

AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI

mgr inż. Marcin Potoczny

Praca doktorska

**Ciśnienie krytyczne i opory ruchu
w uszczelnieniach z cieczą magnetoreologiczną**

Promotor
dr hab. inż. Józef Salwiński, prof. AGH

Kraków 2012

Składam serdeczne podziękowania Panu
Profesorowi Józefowi Salwińskiemu
za opiekę naukową, cenne wskazówki
i wsparcie w trudnych chwilach, a także
wszystkim osobom, którzy przyczynili
się do realizacji niniejszej pracy.

Spis treści

WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE	7
2. USZCZELNIENIA WAŁÓW OBROTOWYCH	10
2.1. Uszczelnienia tradycyjne	10
2.2. Uszczelnienia z cieczami magnetycznymi	18
3. CIECZE MAGNETYCZNE	24
3.1. Budowa i właściwości cieczy magnetycznych	24
3.2. Modele reologiczne cieczy magnetycznych	34
4. CEL I TEZA PRACY	41
5. MODELOWANIE DZIAŁANIA USZCZELNIENIA Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ	44
5.1. Teoretyczne podstawy modelowania uszczelnień z cieczą magnetyczną	44
5.2. Model matematyczny wyznaczania ciśnienia krytycznego uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną	54
5.3. Analityczne wyznaczanie momentu tarcia w uszczelnieniu z cieczą MR	59
6. ZAKRES BADAŃ LABORATORYJNYCH	60
6.1. Wprowadzenie	60
6.2. Program badań laboratoryjnych	61
6.3. Wyznaczenie zmian lepkości dynamicznej cieczy magnetoreologicznej pod wpływem zmian pola magnetycznego	63
6.4. Analiza numeryczna rozkładu pola magnetycznego w uszczelnieniu z cieczą MR	67
6.5. Stanowisko do badań uszczelnień z cieczą MR	80
6.6. Procedura badawcza	84
6.7. Badania pilotażowe	86
7. CIŚNIENIE KRYTYCZNE W USZCZELNIENIU Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ	90
7.1. Układ tulei badawczych	90
7.2. Badania ciśnienia krytycznego przy ustalonym współczynniku wypełnienia	91

7.3. Weryfikacja modelu matematycznego wyznaczania ciśnienia krytycznego	105
7.4. Podsumowanie	112
8. OPORY RUCHU W USZCZELNIENIU Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ	113
8.1. Układ tulei badawczych	113
8.2. Badania oporów ruchu w uszczelnieniu z cieczą MR	114
8.3. Weryfikacja analitycznych zależności do obliczania momentu tarcia ...	119
8.4. Podsumowanie	120
9. BADANIA PORÓWNAWCZE USZCZELNIEŃ Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ I FERROMAGNETYCZNĄ	121
9.1. Układ tulei badawczych	121
9.2. Badania porównawcze uszczelnienia z cieczą MR i z cieczą FF	122
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z PRACY	126
LITERATURA	129

WYKAZ STOSOWANYCH OZNACZEŃ

MF	– ciecz magnetyczna (magnetic fluid)
FF	– ciecz ferromagnetyczna (ferrofluid)
MR	– ciecz magnetoreologiczna (magnetorheological fluid)
H	– natężenie pola magnetycznego [A/m]
H_{max}	– maksymalne natężenie pola magnetycznego w szczelinie
B	– indukcja magnetyczna [$T=N/A \cdot m$]
B_{max}	– maksymalna indukcja magnetyczna w szczelinie
M	– Magnetyzacja [A/m]
M_s	– magnetyzacja nasycenia [A/m]
J	– polaryzacja [T]
μ_0	– przenikalność magnetyczna próżni [H/m]=[N/A^2]=[$T \cdot m/A$]
η	– współczynnik lepkości dynamicznej [$mPa \cdot s$]
τ	– naprężenie odkształcające
G	– moduł Kirchhoffa
γ	– odkształcenie postaciowe
τ_o	– granica płynięcia (graniczne naprężenie styczne) [Pa]
$\dot{\gamma}$	– szybkość odkształcenia [s^{-1}]
p_s	– ciśnienie statyczne (w warunkach statycznych dla $n=0$) [Pa]
p_r	– ciśnienie robocze (w warunkach dynamicznych dla $n \neq 0$) [Pa]
p_{krs}	– statyczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia z cieczą magnet. [Pa]
p_{krd}	– dynamiczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia z cieczą magnet. [Pa]
p_{kr1s}	– statyczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia jednowystępowego [Pa]
p_{kr1d}	– dynamiczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia jednowystępowego [Pa]
p_{krZs}	– statyczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia wielowystępowego [Pa]
p_{krZd}	– dynamiczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia wielowystępowego [Pa]
M_t	– Moment tarcia uszczelnienia z cieczą magnetyczną [Nm]
U_M	– jednostkowa energia, związana z siłą magnetyczną
Fr_m	– magnetyczna liczba Froude'a
Ta_{kr}	– krytyczna liczba Taylora
V	– objętość cieczy magnetycznej w szczelinie [m^3]
V_n	– objętość nominalna cieczy magnetycznej w szczelinie [m^3]

ρ	– gęstość cieczy magnetycznej [g/cm ³]
$\frac{V}{V_n}$	– współczynnik wypełnienia szczeliny δ cieczą MR
δ	– szczelina promieniowa uszczelnienia [m]
δ_0	– grubość warstwy quasi-stałej [m]
R_1	– promień cylindra wewnętrznego (promień wału) [m]
D	– średnica wału,
R_2	– promień cylindra zewnętrznego [m] ($R_2 = R_1 + \delta$)
$R_2(B)$	– promień zewnętrzny szczeliny pomniejszony o grubość δ_0
S	– pole powierzchni wału (występu) zwilżone cieczą magnetyczną [m ²]
ω	– prędkość kątowna wału [s ⁻¹]
n	– prędkość obrotowa wału [min ⁻¹]
v_R	– prędkość liniowa na powierzchni wału,
v_0	– prędkość liniowa warstwy quasi-stałej,
Z	– liczba występów uszczelniających na tulei pomiarowej
Z_B	– liczba występów uszczelniających na tulei bazowej
T	– temperatura cieczy [°C]
T_p	– początkowa temperatura pracy w uszczelnieniu [°C]
T_k	– końcowa temperatura pracy w uszczelnieniu [°C]
t	– szerokość szczeliny z cieczą magnetyczną [m]
b	– szerokość występu uszczelniającego przy podstawie
α	– kąt pochylenia występu uszczelniającego
h	– szczelina pomiarowa do badań lepkości na reometrze
ξ	– poziom istotności dla przedziału ufności
C_s	– bezwymiarowy współczynnik proporcjonalności
C_d	– współczynnik korygujący ciśnienie krytyczne w warunkach dynamicznych
C_t	– współczynnik korygujący, odpowiedzialny za tarcie w uszczelnieniu
ρ	– gęstość cieczy [g/m ³]
v	– prędkość przepływu [m/s]
F	– siła masowa
c	– ciepło właściwe
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła
Φ	– intensywność wewnętrznych źródeł ciepła (intensywność dyssypacji)

1. WPROWADZENIE

Od czasu wynalezienia materiałów sterowalnych, a zwłaszcza wytworzenia płynów elektoreologicznych i magnetycznych w pierwszej połowie XX w., obserwuje się coraz częstsze ich wykorzystanie w zastosowaniach technicznych. Podstawową cechą materiałów określanych jako sterowalne jest możliwość zmiany ich właściwości pod wpływem oddziaływania zewnętrznego. W cieczach sterowalnych oddziaływaniem tym jest zewnętrzne pole, zależne od typu cieczy. Kształtowanie właściwości cieczy elektoreologicznych wymaga zastosowania pól elektrostatycznych o dużych natężeniach, ciecze magnetyczne natomiast reagują pod wpływem pola magnetycznego, [26,40].

Z punktu widzenia zastosowań inżynierskich, zasadniczą rolę zaczęły odgrywać ciecze magnetyczne, ze względu między innymi na uzyskiwane maksymalne naprężenia styczne, które są 20÷50 krotnie wyższe niż w cieczach elektoreologicznych. Ciecze magnetyczne są również bardziej stabilne chemicznie, są łatwiejsze w użyciu i mniej wrażliwe na zanieczyszczenia, jednocześnie umożliwiają pracę w szerszym zakresie temperatur, [29].

W literaturze ciecze magnetyczne mają często zróżnicowane nazewnictwo i niekiedy nadrzędna grupa wszystkich cieczy tego typu klasyfikowana jest, jako ciecze magnetoreologiczne a niekiedy, jako magnetyczne, [33,37,40]. Znaczenia te są bliskoznaczne, jednak w odniesieniu do podziału i przeznaczenia cieczy, nazewnictwo to w dalszej części pracy zostało usystematyzowane. Ciecze te jako ogólna, nadrzędna grupa, nazywane będą cieczami magnetycznymi (magnetic fluid – MF), a ich podstawowe rodzaje to, zgodnie z literaturą, ciecze ferromagnetyczne tzw. ferrociecze (ferrofluid – FF) oraz ciecze magnetoreologiczne (magnetorheological fluid – MR fluids).

W technice ciecze magnetyczne znajdują coraz szersze zastosowanie. Wykorzystywane są między innymi w uszczelnieniach, w głośnikach, w tłumikach drgań a także w aplikacjach medycznych oraz jako środek polerski lub jako środek smarny, [62].

W zastosowaniach praktycznych duży obszar obejmuje wykorzystanie cieczy magnetycznych w technice uszczelniania. Zastosowanie znajdują tu przede wszystkim ciecze ferromagnetyczne. Wiele badań w tym zakresie od lat

prowadzonych jest w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn. Stworzone w Katedrze laboratorium uszczelnień i cieczy magnetycznych wyposażone zostało w stanowiska badawcze własnej konstrukcji, przeznaczone do badań uszczelnień z cieciami magnetycznymi. Wykonywane są tu badania własne i projekty badawcze dotyczące uszczelnień z cieciami ferromagnetycznymi pracującymi w środowisku gazowym (w powietrzu), a także w ostatnich latach, w środowisku wodnym. Prowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk tribologicznych oraz granicznych warunków pracy uszczelnień ferromagnetycznych w określonych warunkach pracy. Uzyskane wyniki opisane zostały w wielu publikacjach w kraju i za granicą, np. [44,49,50,51,75,76,77,78].

Prowadzone prace doprowadziły również do powstania szeregu innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych uszczelnień tego typu i głowic stanowisk badawczych, potwierdzonych przyznanymi patentami, m.in. [108,111,112,113,114,115].

Uszczelnienia z cieczą magnetyczną tworzą klasę uszczelnień bezstykowych, charakteryzujących się doskonałą szczelnością w środowisku gazowym. Jednocześnie ich istotną cechą jest możliwość uszczelniania elementów ruchomych (np. wałów obrotowych) przy niewielkich oporach ruchu. Te właściwości uszczelnień, powodują że wypełniają one lukę pozostawioną przez uszczelnienia tradycyjne. W przypadku bowiem tradycyjnych uszczelnień mamy do czynienia albo z uszczelnieniami stykowymi, które zachowują szczelność kosztem znacznych oporów ruchu i stosunkowo szybkim zużyciem, albo z uszczelnieniami bezstykowymi, gdzie opory ruchu nie występują, ale najczęściej jest to okupione brakiem, w warunkach statycznych, szczelności.

W technice uszczelniania pewną perspektywą rozwoju uszczelnień z cieciami magnetycznymi może być zastąpienie cieczy ferromagnetycznych poprzez cieczy magnetoreologiczne, które obecnie wykorzystywane są głównie jako środek czynny w aktywnych elementach tłumiących.

Pierwsze prace badawcze w zakresie zastosowania cieczy MR w uszczelnieniach podjęto w zagranicznych ośrodkach naukowych, w szczególności na Uniwersytecie Akida w Japonii [16] i w Białoruskiej Akademii Nauk, [19,22,23,24].

Wstępne badania pozwalają stwierdzić, że uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną uzyskują znacznie wyższe ciśnienia krytyczne niż uszczelnienia z cieczą ferromagnetyczną. Związane jest to ze zdecydowanie wyższymi wartościami nasycenia magnetycznego tych cieczy. Pewną zaletą cieczy magnetoreologicznych w odniesieniu do ferromagnetycznych jest również ich niższa cena [34,37,99]. Wadą jednak uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną mogą być wyższe opory tarcia wynikające ze znacznego wzrostu lepkości cieczy MR pod wpływem działania pola magnetycznego.

Uszczelnienia wykorzystujące ciecz magnetoreologiczną nie są jeszcze dobrze poznane i przebadane. Aby można było zweryfikować ich przydatność w technice uszczelnień konieczne jest przeprowadzenie potężnej ilości badań, pozwalających określić warunki i skuteczność zastosowania cieczy magnetoreologicznych w uszczelnieniach.

W pracy skoncentrowano się na określeniu możliwości wykorzystania cieczy MR w problematyce uszczelnień wałów obrotowych, ze względu na powszechność występowania takiego układu w urządzeniach mechanicznych. Znaczna część pracy wykonana została w ramach projektu badawczego MNiSzW obejmującego wyznaczenie granicznych warunków pracy uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną, [86]. Analogicznie jak w uszczelnieniach z cieczą ferromagnetyczną, za podstawowe kryteria pracy uszczelnienia uznano maksymalną szczelność, czyli wartość ciśnienia krytycznego (tzw. ciśnienia przebicia), jakie może osiągnąć uszczelnienie, oraz opory ruchu uszczelnienia w trakcie pracy w środowisku gazowym.

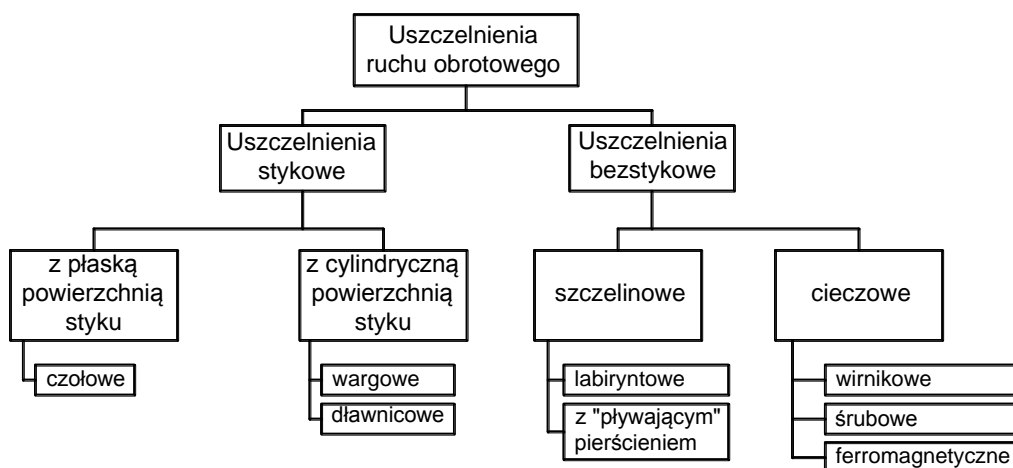
2. USZCZELNIENIA WAŁÓW OBROTOWYCH

Podczas pracy części ruchomych urządzeń, szczególnie wałów obrotowych, aby uzyskać odpowiednio długą ich żywotność, często niezbędne jest odpowiednie uszczelnienie komory pracy np. łożysk. Uszczelnienia obrotowe wałów stosuje się najczęściej w celu zapobiegnięcia lub ograniczenia przecieku czynnika roboczego (często cieczy smarującej) lub uniknięcia zanieczyszczeń zewnętrznych. Różnorodne warunki eksploatacyjne, a przede wszystkim różne medium uszczelniane i wymagania co do szczelności, wpłynęły na powstanie szerokiego zakresu rodzajów uszczelnień, [31,89].

2.1. Uszczelnienia tradycyjne

Do uszczelnień tradycyjnych wałów obrotowych zaliczamy wszelkie, powszechnie stosowane rodzaje uszczelnień, mechanicznie zamykające przestrzeń roboczą czynnika uszczelnianego. W literaturze spotyka się wiele odmian konstrukcyjnych uszczelnień i przykładów klasyfikacji w odniesieniu do różnych kryteriów podziału, np. postaci elementu uszczelniającego, kształtu powierzchni, sposobu docisku itp.

Generalnie uszczelnienia te można podzielić na stykowe, gdy występuje kontakt pomiędzy współpracującymi powierzchniami, i bezstykowe, przy braku takiego kontaktu, [31]. Na rys.2.1. przedstawiono ogólny podział uszczelnień ruchu obrotowego.



Rys.2.1. Ogólny schemat klasyfikacji uszczelnień ruchu obrotowego, [31].

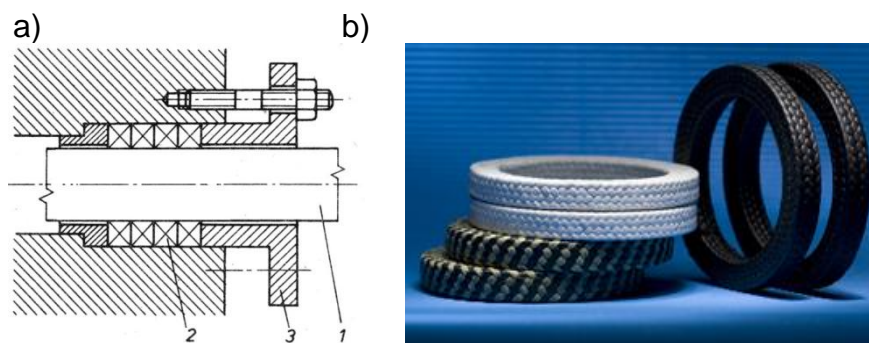
Uszczelnienia stykowe

Uszczelnienia stykowe są podstawowymi elementami utrzymywania szczelności w aplikacjach maszynowych. Ich budowa i zasada działania opiera się o mechaniczne zamknięcie uszczelnianej przestrzeni.

W przypadku ruchu obrotowego, uszczelnienia te można podzielić na dwie grupy zależnie od rodzaju pracujących powierzchni. Są to uszczelnienia z cylindryczną powierzchnią styku (promieniowe) i z płaską powierzchnią styku (czołowe).

Uszczelnienia promieniowe współpracują najczęściej bezpośrednio z powierzchnią obracającego się wału i są to przede wszystkim uszczelnienia dławnicowe i wargowe.

Uszczelnienia dławnicowe są jednym z najprostszych rodzajów uszczelnień. Ich działanie opiera się na dławieniu wypływu czynnika uszczelnianego dzięki zastosowaniu pakietu pierścieni uszczelniających umieszczonych w komorze dławnicowej i dociskanych przez dławik. Nacisk dławika powoduje odkształcenie pierścieni uszczelniających i ich nacisk na powierzchnię wału i komory dławnicowej. Rys.2.2, przedstawia konstrukcję typowego uszczelnienia dławnicowego oraz kilka pierścieni dławnicowych, [107].



Rys.2.2. Uszczelnienie dławnicowe [31,107].

a) Konstrukcja typowego uszczelnienia, b) pierścienie uszczelniające
1-wał, 2-pierścienie uszczelniające, 3-dławik

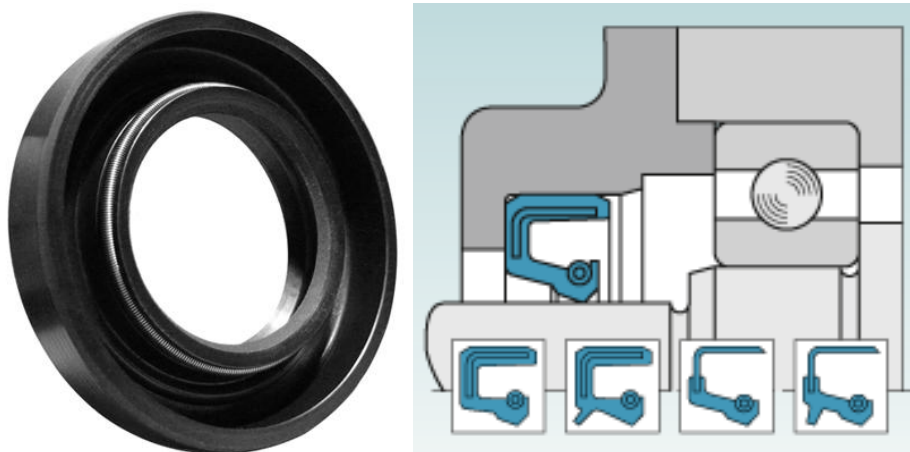
W zależności od środowiska pracy dławnicy, osiągniętych temperatur oraz wymogów bezpieczeństwa, szczelnie dławnicowe wykonywane są w różnym splucie i z różnych materiałów, zapewniających im niski współczynnik tarcia, odpowiednią odporność chemiczną oraz dobre przewodnictwo ciepła, [95].

