroskali przyjęto, że powierzchnia krawędzi uszczelniającej jest bardzo gładka. Wystarczy 4÷7 godzin pracy uszczelnienia na wale, aby doszło do powstania, często bardzo zróżnicowanej, tekstury powierzchni wargi. Zależy ona od warunków styku, chropowatości powierzchni wału, rodzaju kauczuku i użytych w nim wypełniaczy. Stwierdzono, że tekstura krawędzi uszczelniającej po współpracy z powierzchnią wału odpowiada teksturze pozostawionej na powierzchni wargi przez wiązkę światła wysłanego z jednorodnego lasera CO₂. To podobieństwo zauważono zupełnie przypadkowo, podczas obserwacji pod mikroskopem elektronowym „punktów” odniesienia na wardze wykonywanych laserem, które były niezbędne do oceny położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej (p. 4.1.1). Na rysunku 97a pokazano teksturę śladu pozostawionego przez wiązkę światła z lasera na powierzchni wargi wykonanej z gumy FKM S-450. Guma ta charakteryzuje się większą wartością składowej adhezyjnej współczynnika tarcia niż guma FKM S-490. Na rysunku 97b przedstawiono teksturę powierzchni zużytej wargi po współpracy z wałem o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$.

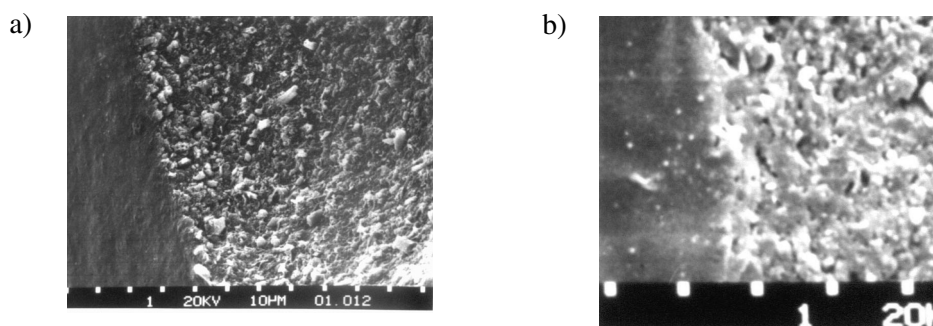


Rys. 97. Tekstura powierzchni wargi z gumy fluorowej S-450:
a) po działaniu wiązki światła laserowego o energii 0,14 J,
b) po współpracy z powierzchnią wału

Zarówno w jednym, jak i drugim przypadku na powierzchni znajdują się kawerny otoczone łańcuchami elastomeru. Kawerny te powstają w rezultacie odsłaniania naturalnej porowatości gumy i zawartych w niej pęcherzyków powietrza oraz usuwania z gumy cząstek wypełniaczy. Kawerny stanowią przeciętnie od 30 do 80% całkowitej

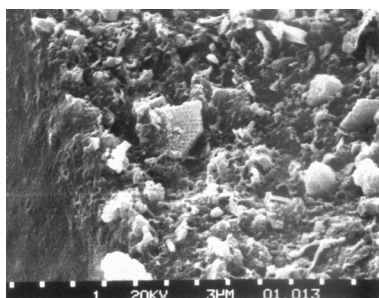
powierzchni ocenianego obszaru styku na sfotografowanych wycinkach wargi. Ich największe skupienie występuje w obszarze, na którym nacisk jednostkowy był największy. Głębokość kawern jest zmienna i waha się od dziesiątych części mikrometra do kilkunastu mikrometrów. Warstwa wierzchnia krawędzi uszczelniającej wargi stanowi więc ciało porowate o właściwościach lepkosprężystych, zdecydowanie innych od właściwości gumy położonej głębiej.

Tekstura powierzchni wargi wykonanej z gumy fluorowej S-490 jest zdecydowanie inna (rys. 98.). Struktura jest ciągła i pokryta mniej lub bardziej półkolistymi występami wysokości od 1 do 4 μm . Jak już wspomniano, guma S-490 charakteryzuje się mniejszym oddziaływaniem adhezyjnym z powierzchnią stalową niż guma S-450.



Rys. 98. Tekstura powierzchni wargi z gumy fluorowej S-490:

- a) po działaniu wiązki światła laserowego energii 0,14 J,
 b) po współpracy z powierzchnią wału o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$



Powiększenie obrazu z rysunku 98b jest dowodem, że warstwa wierzchnia krawędzi uszczelniającej ma zbliżone właściwości do właściwości gumy położonej głębiej.

Rys. 99. Powiększenie obszaru na lewej dolnej części zdjęcia z rysunku 98a

Bardzo poważne trudności stwarzała ocena właściwości lepkosprężystych warstwy wierzchniej powierzchni krawędzi uszczelniającej. Z tego względu zdecydowano się wykazać wpływ tekstury krawędzi uszczelniającej na opór tarcia uszczelnienia w następujący sposób: Po kilka uszczelnień wykonanych z gum S-450 i S-490 kolejno badano przez 7 godzin podczas pracy z wałkiem o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$. Wymiary kawern oceniano na swobodnych uszczelnieniach, dlatego przyjęto, że na wale mają one zmienione wymiary. Po osadzeniu uszczelnienia na wale wargę uległa roz-

ciągnięciu oraz dociskowi. Aby wykazać wpływ tekstury dotartej wargi na opór tarcia, zdecydowano uszczelnienia po pracy zamontować na wale o chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$. W przypadku tych wałów ilorazy R_t/\bar{r} oraz σ/\bar{r} są mniejsze niż wałów o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$. Po ocenie oporu tarcia uszczelnień wykonanych z gumy S-450 stwierdzono, że zmniejszył się on o około 35÷45%, w porównaniu z oporem tarcia przy współpracy z wałem o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$. Ten znaczny spadek oporu tarcia odnotowano dla uszczelnień, których warstwa wierzchnia krawędzi uszczelniającej przypominała ciało porowate. Przypuszcza się, iż wystąpiło w tym przypadku zmniejszenie częstości odkształcania lokalnych obszarów styku wargi z wałem, spadek energii niezbędnej do zdeformowania warstwy wierzchniej oraz pojawienia się lokalnego oddziaływania hydrodynamicznego.

W uszczelnieniach wykonanych z gumy S-490 i współpracujących z wałem o chropowatości $R_a = 0,32 \mu\text{m}$ odnotowano opór tarcia mniejszy o 15÷23% od tego, jaki występował uprzednio podczas współpracy z wałem o chropowatości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$. Zmniejszenie oporu tarcia przypisuje się pewnemu zmniejszeniu częstości odkształcania lokalnych obszarów styku, mniejszej penetracji nierówności powierzchni wału w wargę oraz poprawie oddziaływania hydrodynamicznego.

Doprowadzenie warstwy wierzchniej do struktury ciała porowatego jest bardzo efektywnym sposobem redukcji oporu tarcia uszczelnienia wargowego.

7.5. PODSUMOWANIE

Możliwości zmniejszenia oporu tarcia uszczelnień wargowych można zrekapitułować następująco:

1. W parze ciernej uszczelnienie wargowe–wał dochodzi do utworzenia się jednej, optymalnej ze względu na opór tarcia, chropowatości powierzchni wału, niezależnie od wartości chropowatości oryginalnych powierzchni szlifowanych wgłębnie wałów. Zaleca się, aby chropowatość technologiczna była równoważna chropowatości optymalnej.