Zaletą Uszczelnień dławnicowych jest prosta konstrukcja, łatwość montażu, niski koszt i dość swobodny dobór materiału uszczelniającego.

Podstawową wadą uszczelnień tego typu jest ich możliwe przesączenie przez czynnik uszczelniany oraz duże opory tarcia. Niepraktyczna jest również konieczność zapewnienia dodatkowego elementu dociskającego, którego nacisk wpływa bezpośrednio na szczelność i opory ruchu.

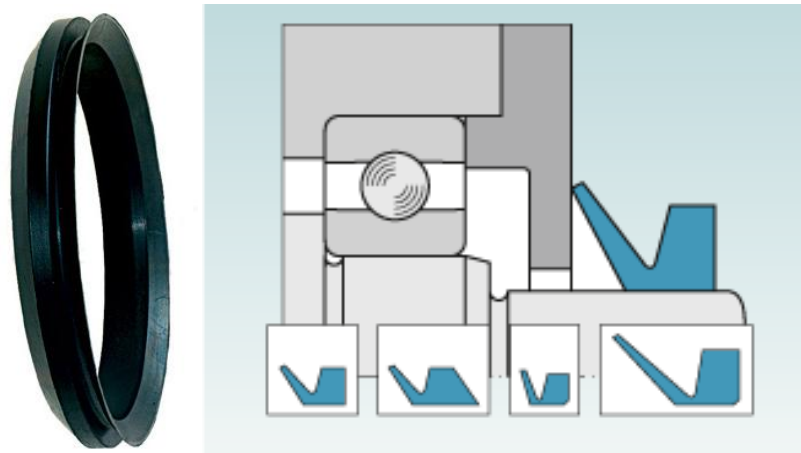
Znacznie praktyczniejsze i powszechniejsze w zastosowaniach stały się Uszczelnienia wargowe. Uszczelnienia te dzięki swojej prostej konstrukcji zapewniają zwartą i syntetyczną zabudowę, nie wymagającą dodatkowych narzędzi i elementów. Najczęstszym rozwiązaniem są tzw. simeringi, uszczelnienia w postaci elastomerowego pierścienia wyposażonego w elastyczną wargę, która przylegając do powierzchni wału tworzy barierę uszczelniającą. Pierścień zwykle zawiera dodatkowo wzmocnienie metalową wkładką i sprężynę, poprawiającą przyleganie wargi do wału, [31,106].

Przykład zabudowy typowego pierścienia uszczelniającego w uszczelnieniu i kilka odmian konstrukcyjnych pokazany został na rys.2.3.



Rys.2.3. Promieniowy pierścień uszczelniający z wargą, [89]
- zdjęcie oraz zabudowa w uszczelnieniu i kilka odmian konstrukcyjnych

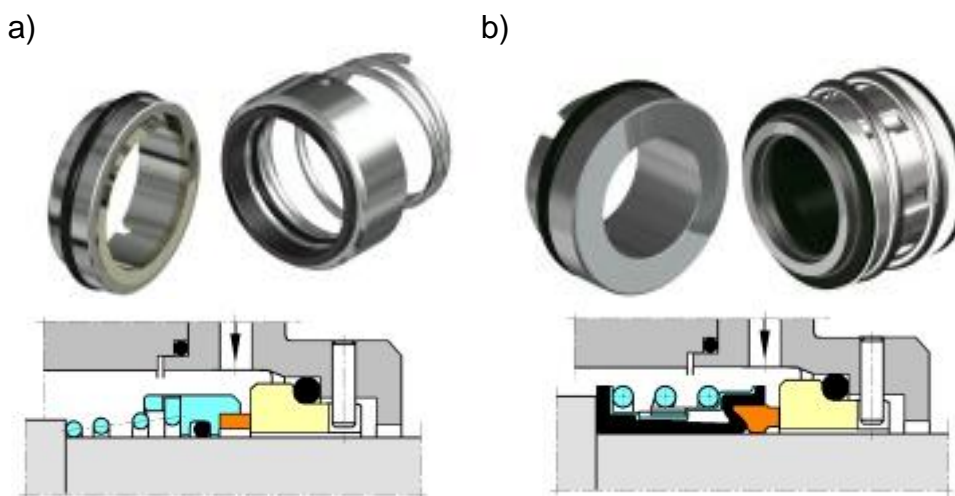
Innym rodzajem pierścienia wargowego, jest V-ring. Jest to pierścień o działaniu osiowym, współpracując z czołową powierzchnią gniazda. Ze względu na budowę i charakter pracy w literaturze klasyfikowany jest do uszczelnień wargowych. V-Ring montowany jest bezpośrednio na wale a uszczelniająca warga dociskana jest do czołowej powierzchni gniazda, zachowując niski współczynnik tarcia w trakcie ruchu, [89]. Przykład zabudowy uszczelnienia V-ring i kilka odmian konstrukcyjnych pokazano na rys.2.4.



Rys.2.4. Pierścień uszczelniający V-ring, [89]
 - zdjęcie oraz zabudowa w uszczelnieniu i kilka wariantów konstrukcyjnych

Względem powierzchni osadzenia uszczelnienia na wale nie są stawiane specjalne wymagania, dopuszczalna jest niewspółosiowość wału i otworu powierzchni współpracującej. Pierścienie typu V-ring zapewniają również uszczelnienie, gdy wał jest zowalizowany lub obraca się mimośrodowo, [106].

Uszczelnienia czołowe podobnie jak pierścienie V-ring działają na powierzchniach czołowych. Zasadniczą jednak różnicą jest wysoka dokładność przygotowania współpracujących czołowych powierzchni ślizgowych, wykonanych na specjalnych pierścieniach uszczelniających oraz rozbudowana konstrukcja. Jeden z pierścieni osadza się nieruchomo w obudowie, a drugi na wale obrotowym i dociska się je do siebie za pomocą elementów dodatkowych np. sprężyny, i ciśnieniem czynnika roboczego, [31,97].



Rys.2.5. Przykłady rzeczywistych uszczelnień czołowych ANGA, i sposób ich zabudowy [91].
 a) uszczelnienie typu A3, zależne od kierunku obrotów wału,
 b) uszczelnienie typu A4, niezależne od kierunku obrotów wału

Uszczelnienia czołowe dzięki wysokiej dokładności wykonania współpracujących powierzchni umożliwiają uzyskiwanie szczelności przy znacznie wyższych ciśnieniach niż w przypadku uszczelnień wargowych. Jednak ich konstrukcja jest znacznie bardziej skomplikowana niż uszczelnień wargowych i wymagają wysokiej jakości wykonania powierzchni współpracujących, co wpływa na stosunkowo wysoką cenę.

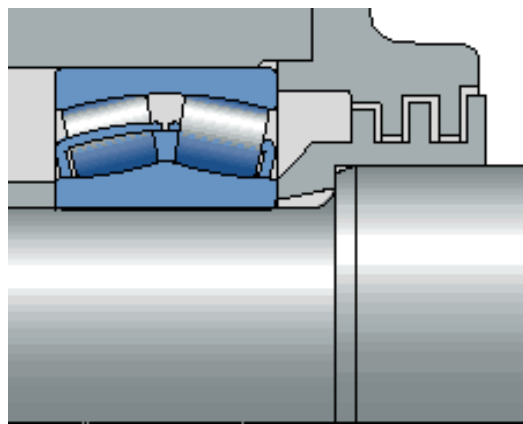
Uszczelnienia stykowe posiadają szereg cech niekorzystnych, które ograniczają ich zastosowanie. Zasadniczą wadą tych uszczelnień jest generowanie znacznych oporów ruchu i przyrostu temperatury, poprzez ciągły kontakt cierny z obracającą się powierzchnią wału. W wyniku nierówności powierzchni elementy uszczelnienia mogą do niej nierównomiernie przylegać, przez co pogarszają się warunki szczelności. Uszczelniane medium przedostaje się w mikroszczeliny pomiędzy ślizgające się po sobie powierzchnie, co powoduje spadek jego ciśnienia,

Same uszczelnienia, jak i elementy z nimi współpracujące narażone są również na zużycie ścierne w obszarze styku powierzchni uszczelniających. Dochodzi do niego na skutek działania drobinek zanieczyszczeń, które pojawiają się w systemie i są przenoszone przez medium w obszar uszczelnienia. Wiąże się to z koniecznością zapewnienia wysokiej dokładności wykonania i odpowiedniej twardości współpracujących powierzchni, [89].

Uszczelnienia bezstykowe

W celu zmniejszenia znacznych oporów ruchu generowanych przez uszczelnienia stykowe stosuje się uszczelnienia charakteryzujące się pracą bezkontaktową. Charakterystyczną cechą takich uszczelnień jest nie dopuszczenie do wzajemnego kontaktu między powierzchniami, przez pozostawienie niewielkiej szczeliny pomiędzy pracującymi elementami. Dzięki temu nie występuje problem tarcia zewnętrznego i obniżenia trwałości, jak to ma miejsce w uszczelnieniach stykowych, ale kosztem utraty szczelności przy niższych prędkościach obrotowych lub postoju. Uszczelnienia bezstykowe stosowane są głównie w urządzeniach pracujących przy wysokim ciśnieniu i podwyższonych prędkościach obwodowych lub przy wymaganiach bardzo niskich oporów ruchu, [31].

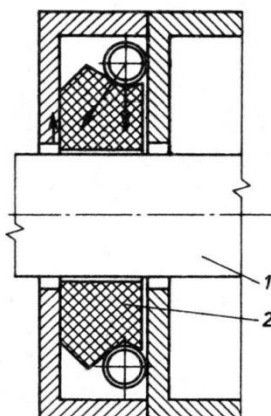
Podstawową odmianą uszczelnień tego typu są uszczelnienia szczelinowe tzw. labiryntowe (rys.2.6). Ich zadaniem jest dławienie przepływu poprzez spadek ciśnienia wynikający z tarcia wewnętrznego w czynniku roboczym przepływającym przez szczelinę. Zwiększenie długości szczeliny i skomplikowanie jej kształtu poprzez stworzenie labiryntu potęguje ten efekt.



Rys.2.6. Uszczelnienie labiryntowe, [93]

Często w szczelinę labiryntu wprowadza się smar dodatkowo ograniczający przepływ. W nowoczesnych konstrukcjach tego typu, stosowany jest dodatkowy pierścień uszczelniający typu O-ring „VBX”, którego zadaniem jest zapobieganie wyciekom podczas postoju. W trakcie ruchu natomiast siła odśrodkowa oraz ciśnienie czynnika roboczego powoduje odepchnięcie O-ringa od pracującej powierzchni [93,106]. Podstawową wadą uszczelnień labiryntowych jest to, że w warunkach statycznych nie zapewniają szczelności a jedynie ograniczają przeciek.

Do uszczelnień szczelinowych należą również uszczelnienia z pływającym pierścieniem. Konstrukcja takich uszczelnień składa się z pierścienia osadzonego w gnieździe obudowy i zabezpieczonego przed obrotem. Pierścień składa się z trzech segmentów i jest dociskany do powierzchni czołowej gniazda zwykle przez sprężynę i ciśnienie czynnika roboczego (rys.2.7). Przy odpowiednim doborze luzu promieniowego, podczas ruchu obrotowego wału w szczelinie tworzy się klin smarny i następuje hydrodynamiczne uniesienie pierścienia do położenia równowagi [31].

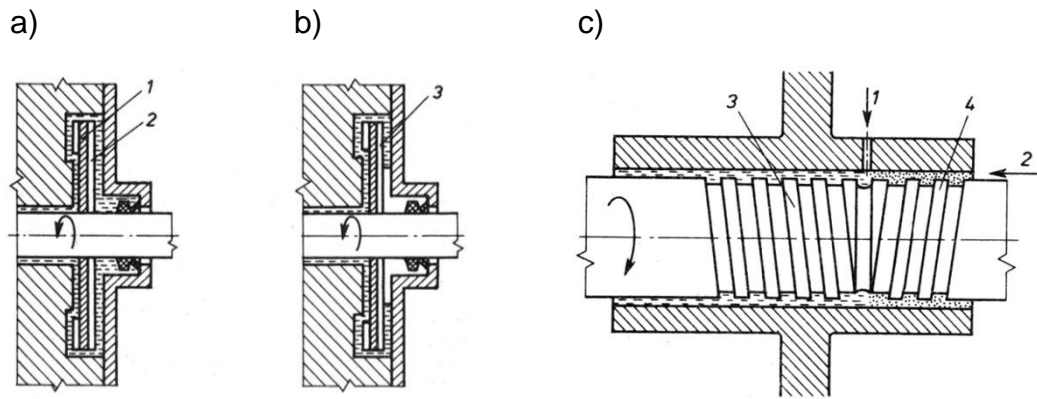


Rys.2.7. Schemat uszczelnienia z pływającym pierścieniem, [31]

1–wał, 2–pierścień uszczelniający

Niekorzystnym zjawiskiem podczas pracy przy wyższych ciśnieniach tych uszczelnień jest tarcie na powierzchni czołowej pierścienia powodujące istotne opory ruchu. Efekt ten jest minimalizowany przez odpowiednie profilowanie powierzchni czołowej i dodatkowe odciążanie pierścienia poprzez wprowadzenie elementów tocznych lub doprowadzenie ciśnienia czynnika roboczego w obszar styku powierzchni czołowych, [31]. Zwiększone opory ruchu i nadal niewystarczająca szczelność pozostają głównymi wadami uszczelnień tego typu.

Inną odmianą uszczelnień bezstykowych są uszczelnienia wykorzystujące ciecz zaporową, o podwyższonym ciśnieniu. Przy odpowiednim doborze cieczy, jej gęstości mieszalności, zdecydowanie zmniejszają się opory tarcia i zwiększa szczelność. Do podstawowych uszczelnień tego typu należą uszczelnienia *wirnikowe* i *śrubowe*. Pierwsze z nich utrzymują zwiększone ciśnienie w pierścieniu cieczy zaporowej przez odśrodkowy wirnik (rys.2.8a,b). Drugie natomiast, wywołują ruch osiowy cieczy zwiększając jej ciśnienie i przeciwdziałając przeciekowi (rys.2.8c), [31]. Spotyka się również tzw. zamki hydrauliczne, gdzie do wytworzenia ciśnienia cieczy zaporowej wykorzystuje się ciśnienie hydrostatyczne podawane z pompy.

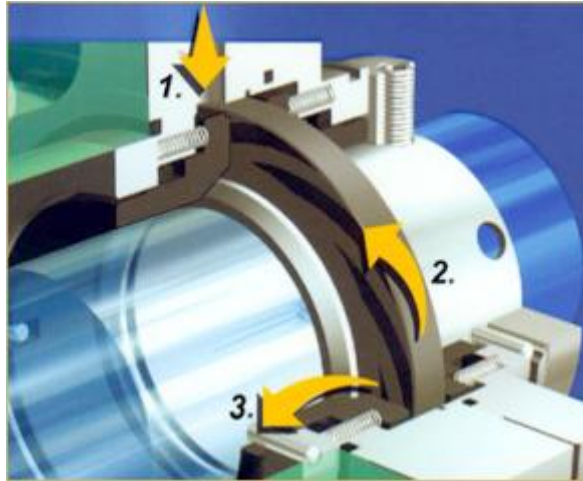


Rys.2.8. Uszczelnienie cieczowe, [31]

- a),b) wirnikowe: podczas postoju (a) i przy obrotach wału (b): 1-łopatka wirnika,
 2-ciecz zaporowa podczas postoju, 3-pierścień cieczy zaporowej
 c) śrubowe: 1-dopływ cieczy zaporowej, 2-uszczelniane medium, 3,4-rowki śrubowe lewo
 i prawoskrętne

Wadą uszczelnień z cieczą zaporową jest konieczność ciągłego dostarczania cieczy, co powoduje rozbudowanie ich konstrukcji, a także konieczność stosowania różnych cieczy do różnych nie wpływających na zmianę właściwości uszczelnianego medium.

Podobną ideę uszczelniania, ale z wykorzystaniem ciśnienia gazu zamiast cieczy, zastosowano w jednej z najnowszych generacji uszczelnień bezstykowych, którymi są uszczelnienia *gazodynamiczne*. Jest to rodzaj uszczelnień czołowych, przy czym pierścienie ślizgowe, podczas ruchu obrotowego są od siebie odsunięte poprzez uzyskanie efektu poduszki gazowej, co zapewnia bezstykową pracę par ślizgowych. Efekt ten powstaje w wyniku dynamicznego sprężania gazu (najczęściej azotu lub powietrza) w mikrowybraniach bieżni pierścieni uszczelniających (rys.2.9). Przy zaniku ciśnienia gazu zaporowego, uszczelnienie nadal pracuje w trybie stykowym. Uszczelnienia gazodynamiczne mają zastosowanie do mediów: toksycznych, korozyjnych, wybuchowych (z możliwością samozapłonu), kancerogennych, [92].



Rys.2.9. Uszczelnienie gazodynamiczne – zasada działania, [92]

1. Doprowadzenie zasilania gazu zaporowego z instalacji
2. Gaz zaporowy „wciska się” w rowki pierścienia
3. Powstanie poduszki gazowej i rozsuniecie pierścienia

Uszczelnienia gazodynamiczne odznaczają się wysoką sprawnością przy dużych prędkościach obwodowych, generując minimalne opory ruchu wynikające jedynie tarcia sprężonego gazu.

Wadami tych uszczelnień jest bardzo zaawansowana i skomplikowana konstrukcja, pociągająca za sobą ich znaczny koszt oraz konieczność zewnętrznego zasilania gazem zaporowym.

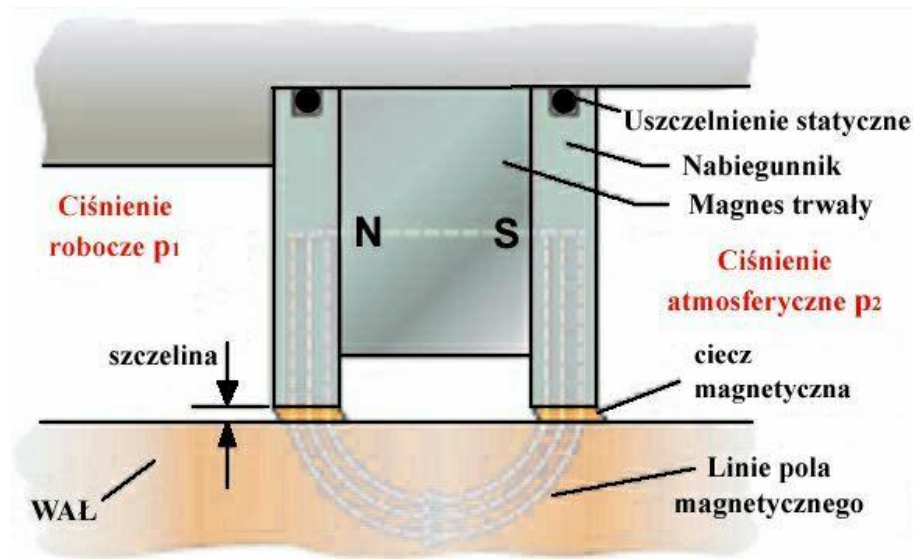
Istniejące uszczelnienia nie spełniają wszystkich oczekiwań konstruktorów, w związku z czym powstały nowe rozwiązania konstrukcyjne uszczelnień z wykorzystaniem cieczy magnetycznych. Uszczelnienia takie charakteryzuje prosta konstrukcja, niewymagająca wysokich dokładności wykonania współpracujących powierzchni. Uszczelnienia zapewniają wysoką szczelność, niezależnie od tego czy wał jest w ruchu czy w spoczynku, dzięki polu magnetycznemu utrzymującemu barierę cieczy magnetycznej w węzle uszczelniającym.

2.2. Uszczelnienia z cieciami magnetycznymi

Uszczelnienia z cieczą magnetyczną tworzą klasę uszczelnień bezstykowych, charakteryzujących się doskonałą szczelnością w środowisku gazowym, w zakresie od próżni do ciśnień rzędu 1MPa. Istotną ich cechą jest możliwość uszczelniania jednocześnie eliminując tarcie pomiędzy

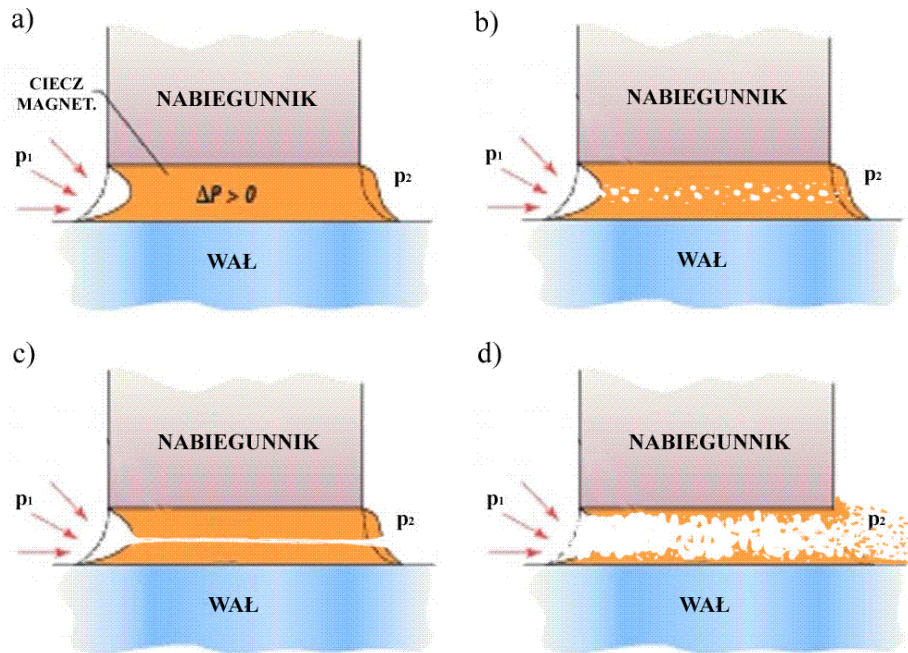
współpracującymi powierzchniami, zamieniając je na tarcie wewnętrzne w cieczy.

Uszczelnienie z cieczą magnetyczną uzyskuje szczelność dzięki utworzeniu płynnej bariery pomiędzy uszczelnianymi obszarami. Ciecz aplikowana jest do jednej lub kilku szczelin uszczelnienia, zamykając obwód magnetyczny utworzony przez wał, magnesy trwałe (samarowo-kobaltowe lub neodymowe) i nabiegunniki. Siła pola magnetycznego utrzymuje ciecz magnetyczną w bardzo małych pierścieniowych szczelinach i skupia ją wokół występów, w rejonie koncentracji linii pola magnetycznego (rys.2.10) [59].



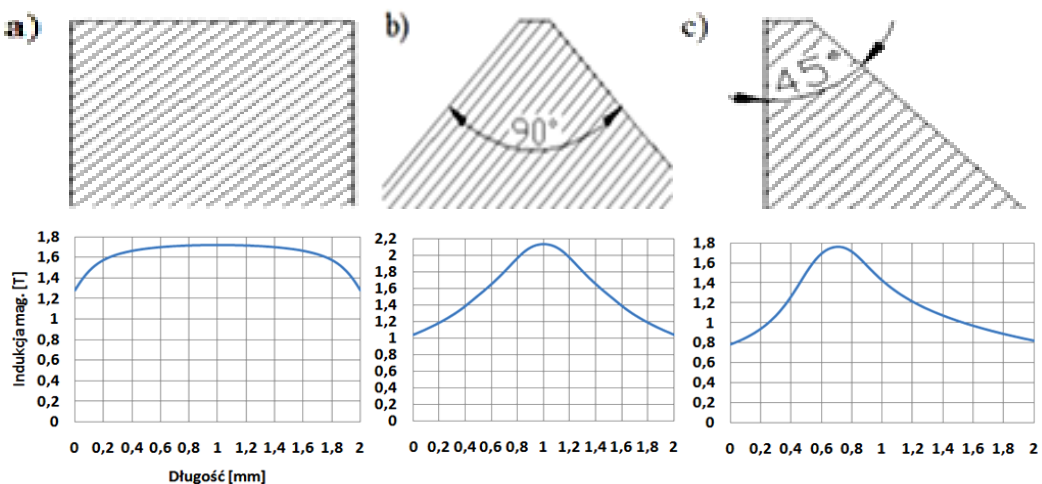
Rys.2.10. Model uszczelnienia z cieczą magnetyczną

Uszczelnienie z cieczą magnetyczną pracuje poprawnie do momentu tzw. przebicia, czyli wyparcia cieczy magnetycznej przez czynnik uszczelniany o nadmiernym ciśnieniu. Proces utraty szczelności uszczelnienia z cieczą magnetyczną przebiega w sposób przedstawiony na rys.2.11, gdzie pokazano mechanizm utraty szczelności jednowystępowego (jednostopniowego) uszczelnienia z cieczą magnetyczną w przypadku wzrostu ciśnienia powyżej wartości granicznej: [45,48].



Rys.2.11. Proces utraty szczelności w uszczelnieniu ferromagnetycznym
 a) poprawna praca uszczelnienia, b) faza I – przeciek bąbelkowy, c) faza II – przeciek kanalikowy, d) faza III – wydmuchanie cieczy

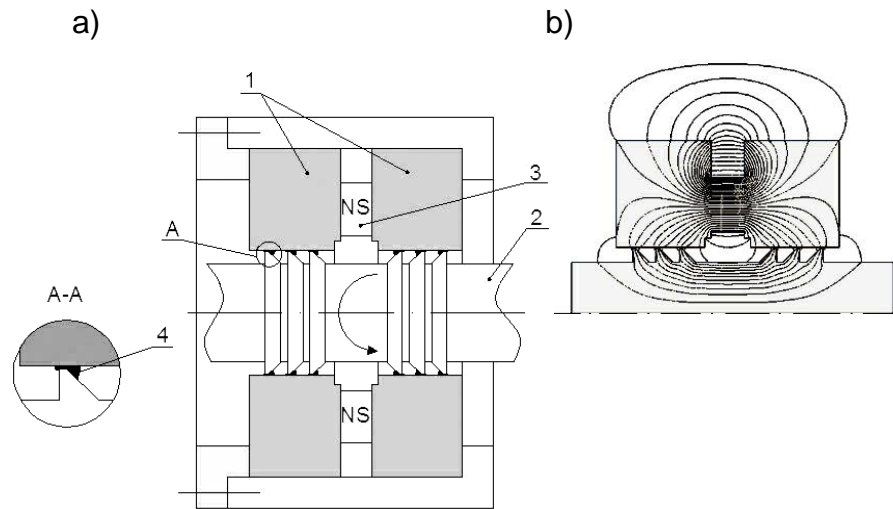
Dla zwiększenia koncentracji pola magnetycznego w rejonie szczeliny, w uszczelnieniach tego typu stosuje się występy o przekroju prostokąta, trójkąta lub trapezu, co wpływa na zmianę rozkładu i wartość indukcji magnetycznej (rys.2.12) [54].



Rys.2.12. Przykłady analiz numerycznych rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie uszczelniającej dla różnych kształtów występów uszczelniających przy tej samej konstrukcji uszczelnienia

Ciecz skoncentrowana wokół jednego występu uszczelniającego tworzy pojedynczy stopień uszczelnienia, które może być stosowane przy stosunkowo niskich wartościach ciśnienia (do ok. 0,05 MPa). W celu skutecznego uszczelnienia przestrzeni o wyższym ciśnieniu stosuje się uszczelnienia

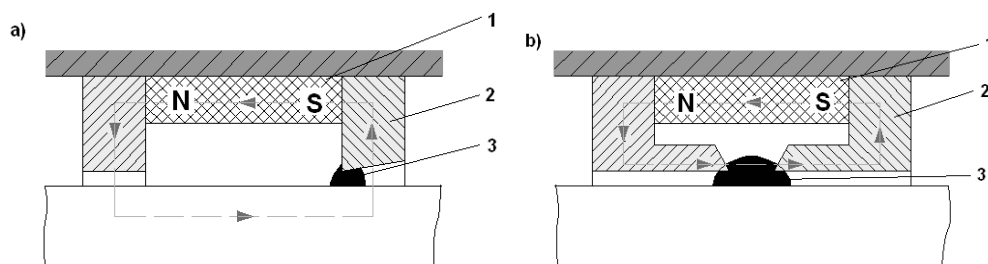
wielowystępowe (wielostopniowe) [36]. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego i rozkład koncentracji linii pola magnetycznego pokazano na rys.2.13.



Rys.2.13. Model uszczelnienia wielowystępowego
 a) wielowystępowe uszczelnienie symetryczne: 1 – nabiegunniki, 2 – wał z występami uszczelniającymi, 3 – magnes trwały, 4 – ciecz magnetyczna,
 b) numeryczna symulacja rozkładu linii pola magnetycznego

Uszczelnienia z cieczą magnetyczną znajdują zastosowanie w konstrukcjach maszyn i urządzeń, w szczególności jako uszczelnienia wielowystępowe (wielostopniowe) wałów obrotowych, ochronne łożysk tocznych, a także połączeń spoczynkowych.

Dwie zasadnicze odmiany konstrukcyjne uszczelnień, wynikają z właściwości magnetycznych uszczelnianych wałów. Jeżeli wał jest ferromagnetyczny, może być wykorzystany jako element obwodu pola magnetycznego (rys.2.14.a), ale istnieje również możliwość uszczelniania wałów niemagnetycznych (rys.2.14.b).

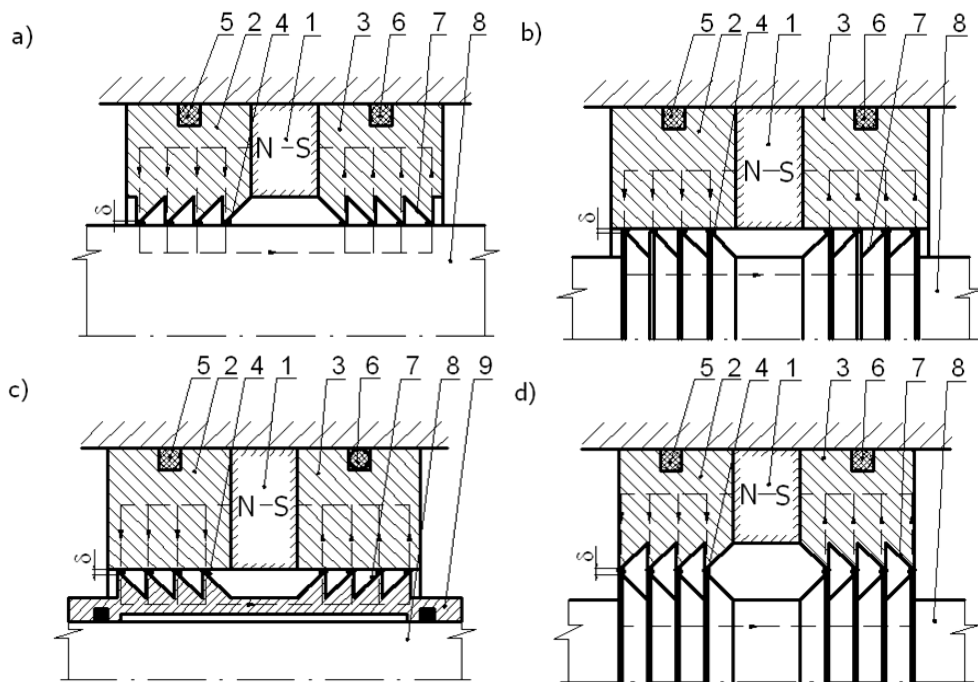


Rys.2.14. Odmiany uszczelnień z cieczą magnetyczną:
 1 – pierścieniowy magnes trwały, 2 – nabiegunnik, 3 – ciecz magnetyczna
 a) wał z materiału o właściwościach magnetycznych, b) wał z materiału niemagnetycznego, wg [38].

Zasada działania wszystkich tego typu uszczelnień jest taka sama, a ich konstrukcyjnych ewolucji i odmian powstało tak wiele, że nie sposób wszystkich

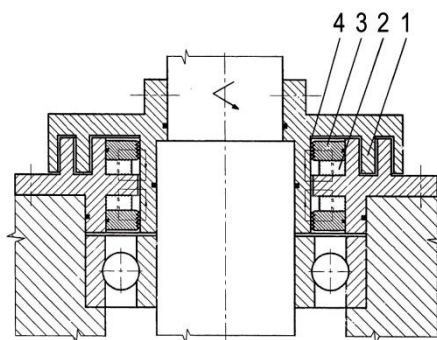
przytoczyć. W zależności od umiejscowienia występów uszczelniających można wyróżnić kilka charakterystycznych wariantów konstrukcyjnych uszczelnień wielowystępowych przedstawionych na rys.2.15:

- z występami uszczelniającymi na nabiegunnikach
- z występami uszczelniającymi na wale
- z występami uszczelniającymi na tulei magnetycznej osadzonej na wale
- z występami uszczelniającymi na nabiegunnikach i na wale



Rys.2.15. Podstawowe postacie konstrukcyjne wielowystępowych uszczelnień z cieczą magnetyczną: 1- magnes trwały, 2,3- nabiegunniki, 4-ciecz magnetyczna, 5,6- pierścienie uszczelniające, 7- występ uszczelniający, 8- wał, 9- tuleja magnetyczna [82]

W pewnych szczególnych warunkach, można uszczelnienia z cieczą magnetyczną łączyć się z uszczelnieniami tradycyjnymi, tworząc tzw. uszczelnienia hybrydowe. Głównym zadaniem uszczelnień tradycyjnych (np. labiryntowych, dławicowych, itp.), jest wtedy wstępne odseparowanie mechanicznych zanieczyszczeń [48]. Przykład takiego uszczelnienia pokazano na rys.2.16, w którym uszczelnienie z cieczą magnetyczną jest zespolone z uszczelnieniem labiryntowym [116]. Inne rozwiązania tego typu, różnych odmian i rodzajów, można znaleźć w wielu publikacjach i patentach m.in. [36,82,90,109,110].



Rys.2.16. Uszczelnienie hybrydowe z cieczą magnetyczną wału pionowego:
 1- uszczelnienie labiryntowe, 2- magnes trwały, 3 - wielokrawędziowe nabiegunki,
 4 - ciecz magnetyczna, [116]

Uszczelnienia z cieczami magnetycznymi otworzyły szereg możliwości aplikacji w warunkach gdzie inne uszczelnienia nie zdawały egzaminu. Obecnie w uszczelnieniach z cieczami magnetycznymi zastosowanie znajdują przede wszystkim ciecze ferromagnetyczne (ferrofluids), [5,6]. Charakteryzują się one małymi oporami tarcia i doskonałą szczelnością, także w warunkach wysokiej próżni przy zastosowaniu odpowiedniej bazy cieczy ferromagnetycznej. Do podstawowej wady tych uszczelnień można zaliczyć możliwość uszczelniania jedynie niewielkich ciśnień czynnika uszczelnianego.

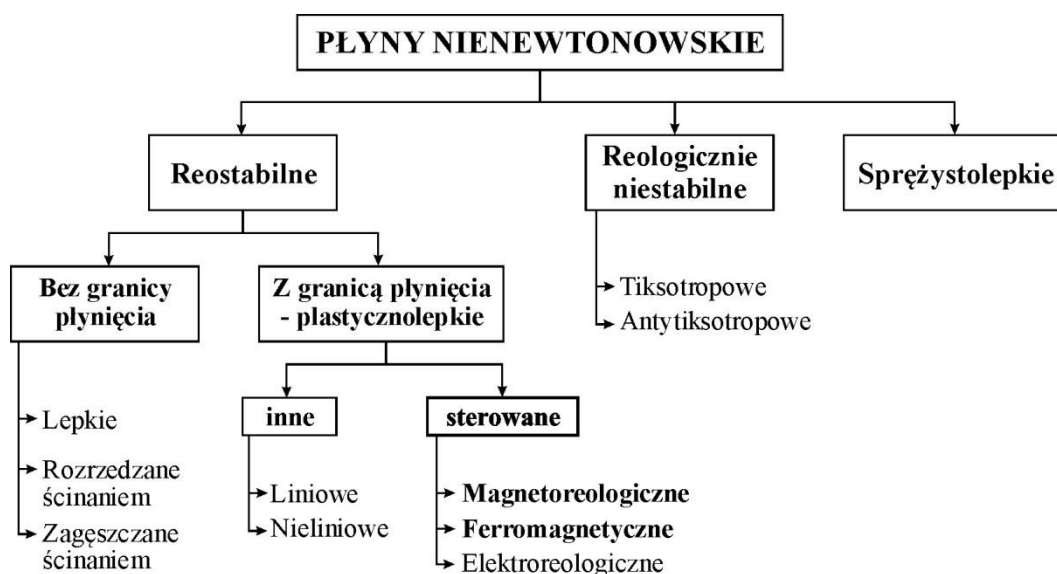
Aby właściwie postrzegać funkcjonalność i możliwości uszczelnień z cieczami magnetycznymi konieczna jest znajomość podstawowych rodzajów, właściwości i zachowania się cieczy magnetycznych.

3. CIECZE MAGNETYCZNE

Wytworzenie pierwszych cieczy magnetycznych w latach 40-tych XXw. przypisuje się Jacobowi Rabinowi z US National Bureau of Standards, który zapoczątkował badania nad cieczami zmieniającymi swoje właściwości w polu magnetycznym. Natomiast za twórcę cieczy magnetycznej, jako stabilnej zawiesiny koloidalnej, uważa się R. E. Rosensweig'a z USA. Do dalszego rozwoju cieczy tego rodzaju, początkowo w zastosowaniach jedynie militarnych, przyczyniły się prace badawcze prowadzone w USA, w dawnym ZSRR, Japonii, Francji, Wielkiej Brytanii i Rumunii, [37,62].

3.1. Budowa i właściwości cieczy magnetycznych

Ciecze magnetyczne należą do sterowanych płynów plastyczno-lepkich, będących reostabilnymi cieczami nienewtonowskimi, które charakteryzują się określoną granicą płynięcia (rys.3.1.), [37].

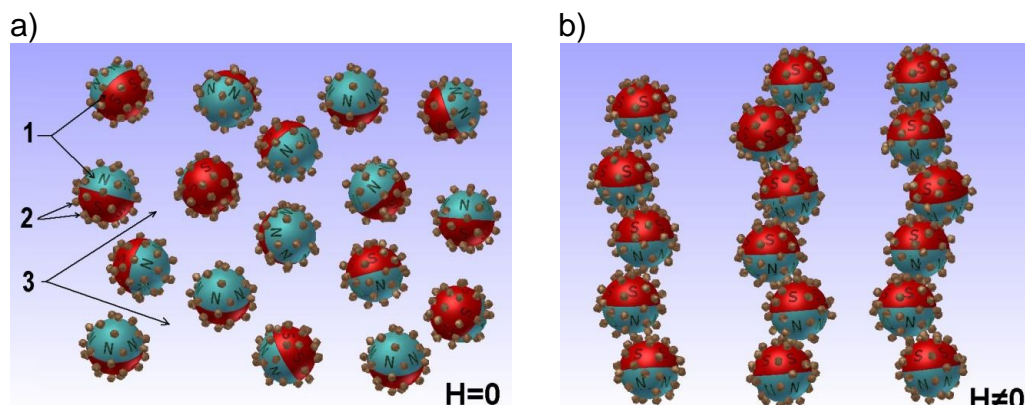


Rys.3.1. Ogólna klasyfikacja płynów nienewtonowskich [29]

Przy braku oddziaływania pola magnetycznego ciecze te zachowują się jak zwykła ciecz newtonowska, natomiast w obecności pola następuje zmiana ich lepkości i granicy płynięcia.

Ciecz magnetyczna składa się z trzech podstawowych składników, przedstawionych poglądowo na rys.3.2, są to: ciecz nośna, cząsteczki

ferromagnetyczne oraz ochronna powłoka powierzchniowa zwana surfaktantem.