2. Częstość odkształcania lokalnych obszarów styku wargi z wałem praktycznie nie zależy od głębokości wnikania nierówności powierzchni optymalnej. Dzięki tej cesze powierzchni, uszczelnienie pracuje bez poślizgu w warunkach zmiennego rozkładu nacisku w kierunku obwodowym.

3. Nie dochodzi do utworzenia się optymalnej chropowatości powierzchni podczas współpracy wargi z wałem o chropowatości izotropowej, o prawostronnym rozkładzie gęstości częstości rzędnych profilu i dużej koncentracji rzędnych wokół średniej linii profilu. Powierzchnia tulejki tłoczonyj nawęglanej ulega zużyciu, a powierzchnia wargi zniszczeniu (mikroskrawaniu).

4. Powierzchnie tłoczonych tulejek fosforanowanych i szlifowanych fosforanowanych ulegają przekształceniu w powierzchnie o chropowatości optymalnej po współpracy z uszczelnieniami wargowymi. Okres pracy powierzchni optymalnej zależy od

trwałości warstewki fosforanu. Nie zaleca się stosowania tulejek o powierzchniach fosforanowanych i szlifowanych.

5. Stwierdzono różnice tekstury warstwy wierzchniej powierzchni wargi wykonanej z gumy o wysokim oraz z gumy o niskim oddziaływaniu adhezyjnym z powierzchnią stalowych wałów szlifowanych. W pierwszym przypadku struktura jest porowata, a w drugim ciągła o półkolistych nierównościach.

6. Zmiana powierzchni wargi z gładkiej na porowatą sprawia, że wał zaczyna współpracować z warstwą materiału o mniejszej sztywności stycznej niż sztywność gumy niezużytej.

7. Współpraca wału z powierzchnią o mniejszej chropowatości ($R_a = 0,32 \mu\text{m}$) z uszczelnieniem o porowatej warstwie wierzchniej wargi, otrzymanej w rezultacie uprzedniej współpracy z wałem o chropowatości większej ($R_a = 0,63 \mu\text{m}$), prowadzi do zmniejszenia oporu tarcia o połowę. Wykonywanie uszczelnień o porowatej warstwie wierzchniej krawędzi uszczelniającej i kojarzenie ich z powierzchnią wałów o chropowatości optymalnej może stanowić efektywny sposób zredukowania oporu tarcia uszczelnienia.

8. SYNTEZA PRACY

Uszczelnienie wargowe-wał to rzeczywiście specyficzna para niemająca wielu odpowiedników pośród innych par ciernych. Po pierwsze – immanentną cechą uszczelnień wargowych jest „tkwiące” w nich obciążenie; wystarczy uszczelnienie osadzić na wale, aby wargę zaczęła wywierać nacisk na jego powierzchnię. W większości par tribologicznych obciążenie przykładane jest z zewnątrz, a jego wartość może być zadawana z żadaną dokładnością. Po drugie – położenie obszaru styku na krawędzi uszczelniającej oraz na powierzchni wału ustala się samoczynnie podczas montażu uszczelnienia na wale i zależy od bardzo wielu zmiennych. W innych parach ślizgowych położenie oraz wartość nominalnej powierzchni styku są znane i łatwe do przewidzenia. Po trzecie – wartość i rozkład nacisku na obwodzie wargi zależą, jak się okazało, od położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej. W innych parach ciernych wartość nominalnego nacisku jest znana a priori.

Uzmysłowienie sobie tej specyfiki oraz konsekwencji z niej wynikających zdecydowało o wyborze tej pracy. Dowiedzenie słuszności pierwszej tezy, stwierdzającej, że parę wargę-wał powinno się charakteryzować na podstawie sposobu tworzenia się powierzchni styku, wymagało opracowania odpowiedniej metody oceny położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej oraz stanowiska badawczego. Wykazano, że położenie to jest zmienne na obwodzie wargi, a rozstęp między jego dwoma skrajnymi położeniami może być równy kilku szerokościom styku wargi z wałem. Stwierdzono, że położenie obszaru styku zależy przede wszystkim od położenia krawędzi uszczelniającej w swobodnym uszczelnieniu oraz od kinematyki ruchu względnego wargi i wału podczas montażu uszczelnienia. W czasie tych samych pomiarów stwierdzono, że zmiennemu położeniu obszaru styku w kierunku obwodowym towarzyszy zmiana wartości nacisku stykowego. Tę zmienność wartości nacisku stwierdzono jakościowo, w wyniku pomiaru intensywności światła odbitego od wargi stykającej się z powierzchnią szklanego wału w trzech miejscach na obwodzie. Rezultaty tego etapu badań doprowadziły do stwierdzenia, że uszczelnienie wargowe nie może być traktowane jako ciało osiowo symetryczne.

Potrzeba scharakteryzowania rodzaju styku pomiędzy wargą a wałem wynikła ze stwierdzonej zmienności nacisku stykowego po obwodzie wargi. W tym celu dokładnie zanalizowano topografię oryginalnych powierzchni wałów szlifowanych wgłębnie

oraz tulejek tłoczonych nawęglanych i tłoczonych fosforanowanych. Stwierdzono, że rzeczywisty styk pomiędzy wargą a wałem zależy przede wszystkim od rozkładu gęstości częstości rzędnych profilu, od rozkładu promieni zaokrąglenia wierzchołków nierówności i od jego średniej wartości. Uwzględniono również wartości ilorazu R_r/\bar{r} oraz σ/\bar{r} . Wykazano, że niezbędne jest zastosowanie wałków o chropowatości anizotropowej i o lewostronnym rozkładzie gęstości częstości rzędnych, aby otrzymać, przy określonym rozstępie położenia obszaru styku na krawędzi uszczelniającej, równomierne zużycie wargi. W ten sposób dowiedziono słuszności trzeciej tezy, stanowiącej, że chropowatość powierzchni wału należy dobierać w zależności od najbardziej niekorzystnych warunków styku rozpatrywanego w makroskali.

Z przeprowadzonych rozważań, przy okazji analizy styku wału z wargą na poziomie mikroskali, wynika, że chropowatość powierzchni wału powinna być również dobierana stosownie do właściwości danej gumy. Jeżeli przyjąć, że składowa deformacyjna współczynnika tarcia zależy od kąta strat wewnętrznych gumy, to należy oczekiwać, że maksymalna wartość oporu ruchu uszczelnienia wystąpi przy określonej częstości odkształcania gumy. Podczas ruchu wału dochodzi do odkształcania lokalnych obszarów styku nierówności powierzchni wału z powierzchnią wargi. Stwierdzono, że przyjęcie średniego promienia wszystkich nierówności, odpowiadającego promieniowi chropowatości równoważnej, zapobiegnie zmienności częstości odkształcania przy niekorzystnym rozkładzie nacisku stykowego w uszczelnieniu. Jedyne, co należy sprawdzić, to częstość odkształcania lokalnych obszarów tarcia, która powinna być mniejsza od częstości, przy której kąt strat wewnętrznych zbliża się do maksimum. Ponadto należy tak kształtować topografię powierzchni wałów o różnej chropowatości, aby iloraz σ/\bar{r} zachowywał tę samą wartość dla każdej z nich. Dobór chropowatości powierzchni wałków zgodnie z powyższymi zaleceniami jest możliwy, wyznaczono bowiem, według wcześniej opracowanej metody, charakterystyki lepko-sprężyste gum najczęściej stosowanych do produkcji uszczelnień wargowych.

W czasie pracy uszczelnienia dochodzi do zużycia powierzchni krawędzi uszczelniającej wargi. Wyróżniono dwa rodzaje tekstury: porowatą oraz ciągłą o stosunkowo niewielkiej wysokości nierówności. Pierwszy typ struktury odpowiada gumom o większym oddziaływaniu adhezyjnym z powierzchnią stalowego wału, a drugi typ – odwrotnie – o mniejszym oddziaływaniu. Otrzymanie struktury porowatej warstwy wierzchniej zależy od udziału wypełniaczy w gumie oraz od głębokości wnikań nierówności powierzchni wału w powierzchnię wargi. Doprowadzenie do otrzymania porowatej warstwy wierzchniej wargi jest bardzo efektywnym sposobem zmniejszenia oporu tarcia, pod warunkiem współpracy z powierzchnią wału o chropowatości równoważnej.

Współpracę uszczelnienia wargowego z powierzchnią wału można przedstawić w postaci pętli zdarzeń i sprzężeń zwrotnych (rys. 100.) następujących po sobie [10]. Zamknięcie się tej pętli oznacza, że system warg–wał zmierza do stanu równowagi. W przedstawionym dalej przebiegu zdarzeń występują sprzężenia zwrotne, na przy-

kład pomiędzy zużyciem a rodzajem styku (mikroskala), pomiędzy rozkładem nacisku stykowego a położeniem obszaru styku (makroskala) lub pomiędzy ustawieniem się wargi a kinematyką ruchu względnego obu powierzchni.

W sytuacji ustalenia się rozkładu nacisku oraz rodzaju styku wystąpi odtworzenie się optymalnej (równoważnej) tekstury powierzchni wału i wargi wraz z towarzyszącym mu bardzo umiarkowanym ich zużywaniem.



Rys. 100. Sekwencja zdarzeń występujących w okresie montażu oraz podczas docierania się powierzchni pary uszczelnienia wargowe-wał

DODATEK 1

METODA WYZNACZANIA STAŁYCH REOLOGICZNYCH GUM

Do przeprowadzenia optymalizacji wargowych pierścieni uszczelniających [11] konieczna była znajomość składowej dynamicznej obciążenia wywieranego przez wargę na wał w warunkach bicia promieniowego wału. Składowa ta może być obliczona na podstawie składowej rzeczywistej modułu sprężystości zależnej od charakteru gumy i częstości jej odkształcania. Autor dysponował maszynami wytrzymałościowymi do badania stanu naprężenia w warunkach jednoosiowego, quasi-statycznego stanu odkształcania. Należało zatem opracować metodę wyznaczenia stałych reologicznych gum stosowanych do produkcji uszczelnień wargowych na podstawie wyników badań relaksacji w warunkach quasi-statycznego stanu odkształcania. Metodę tę oparto na teorii Volterra-Boltzmana, zgodnie z którą naprężenie w danej chwili t zależy nie tylko od odkształcania w tym czasie, ale i od odkształceń w okresie poprzedzającym τ . Związek naprężenia z odkształceniem wyraża równanie całkowe drugiego rodzaju

$$\sigma(t) = E \left[\varepsilon(t) - \int_{-\infty}^t R(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (1.1)$$

w którym $R(t-\tau)$ – jądro zwane funkcją wpływu; wyraża ono wpływ poprzedzających zdarzeń.

Zależność tego jądra od różnicy $(t-\tau)$ wymaga, by właściwości gumy pozostawały stałe w czasie. Aby opisać zjawisko relaksacji, należy zastosować jądro spełniające następujące wymagania:

- powinno być dodatnie i monotonnie malejące do zera,
- jego całka musi być zbieżna do skończonej wartości,
- transformata Laplace'a tej funkcji powinna być stosunkowo prosta,

- powinno umożliwić wyznaczenie stałych reologicznych gum,
- dostosowanie się do krzywych doświadczalnych $\sigma(t) - \varepsilon_k$.

Zastosowano jądro Kołtunowa [44], które spełnia te wymagania, a nade wszystko ostatnie – dotyczące aproksymacji przebiegu relaksacji gumy. Jądro to ma postać

$$R(\tau) = Ae^{-\beta\tau} \tau^{\alpha-1}; \quad 0 < \alpha < 1, \quad (1.2)$$

gdzie: A , β i α – stałe gumy, wyznaczone na podstawie krzywych doświadczalnych $\sigma(t) - \varepsilon_k$.

Należy wykazać, że składowe rzeczywistą i urojoną modułu sprężystości oraz kąta strat wewnętrznych można wyrazić za pomocą stałych A , β , α wyznaczonych na podstawie quasi-statycznych badań próbek gumowych.

1. Obliczenie składowych rzeczywistej i urojonej modułu sprężystości

Załóżmy, że próbka gumowa jest poddana okresowo zmiennej deformacji

$$\varepsilon(\tau) = \varepsilon_k e^{i\omega\tau}, \quad (1.3)$$

gdzie ω – częstość odkształcania.

Naprężenie wywołane tym odkształceniem

$$\sigma(t) = E_o \left[\varepsilon_k e^{i\omega t} - \int_{-\infty}^t R(t-\tau) \varepsilon_o e^{i\omega\tau} d\tau \right], \quad (1.4)$$

można także zapisać jako

$$\sigma(t) = E(i\omega) \varepsilon_k e^{i\omega t}. \quad (1.5)$$

Po porównaniu równania (1.4) z zależnością (1.5) otrzymuje się

$$E(i\omega) = e^{-i\omega t} E_o \left[e^{i\omega t} - \int_0^{\infty} R(t-\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \right], \quad (1.6)$$

gdzie $E_o = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_k}$ – wartość modułu w chwili $t = 0$.

Po wprowadzeniu zmiennej $u = t - \tau$ do równania (1.6) i dokonaniu przekształceń otrzymuje się

$$E(i\omega) = E_o \left[1 - \int_0^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right]. \quad (1.7)$$

Po podstawieniu pod znak całki w równaniu (1.7) wyrażenia (1.2) można wykazać, że transformata Laplace'a funkcji $R(\tau) = Ae^{-\beta\tau} \tau^{\alpha-1}$ ma postać

$$\Im [R(\tau)] = \frac{A\Gamma(\alpha)}{(i\omega + \beta)^\alpha}, \quad (1.8)$$

gdzie $\Gamma(\alpha)$ – funkcja gamma.

Moduł mianownika w wyrażeniu (1.8) można zapisać

$$z = (i\omega + \beta)^\alpha = |z|^\alpha e^{i\alpha\varphi} = |z|^\alpha \cos \alpha\varphi + |z|^\alpha i \sin \alpha\varphi,$$

gdzie $\varphi = \arctg \frac{\omega}{\beta}$.