Rys.3.2. Ciecz magnetyczna: a) bez oddziaływania pola magnetycznego: 1– cząsteczki ferromagnetyku, 2– ochronna powłoka powierzchniowa, 3– ciecz nośna, b) w jednorodnym polu magnetycznym

Ciecze magnetyczne są koloidalną zawiesiną cząstek ferromagnetycznych w cieczy nośnej (osnowie), którą najczęściej jest olej syntetyczny lub lekki olej mineralny. Jako ciecz nośną stosuje się także węglowodory, wodę, pochodne fluorowe węglowodorów, estry, diestry, związki metaloorganiczne, polifenyloetery itd. Mogą też być stosowane praktycznie wszelkie ciecze, będące obojętne magnetycznie, posiadające niską prężność par (odparowalność) i spełniające określone wymagania, co do gęstości, lepkości, temp. krzepnięcia i innych, uzależnionych od przeznaczenia i warunków użytkowania cieczy magnetycznej, [84].

Cząsteczki ferromagnetyczne pokryte są monomolekularną warstewką środka powierzchniowo aktywnego, np. kwasu oleinowego. Powłoka ta zapobiega koagulacji i sedymentacji spowodowanych istnieniem sił Van der Waalsa, przyciągania magnetycznego i grawitacji, [36,37,57]. Bez tej powłoki cząstki ferromagnetyczne przy dostatecznym zbliżeniu, mają tendencję do łączenia się w większe kompleksy. Ulegają wówczas przyspieszonej sedymentacji. Średnia prędkość ruchów Browna takich zbitych grup cząstek jest niewystarczająca, żeby skutecznie przeciwdziałać sedymentacji. Te specjalne substancje powierzchniowo czynne tworzą bardzo cienkie jedno- lub dwucząsteczkowe warstewki ochronne wokół cząstek ferromagnetycznych, nie dopuszczając do zbytowego zbliżenia się cząstek i ich aglomeracji, [3].

Ze względu na budowę cieczy magnetycznych wyróżnia się dwa podstawowe ich rodzaje:

- 1) Ciecze ferromagnetyczne (ferrofluids - FF) – *Ferrociecze*, które w literaturze niekiedy nazywane są *cieczami nanomagnetycznymi*.
- 2) Ciecze magnetoreologiczne (magnetorheological fluid – MRF) – *ciecze MR*, lub ciecze *mikromagnetyczne*

Spotykane w literaturze nazewnictwo cieczy tego rodzaju nie jest jednoznaczne i często terminy „ciecze magnetyczne” i „ciecze magnetoreologiczne” stosowane są przemiennie, [33,37,40]. Termin "magnetoreologiczna" podkreśla, że główną cechą cieczy jest zmiana właściwości reologicznych w zależności od działającego na nią pola magnetycznego. Natomiast nazwa cieczy "magnetyczna" wskazuje, że główną cechą tej cieczy jest jej podatność na działanie pola magnetycznego.

Można zatem przyjąć, że nazwa "ciecz magnetyczna" jest bardziej uniwersalna, dlatego, za bardzo dobry można uznać, wskazany powyżej, podział cieczy o właściwościach magnetycznych na: "ferromagnetyczne" (nanomagnetyczne) i "magnetoreologiczne" (mikromagnetyczne). Ciecze ferromagnetyczne nie wykazują zbyt dużych zmian właściwości reologicznych pod wpływem pola magnetycznego i nie cechują się wyraźną granicą płynięcia [28], a ich dominującą cechą jest trwałość tworzonego przez nie układu koloidalnego. Ciecze magnetoreologiczne z kolei wykazują znaczące zmiany właściwości reologicznych pod wpływem pola magnetycznego. Ich lepkość znacząco wzrasta, i posiadają wówczas wyraźną granicę płynięcia. Nie tworzą one natomiast trwałego układu koloidalnego i po pewnym czasie następuje rozdzielenie fazy magnetycznej (cząstek magnetycznych) od fazy nośnej niemagnetycznej.

Różnorodność cech tych dwóch rodzajów cieczy predysponuje je oczywiście do różnych zastosowań.

Należy jednak pamiętać, że zawsze występują pewne odstępstwa od klasyfikacji tego typu i mogą się zdarzyć ciecze FF o silnych reakcjach reologicznych na pole magnetyczne oraz ciecze MR tworzące trwałe układy koloidalne, a także takie ciecze, których właściwości plasują je pomiędzy cieczami FF i MR.

Ciecze ferromagnetyczne – FF

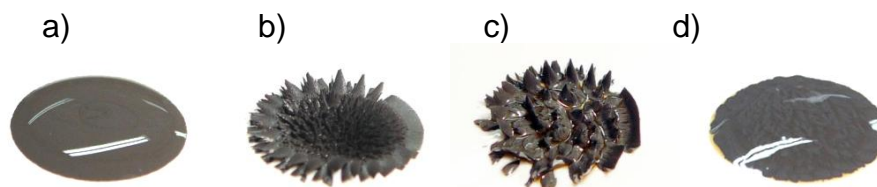
Cząsteczki ferromagnetyczne w takiej cieczy występują w rozmiarach rzędu 3nm do 15nm, co pozwala na uzyskanie jednorodnej cieczy i przez ich znikomą masę, uniezależnienie od sedymentacji grawitacyjnej. Zmniejszenie cząsteczek do tych wielkości powoduje osłabienie właściwości magnetycznych. Jednak utrzymanie średnic cząsteczek w wąskim zakresie zapewnia dużą stabilność właściwości magnetycznych takiej cieczy. Cząstki ferromagnetyczne, wykonane są zwykle z tlenku żelaza Fe_3O_4 . Ich zawartość w cieczy wynosi od 2% do 15%. Skład objętościowy typowej cieczy FF to ok. 5% cząsteczek ferromagnetycznych, 10% to ich powłoki ochronne, a pozostałe 85% stanowi ciecz nośna. Przy zastosowaniu cieczy nośnej o niskiej zdolności parowania ciecze ferromagnetyczne cechuje duża trwałość. Dzięki ruchom termicznym bardzo małych cząstek ferromagnetycznych w cieczy nośnej, nie występuje w nich zjawisko aglomeracji i opadania cząstek na dno zbiornika niezależnie od długotrwałego pozostawienia cieczy w bezruchu. Wartość maksymalnego indukowanego w cieczy FF naprężenia stycznego nie przekracza 5kPa, a jej lepkość w zależności od rodzaju cieczy nośnej i koncentracji cząstek może przyjmować bardzo szeroki zakres i wynosić od 5 do 25000 mPa·s. Nasycenie magnetyczne cieczy jest jednak ograniczone do wartości od 0,005 do 0,13T, z powodu maksymalnej magnetyzacji domen magnetycznych wynoszącej ok. 0,6T. Wartość nasycenia magnetycznego ustalana jest w zależności od warunków pracy. Według danych Ferrolabs, jednego z głównych producentów tych cieczy, magnetyzacja nasycenia wynosi ok. 20÷60 kA/m, a w niektórych przypadkach nawet mniej [94]. Ciecze FF mogą pracować w szerokim zakresie temperatur (od -65°C do 200°C) i ciśnień, także w warunkach próżni. Istotną cechą jest, że w tym zakresie temperatur magnetyzacja cieczy nie jest zależna od zmian temperatury, [37,57,74].

Podstawowe zastosowania cieczy ferromagnetycznych wiążą się z budową uszczelnień, znajdują zastosowanie m.in. do uszczelnienia dysków komputerowych (HDD), napędów optycznych (CD, DVD) i uszczelnień pomp krwi. Stosowane są także w medycynie jako nośniki leków, czynnik kontrastujący w badaniu rezonansem magnetycznym i do zwalczania

nowotworów. Wykorzystywane są również do poprawienia charakterystyk pracy głośników i silników elektrycznych oraz jako środek smarny itd. [52,62,67,70].

Ciecze magnetoreologiczne – MR

Ciecze magnetoreologiczne mają zbliżoną budowę do cieczy ferromagnetycznych, ale średnica cząstek jest w nich rząd wielkości większa i wynosi od $0,5\mu\text{m}$ do $10\mu\text{m}$. Zawartość procentowa cząsteczek w cieczy wynosi od 20% do 85%. Taka zawartość cząstek wpływa na znaczne wartości magnetyzacji nasycenia wynoszące w granicach do ok. $600\text{--}700\text{kA/m}$, [94]. Ciecz zachowuje swoje właściwości w zakresie temperatur od -50° do 150°C . Podstawową cechą cieczy MR są duże zmiany jej lepkości już przy stosunkowo niewielkim polu magnetycznym. Przy natężeniach zewnętrznego pola magnetycznego od 150 do 250 kA/m w cieczy MR występują naprężenia styczne na poziomie od 50 do 250 kPa , co powoduje, że z „gęstawej” cieczy przeistacza się w masę o konsystencji „masła”. Przy braku zewnętrznego pola ciecz MR przypomina konsystencją zwykły olej silnikowy. Na rys.3.3 pokazano kroplę cieczy MR rozlaną na płaszczyźnie, w stanie swobodnym i pod działaniem zewnętrznego pola magnetycznego, [29,37].



Rys.3.3. Kropla cieczy magnetoreologicznej typu MRF-122EG
a) postać cieczy bez pola magnetycznego; b),c) reakcja cieczy MR pod działaniem pola magnetycznego (w różnej odległości od źródła pola); d) po odsunięciu od pola magnetycznego

Ze względu na bardzo krótki czas reakcji cieczy MR na zmianę pola, można je stosować w układach wymagających dużej dynamiki. W ciągu mikrosekund jest możliwa zmiana lepkości cieczy zarówno przy zmniejszaniu jak i zwiększaniu natężenia pola magnetycznego. Kolejnym czynnikiem przemawiającym na korzyść cieczy MR jest jej niski koszt wytwarzania, co powoduje, że jest ona znacznie tańsza od cieczy FF. Negatywną cechą cieczy magnetoreologicznej jest jednak to, że ze względu na wielkość cząstek, po dłuższym pozostawieniu jej w bezruchu cząstki ferromagnetyczne ulegają sedymentacji grawitacyjnej, osiadając na dnie zbiornika. Właściwości cieczy MR mogą być kształtowane

w szerokim zakresie, zmieniając ich indukcję nasycenia, właściwości smarne i chłodzące. Możliwe jest to, dzięki stosowaniu różnych materiałów magnetycznych i cieczy nośnych w trakcie ich wytwarzania.

Dzięki unikatowym właściwościom cieczy magnetoreologiczne znalazły bardzo szerokie zastosowania przemysłowe, [37,57,74]. W obecnych zastosowaniach służą w przede wszystkim do kontrolowanego rozpraszania energii lub jej przekazywania w urządzeniach mechanicznych. Największą grupę stanowią sterowane tłumiki drgań, pochłaniacze energii uderzeń, urządzenia mocujące oraz urządzenia odpowiedzialne za przekazywanie momentu obrotowego (sprzęgła). Praktycznym przykładem może być półaktywny system kontroli samochodowego zawieszenia o nazwie MagneRide firmy Delphi [105] lub Tłumik sejsmiczny MRD-9000 amerykańskiej firmy LORD do tłumienia drgań budynków podczas trzęsienia ziemi [71]. Prace badawcze nad zastosowaniem cieczy MR zakresie aktywnych układów tłumienia drgań prowadzone są od kilku lat w Akademii Górniczo-Hutniczej w Katedrze Automatyzacji Procesów, [63,64,65,66].

Ciecze MR wykorzystuje się również jako precyzyjne narzędzia skrawające, środki polerskie (np. w optyce) lub elementy aktywne w systemach dotykowych [28,29,57].

Ciecze magnetoreologiczne przeznaczone do zastosowań komercyjnych muszą charakteryzować się szeregiem określonych właściwości. Do najważniejszych zalicza się: małą lepkość przy braku pola magnetycznego, wysoką granicę płynięcia w warunkach oddziaływania pola magnetycznego (szczególnie dla obciążeń zmiennych), krótki czas reakcji, szeroki zakres temperatur pracy, minimalny efekt sedymentacji i łatwość rozmieszania do ponownego ujednorodnienia [28].

Tab.3.1. Najczęściej spotykane składniki i właściwości cieczy MR [32]

Składnik cieczy MR	Rodzaj materiału
Cząstki magnetyczne	żelazo, ferryty, stop żelazo-kobalt
Ciecz nośna	oleje: mineralny, syntetyczny, półsyntetyczny, węglowodorowy, silikonowy oraz woda
Parametr	Wartość
Kształt i wielkość magnetycznych cząstek	zbliżony do kulistego, o średnicy 0,1 – 10 μm
Zawartość cząstek w cieczy	≈ 80 % wagowo
Gęstość	3 – 4 g/cm^3
Temperatura pracy	od -40 do $+150$ $^{\circ}C$ (zależna od cieczy nośnej)
Przewodność cieplna	0,2 – 3,6 $W/m^{\circ}C$
Lepkość przy braku pola	0,1 – 10 $Pa s$ (dla niskich prędkości ścinania)
Maksymalne pole magnetyczne	250 kA/m (ograniczenie nasyceniem)
Maksymalne naprężenie, granica płynięcia	50 – 250 kPa
Maksymalna gęstość energii	0,1 J/cm^3
Czas reakcji	poniżej 10 ms

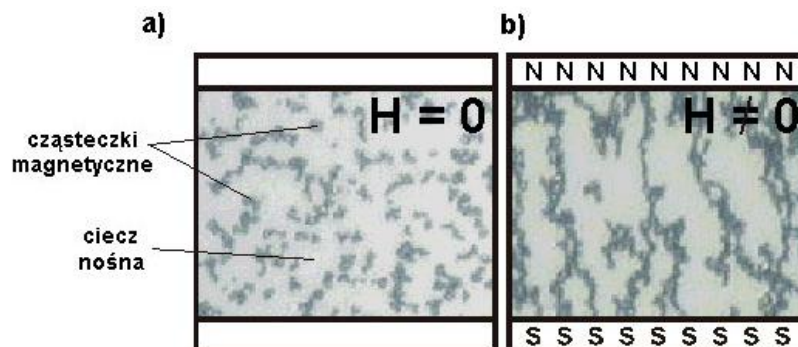
Istnieje wiele rodzajów cieczy magnetoreologicznych różniących się budową i składem. Część z nich jest dostępna komercyjnie, np. od firmy LORD producenta takich cieczy: MRF-122EG, MRF-132DG, MRF-140CG [99].

Znacząca ilość rozwiązań chronionych jest też patentami (np. US Patents: 5505880, 5906767, 6203717, 6787058, 6824700), [28].

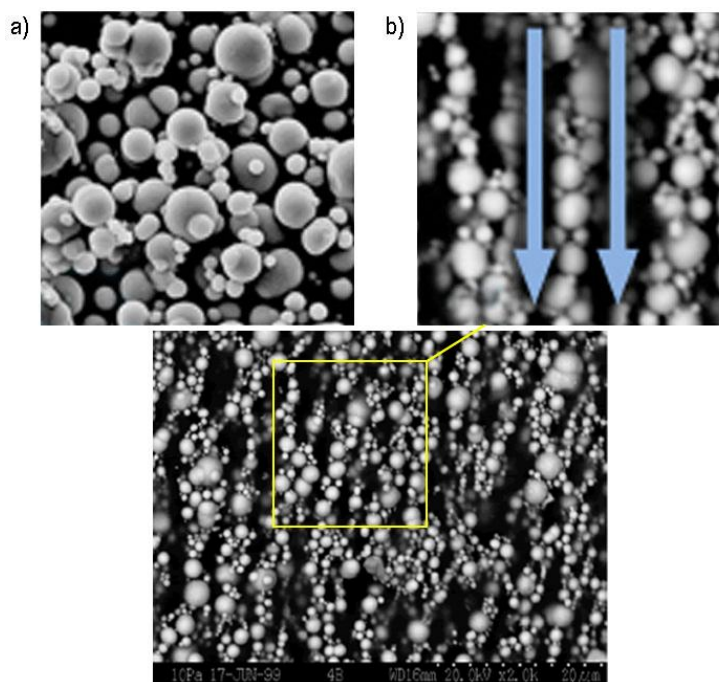
Aktualnie na rynku światowym dostępnych jest ok. 30 rodzajów cieczy magnetoreologicznych różnych producentów. Najbardziej rozpowszechnione są ciecze produkowane seryjnie od ponad 25 lat przez amerykańską firmę LORD [100]. Spośród innych producentów cieczy MR można wymienić firmę Liquid Research Ltd (Anglia) i Ferrolabs (Rosja).

Ciecze magnetyczne obu rodzajów wykazują cechy materiałów idealnie miękkich magnetycznie. Ferromagnetyczne cząsteczki zawieszane w cieczy nośnej, stanowiące pojedyncze domeny magnetyczne, pod wpływem

zewnętrznego pola magnetycznego, tworzą skupiska cząsteczek w postaci łańcuchów, ulegając orientacji i koncentracji wzdłuż linii sił pola magnetycznego (rys.3.4 i rys.3.5). Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego cząsteczki ulegają rozproszeniu i ciecz przyjmuje swoją pierwotną postać.



Rys.3.4. Obraz formowania się łańcuchów cząstek ferromagnetycznych w cieczy magnetycznej pod wpływem pola: a) bez pola magnetycznego ($H=0$), b) w jednorodnym polu magnetycznym ($H \neq 0$), [8]



Rys.3.5. Zdjęcie cząstek ferromagnetycznych w cieczy MR (cząstki karbonylu żelaza w oleju mineralnym) wykonane skaningowym mikroskopem elektronowym a) bez pola magnetycznego, b) w jednorodnym polu magnetycznym (strzałki wskazują kierunek linii pola) [96,104]

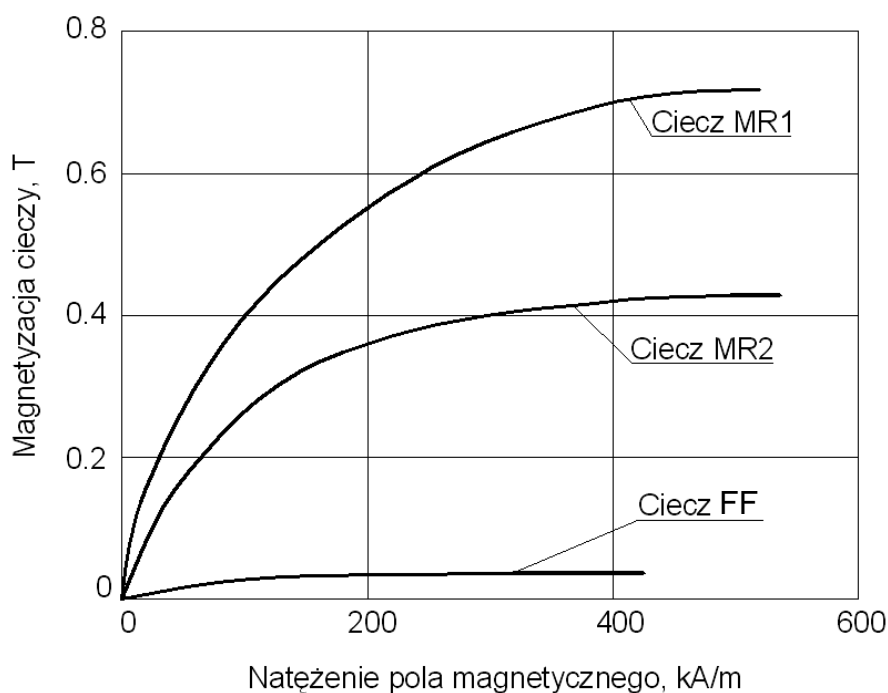
Im silniejsze pole magnetyczne – więc większa indukcja magnetyczna pola B – tym większe „naprężenie” łańcuchów utworzonych z ferromagnetycznych cząsteczek, a tym samym zwiększa się lepkość cieczy, [25].

W tabelicy (Tab.3.2) przedstawiono porównanie wybranych właściwości cieczy magnetoreologicznych (MR) i ferromagnetycznych (FF).