Ponieważ moduł $|z| = \sqrt{\beta^2 + \omega^2}$, jego postać końcowa przyjmie więc kształt

$$|z| = \sqrt{|z|^{2\alpha} \cos^2 \alpha\varphi + |z|^{2\alpha} \sin^2 \alpha\varphi} = \sqrt{|z|^{2\alpha}} = \sqrt{(\beta^2 + \omega^2)^\alpha}.$$

Moduł poszukiwanej funkcji

$$|B| = \frac{A\Gamma(\alpha)}{(\beta^2 + \omega^2)^{\alpha/2}}$$

oraz jej argument

$$\theta = \arctg \frac{|z|^\alpha \sin \alpha\varphi}{|z|^\alpha \cos \alpha\varphi} = \alpha\varphi.$$

W rezultacie składową rzeczywistą modułu sprężystości można obliczyć z wyrażenia

$$E'(\omega) = E_o [1 - |B| \cos \theta] = E_o \left[1 - \frac{A\Gamma(\alpha)}{(\beta^2 + \omega^2)^{\alpha/2}} \cos \alpha\varphi \right], \quad (1.9)$$

a składową urojoną według wzoru

$$E''(\omega) = E_o [1 - |B| \sin \theta] = E_o \left[1 - \frac{A\Gamma(\alpha)}{(\beta^2 + \omega^2)^{\alpha/2}} \sin \alpha\varphi \right] \quad (1.10)$$

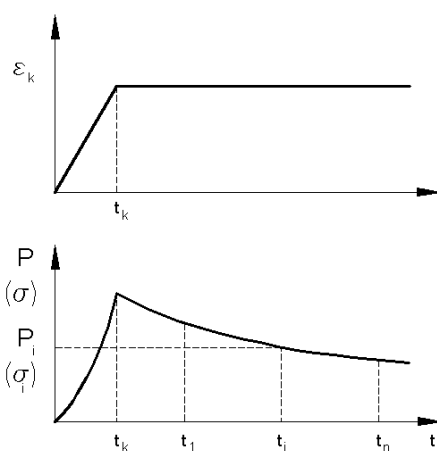
oraz kąt strat wewnętrznych na podstawie zależności

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} = \frac{|B| \sin \theta}{1 - |B| \cos \theta}. \quad (1.11)$$

Wynika z tego, że znajomość stałych A , β oraz α , wyznaczonych z quasi-statycznych badań próbek gumowych, umożliwia ocenę składowych modułu sprężystości zależnie od częstości odkształcania ω .

2. Wyznaczenie stałych funkcji wpływu $R(\tau)$

Wartości stałych A , α i β funkcji wpływu $R(\tau)$ określano na podstawie doświadczalnych krzywych relaksacji (rys. 1.1). Próbki w kształcie standardowych wiosełek (również w kształcie pierścienia typu O) rozciągano ze stałą prędkością $\sigma = 500$ mm/min; maksymalne odkształcenie względne $\varepsilon_{\max} \leq 0,12$. Krzywą zmiany naprężenia wyznaczano w okresie $t = 1$ h. Badania relaksacji próbek gumowych prowadzono w powietrzu o temperaturze 20, 100, 120 oraz 140 °C. Każda próbka była badana tylko raz. Stałe A , α oraz β wyznaczano na podstawie danych otrzymanych z badania 5 próbek.



Rys. 1.1. Krzywa relaksacji próbki gumowej

Wartości siły w próbce i czasu notowano w sposób zautomatyzowany; w początkowym okresie relaksacji siłę odczytywano co 0,1 s; w dalszym okresie odczytywano czas, po którym siła malała każdorazowo o 0,2 N. Utworzono zbiór wartości $\{P_i, t_i\}$, w którym P_i – siła rozciągająca próbkę, a t_i – czas pomiaru siły o wartości P_i .

Naprężenie obliczano ze wzoru

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_{t_k}} \quad (i = 0, 1, \dots, n),$$

w którym F – pole początkowego przekroju próbki.

Parametry A , β oraz $\frac{P}{(\sigma)}$ obliczano z funkcjonału o postaci

$$\frac{P_i}{(\sigma_i)} \quad I \equiv \sum_{i=0}^n [\sigma(t_i) - \sigma_i]^2 L_i, \quad (1.12)$$

w którym:

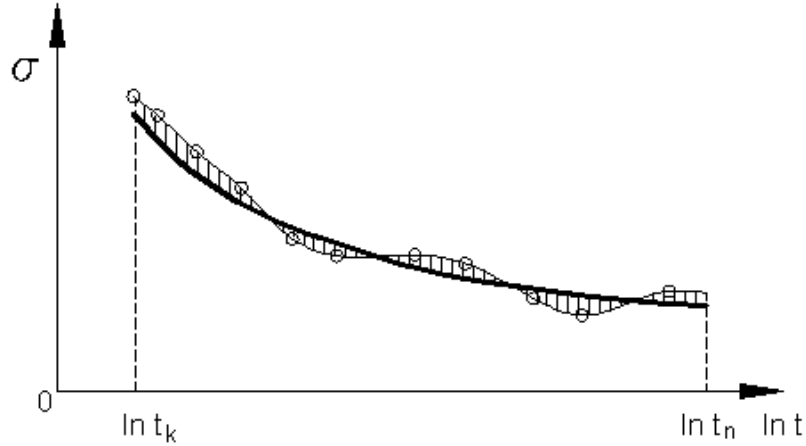
$\sigma(t_i)$ – rzędna teoretycznej krzywej relaksacji w chwili t_i czasu $t_n = t$

σ_i – rzędna doświadczalnej krzywej relaksacji w tej samej chwili,

L_i – waga obserwacji w i -tym punkcie

$$L_i = \begin{cases} 0,5(\ln t_1 - \ln t_0), & i = 0, \\ 0,5(\ln t_{i+1} - \ln t_{i-1}), & 1 \leq i \leq n-1, \\ 0,5(\ln t_n - \ln t_{n-1}), & i = n. \end{cases}$$

Wyrażenie (1.12) jest całką z odległości kwadratów pomiędzy obiema krzywymi (rys. 1.2). Całkowanie jest prowadzone wzdłuż zmiennej niezależnej $\ln t$.



Rys. 1.2. Aproksymacja eksperymentalnej krzywej relaksacji

Krzywa teoretyczna opisana równaniem (1.1) najdokładniej odwzorowuje krzywą doświadczalną wówczas, gdy funkcjonal (1.12) zmierza do minimum. Po podstawieniu równania (1) do wzoru (1.12) otrzymuje się

$$I = I\{E_o, A, \alpha, \beta\} = \sum_{i=0}^n \left\{ E_o \left[\varepsilon_k - \int R(\tau) \varepsilon(t_i - \tau) \right] - \sigma_i \right\}^2 L_i$$

$$= \sum_{i=0}^n \left\{ E_o \varepsilon_k (1 - H_i) - \sigma_i \right\}^2 L_i,$$

gdzie

$$H_i(A, \alpha, \beta) \equiv \frac{1}{\varepsilon_k} \int_0^{t_i} R(\tau) \varepsilon(\tau) d\tau.$$

Przyrównanie do zera pochodnej funkcjonału po E_o pozwala wyznaczyć wartość modułu sprężystości E_o dla czasu $t = 0$

$$E_o = \frac{\sum_{i=0}^n \sigma_i (1 - H_i) L_i}{\varepsilon_k \sum_{i=0}^n (1 - H_i)^2 L_i}. \tag{1.13}$$

Z zależności (1.13) wynika, iż udało się zredukować liczbę poszukiwanych parametrów. Funkcjonał można teraz zapisać w formie

$$I \{E_o(A, \alpha, \beta), A, \alpha, \beta\} \equiv \hat{I}(A, \alpha, \beta).$$

Parametry A , α oraz β nie mogą być określone analitycznie, bowiem $H_i(A, \alpha, \beta)$ jest uwikłaną funkcją.

Poszukiwanie minimalnej wartości funkcjonału \hat{I} przeprowadzono w czterech krokach; w trzech pierwszych zastosowano metodę gradientów, a w czwartym kroku metodę semigradientową. Cały obszar $(A_1, A_2) \times (\alpha_1, \alpha_2) \times (\beta_1, \beta_2)$ podzielono równomiernie i dla każdego punktu obliczano wartość funkcjonału \hat{I} . Obszar poszukiwania zawężał się w każdym kroku.

Błąd interpolacji wyników oceniano

$$\Delta I = \sqrt{\frac{I}{\sum_{i=0}^n \sigma_i^2 L_i} - 100\%}$$

jako standardowe odchylenie krzywej teoretycznej od doświadczalnej.

Identyczną procedurę zastosowano do oceny parametrów A , α , β na podstawie badań 5 próbek gumowych. Funkcjonał w tym przypadku miał postać

$$I = \sum_{k=1}^5 \sum_{i_k=0}^n [\sigma(t_{ik}) - \sigma_{ik}]^2 L_{ik},$$

gdzie:

k – numer próbki 1, 2, ..., 5,

$\sigma(t_{ik})$, σ_{ik} – rzędne teoretyczna i doświadczalna odpowiednio dla k -tej próbki w chwili t_{ik} .

3. Wyniki badań

Badano bardzo wiele gum stosowanych do wytwarzania wargowych pierścieni uszczelniających. Poniżej zamieszczono dane dotyczące parametrów i modułów wyznaczonych według podanej metody jedynie dla tych gum, z których wykonano uszczelnienia najczęściej cytowane w pracy.

Tabela 1.1. Parametry i moduły sprężystości gum fluorowych FKM w zależności od temperatury

Parametry	Guma S-450			
	temperatura próbki			twardość
	20 °C	100 °C	140 °C	IRHD
1	2	3	4	5
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1^{*}) = 0,67$ $\sigma_\infty = 0,36$ $\Delta\sigma = 47\%$	0,44 0,26 41%	0,41 0,27 34%	72
Parametry reologiczne	$A = 0,022 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,033$ $\beta = 0,0017 \text{ s}^{-1}$	0,0109 0,0139 0,00123	0,0122 0,0217 0,00077	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_o = 17,5$ $E_\infty = 3,6$ $E'_{3000} = 8,1$ $E''_{3000} = 0,49$ $\psi_{3000} = 3,44^\circ$	14,9 2,6 5,3 0,30 3,18°	11,1 2,7 4,8 0,21 2,51°	
Guma S-490				
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 1,15$ $\sigma_\infty = 0,40$ $\Delta\sigma = 65\%$	0,57 0,37 35%	0,49 0,36 27%	75
Parametry reologiczne	$A = 0,0233 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,03$ $\beta = 0,0063 \text{ s}^{-1}$	0,0136 0,0189 0,0021	0,0176 0,0317 0,00232	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_o = 42,9$ $E_\infty = 4,7$ $E'_{3000} = 15,6$ $E''_{3000} = 1,36$ $\psi_{3000} = 5,0^\circ$	18,3 3,7 6,6 0,34 2,9°	10,3 3,5 5,6 0,24 2,45°	
Guma W707				
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 1,05$ $\sigma_\infty = 0,59$ $\Delta\sigma = 44\%$		0,74 0,60 19%	77
Parametry reologiczne	$A = 0,0233 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,03$ $\beta = 0,0063 \text{ s}^{-1}$		0,0155 0,0301 0,00306	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_o = 19,2$ $E_\infty = 5,9$ $E'_{3000} = 13,4$ $E''_{3000} = 0,56$ $\psi_{3000} = 2,37^\circ$		15,1 6,0 8,8 0,3 1,98°	

Guma W0781				
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 0,78$ $\sigma_\infty = 0,49$ $\Delta\sigma = 37\%$	0,70 0,53 24%	0,67 0,52 22%	74
Parametry reologiczne	$A = 0,0266 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0701$ $\beta = 0,00051 \text{ s}^{-1}$	0,0160 0,0300 0,0010	0,0153 0,0301 0,00096	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 17,9$ $E_\infty = 4,9$ $E'_{3000} = 9,8$ $E''_{3000} = 0,35$ $\psi_{3000} = 2,04^\circ$	15,1 5,3 8,4 0,32 2,15°	13,6 5,2 7,9 0,27 1,97°	
Guma W0792				
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 0,79$ $\sigma_\infty = 0,46$ $\Delta\sigma = 42\%$	0,48 0,32 33%	0,43 0,32 26%	74
Parametry reologiczne	$A = 0,0281 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0540$ $\beta = 0,0021 \text{ s}^{-1}$	0,0280 0,0620 0,0026	0,0220 0,0460 0,0014	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 16,5$ $E_\infty = 4,9$ $E'_{3000} = 10,4$ $E''_{3000} = 0,52$ $\psi_{3000} = 2,86^\circ$	8,9 3,3 6,2 0,27 2,46°	8,2 3,0 5,3 0,21 2,33°	

Tabela 1.2. Parametry i moduły sprężystości gumy silikonowej MVQ w zależności od temperatury

Parametry	Guma W0640			
	temperatura próbki			twardość
	20 °C	100 °C	140 °C	IRHD
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 1,02$ $\sigma_\infty = 0,53$ $\Delta\sigma = 48\%$	0,71 0,58 18%	0,57 0,52 9%	77
Parametry reologiczne	$A = 0,028 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0540$ $\beta = 0,0030 \text{ s}^{-1}$	0,0161 0,0460 0,0009	0,0100 0,0460 0,0014	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 25,2$ $E_\infty = 7,8$ $E'_{3000} = 15,9$ $E''_{3000} = 0,8$ $\psi_{3000} = 2,88^\circ$	10,9 5,8 8,1 0,207 1,46°	7,3 5,2 6,1 0,058 0,54°	

Tabela 1.3. Parametry i moduły sprężystości gumy akrylowej ACM w zależności od temperatury

Parametry	Guma W0544			
	temperatura próbki			twardość
	20 °C	100 °C	140 °C	IRHD
1	2	3	4	5
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 1,08$ $\sigma_\infty = 0,56$ $\Delta\sigma = 48\%$	0,51 0,37 27%	0,55 0,37 33%	70
Parametry reologiczne	$A = 0,0280 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0540$ $\beta = 0,0022 \text{ s}^{-1}$	0,0217 0,0459 0,0023	0,0210 0,0621 0,0001	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 18,7$ $E_\infty = 5,6$ $E'_{3000} = 11,8$ $E''_{3000} = 0,588$ $\psi_{3000} = 2,86^\circ$	9,6 3,7 6,2 0,241 2,23°	8,2 3,4 6,5 0,18 1,60°	70

Otrzymane wyniki, a zwłaszcza te dotyczące modułu sprężystości E_∞ , $E'(\omega)$ oraz $\psi(\omega)$, umożliwiły dobór obciążenia, jaki wargę wywiera na wał w sytuacji, gdy wał obraca się z biciem promieniowym. Po prostu możliwa była ocena składowej dynamicznej obciążenia, która okresowo zmniejsza wypadkowe obciążenie na styku wargę –wał. Wyniki te są również przydatne do doboru chropowatości powierzchni wału w zależności od właściwości lepkosprężystych danej gumy.