Tab.3.2. Wybrane właściwości cieczy magnetoreologicznych (MR) i ferromagnetycznych (FF)

Cecha/Własność	Ciecze MR	Ciecze FF
Ciecz nośna	olej węglowodorowy, olej silikonowy, woda	olej mineralny, olej syntetyczny, ester, polifenyl, woda
Materiał cząstek	żelazo	tlenek żelaza, np. Fe ₃ O ₄
Wielkość cząstek	0,1 ÷ 10 µm	<10 nm
Gęstość, [g/cm ³]	3 ÷ 5	1 ÷ 2
Współczynnik lepkości, [Pa·s] (bez pola magnetycznego)	0,05 ÷ 0,3	0,002 ÷ 0,05
Maksymalna granica płynięcia, [kPa]	100	10
Udział objętościowy cząstek, [%]	do 50	do 10
Zakres temperatury pracy, [°C]	- 40 ÷ 130	-65 ÷ 200
Magnetyzacja nasycenia, [kA/m]	300 ÷ 600	30 ÷ 60
Wymagane pole magnetyczne, [kA/m]	~250	~80
Sposób wywołania pola magnetycznego	elektromagnes i/lub magnes stały	magnes stały
Funkcjonalność	kontrolowane naprężenie styczne	kontrolowany przepływ cieczy

Przykładowe charakterystyki magnesowania cieczy ferromagnetycznej i magnetoreologicznej przedstawiono na rys.3.6, [16]. Pokazują one, że obie ciecze są materiałem niemal doskonale miękkim magnetycznie. Ciecz magnetoreologiczna w porównaniu z cieczą ferromagnetyczną wykazuje kilkakrotnie większą magnetyzację przy tym samym natężeniu pola magnetycznego.



Rys.3.6. Krzywe magnetyzacji cieczy magnetoreologicznej (MR) i ferromagnetycznej (FF)
 Ciecz MR1: cząstki żelaza o wielkości 4,0-5,3 μm , objętość w cieczy MR: 35%
 Ciecz MR2: cząstki żelaza o wielkości 10 nm, objętość w cieczy MR: 35%
 Ciecz FF: cząstki magnetytu o wielkości 10nm, objętość w cieczy FF: 10%, [16]

Przytoczone charakterystyki i porównanie właściwości cieczy magnetycznych obu rodzajów wykazują ogólne podobieństwo ich zachowania pod działaniem pola magnetycznego, ale też ujawniają szereg różnic pomiędzy nimi.

W odniesieniu do cieczy magnetoreologicznych, w aspekcie uszczelnień, najistotniejszą z tych różnic w pozytywnym rozumieniu jest znacznie wyższa magnetyzacja nasycenia. Różnicą negatywną natomiast jest niewątpliwie mniejsza stabilność cieczy i jej podatność na sedymentację. Ta charakterystyka budowy i właściwości cieczy potwierdza słuszność prowadzenia prac badawczych zmierzających w kierunku aplikacji cieczy magnetoreologicznych do uszczelnień.

Ciecze magnetoreologiczne i ferromagnetyczne stanowią tą samą grupę sterowalnych płynów nienewtonowskich, podobnie zachowujących się pod działaniem pola magnetycznego. W efekcie tego do ich opisu stosowane są takie same modele reologiczne, [28].

3.2. Modele reologiczne cieczy magnetycznych

Złożone właściwości reologiczne wytwarzanych przemysłowo cieczy, w tym cieczy magnetycznych, wymusiły rozwój badań nad reologią i mechaniką tych płynów. Ciecze te nie spełniają podstawowego prawa Newtona, co klasyfikuje je do grupy płynów nienewtonowskich. Ciecze takie, charakteryzują się brakiem stałej wartości lepkości w danej temperaturze i ciśnieniu, a w ogólnym przypadku ich lepkość zależy od szybkości i czasu ścinania, [13]. Idealne ciała stałe odkształcają się w sposób sprężysty, natomiast idealne ośrodki płynne, jak ciecze i gazy, nieodwracalnie się deformują (płyną). Występujące ciała rzeczywiste nie są idealne i tylko nieliczne ciecze zachowują się w sposób zbliżony do idealnych [13,29].

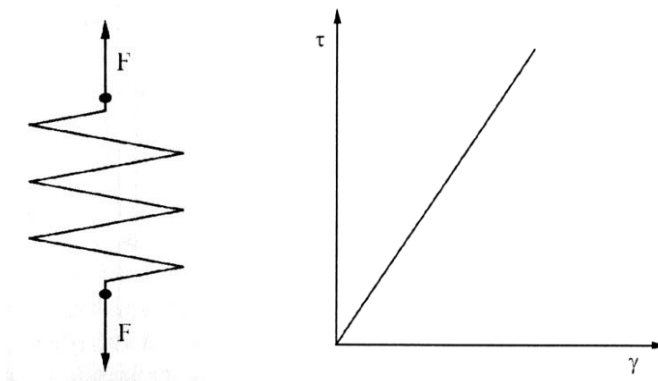
W ramach płynów nienewtonowskich wyodrębniono dwie grupy płynów: płyny reologicznie stabilne, których właściwości nie zależą od czasu, i reologicznie niestabilne, które zmieniają swoje właściwości w czasie ścinania. [13].

Zachowanie i właściwości płynów nienewtonowskich przybliżyć można poprzez zastosowanie modeli mechanicznych. Są one kombinacją podstawowych modeli reologicznych ciał doskonałych:

- ciało doskonale sprężyste Hooke'a,
- ciało doskonale plastyczne St.Venanta,
- płyn doskonale lepki Newtona.

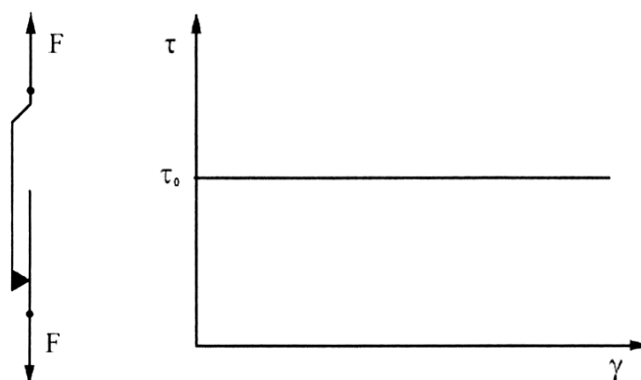
Modele te obrazują pod względem jakościowym dane ciało reologiczne, przedstawiając podstawową zależność, wydłużenia ciała w funkcji przyłożonej siły, czyli analogicznie zależność odkształcenia w funkcji naprężenia, [13,37].

Modelem mechanicznym ciała doskonale sprężystego Hooke'a jest bezmasowa sprężyna, dla której przyłożenie siły wywołuje natychmiastowe odkształcenie, a jej odjęcie powoduje natychmiastowy powrót do pierwotnego kształtu (rys.3.7). Charakterystyka reologiczna ciała doskonale sprężystego wskazuje na proporcjonalność między naprężeniem a odkształceniem.



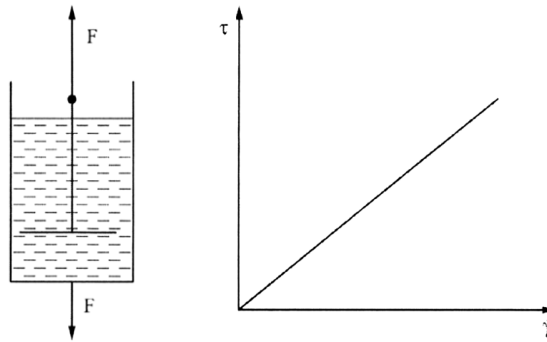
Rys.3.7. Model ciała doskonale sprężystego Hooke'a i charakterystyka reologiczna $\tau(\gamma)$ [13]

Ciało doskonale plastyczne St. Venanta można opisać modelem mechanicznym suwaka przesuwającego się z tarciem po płaskiej powierzchni. Odkształcenie (ruch suwaka) nastąpi jeżeli przyłożona siła będzie większa od siły tarcia statycznego. Odjęcie siły spowoduje zatrzymanie odkształcenia ale nie powróci ono do stanu pierwotnego (rys.3.8).



Rys.3.8. Model ciała doskonale plastycznego St. Venanta i charakterystyka $\tau(\gamma)$ [13]

Modelem mechanicznym płynu doskonale lepkiego Newtona jest tłumik hydrauliczny w postaci tłoka zanurzonego w naczyniu z lepką cieczą (rys.3.9). Przyłożenie dowolnie małej siły wywołuje ruch tłoka z odpowiednią prędkością, ale jej odjęcie nie spowoduje powrotu do pierwotnego położenia. Siła jest proporcjonalna do szybkości ruchu, czyli naprężenie styczne płynu jest proporcjonalne do szybkości odkształcenia.



Rys.3.9. Model płynu doskonale lepkiego Newtona i charakterystyka $\tau(\dot{\gamma})$ [13]

Ciecze magnetyczne ze względu na swoje specyficzne właściwości nastroczają zasadniczych trudności w zastosowaniu modelu umożliwiającego opis materiału, który w bardzo krótkim czasie może zamiennie wykazywać cechy ciała stałego oraz cieczy. Modele słuszne dla opisu uogólnionych cieczy newtonowskich nie odwzorowują nieliniowych zależności wynikających z wpływu zewnętrznego pola magnetycznego, przez co są niewystarczające. Do opisu cieczy magnetycznych wprowadzono konstytutywne modele reologiczne, z których najistotniejsze to Model Bingham, Cassona i Herschela-Bulkleya. Podjęto także próby wprowadzenia innego modelu (model McKinleya), nie bazującego na znanych modelach newtonowskich [28].

Model Bingham

Model Bingham jest modelem opisującym właściwości cieczy i materiałów magnetoreologicznych, który występuje w literaturze najczęściej. Należy on do grupy modeli odcinkowo-liniowych powstałych z połączenia elementów sprężystych, lepkich oraz sztywno-plastycznych, [10,17].

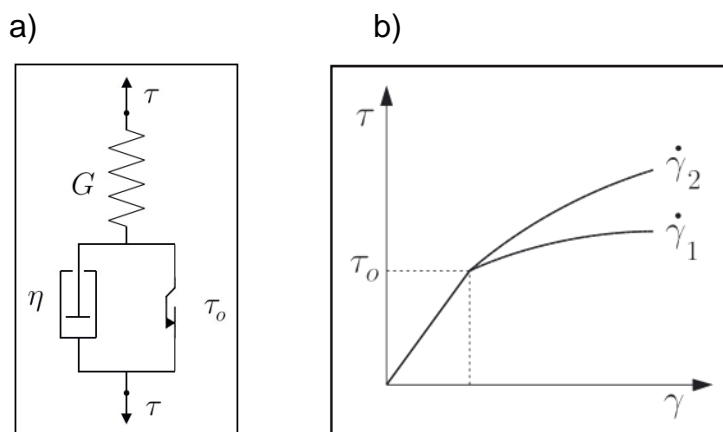
Model ciała Bingham, w swojej podstawowej formie opisuje właściwości materiału sprężysto/lepkoplastycznego, który charakteryzują dwa obszary naprężeń stycznych, rozdzielone granicą płynięcia τ_o , [28,69]

$$\tau = G\gamma \quad \text{dla } \tau < \tau_o \quad (3.1)$$

$$\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma} \quad \text{dla } \tau \geq \tau_o \quad (3.2)$$

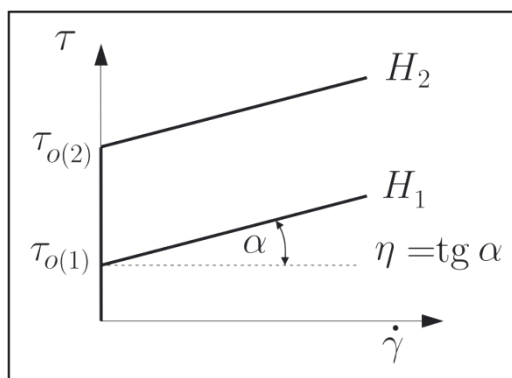
gdzie: τ – naprężenie
 G – moduł Kirchhoffa
 γ – odkształcenie postaciowe
 η – współczynnik lepkości dynamicznej
 τ_o – granica płynięcia
 $\dot{\gamma}$ – szybkość odkształcenia (ścianania)

Model reologiczny dla ciała Binghama przedstawiono na rysunku (rys.3.10). Granica płynięcia τ_o , określa punkt, powyżej którego w materiale zaczynają występować odkształcenia plastyczne oraz efekty lepkie. Poniżej τ_o ciało Binghama zachowuje się tak samo, dla różnych wartości prędkości ($\dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$). Efekty lepkie w materiale opisywane są za pomocą współczynnika lepkości η , jak dla typowej cieczy Newtona, [28].



Rys.3.10. Materiał Binghama, [28] a) Model reologiczny, b) Charakterystyka $\tau(\gamma)$ dla dwóch prędkości odkształcania ($\dot{\gamma}_2 > \dot{\gamma}_1$)

W przypadku cieczy magnetoreologicznych istotną rolę odgrywa oddziałujące pole magnetyczne H , które wpływa na wartość granicy płynięcia τ_o . Przy wzroście wartości pola magnetycznego H , następuje wzrost wartości τ_o . Zależność τ_o od H jest liniowa w zakresie do osiągnięcia zjawiska nasycenia cieczy MR, [28].



Rys.3.11. Charakterystyka $\tau(\dot{\gamma})$ materiału Binghama poszerzona o zależność $\tau(H)$ jak dla cieczy MR. Przebiegi dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego $H_2 > H_1$ [28]

Zachowanie cieczy magnetoreologicznych, charakteryzuje się występowaniem różnego rodzaju nieliniowych zjawisk, wynikających w dużej mierze z nienewtonowskich właściwości cieczy MR. Model Binghama, będąc pewnym

uproszczeniem, nie jest w stanie ich wszystkich opisać. Model ten dobrze opisuje zmiany naprężenia stycznego w funkcji szybkości odkształcania przy ścinaniu w zależności od pola magnetycznego, w zakresie liniowej części charakterystyki [28,37]:

$$\tau = \tau_o(B) + \eta\dot{\gamma} \quad (3.3)$$

gdzie:

- τ – naprężenia styczne w cieczy,
- $\tau_o(B)$ – graniczne naprężenia styczne,
- η – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy,
- $\dot{\gamma}$ – szybkość odkształcania (ścianania)

Mimo ograniczeń, model Bingham w swojej podstawowej formie jest z powodzeniem wykorzystywany do projektowania urządzeń z cieczami MR, [28,34].

Model Crossa

Model Crossa obejmuje zakres charakterystyki $\tau(\dot{\gamma})$ dla szybkości odkształcania $\dot{\gamma} < 10s^{-1}$. W przypadku tak niskich szybkości odkształcania model Bingham nie odzwierciedla dobrze zachowania się cieczy magnetoreologicznych. W tym zakresie charakterystyka staje się nieliniowa i zanika punkt granicy płynięcia. Dla uwzględnienia tego zjawiska znajduje zastosowanie model Crossa, [11,28]:

$$\tau = \left[\eta_\infty + \frac{\eta_o - \eta_\infty}{1 + \lambda\dot{\gamma}} \right] \dot{\gamma} \quad (3.4)$$

- gdzie: η_o – współczynnik lepkości dynamicznej dla małych szybkości ścianania
 η_∞ – współczynnik lepkości dynamicznej dla dużych szybkości ścianania

Modele Cassona i Herschela-Bulkleya

Przy znacznych wartościach szybkości ścianania $\dot{\gamma}$ występuje zjawisko spadku lepkości cieczy MR. W przypadkach przepływu cieczy z dużymi prędkościami przez otwory o niewielkich rozmiarach może mieć istotne znaczenie znajomość zachodzących zjawisk, które nie są uwzględniane przez model Bingham [12,28].

Do opisu zjawiska spadku lepkości cieczy MR ze wzrostem szybkości ścianania literatura podaje modele Cassona oraz Herschela-Bulkleya [11,27,87]. Modele

te zbliżone są do modelu Bingham, ale uwzględniają nienewtonowskie właściwości cieczy MR, jak zmiany kształtu przebiegu funkcji $\tau(\dot{\gamma})$, [11,28].

Model Cassona

$$\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_o^{\frac{1}{2}} (\eta\dot{\gamma})^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Model Herschela-Bulkleya

$$\tau = \tau_o + (C\dot{\gamma})^p \quad (3.6)$$

gdzie: p – oznacza dodatni współczynnik

C – parametr zgodności

Model McKinleya

Model McKinleya został wprowadzony dla cyklicznych odkształceń ścinających o dużych amplitudach. Model ten nie bazuje na modelach cieczy newtonowskich, jest to odrębny nieliniowy, sprężysto-plastyczny model konstytutywny, dla którego zaproponowano krzywą płynięcia wprowadzając dodatkowy parametr wewnętrzny zależny od czasu $\Delta(t)$, [72]

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{t_1 G} [\tau - G\Delta(t)] \quad (3.7)$$

gdzie: t_1 – czas relaksacji

C – parametr zgodności

$\Delta(t)$ – parametr wewnętrzny wyznaczany na podstawie analizy kinetyki procesu

Model McKinleya, według autorów dość dobrze odzwierciedla wyniki eksperymentalne, ale autorzy nie podają zależności jego parametrów od pola magnetycznego, [28,72]

Specyficzna budowa cieczy magnetoreologicznych wpływa na zmianę ich fizycznych właściwości, powodując że zależność naprężenia stycznego od szybkości ścinania może być zależnością liniową (ciecz newtonowska), przy braku pola magnetycznego, lub nieliniową (ciecz Bingham) pod działaniem pola, [20].

Spośród przytoczonych modeli reologicznych w zakresie oddziaływania pola magnetycznego najczęściej zastosowanie znajduje model Bingham i stanowi on podstawę do dalszego modelowania parametrów cieczy magnetycznych.

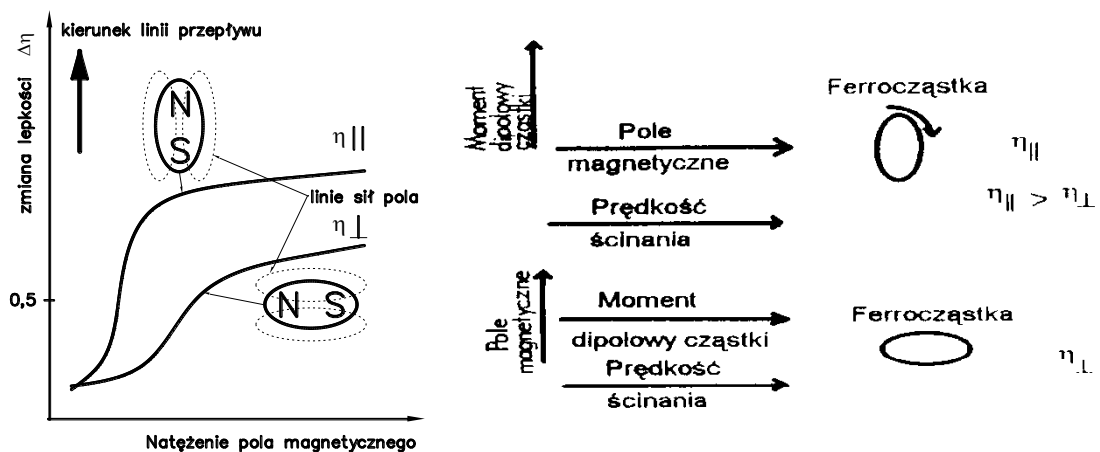
Należy zauważyć, że w przypadku cieczy magnetoreologicznych przy odpowiednio dużym natężeniu pola magnetycznego następuje gwałtowne zwiększenie współczynnika lepkości o kilka rzędów wartości i przejście do stanu quasi-stałego, co powoduje silne ograniczanie przemieszczania się cieczy bazowej. W wyniku tego powstaje faza, o bardzo zmniejszonej płynności, zbliżona do ciała stałego. Po przekroczeniu granicznych naprężeń stycznych struktura quasi-stała ulega niszczeniu i przechodzi w strukturę odpowiadającą fazie ciekłej, [84].