Opracowaną metodę stosowano u jednego ze zlecniodawców do oceny właściwości gum na etapie ustalania składu mieszanki.

Tabela 1.4. Parametry i moduły sprężystości gum nitrylowych NBR w zależności od temperatury

Parametry	Guma W0137			
	temperatura próbki			twardość
	20 °C	100 °C	140 °C	IRHD
1	2	3	4	5
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 1,68$ $\sigma_\infty = 1,03$ $\Delta\sigma = 39\%$	0,95 0,79 17%	0,85 0,69 19%	78
Parametry reologiczne	$A = 0,0220 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0380$ $\beta = 0,0022 \text{ s}^{-1}$	0,0150 0,0540 0,00089	0,0154 0,0700 0,00039	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 37,2$ $E_\infty = 10,3$ $E'_{3000} = 20,4$ $E''_{3000} = 1,02$ $\psi_{3000} = 2,86^\circ$	13,0 7,9 10,4 0,22 1,22°	10,9 6,9 9,5 0,175 1,05°	
Guma HNBR W1423				
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 0,88$ $\sigma_\infty = 0,48$ $\Delta\sigma = 45\%$	0,52 0,36 31%	0,59 0,39 34%	75
Parametry reologiczne	$A = 0,0275 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0461$ $\beta = 0,00179 \text{ s}^{-1}$	0,0220 0,0460 0,00140	0,0280 0,0540 0,00295	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 22,0$ $E_\infty = 4,9$ $E'_{3000} = 12,3$ $E''_{3000} = 0,71$ $\psi_{3000} = 3,32^\circ$	10,0 3,7 6,4 0,26 2,32°	12,5 3,9 7,9 0,39 2,86°	
Guma 77 A/12			120°	
Napężenie w czasie badania, MPa	$\sigma_1 = 1,13$ $\sigma_\infty = 0,77$ $\Delta\sigma = 32\%$	0,89 0,73 18%	1,05 0,81 23%	75
Parametry reologiczne	$A = 0,0220 \text{ s}^{-\alpha}$ $\alpha = 0,0460$ $\beta = 0,0030 \text{ s}^{-1}$	0,0160 0,0380 0,0030	0,0156 0,0301 0,00171	
Moduły sprężystości i ich składowe, MPa	$E_0 = 19,9$ $E_\infty = 7,8$ $E'_{3000} = 12,8$ $E''_{3000} = 0,515$ $\psi_{3000} = 2,30^\circ$	14,9 7,2 9,9 0,29 1,7°	21,1 8,1 11,9 0,43 2,1°	76

Otrzymane wyniki, a zwłaszcza te dotyczące modułu sprężystości E_∞ , $E'(\omega)$ oraz $\psi(\omega)$, umożliwiły dobór obciążenia, jaki wargę wywiera na wał w sytuacji, gdy wał obraca się z biciem promieniowym. Po prostu możliwa była ocena składowej dynamicznej obciążenia, która okresowo zmniejsza wypadkowe obciążenie na styku wargi – wał. Wyniki te są również przydatne do doboru chropowatości powierzchni wału w zależności od właściwości lepkosprężystych danej gumy.

Opracowaną metodę stosowano u jednego ze zleceniodawców do oceny właściwości gum na etapie ustalania składu mieszanki.

LITERATURA

- [1] Będziński R., Gawliński M., *Obciążenie promieniowe wargi pierścieni uszczelniających walki obrotowe*, Technika Smarownicza, nr 5, 1975
- [2] Brink R., Czernik D., Horve L., *Handbook of Fluid Sealing*, McGraw-Hill, USA, 1993
- [3] Brink R., *The Heat Load of an Oil Seal*, 6th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHRA, Paper C1 1974
- [4] Brown J.N., *A Wear Study of Polyacrylate Radial Oil Lip Seals*, ASLE Trans., Vol. 20, 2, 161–168
- [5] Demkin N.B., *Teorija kontakta realnych poverchnostej i tribologia*, Trenie i Iznos, t. 16, 1995, 1003–1025
- [6] Deuring H., *Conclusion of Operating Tests Pertaining to Performance and Durability of Radial Shaft Seals*, Paper E4, Goetzewewke AG, Burscheid, Niemcy, 1975
- [7] Gabelli A., Ponson F., Poll G., *Formation of Lubricant Film in Rotary Sealing Contacts; Part I – Lubricant Film Modelling* ASME/STLE Tribology Conference, Toronto, 1990, Paper No. 90-Trib-64
- [8] Gabelli A., Ponson F., Poll G., *Computation and Measurement of the Sealing Contact Stress and its Role in Rotary Lip Seal Design*, 13th Int. Conf. On Fluid Sealing, Kluwer Academic Publishers, Brugge, 1992
- [9] Gawliński M., *Optimal Surface Roughness of the Shafts Cooperating with Oil Lip Seals*, 16th Int. Conf. on Fluid Sealing, Brugge, Professional Engng Publishing Ltd., London 2000
- [10] Gawliński M., *Uszczelnienie elastomerowe-wal jako szczególna para cierna*, mat. konf. „Problemy niekonwencjonalnych układów łożyskowych”, Politechnika Łódzka, Łódź 1997
- [11] Gawliński M., Konderla P., *Mathematical Models in Numerical Analysis of Oil Lip Seals*, 7th Int. Conf. on Sealing Technology, Vol. 1, Budapest 1982, 299–306
- [12] Gawliński M., Rogula J., *Wyznaczenie składowej adhezyjnej współczynnika tarcia pary stal-elastomer*, Tribologia, nr 3, 2002
- [13] Gawliński M., *Rozwój koncepcji dotyczących mechanizmu uszczelniania pierścieni uszczelniających walki obrotowe*, III konf. „Uszczelnienia i techniki uszczelniania”, Wrocław 1981
- [14] Gawliński M., Konderla P., Upper G., *Optimization of Crankshaft Seals*, Vol. 41, SAE Transactions, 1989
- [15] Gawliński M., *Surface Roughness and Contact Conditions – Key Factors Influencing Oil Seal Friction*, referat wygłoszony na Research Board Meeting, Chicago Rawhide Industries, 1995
- [16] Gawliński M., *On the Friction Reduction in Rubber Lip Seals for Rotating Shafts*, Sealing Technology No. 40, Elsevier Advanced Technology, 1997

- [17] Gawliński M., Upper G., *A Contribution to the Determination of Frictional Losses of Radial Shaft Seals*, SAE Paper No. 890664
- [18] Gawliński M., Podkomorzy K., Szymkowski J., *Determination of Equilibrium Roughness of Shaft Surface Rubbing Against the Sealing Lip*, Raport ITCiMP SPR 43/93 PWr., na zlecenie Chicago Rawhide Industries, Elgin, USA, 1993
- [19] Gawliński M., Konderla P., *Wpływ parametrów geometrycznych na wrażliwość konstrukcji pierścienia uszczelniającego wał korbowy*, Sterowanie i Napęd Hydrauliczny, nr 5, 1992, 13–16
- [20] Gawliński M., *Contact Conditions Between Sealing Lip and Shaft*, 3rd Chicago Rowhide Int. Research and Development Conf. St. Charles, 1996
- [21] Gawliński M., Dudziński W., Podkomorzy K., *The Search for the Optimal Surface Treatment of the Wear Sleeves*, Raport ITCiMP SPR 49/90 PWr., raport dla Bruss Dichtungstechnik GmbH, Niemcy, 1990
- [22] Gawliński M., Rogula J., Podkomorzy K., *Contact Conditions of Lip with Shaft and Their Relation to Equilibrium Roughness*, Raport ITCiMP SPR 14/96 P.Wr., na zlecenie Chicago Rawhide Industries, Elgin, USA, 1996
- [23] Gawliński M., Rogula J., Podkomorzy K., Barszcz R., *Contact Condition of Lip with Shaft and Their relation to Equilibrium Roughness – Phase 2*, Raport ITCiMP SPR 61/98 PWr. – zlecenie dla Chicago Rawhide Industries, Elgin, USA, 1998
- [24] Gawliński M., Podkomorzy K., *Experimental Investigations of Frictional Losses in Oil Lip Seals*, Raport ITCiMP SPR 6/89 PWr., wykonano dla Bruss Dichtungstechnik GmbH, Niemcy, 1989
- [25] Gawliński M., Podkomorzy K., Rogula J., *Determination of Rubber Constants Influencing Coefficient of Friction*, Raport ITCiMP SPR 12/98 PWr., wykonano dla Chicago Rawhide Industries, Elgin, USA, 1998
- [26] Gawliński M., Podkomorzy K., Rogula J., *An Evaluation of the Design Quality of Elastomeric Oil Lip Seals Operating on the Front Axles of the Passenger Cars*. Wykonano dla GKN-Polska, 2000
- [27] Gawliński M., Podkomorzy K., *Torque and Power Consumption of Lip Seals with Very Small Apex Radius of Sealing Edge*, Raport ITCiMP SPR 35/93, P.Wr., wykonano dla Bruss Dichtungstechnik GmbH, Niemcy, 1993
- [28] Golubev G.A., Kukin G.M. i in., *Kontaktne uplotnenija wraščajušichsja walov*, Mašinostroenie, 1976
- [29] Greenwood J.A., *A Unified Theory of Surface Roughness*, Proc. R. Soc., A393, 1984, 133–157
- [30] Grosch K.A., *The Relation between the Friction and Visco-Elastic Properties of Rubber*, Proc. R. Soc., A274, 1996, 21–39
- [31] Grudziński K., Kostek R., *Symulacyjne badania zależności siły tarcia od kontaktowych mikrodrgań normalnych*, Zeszyty Naukowe Polit. Opolskiej, z. 68, nr 270, 2001
- [32] Grudziński K., *Symulacyjne badania tarcia mieszanego w warunkach stacjonarnych i niestacjonarnych*, XIII symposium „Podstawy konstrukcji maszyn”, Świnoujście 1987
- [33] Grudziński K., Wedman S., *A simulation investigation into self-excited stick-slip motion in a mass-spring system under varying conditions*, 10th World Congress, Oulu University, 1999
- [34] Grudziński K., Warda J., *Badania wpływu wybranych czynników trybologicznych na charakterystyki tarcia mieszanego*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, z. 12, 1993, s. 499–514

- [35] Hirano F., *The Lubrication Condition of a Lip Seal*, Paper 15, Vol. 180 Pt 3B, Proc. Instn. Mech. Engrs 1965–1966
- [36] Horve L., *Understanding the Sealing Mechanism of the Radial Lip Seal for Rotating Shafts*, 13th Int. Conf. On Fluid Sealing, Kliwer Academic Publishers, Brugge 1992
- [37] Horve L., *The Correlation of Rotary Shaft Radial Lip Seal Service Reliability and Pumping Ability to Wear Track Roughness and Microasperity Formation*, Paper SAE 910530
- [38] Jagger E.T., Wallace D., *Further Experiments on the Sealing Mechanism of a Synthetic Rubber Lip Type Operating on a Rotating Shaft*, Proc. Inst. Mech. Engrs., 187, 1973, 361–367
- [39] Jagger E.T., *Positive Action Seals in Europe*, Transaction of ASME, Paper No. 67–WA/Lub-2
- [40] Johnston D., Vogth R., *Rotary Seal Friction, the Influence of Material, Oil and Shaft Surface*, Paper SAE 950764
- [41] Johnston D., *Analysis and Interpretation of the Frictional Behavior of Elastomeric Rotary Lip Seals*, Paper SAE 97113
- [42] Kammüller M., *Zur Abdichtwirkung von Radial – Wellendichtringen*, Dissertation Univ. Stuttgart, Stuttgart 1986
- [43] Kawahara Y., Abe M., Hirabayashi H., *Effect of Surface Condition of Lip on Sealing Phenomena of Oil Seals*, Paper SAE 780405
- [44] Kawahara Y., Abe M., Hirabayashi H., *An Analysis of Sealing Characteristics of Oil Seals*, ASLE Transaction, 23, 1980, 93–102
- [45] Koltunov M.A., *Polzučest i relaksacija*, Vysšaja Škola, Moskva 1976
- [46] Kombalov V.S., *Ocenka tribotehničeskich svojstv kontaktirujuščich poverchnostej*, Izd. „Nauka”, Moskva 1983
- [47] Kragelski J.V., *Trenie i iznos*, Mašinstroenie, Moskva 1978
- [48] Lawrowski Z., *Tribologia*, PWN, Warszawa 1993
- [49] Lee S.E., *„Bi-Gaussian” Representation of Worn Surface Topography in Elastic Contact Problems*, 1998, Session VIII, Paper VIII (Autor otrzymał kopię artykułu od wydawnictwa BHR Group Ltd, the Fluid Engineering Centre, Cranfield, Bedfordshire MK 43 OAJ, Anglia)
- [50] Leszek W., *Jeszcze raz i nieco inaczej o trybologii*, Międzynarodowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1994
- [51] Mihin N.M., *Vnešnee trenie tverdyh tel*, Izd. „Nauka”, Moskva 1977
- [52] Molitor T., *Performance Evaluation of Silicone and Fluoroelastomer Automotive Crankshaft Seals*, Paper SAE 850332
- [53] Müller K.H., *Concepts of Sealing Mechanism of Rubber Lip Type Rotary Shaft Seals*, 11th Int. Conf. On Fluid Sealing, Elsevier Applied Science Publishers, Cannes 1987
- [54] Norma ISO 6194/1-5 Radial Lip Seals
- [55] Nowicki B., *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni*, WNT, Warszawa 1991
- [56] Ott G., *Untersuchungen zum Dynamischen Leckage – und Reibverhalten von Radial – Wellendichtringen*, Dissertation, Univ. Stuttgart, 1983
- [57] Otto V., *More Effective Rotary Shaft Seals through Energy Savings*, 7th Int. Meeting on Sealing Technology, Vol. 1, Budapest 1982, 219–224
- [58] Persson B.N.J., *Sliding Friction – Physical Principles and Applications*, Springer, 2000
- [59] Qu J., *Non- R_a Roughness Parameters of Shaft Surfaces for Radial Lip Seal Applications*, Paper SAE 951195