W pracach [83 i 84] przedstawiono trudny do zakwestionowania pogląd, że przy wzroście pola magnetycznego następuje potężowy wzrost współczynnika lepkości cieczy:

$$\eta = a H^b \quad (3.8)$$

gdzie:

- η – współczynnik lepkości dynamicznej
- H – natężenie pola magnetycznego
- a i b – stałe zależne od właściwości fizykochemicznych cieczy



Rys.3.12. Zmiany współczynnika lepkości cieczy magnetycznej w zależności od kierunku linii pola magnetycznego względem kierunku linii przepływu (kierunku ścinania), [83,84]

Według autora, wartości stałej b zależą także od kierunku linii sił pola w odniesieniu do kierunku ścinania (przepływu cieczy) i zawierają się w zakresie $1,5 \div 3$, co odpowiada za znaczne zmiany wartości współczynnika lepkości zależnie od kierunku działania pola magnetycznego (rys.3.12) [83,84].

4. CEL I TEZA PRACY

Celem niniejszej pracy jest określenie możliwości zastosowania cieczy magnetoreologicznej w uszczelnieniach i wyznaczenie parametrów granicznych dla ustalonych warunków pracy. W pracy skoncentrowano się na problematyce uszczelnień wałów obrotowych, jako najpowszechniej występującego układu ruchowego. Uszczelnienia ruchu obrotowego z cieczami magnetycznymi są obecnie jednymi z najbardziej innowacyjnych rozwiązań w technice uszczelniania. Pozwalają one na uzyskiwanie wysokiej szczelności pomiędzy obrotowym wałem i obudową, przy jednoczesnym zminimalizowaniu oporów ruchu.

W aplikacjach praktycznych wykonuje się przede wszystkim uszczelnienia z cieczami ferromagnetycznymi. Prace badawcze dotyczące tych uszczelnień prowadzone są także od wielu lat w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Wyniki tych prac są przedmiotem publikacji krajowych i zagranicznych m.in. [44,46,47,49,50,51,75,76], co wpłynęło na pozycję AGH jako jednego z wiodących ośrodków w tej dziedzinie w kraju.

Słabością uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną jest ich niska skuteczność przy wyższych ciśnieniach czynnika uszczelnianego, również koszt wytworzenia samej cieczy FF nie sprzyja ich powszechnemu stosowaniu [86]. Alternatywą dla cieczy ferromagnetycznych w technice uszczelniania może być zastosowanie cieczy magnetoreologicznych. Nie spotyka się jednak w światowej nauce wielu prac dotyczących ich zastosowania w tym zakresie. W uszczelnieniach z cieczami magnetycznymi wartości utrzymywanych ciśnień, a tym samym skuteczność uszczelniania, w dużej mierze zależą od magnetyzacji nasycenia cieczy. Ciecze magnetoreologiczne natomiast charakteryzują się znacząco wyższą magnetyzacją nasycenia niż ciecze ferromagnetyczne [34,37,99]. Wskazywałoby to na zasadność aplikacji cieczy magnetoreologicznych w uszczelnieniach tego typu. Na ograniczenie ich zastosowania mogą natomiast wpłynąć spodziewane wyższe opory tarcia, niż przy cieczach ferromagnetycznych, oraz tendencja do sedymentacji przy dłuższym bezruchu.

Obecnie w literaturze odnaleźć można zaledwie kilka publikacji o zastosowaniu cieczy MR do uszczelnień. Nieliczne prace badawcze

w zakresie możliwości takich zastosowań prowadzone były jedynie w Japonii [16] i Białorusi [19,22,23,24].

Istotnym zagadnieniem dla uszczelnień tego typu jest wyjaśnienie, w jaki sposób różne właściwości fizyczne cieczy magnetoreologicznej oraz cechy konstrukcyjne uszczelnienia, wpływają na ich parametry pracy. Za takie uznano, analogicznie do uszczelnień z cieczą FF, maksymalną szczelność, czyli wartość ciśnienia krytycznego (ciśnienia przebiccia), jakie może być utrzymane przez uszczelnienie, oraz opory ruchu (moment tarcia) uszczelnienia.

Analiza teoretyczna zamieszczona w rozdz.5 wskazuje, że ciśnienie krytyczne uszczelnienia z cieczą magnetyczną w warunkach statycznych zależy przede wszystkim od magnetyzacji nasycenia cieczy magnetycznej M_s oraz różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną wartością natężenia pola magnetycznego H_{max} i H_{min} (i indukcji magnetycznej B) w szczelinie roboczej. Rozkład natężenia pola magnetycznego (i indukcji), a także wartości H_{max} i H_{min} są zależne od geometrii występu uszczelniającego, wysokości szczeliny i energii układu magnetycznego.

Celem pracy jest wyznaczenie granicznych warunków pracy uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną przy ruchu obrotowym w warunkach nadciśnienia. Zagadnienie to będzie rozwiązane na drodze badań doświadczalnych z wykorzystaniem specjalnie w tym celu opracowanego i zbudowanego stanowiska badawczego.

W szczególności zamierzone jest wyznaczenie analitycznych zależności ciśnienia krytycznego w warunkach dynamicznych i oporów tarcia, dla różnych wysokości szczeliny i objętości cieczy MR w obecności pola magnetycznego.

W pracy rozpatrzona zostanie możliwość zastosowania cieczy MR do uszczelnień wałów obrotowych przez:

- 1) Określenie podstawowych parametrów pracy uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną w postaci ciśnienia krytycznego i momentu oporu ruchu.
- 2) Analizę teoretyczną i opracowanie modelu uszczelnienia z cieczą MR oraz wyznaczenie zależności na ciśnienie krytyczne i moment tarcia w funkcji wysokości szczeliny, natężenia pola magnetycznego i objętości cieczy znajdującej się w szczelinie roboczej.

- 3) Porównanie ciśnień granicznych i oporów ruchu uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną oraz ciśnień granicznych i oporów ruchu uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną.

Teza

Analiza dostępnej literatury oraz sformułowane uprzednio cele pracy uzasadniają przyjęcie poniższych tez pracy:

Jako tezę podstawową przyjęto:

możliwe jest efektywne zastosowanie cieczy magnetoreologicznej w uszczelnieniu wałów obrotowych, jako alternatywy cieczy ferromagnetycznej.

Tezą pomocniczą jest:

zastosowanie cieczy magnetoreologicznej w uszczelnieniu pozwala na uzyskanie wyższych ciśnień krytycznych w porównaniu z cieczą ferromagnetyczną, dla tych samych parametrów pola magnetycznego i geometrii uszczelnienia.

5. MODELOWANIE DZIAŁANIA USZCZELNIENIA Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ

W pierwszej części rozdziału przedstawione zostaną zagadnienia teoretyczne związane z wyznaczaniem ciśnienia krytycznego i momentu tarcia uszczelnienia z cieczą magnetyczną opracowane na podstawie literatury. W dalszych częściach przedstawiony będzie model matematyczny pozwalający na wyznaczenie ciśnienia krytycznego, a następnie sposób analitycznego wyznaczania momentu tarcia w uszczelnieniach z cieczą magnetoreologiczną.

5.1. Teoretyczne podstawy modelowania uszczelnień z cieczą magnetyczną

Ciecze magnetyczne, będące przedstawicielami płynów nienewtonowskich reostabilnych z granicą płynięcia zwykle opisywane są modelem Binghama, który cechuje występowanie zależności między naprężeniem stycznym τ a szybkością odkształcenia przy ścinaniu $\dot{\gamma}$ w postaci:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (5.1)$$

gdzie:

η – współczynnik lepkości dynamicznej,

τ_0 – graniczne naprężenie styczne (granica płynięcia)

$\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania

W przypadku gdy naprężenia styczne są większe od granicy płynięcia $\tau > \tau_0$ ciecz magnetyczna zachowuje się jak ciecz newtonowska, [37,54,68]. Dla naprężeń niższych, gdy $\tau < \tau_0$ ciecz przyjmuje właściwości ciała quasi-stałego i do opisu cieczy należy można się równaniem charakteryzującym sprężyste ciało stałe.

Granica płynięcia w cieczach magnetycznych zależy od indukcji magnetycznej w cieczy $\tau_0(B)$, można więc zapisać:

$$\tau = \tau_0(B) + \eta \dot{\gamma} \quad (5.2)$$

przy czym:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (5.3)$$

W zakresie liniowej zależności indukcji B od natężenia pola magnetycznego H , gdy ciecz osiąga stan nasycenia $M = M_s = const$, naprężenie styczne może być również wyrażone związkiem [37]:

$$\tau = \tau_o(H) + \eta\dot{\gamma} \quad (5.4)$$

gdzie:

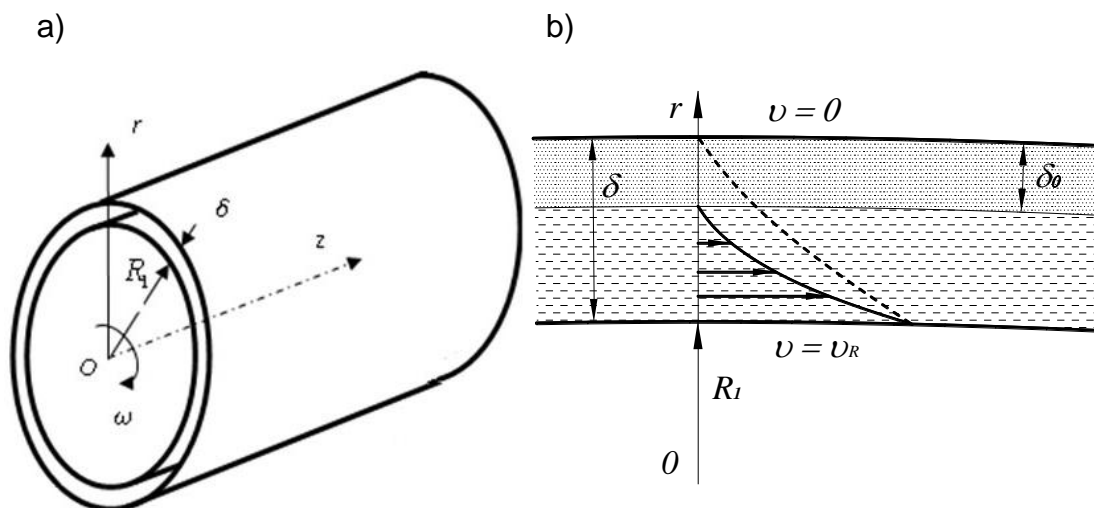
- B – indukcja magnetyczna,
- H – natężenie pola magnetycznego
- M – magnetyzacja cieczy
- M_s – magnetyzacja nasycenia
- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

W przepływie cieczy w szczelinie uszczelnienia między wirującymi powierzchniami tworzy się obszar ciała quasi-stałego. W pracy [68] omówiono sytuację powstania ciała quasi-stałego w przepływie wirującym między dwoma cylindrami, w obszarze gdzie naprężenie styczne jest mniejsze od granicy płynięcia $\tau < \tau_0$, (rys.5.1). Obszar ten o grubości δ_0 jest nieruchomy jeżeli przylega do powierzchni nieruchomego cylindra zewnętrznego. Przepływ cieczy magnetycznej ze ścinaniem odbywa się wówczas w pomniejszonej szczelinie pierścieniowej $R_1 \leq r \leq r_0$, po stronie ruchomego cylindra wewnętrznego,

$$r_0 = R_1 + \delta - \delta_0 \quad (5.5)$$

Znając moment obrotowy wału M_{obr} i graniczne naprężenie styczne τ_0 można określić granicę obszaru ciała quasi-stałego, [68].

$$r_0 = \sqrt{\frac{M_{obr}}{2\pi\tau_0}} \quad (5.6)$$



Rys.5.1. Rozkład prędkości cieczy magnetycznej w przepływie obwodowym między cylindrami
 a) schemat szczeliny b) rozkład prędkości cieczy w szczelinie pierścieniowej ($\delta \ll R$).

Dla jednowystępowego uszczelnienia z cieczą magnetyczną wałów o małej prędkości obrotowej za podstawę teoretyczną przyjmuje się równanie Bernoulliego dla ustalonego przepływu cieczy magnetycznej [2,37,54,80]:

$$p_s + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh - U_M = const \quad (5.7)$$

gdzie:

p_s – ciśnienie statyczne

U_M – jednostkowa energia, związana z siłą magnetyczną

Energia U_M zależy od natężenia pola magnetycznego H i stopnia magnetyzacji cieczy M , [54]:

$$U_M = \mu_0 \int_0^H M \cdot dH \quad (5.8)$$

Siły grawitacji ρgh w równaniu (5.7) są 10^4 razy mniejsze od energii U_M [80], czyli są pomijalnie małe, stąd dla wału nieruchomego ($v = 0$):

$$p_s - U_M = const \quad (5.9)$$

Równanie Bernoulliego (5.7) jest zasadne do analizy przepływów cieczy magnetycznej o niewielkich prędkościach ($v < 10$ m/s) jako cieczy doskonałej przy pominięciu tarcia i dyssypacji energii kinetycznej [7].

Modelowanie uszczelnienia magnetycznego uwzględniające siły tarcia może być zrealizowane z wykorzystaniem równań Naviera-Stokesa, które można zapisać w postaci wektorowej [1,2,41,80]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{d\vec{v}}{dt} &= \rho \vec{F} - \text{grad}p + \eta \Delta \vec{v} + \mu_0 M \cdot \text{grad}H \\ \text{div} \vec{v} &= 0 \\ \rho c \frac{dT}{dt} &= \lambda \Delta T + \Phi\end{aligned}\quad (5.10)$$

gdzie:

ρ – gęstość cieczy	μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni
η – współczynnik lepkości dynamicznej	c – ciepło właściwe
p – ciśnienie	λ – współczynnik przewodzenia ciepła
v – prędkość	T – temperatura cieczy
F – siła masowa	Φ – intensywność wewnętrznych źródeł ciepła (intensywność dyssypacji)
H – natężenie pola magnetycznego	
M – magnetyzacja cieczy	

Przy pominięciu procesu wymiany ciepła i zastosowaniu reguły sumowania powtarzających się wskaźników (konwencja sumacyjna Einsteina), powyższą zależność można zapisać w postaci tensorowej:

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) &= \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \mu_0 M_j \frac{\partial H_j}{\partial x_i} \\ \frac{\partial v_i}{\partial x_i} &= 0 \quad i, j = 1, 2, 3\end{aligned}\quad (5.11)$$

Dla stacjonarnego przepływu osiowo-symetrycznego nieściśliwej cieczy magnetycznej w stanie nasycenia, przy pominięciu siły grawitacji F równania te w cylindrycznym układzie współrzędnych przyjmują postać:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial r} &= \frac{\rho v_\varphi^2}{r} + 2 \frac{\partial \eta}{\partial r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \mu_0 M \frac{\partial H}{\partial r} \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= 2 \frac{\partial \eta}{\partial z} \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \mu_0 M \frac{\partial H}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta \frac{1}{r} \frac{\partial r v_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right) &= 0\end{aligned}\quad (5.12)$$

który można rozwiązać przy założonych warunkach brzegowych, $v_\varphi = v_\varphi(r)$

i $\eta = \text{const}$,

Ciśnienie krytyczne (ciśnienie przebicia) w uszczelnieniu.

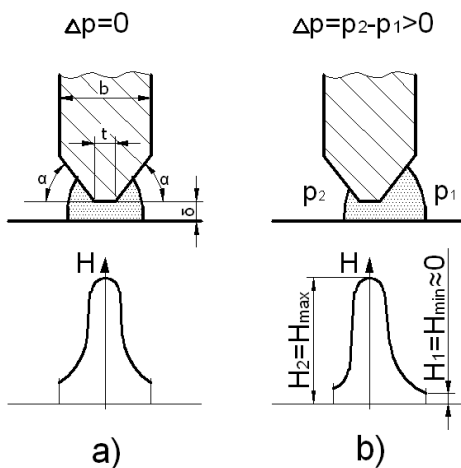
Ciśnienie krytyczne uszczelnienia, będące ciśnieniem, przy którym następuje przeciek określić można na podstawie równania Bernoulliego (5.9). Różnica ciśnienia po obu stronach uszczelniającej cieczy magnetycznej jest jednoznaczna z różnicą energii magnetycznej na powierzchni cieczy po obu stronach [54]:

$$(\Delta p_s)_{2-1} = p_2 - p_1 = (U_M)_2 - (U_M)_1 \quad (5.13)$$

Przy natężeniu pola magnetycznego, przy którym ciecz magnetyczna znajduje się w stanie nasycenia, więc $M = M_s = const$, [54], można zapisać:

$$(\Delta p_s)_{2-1} = \mu_0 M_s (H_2 - H_1) \quad (5.14)$$

Przebicie uszczelnienia może wystąpić, jeżeli ciecz magnetyczna ze stanu równowagi (przy $\Delta p=0$), zostanie przemieszczona pod wpływem znacznej różnicy ciśnień $p_2 > p_1$, (rys.5.2.b), co w konsekwencji spowoduje wyrzucanie cieczy ze szczeliny.



Rys.5.2. Rozmieszczenie cieczy magnetycznej w uszczelnieniu oraz rozkład natężenia pola magnetycznego H w szczelinie przy ciśnieniu $\Delta p=0$ (a) i $\Delta p=p_2 - p_1 > 0$ (b), [54]

Dla uszczelnienia jednowystępowego (na pojedynczym występie) w warunkach statycznych ciśnienie krytyczne można wyznaczyć:

$$p_{kr1s} = \mu_0 M_s (H_{max} - H_{min}) \quad (5.15)$$

a uwzględniając fakt, że $H_{max} \gg H_{min}$:

$$p_{kr1s} = \mu_0 M_s H_{max} \quad (5.16)$$

Przy założeniu, że przepływ w szczelinie jest laminarny (przepływ Couette'a), ciśnienie krytyczne uszczelnienia jednowystępowego w warunkach dynamicznych spada na skutek oddziaływania sił odśrodkowych [4,7,14,54]:

$$p_{kr1d} = p_{kr1s} - \frac{\rho v_R^2}{2} \frac{\delta}{R} \quad (5.17)$$

Dla określenia granicy przepływu laminarnego w szczelinie można posłużyć się krytyczną wartością liczby Taylora [129]:

$$Ta_{kr} = Re \sqrt{\frac{\delta}{R_1}} = \frac{\rho v_R}{\eta} \sqrt{\frac{\delta^3}{R_1}} \quad (5.18)$$

Wpływ sił odśrodkowych uwzględnia magnetyczna liczba Froude'a [4,7]:

$$Fr_m = \frac{\rho v_R^2}{R_1 \mu_0 M_s |\nabla H|} \quad (5.19)$$

gdzie $\nabla H \approx \frac{H_{max} - H_{min}}{\delta} \approx \frac{H_{max}}{\delta}$

stąd zależność (5.17) przyjmuje postać:

$$p_{kr1d} = \Delta p_{kr1s} (1 - 0,5 Fr_m) \quad (5.20)$$

Jeżeli liczba Froude'a osiąga małe wartości siły odśrodkowe można pominąć.

Przy analizie uszczelnień jednowystępowych z cieczą magnetyczną stosuje się założenia upraszczające: analiza uszczelnienia ogranicza się do nieruchomego wału, siły grawitacji są pomijalnie małe i linie sił pola magnetycznego są równomierne. Wówczas składniki równania Bernoullego określające ciśnienie dynamiczne mogą zostać pominięte ze względu na znikomo małą wartość. W przypadku uszczelnienia z cieczą ferromagnetyczną w stanie nasycenia, w pracy [37] maksymalne ciśnienie krytyczne przyjmuje postać:

$$p_{kr1s} = \mu_0 M_s H_{max} \quad (5.21)$$

gdzie p_{kr1s} – statyczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia jednowystępowego

$M_s \cdot H_{\max}$ – maksymalna wartość dla warunków nasycenia

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

Dla uszczelnień wielowystępowych (wielostopniowych – dla Z występów uszczelniających) ciśnienie krytyczne w stanie statycznym powinno wynosić:

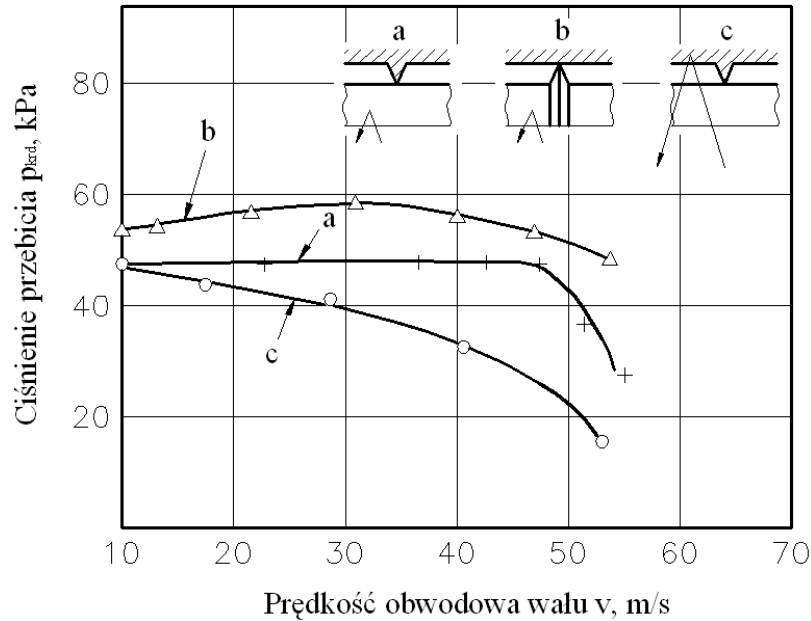
$$p_{krZs} = Z \cdot p_{kr1s} = Z \mu_0 M_s H_{\max} \quad (5.22)$$

a w stanie dynamicznym:

$$p_{krZd} = p_{krZs} - Z \frac{\rho v_R^2}{2} \frac{\delta}{R} \quad (5.23)$$

W pracy [5] autorzy przytaczają wyniki badań nad uszczelnieniami z cieczami ferromagnetycznymi wskazujące, że jednowystępowe uszczelnienie może utrzymać ciśnienie rzędu 20-60kPa w zależności od rodzaju cieczy.