- [60] Qu J., *The Application of Discriminant Analysis in Shaft Surface Classification for Radial Lip Seals*, Paper SAE 960214
- [61] Rymuza Z., *Tribologia polimerów ślizgowych*, WNT, Warszawa 1986
- [62] Salant R., *On the Sealing Mechanism of Lip Seals Containing Microundulations*, 13th Int. Conf. On Fluid Sealing, Kluwer Academic Publishers, Brugge 1992
- [63] Salant R., *Numerical Analysis of the Flow Field within Lip Seals Containing Microundulation*, ASME J. of Tribology, 114, 1992, 485–492
- [64] Salant R., Flaherty A., *Elastohydrodynamic Analysis of Reverse Pumping in Rotary Lip Seals with Microundulations*, ASME J. of Tribology, 116, 1994, 56–62
- [65] Schouten M.J.W., Gawliński M., *Enkele Tribotechnische Aspecten von een Roterende Aafdichting*, Polytechnisch Tijdschrift W33, Nr. 9, 1978
- [66] *Shaft Requirements for Rotary Lip Seals*, The Rubber Manufacturers Association, USA, 1999
- [67] Shimotsuma Y., Iwasaki M., *Study on Positive Contact Seals-Sealing Mechanism of Lip Type Oil Seal*, Kansai University, Suita Osaka 1974
- [68] Sponagel S., Kiltbau G., Spies K.H., *Sealing Mechanism of Lip seals*, 11th Int. Conf. On Fluid Sealing, Elsevier Applied Science Publishers, Cannes 1987
- [69] Symons J.D., *Lip Motion – an Important Factor in Seal Design and Performace*, ASLE Trans, Vol. 19, 2, 135–145
- [70] Symons J.D., *A Friction – Reducing Shaft Surface for Use with Standard Radial Sharp Lip Oil Seals*, Paper SAE 810201
- [71] Symons J.D., *Optimum Lip Seal Design by Fractional Factorial Experimentation*, Paper SAE 660380
- [72] Szczerek M., *Problemy systematyzacji badań tribologicznych*, w: *Tribologia sprzyja (wy)trwałości*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [73] Teaste A.A., *Proces smazki rezinowego uplotnienia na vrašćajuščichsja valu*, Trudy Tallinskogo Polit. Instituta, seria A, 1971
- [74] Thomas T.R. et al., *Surface Microgeometry of Lip Seals Related to their Performance*, 7th Int. Conf. On Fluid Sealing, Paper J2, Nottingham 1975
- [75] Upper G., *Dichtlippentemperatur von Radialwellendichtringen*, Dissertation Univ. Karlsruhe, 1968
- [76] Von Bavel P.G.M. et al., *Upstream Pumping of Radial Lip Seals by Tangentially Deforming Rough Seal Surface*, Transaction of ASME, Vol.118, 1996
- [77] Von Leeuwen H., Wolfert M., *The Sealing and Lubrication Principles of Plain Radial Lip Seals: An Experimental Study of Local Tangential Deformations and Film Thickness*, Elastohydrodynamics, ed. D. Dowson, Elsevier Science B.V, 1996
- [78] Wiehler K. et al., *Radial Lip Seals – Thin Film Lubrication and Shear Thinning*, 12th Int. Colloquium “Tribology 2000-Plus”, Technische Akademie Esslingen, Vol. II, 2000
- [79] *Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn*, pod redakcją W. Zwierzyckiego, Warszawa–Poznań 1990
- [80] Zwierzycki W., *Zagadnienia identyfikacji procesów zużywania w styku tarciovym*, w: „Tribologia sprzyja (wy)trwałości”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000
- [81] Zwierzycki W., *Zagadnienia apriorycznej oceny trwałości węzłów tarcia ślizgowego*, Oficyna Politechniki Poznańskiej, Poznań 1990

LOCAL CONTACT CONDITIONS AND FRICTIONAL LOSSES IN OIL LIP SEALS

The monograph presents an analysis of the causes of the frictional losses generated in the oil lip seal rubbing against the shaft as well as the means to reduce them. Contact between the lip and the shaft is considered in macro- and microscale. It has been found that the contact area position on the sealing edge of the lip is variable over its perimeter and that the distance between two extreme contact positions can be equal to some of the contact widths of the lip with the shaft. This distance when expressed in terms of the contact width is called relative interval of the contact area position on the sealing edge. The contact area position depends on the shape of the sealing edge in the free oil lip seal and on the kinematics of the relative displacement of the shaft and the lip. Moreover, it was found during these tests that variation in the values of contact pressure at lip-shaft interface corresponds with the variable position of the contact area in the circumferential direction. This relation is a direct reason for diversification of the contact conditions in micro scale; the irregularities on the shaft surface penetrate the deeper into the lip the higher the contact pressure is. In this way, local areas with different conditions of friction and lubrication originate.

Distortions of the local contact areas take place during shaft rotation; frequency of distortion may differ locally, in one and the same oil lip seal, by one order of magnitude. It often occurs, due to the vibrations and better lubricating conditions, that there is no lip wear over some part of the perimeter. Hence, one recommends the parameters of the shaft surface roughness ensuring, at a given relative interval of contact area position, uniform lip wear over the whole perimeter. It appeared that frictional losses are affected by the distributions of the profile ordinates and radii values of the shaft surface irregularities. It is suggested that the rubber properties should be taken into account when choosing the shaft surface roughness. The distortion frequency of the local contact areas should be taken as a criterion; shaft surface roughness is considered good when it causes higher frequency than that corresponding with the maximal value of an angle of internal losses in the rubber.

It has been proved that the roughness anisotropy and left-hand side distribution of the density frequency of profile ordinates is the best for plunge ground surfaces. Such a metal surface easily runs-in during cooperation with the lip as well as transforms into optimal one with respect to the power consumption and the lip wear. Furthermore, surfaces with anisotropy show lower frictional losses when run against the seals made of rubbers with high adhesive interaction with steel. One should create the shaft surface topography in such a way as to get constant value of the ratio: standard deviation σ of the profile ordinates distribution and mean radius

value \bar{r} of all irregularities irrespective of the shaft surface roughness. At constant value of the ratio the distortion frequency remains constant, too.

It was found that the wear track on the sealing edge can be either porous or smooth. The seals with porous external layer of the sealing edge had lower frictional losses than those having smooth wear track. Reduction of the frictional losses results from smaller tangential stiffness of the porous layer and from weaker adhesive interaction between steel shaft and rubber lip.

Verified by Halina Marciniak



BIBLIOTEKA GŁÓWNA

317812 L/1

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w następujących księgarniach:
„Politechnika”
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
budynek A-1 PWr., tel. (0-71) 320 25 34;
„Tech”
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. (0-71) 320 32 52
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową

ISBN 83-7085-784-1