Ciśnienie krytyczne w zależności od konstrukcji uszczelnienia jest w różny sposób wrażliwe na prędkość obrotową uszczelnianego wału. Według pracy [54] eksperymentalne zależności ciśnienia krytycznego (przebiecia) od prędkości obrotowej wału (rys.5.3), kształtują się w granicach 40-50kPa dla prędkości liniowej wału do 40-50m/s. Dalszy wzrost prędkości powoduje spadek utrzymywanych przez uszczelnienie ciśnień krytycznych p_{krd} . Według autorów może mieć to związek ze wzrostem temperatury w uszczelnieniu na skutek tarcia w cieczy.



Rys.5.3. Zależność ciśnienia krytycznego p_{krd} od prędkości obwodowej wału v dla różnych konstrukcji uszczelnienia [54]:

- a) występy uszczelniające na nieruchomym nabiegunniku,
- b) występy uszczelniające na obracającym się wale,
- c) występy uszczelniające na ruchomym nabiegunniku

Krytyczne ciśnienie przebiccia nie zwiększa się jednak wprost proporcjonalnie ze wzrostem liczby występow uszczelniających Z , a do określenia jego wartości proponowana jest zależność, [53,54]:

$$p_{krZ} / p_{kr1} = 0,6Z + 0,4 \pm 0,1 \quad (5.24)$$

Zależność ciśnienia krytycznego cieczy magnetycznej od parametrów geometrycznych uszczelnienia i właściwości fizycznych cieczy przedstawiono w pracy [41]. Przeprowadzono w tym celu teoretyczną analizę przepływu cieczy magnetycznej w szczelinie pierścieniowej łożyska ślizgowego (rys.5.4):

w stanie statycznym:
$$p_{kr1s} = \mu_0 M_s \Delta H_{\max} \quad (5.25)$$

w stanie dynamicznym :
$$p_{kr1d} = \mu_0 M_s \Delta H_{\max} - a\omega^2 \quad (5.26)$$

gdzie:
$$a = \frac{\rho R_1^4}{2(R_2^2 - R_1^2)^2} \left[\frac{R_2^4}{R_1^2} + 4R_2^2 \ln \frac{R_1}{R_2} - R_1^2 \right], \quad (5.27)$$

przy czym: R_1 – promień cylindra wewnętrznego;
 $R_2 = R_1 + \delta$ – promień cylindra zewnętrznego

W literaturze [19] porównano właściwości cieczy ferromagnetycznych (FF) i magnetoreologicznych (MR) szacując możliwości zastosowania cieczy magnetoreologicznych do uszczelniania węzłów łożyskowych. Do określenia maksymalnego ciśnienia krytycznego autorzy zaproponowali zależności:

$$\text{dla cieczy ferromagnetycznych: } p_{kr(FF)} = \mu_0 M_s H \frac{t}{\delta} \quad (5.28)$$

$$\text{dla cieczy magnetoreologicznych: } p_{kr(MR)} = \mu_0 M_s H \frac{t}{\delta} + 2\tau_0 \frac{t}{\delta} \quad (5.29)$$

gdzie: t – szerokość szczeliny, δ - wysokość szczeliny (rys.5.2).

Natomiast w pracy [60] zaproponowano określenie ciśnienia krytycznego dla przepływu cieczy magnetycznej w szczelinie pierścieniowej w oparciu o równania Naviera-Stokesa (5.12):

$$p_{kr} = \int_{B_b}^{B_a} M dB - \frac{1}{2} \mu_0 (M_{a\tau}^2 - M_{b\tau}^2) + \left[\frac{\rho R_1^4 \omega_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)^2} \left(r^2 - \frac{R_2^4}{r^2} - 4R_2^2 \ln \frac{r}{R_1} \right) \right]_a - \left[\frac{\rho R_1^4 \omega_0^2}{2(R_2^2 - R_1^2)^2} \left(r^2 - \frac{R_2^4}{r^2} - 4R_2^2 \ln \frac{r}{R_1} \right) \right]_b \quad (5.30)$$

Zweryfikowanie tego równania jest jednak trudne z powodu braku możliwości wyznaczenia niezbędnych parametrów na powierzchniach swobodnych (na granicy ciecz-medium uszczelniane) cieczy magnetycznej.

Moment tarcia i straty mocy w uszczelnieniu.

Moment oporowy dla obrotu wału, spowodowany jest tarciami. Dla przepływu laminarnego w uszczelnieniu moment tarcia M_t , można określić na podstawie zależności:

$$M_t = R_1 S \cdot \tau_R \quad (5.31)$$

gdzie: τ_R – naprężenie styczne na powierzchni wału,

$S = 2\pi R_1 t$ – pole powierzchni wału zwilżone cieczą magnetyczną

R_1 – wewnętrzny promień szczeliny uszczelnienia (promień wału)

t – długość wału zwilżona cieczą magnetyczną

Dla uszczelnień jednowystępowych i liniowego rozkładu prędkości w szczelinie:

$$M_{1t} = 2\pi R_1^2 \eta \nu_R \frac{t}{\delta} \quad (5.32)$$

W literaturze spotkać można szereg zależności stosowanych do określenia momentu tarcia w uszczelnieniu z cieczą magnetyczną. W pracy [54] podano różne wzory dla określenia momentu tarcia w zależności od kształtu występu w uszczelnieniu. Dla występów uszczelniających typu II (rys.2.12.c), zbliżonych do stosowanych w badaniach eksperymentalnych w AGH przedstawiono zależność:

$$M_{1t} = 2\pi\eta\omega R_1^3 \left(\frac{t}{\delta} + \text{ctg } \alpha \cdot \ln \frac{b-t}{\delta \cdot \text{ctg } \alpha} \right) \quad (5.33)$$

Na podstawie rozkładu prędkości w przepływie cieczy magnetycznej w uszczelnieniu, w pracy [7] wyznaczono zależność na moment tarcia:

$$M_{1t} = 4\pi\eta \frac{\omega R_1^2 R_2^2 l}{R_2^2 - R_1^2} \approx 2\pi\eta \frac{\omega R_1^3 l}{R_2 - R_1} \quad (5.34)$$

gdzie l – szerokość pierścienia kontaktu cieczy magnetycznej z powierzchnią nieruchomego cylindra zewnętrznego.

W pracy [15] moment tarcia w uszczelnieniu podano na podstawie wzoru N. Pietrowa:

$$M_{1t} = 2\pi\eta_{ef} \omega R_1^3 \frac{l}{\delta} \quad (5.35)$$

gdzie: $\eta_{ef} = \eta_0(1 + 4\varphi)$ – efektywny współczynnik lepkości dynamicznej,

φ – koncentracja objętościowa cząsteczek ferromagnetycznych w cieczy magnetycznej,

η_0 – współczynnik lepkości cieczy nośnej (niemagnetycznej).

Natomiast autorzy pracy [35] moment tarcia w uszczelnieniu określają według zależności:

$$M_{1t} = C_T \pi R_1^2 l \frac{\rho v^2}{2} \quad (5.36)$$

gdzie C_T – współczynnik korekcyjny, który można określić na podstawie wzoru empirycznego:

dla przepływu laminarnego

$$C_T = 3,6(\delta/R_1)^{-0,5} \text{Re}^{-1} 10^{-2}$$

dla przepływu turbulentnego (wirowego)

$$C_T = 0,56(\delta/R_1)^{-0,5} \text{Re}^{-0,5} 10^{-2}$$

Dla uszczelnienia wielowystępowego (o liczbie występów Z) w pracy [54] określono zależność:

$$\frac{M_{Zt}}{M_{1t}} = Z \pm 0,16 \quad (5.37)$$

gdzie: M_{Zt} – moment tarcia uszczelnienia wielowystępowego,
 M_{1t} – moment tarcia uszczelnienia jednowystępowego

Zagadnienie wyznaczania momentu oporu uszczelnienia jest bardzo istotne z uwagi na bezpośredni związek jego wartości z ciepłem wydzielanym podczas pracy. Możliwości zastosowań cieczy magnetycznych w zakresie uszczelnień mogą być ograniczone z powodu nagrzewania cieczy magnetycznej przy dużych prędkościach obrotowych wału. Wzrost temperatury zwiększa intensywność parowania cieczy magnetycznej, co może obniżyć czas pracy uszczelnienia magnetycznego a także wpłynąć na koagulację cząsteczek ferromagnetycznych w okresie gdy wał jest nieruchomy [7,15].

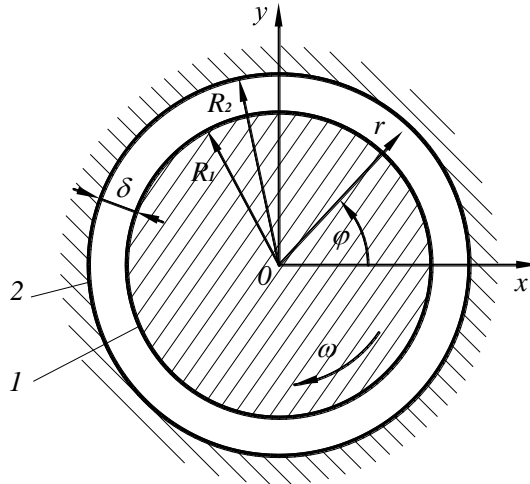
5.2. Model matematyczny wyznaczania ciśnienia krytycznego uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną

Biorąc pod uwagę podobny charakter cieczy ferromagnetycznej i magnetoreologicznej podjęto próby określenia możliwości wykorzystania tej cieczy do uszczelnień wałów obrotowych. Uwzględniając istotnie wyższe wartości magnetyzacji nasycenia cieczy MR [94], powinna ona umożliwiać uszczelnianie znacząco wyższych ciśnień roboczych.

Analogicznie jak w przypadku uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną, jako matematyczny model przepływu cieczy magnetoreologicznej w uszczelnieniach pierścieniowych wstępnie może być zastosowany przepływ cieczy między współosiowymi walcami (rys.5.1.), z których wewnętrzny (1) jest odpowiednikiem wału z występem uszczelniającym, a zewnętrzny (2) pełni rolę wewnętrznej powierzchni nabiegownika [86].

Ciecz magnetoreologiczna o współczynniku lepkości η wypełnia obszar między dwoma walcami, z których wewnętrzny o promieniu R_1 i obraca się z prędkością ω , a zewnętrzny jest nieruchomy i ma promień powiększony o wysokość

szczeliny $R_2 = R_1 + \delta$. Przy małych prędkościach ω ruch wału powoduje laminarny przepływ, znajdującej się w szczelinie pierścieniowej, cieczy.



Rys.5.4. Schemat szczeliny pierścieniowej między wałem (1) a nabiegunnikiem (2)

Pole prędkości cieczy oraz rozkład ciśnienia w szczelinie pierścieniowej o grubości δ można określić korzystając z cylindrycznego układu współrzędnych: r, φ, z , (rys.5.4). W przepływie trójwymiarowym ciśnienie p i składowe wektora prędkości v_r, v_φ, v_z są funkcjami tych współrzędnych. W pierścieniowej szczelinie występuje przepływ osiowo-symetryczny, w którym przy pominięciu wpływu grawitacji [86]:

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0, \quad v_r = v_z = 0, \quad v_\varphi = v(r) \quad (5.38)$$

Jeżeli ciecz magnetoreologiczna jest w stanie nasycenia $M_s = const$, zależność (5.3) można zapisać:

$$\mu_0 \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{\partial B}{\partial r} \quad \text{oraz} \quad \mu_0 \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial B}{\partial z} \quad (5.39)$$

Równania Naviera-Stokesa (5.12) przyjmą wówczas postać:

$$\frac{\rho v^2}{r} + 2 \frac{\partial \eta}{\partial r} \cdot \frac{dv}{dr} + M_s \frac{\partial B}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5.40)$$

$$M_s \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5.41)$$

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv}{dr} - \frac{v}{r^2} = 0 \quad (5.42)$$

Po scałkowaniu równania (5.42), nakładając warunki brzegowe dla v :

$$v = \omega R_1 \text{ dla } r = R_1 \text{ i } v = 0 \text{ dla } r = R_2. \quad (5.43)$$

Otrzymamy rozkład prędkości dla $R_1 \leq r \leq R_2$ w postaci ogólnej [61]:

$$v(r) = \frac{\omega \cdot R_1^2}{r(R_2^2 - R_1^2)} (R_2^2 - r^2) = A \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) \quad (5.44)$$

gdzie:

$$A = \frac{\omega R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (5.45)$$

Jeżeli nie występuje pole magnetyczne $B=0$, wówczas przepływ cieczy magnetoreologicznej jest zbliżony do przepływu cieczy newtonowskiej (np. przepływ oleju mineralnego) i rozkład prędkości (5.44) zbliżony jest do laminarnego przepływu Couette'a, pokazanego na rys.5.1.b linią przerywaną.

Znając rozkład prędkości (5.44) określić można szybkość ścinania:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = -A \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right) \quad (5.46)$$

Wynika z tego, że największa wartość bezwzględna szybkości ścinania $|\dot{\gamma}|$ występować będzie na powierzchni wału. Wraz ze wzrostem odległości r szybkość $|\dot{\gamma}|$ maleje, co wpływa na zmniejszenie naprężenia stycznego $|\tau| = \eta |\dot{\gamma}|$. W polu magnetycznym na pewnej odległości r naprężenie może osiągnąć wartości mniejsze od granicy płynięcia $\tau_0(B)$, co spowoduje rozwarstwienie cieczy magnetoreologicznej i powstanie warstwy ciała quasi-stałego o grubości δ_0 (rys.5.1.b), czemu sprzyja również działanie sił odśrodkowych [54,68]. Naprężenie styczne $\tau(B)$ w przepływie cieczy MR w polu magnetycznym, w szczelinie pomniejszonej o grubość δ_0 , można wyznaczyć z zależności:

$$\tau(B) = \eta \frac{\omega R_1^2}{(R_1^2 - R_2^2(B))} \left(1 + \frac{R_2^2(B)}{r^2} \right) \quad (5.47)$$

gdzie:

$$R_2(B) = R_1 + \delta - \delta_0(B), \quad (5.48)$$

Rozkład prędkości w polu magnetycznym dla $B \neq 0$ przedstawiony jest w postaci linii ciągłej na (rys.5.1.b) i może być opisany funkcją (5.44) jeżeli $R_2 = R_2(B)$.

Analityczne wyznaczenie ciśnienia krytycznego uszczelnienia z cieczą MR

Przyjmując że MR znajduje się w stanie nasycenia magnetycznego $M_s = const$, oraz współczynnik lepkości η w przekroju jest niezmienny, z równań (5.40) i (5.41) otrzymuje się:

$$dp = M_s \cdot dB + \frac{\rho v^2}{r} \cdot dr \quad (5.49)$$

Całkowanie umożliwi obliczenie ciśnienia w dowolnym punkcie przepływu:

$$p = M_s B + \rho A^2 \left(\frac{r^2}{2} - 2R_2^2 \ln \frac{r}{R_2} - \frac{R_2^4}{2r^2} \right) + C \quad (5.50)$$

Dla obliczenia wartości stałej całkowania C przyjęto, że przebicie uszczelnienia nastąpi na powierzchni wału $r = R_1$.

Stąd:

$$p_{kr} = M_s B + \frac{\rho \omega^2 R_1^4}{(R_2^2(B) - R_1^2)^2} \left(\frac{R_1^2}{2} - 2R_2^2(B) \ln \frac{R_1}{R_2(B)} - \frac{R_2^4(B)}{2R_1^2} \right) \quad (5.51)$$

Przy nieruchomym wale czyli w stanie statycznym ciśnienie krytyczne uszczelnienia:

$$p_{krs} = M_s B \quad (5.52)$$

Równanie (5.52) nie uwzględnia zależności ciśnienia krytycznego od ilości cieczy znajdującej się w szczelinie pierścieniowej oraz jej parametrów geometrycznych. Dlatego korzystając z analizy wymiarowej można wyznaczyć wymiarowe parametry, od których zależy równowaga cieczy MR w uszczelnieniu przy nieruchomym wale ($\omega=0$). W stanie statycznym są to: magnetyzacja nasycenia cieczy M_s [A/m], maksymalna indukcja magnetyczna w szczelinie B_{\max} [$\text{kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$], średnica wału $D = 2R_1$ [m], wysokość szczeliny promieniowej δ [m], objętość cieczy w szczelinie V [m^3], gęstość cieczy ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] oraz różnica ciśnień w uszczelnieniu Δp [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$].

Zgodnie z założeniami analizy wymiarowej [21], można zapisać że ciśnienie krytyczne uszczelnienia zależy od tych wielkości wymiarowych w postaci ogólnej:

$$P_{krs} = C_s \cdot M_s^{\alpha_1} \cdot B_{\max}^{\alpha_2} \cdot D^{\alpha_3} \cdot \delta^{\alpha_4} \cdot \rho^{\alpha_5} \cdot V^{\alpha_6} \quad (5.53)$$

gdzie: C_s – bezwymiarowy współczynnik proporcjonalności.

Spośród 7 parametrów wymiarowych mamy 4 parametry wymiarowo niezależne. Są to podstawowe jednostki (w układzie SI): masa [kg], długość [m], czas [s] oraz natężenie prądu [A].

Macierz wymiarowa ma następującą postać:

	M_s	B_{\max}	D	δ	ρ	V	Δp_s	
[kg]	0	1	0	0	1	0	1	
[m]	-1	0	1	1	-3	3	-1	
[s]	0	-2	0	0	0	0	-2	
[A]	1	-1	0	0	0	0	0	

(5.54)

Po porównaniu wykładników potęgowych przy poszczególnych wielkościach wymiarowych, otrzymamy:

$$\begin{aligned} \alpha_2 + \alpha_5 &= 1 \\ -\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4 - 3\alpha_5 + 3\alpha_6 &= -1 \\ -2\alpha_2 &= -2 \\ \alpha_1 - \alpha_2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.55)$$

Z trzeciego równania otrzymujemy $\alpha_2 = 1$, a wtedy z równania pierwszego wynika że $\alpha_5 = 0$ co wskazuje na niezależność ciśnienia krytycznego od gęstości płynu, co i potwierdza wzór (5.52). Z ostatniego równania (5.55) wynika, że $\alpha_1 = 1$. Uwzględniając podane wartości wykładników z drugiego równania przy $\alpha_6 = \frac{1}{3}$ można doprowadzić do $\alpha_3 = -\frac{1}{3}$ i $\alpha_4 = -\frac{2}{3}$, a równanie (5.53) można doprowadzić do postaci:

$$P_{krs} = C_s \cdot M_s \cdot B_{\max} \left(\frac{V}{\pi D \delta^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (5.56)$$

Iloczyn $\pi D \delta^2$ jest proporcjonalny do nominalnej objętości cieczy w szczelinie:

$$V_n = \pi D \delta \cdot t \quad (5.57)$$

i wzór (5.56) można zapisać w postaci:

$$p_{kr1s} = C_s \cdot M_s B_{\max} \left(\frac{V}{V_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.58)$$

W stanie dynamicznym, czyli przy obracającym się wale ($\omega \neq 0$), według zależności (5.51) ciśnienie krytyczne uszczelnienia jednowystępowego p_{kr1d} określić można na podstawie następującego wzoru:

$$p_{kr1d} = p_{kr1s} + \frac{\rho \omega^2 R_1^4}{(R_2^2(B) - R_1^2)^2} \left(\frac{R_1^2}{2} - 2R_2^2(B) \ln \frac{R_1}{R_2(B)} - \frac{R_2^4(B)}{2R_1^2} \right) \quad (5.59)$$

5.3. Analityczne wyznaczanie momentu tarcia w uszczelnieniu z cieczą MR

Na grubość warstwy plastycznej $\delta_o(B)$ w dużym stopniu ma wpływ natężenie pola magnetycznego, ale również prędkość wału $v_R = \omega R$ i temperatura T cieczy MR.

Wzrost natężenia pola magnetycznego powoduje zwiększenie grubości warstwy plastycznej δ_o , zwiększenie szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ (prędkości deformacji) oraz momentu tarcia M_t :

$$M_t(B) = 2\pi R_1^2 t \cdot \tau(B), \quad (5.60)$$

doprowadzając do wyłonienia objętości V i wprowadzając współczynnik C_t :

$$2\pi R_1^2 t = C_t \cdot \frac{V \cdot R_1}{\delta} \quad (5.61)$$

równanie (5.60) można przekształcić do postaci:

$$M_t(B) = C_t \cdot V \cdot \frac{R_1}{\delta} \cdot \tau(B) \quad (5.62)$$

gdzie: C_t - współczynnik korygujący, odpowiedzialny za tarcie w uszczelnieniu, który zależy od wysokości szczeliny δ , ale także od innych czynników, jak kształt i liczba występów uszczelniających.

Aby uwzględnić rzeczywistą objętość cieczy MR w stosunku do objętości szczeliny oraz liczbę występów dobrano i poddano weryfikacji również zależność w postaci:

$$M_t(B) = 2\pi R_1^2 t C_t \tau(B) \left(Z \frac{V}{V_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.63)$$

6. ZAKRES BADAŃ LABORATORYJNYCH

6.1. Wprowadzenie

Badania eksperymentalne przeprowadzono w celu określenia granicznych wartości ciśnień utrzymywanych przez uszczelnienie z cieczą magnetoreologiczną oraz określenia generowanych przez takie uszczelnienia oporów ruchu.

Aby możliwe było wykonanie takich badań zaprojektowano i skonstruowano stanowisko badawcze do badań uszczelnień z cieczami magnetycznymi, a w szczególności z cieczą magnetoreologiczną, (rys.6.18-6.20). W głowicy stanowiska zamontowano tuleje badawcze z występami uszczelniającymi, stanowiące w połączeniu z cieczą magnetoreologiczną i nabiegunnikami węzeł uszczelniający. Układ magnetyczny tworzyło 12 magnesów neodymowych $\varnothing 8 \times 5 \text{ mm}$, spolaryzowanych osiowo, [101]. Stanowisko badawcze zostało opisane w dalszej części pracy.

Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano 16-kanalową kartę pomiarową firmy National Instruments typu NI USB-6211, skojarzoną z komputerem wyposażonym w oprogramowanie NI LabView 8.6, przeznaczonym do akwizycji danych.

Aby ograniczyć straty tarcia, uszczelnienie utworzono przy użyciu cieczy magnetoreologicznej MRF-122EG firmy LORD [99,100], o najmniejszym współczynniku lepkości dynamicznej spośród dostępnych produktów tego producenta. Parametry tej cieczy przedstawiono poniżej:

- rodzaj cieczy: zawiesina 72% cząstek stałych w oleju węglowodorowym
- współczynnik lepkości dynamicznej (w temp. 40°C): $0,042 \pm 0,020 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- gęstość: $2,28 \div 2,48 \text{ g/cm}^3$
- temperatura zapłonu: $>150^\circ\text{C}$
- zakres temperatur pracy: $-40 \div 130^\circ\text{C}$
- magnetyzacja nasycenia: 270 kA/m

Każdy z badanych węzłów uszczelniających składał się z występów w liczbie od $Z=1$ do $Z=5$, które usytuowane w głowicy tworzyły szczeliny

robocze uszczelnienia. W tak powstałe pierścieniowe szczeliny aplikowano odpowiednią ilość cieczy magnetoreologicznej. Liczba występów, ich kształt i wysokości szczeliny zamodelowane zostały w oparciu o geometrię występów uszczelniających stosowaną do badań uszczelnień z cieczami ferromagnetycznymi, przy poprzednich projektach badawczych prowadzonych w laboratorium uszczelnień i zastosowań cieczy magnetycznych AGH.

Wartość objętości aplikowanej cieczy do każdej szczeliny określono poprzez współczynnik wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ (stosunek objętości aplikowanej cieczy MR do nominalnej objętości cieczy w szczelinie, wynikającej z geometrii uszczelnienia).

Objętość nominalna cieczy w szczelinie $V_n = \pi D \delta t$ wyznaczona została na podstawie wymiarów występów uszczelniających zamieszczonych w tab.6.1.

Tab.6.1. Parametry geometryczne szczeliny pomiarowej uszczelnienia z cieczą MR

Parametry geometryczne szczeliny pomiarowej				
D [mm]	δ [mm]	t [mm]	b [mm]	α [°]
50	0,15	0,6	5	45
	0,3	1,2		
	0,5	2		

Wyniki badań zostaną zestawione w formie tabelarycznej i na ich podstawie opracowane będą wykresy ciśnienia krytycznego i momentu tarcia.

6.2. Program badań laboratoryjnych

Ważną informacją o właściwościach środka uszczelniającego jest jego współczynnik lepkości. Zatem przed przystąpieniem do badań nad uszczelnieniami przeprowadzone będą badania zmian lepkości dynamicznej cieczy magnetoreologicznej pod wpływem zmian pola magnetycznego.

Do wyznaczenia wartości analitycznych istotna jest również znajomość parametrów pola magnetycznego w szczelinie roboczej uszczelnienia, takich

jak natężenie pola magnetycznego, a w szczególności indukcja magnetyczna. W tym celu będą one określone dla konkretnych geometrii uszczelnień. Ze względu na niewielkie wymiary szczelin, wyznaczenie ich przeprowadzone zostanie na drodze symulacji numerycznych.

Badania laboratoryjne podzielono na dwa podstawowe obszary badawcze. Jako podstawowy obszar badawczy uznano określenie ciśnienia krytycznego uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną w różnych warunkach pracy.

Wstępny badania ciśnienia krytycznego będą obejmowały:

- określenie ciśnienia krytycznego przy stałej objętości cieczy MR aplikowanej do szczeliny.
- określenie ciśnienia krytycznego przy założonym współczynniku wypełnienia cieczą $\frac{V}{V_n}$

Celem tych badań ma być uzyskanie informacji czy objętość cieczy aplikowanej do szczeliny roboczej wywiera istotny wpływ na skuteczność uszczelniania.

Badania zasadnicze ciśnienia krytycznego będą obejmowały:

- wyznaczenie związku między objętością cieczy magnetoreologicznej aplikowanej do szczeliny roboczej a ciśnieniem krytycznym. Objętość cieczy będzie definiowana współczynnikiem wypełnienia $\frac{V}{V_n}$
- wyznaczenie wartości ciśnienia krytycznego dla różnej ilości występów uszczelniających przy ustalonych warunkach pracy
- określenie wpływu prędkości obrotowej na uzyskiwane wartości ciśnienia krytycznego w uszczelnieniach z cieczą MR przy różnej wysokości szczeliny.

Drugi obszar badawczy będzie obejmował określenie oporów ruchu generowanych przez uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną. W szczególności będzie to dotyczyło wyznaczenia momentów tarcia uszczelnień dla różnej ilości występów, przy ustalonej prędkości obrotowej

Ponieważ w dużym zakresie są dostępne wyniki badań uszczelnień z cieczami ferromagnetycznymi m.in. [75,76,85] przy wielorakich warunkach pracy, dlatego będą przeprowadzone badania porównawcze uszczelnienia z cieczą

magnetoreologiczną i uszczelnienia z cieczą ferromagnetyczną dla takich samych warunków pracy.

6.3. Wyznaczenie zmian lepkości dynamicznej cieczy

magnetoreologicznej pod wpływem zmian pola magnetycznego

Badanie lepkości dynamicznej cieczy magnetoreologicznej polegało na określeniu wartości współczynnika lepkości dynamicznej η cieczy magnetoreologicznej MRF-122EG przy różnych wartościach temperatury $T=20;40,60,80^{\circ}\text{C}$ i różnej indukcji pola magnetycznego B w trzech szczelinach pomiarowych $h=0,1\text{mm}$; $h=0,3\text{mm}$ i $h=0,5\text{mm}$.

Stanowiskiem badawczym, na którym przeprowadzone zostały pomiary parametrów reologicznych cieczy magnetoreologicznej był reometr rotacyjny typu Physica MCR 301 firmy Anton Paar (rys.6.1), wyposażony w przystawkę magnetyczną i stabilizację temperatury.



Rys.6.1. Reometr rotacyjny typu Physica MCR 301 firmy Anton Paar

Do pomiarów zastosowano geometrię pomiarową typu płytka-płytką o średnicy płytki 20mm.

Badanie przeprowadzono przy szybkości ścinania $\dot{\gamma} = 500 \text{ 1/s}$, będącą w zakresie szybkości podawanych przez producenta cieczy dla badań parametrów reologicznych tych cieczy magnetoreologicznych [39,100].

Wzrost indukcji magnetycznej realizowany był stopniowo, w oparciu o możliwości ustawień reometru, w 50 krokach z częstotliwością 5s, dla których odczytywany był pomiar.

Aby określić czy wielkość szczeliny ma istotny wpływ na uzyskiwane wartości współczynnika lepkości wykonano serię badań dla szczelin pomiarowych o wysokości h i objętości aplikowanej próbki v (Tab.6.2.):

Tab.6.2. Wartości wysokości szczelin pomiarowych i objętości próbki

Wysokość szczeliny pomiarowej h [mm]	Objętość aplikowanej cieczy MR v [μ l]
0,5	175
0,3	100
0,1	35

Wysokości szczelin pomiarowych zostały wyznaczone na podstawie przyjętych zaleceń dla tego typu pomiarów. Szczelinę minimalną $h=0,1mm$ przyjęto zgodnie z zaleceniami normy DIN 53018, wg której $h \leq 1\%R_p$, przy czym R_p jest promieniem płytki pomiarowej. Szczelinę maksymalną $h=0,5mm$ wyznaczono jako typową, wg literatury [55,56,73] dla tego typu badań szczelinę pomiarową. Szczelinę taką zalecają również normy ASTM D4440 i D4473, przy występowaniu dużych zmian współczynnika lepkości podczas pomiaru. Szczelina $h=0,3mm$ dobrana została natomiast jako pośrednia, między dwoma pozostałymi.

Przed każdym pomiarem aplikowana była świeża próbka cieczy MR

Badanie przeprowadzono zgodnie z procedurą pomiarową:

1. PreShear (wstępne rozmieszanie próbki):

Szybkość ścinania $\dot{\gamma} = 50$ 1/s

Czas: 1min

2. Rest (stabilizacja próbki):

Szybkość ścinania $\dot{\gamma} = 0$ 1/s

Czas: 0,5min

3. Pomiar:

Szybkość ścinania $\dot{\gamma} = 500$ 1/s (const.)

Liczba punktów pomiarowych: 50

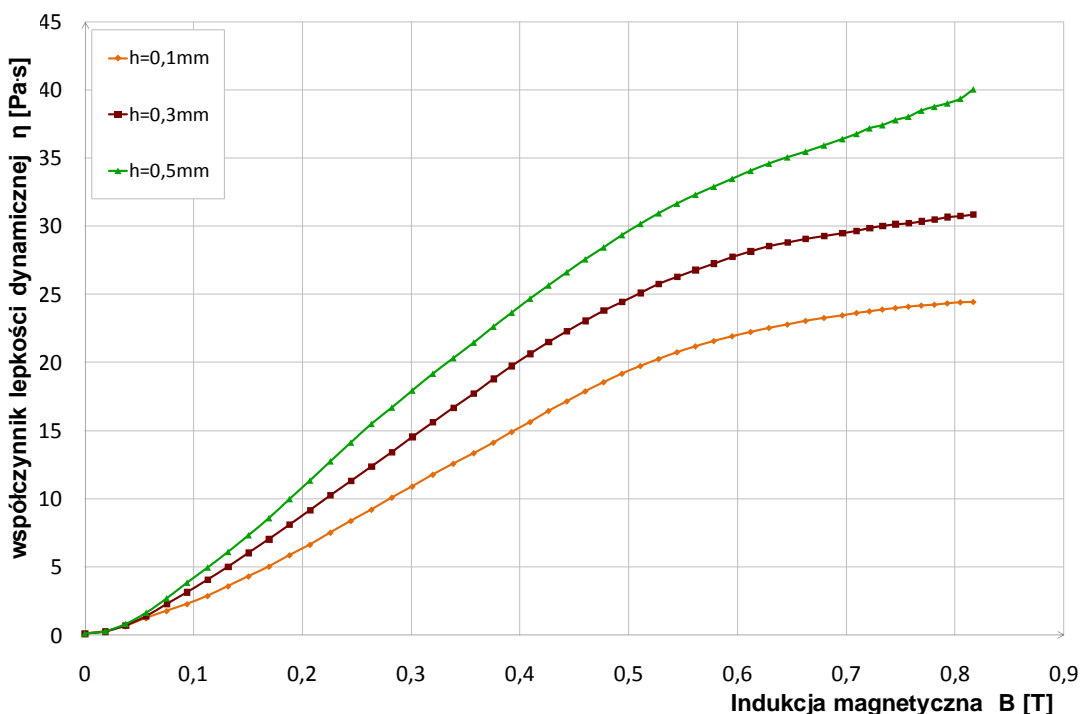
Czas punktu pomiarowego: 5s

Zakres prądu: 0-5A

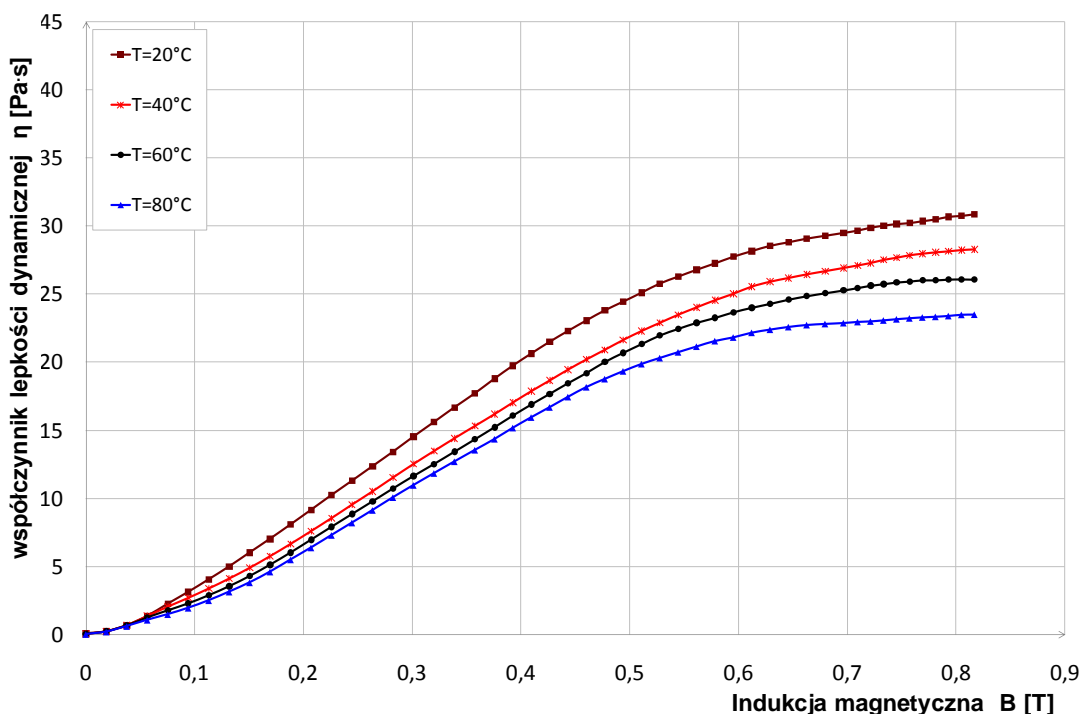
Metoda zadawania prądu (Step Ramp): liniowa

Każdy pomiar został powtórzony, w celu wyeliminowania wyników przypadkowych. Jeżeli wyniki nie różniły się więcej niż 10% większej wartości, zostawały uznane za poprawne.

Przykładowe zależności współczynnika lepkości dynamicznej η od indukcji B , dla różnych geometrii szczeliny pomiarowej i temperatury cieczy MR zostały pokazane na rys.6.2 i 6.3.



Rys.6.2. Współczynnik lepkości dynamicznej η cieczy MRF-122EG w funkcji indukcji magnetycznej B w zależności od szczeliny pomiarowej $h=0,1\text{mm}$; $0,3\text{mm}$ i $0,5\text{mm}$, dla temperatury $T=20^\circ\text{C}$ i prędkości ścinania $\dot{\gamma}=500\text{ 1/s}$



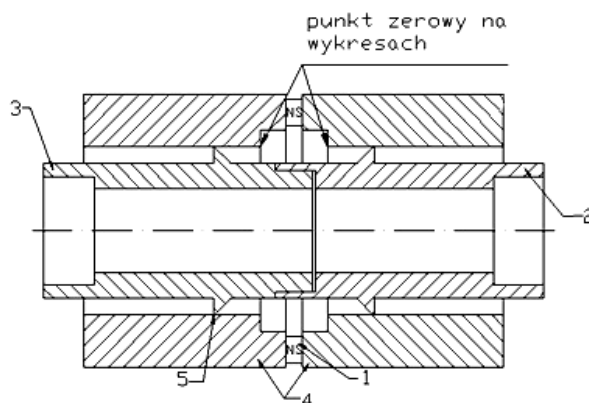
Rys.6.3. Współczynnik lepkości dynamicznej η cieczy MRF-122EG w funkcji indukcji magnetycznej B w zależności od temperatury $T=20\text{ C}$; 40 C ; 60 C i 80 C , dla szczeliny pomiarowej $h=0,3\text{mm}$ i prędkości ścinania $\dot{\gamma}=500\text{ 1/s}$

Na wykresach (rys.6.2 i 6.3) widać, że wzrost indukcji magnetycznej B powoduje zwiększenie współczynnika lepkości η cieczy MR. Dla większości badań zaobserwowano granicę wzrostu współczynnika lepkości przy wartościach indukcji większych od $B=0,7\text{T}$, charakterystyczną dla osiągnięcia stanu nasycenia cieczy MR. Można również zauważyć, że przy wyższych temperaturach obserwuje się niższe wartości współczynnika lepkości cieczy. Obniżenie współczynnika lepkości ma miejsce również przy zmniejszeniu szczeliny pomiarowej.

Należy jednak zauważyć, że zmierzone wartości współczynnika lepkości badanej cieczy MR określono przy stałej szybkości ścinania, dla naprężeń stycznych, będących sumą naprężeń ścinających i granicy płynięcia, odpowiadającej wartości zadanego pola i nie mogą być porównywane z wartością współczynnika lepkości podawanej przez producenta cieczy MR. Przedstawione wykresy służą głównie do pokazania relacji między współczynnikiem lepkości η i indukcją B , dla różnych geometrii szczeliny i temperatury cieczy.

6.4. Analiza numeryczna rozkładu pola magnetycznego w uszczelnieniu z cieczą MR.

Numeryczne analizy rozkładu pola magnetycznego są wykonywane dla konkretnych uszczelnień, których model przedstawiony jest schematycznie na rys.6.4. Modelowane uszczelnienie składa się z 12 osiowo spolaryzowanych magnesów stałych (1) o wymiarach $\varnothing 8 \times 5 \text{ mm}$, do których przylegają nabiegunniki (4). Nominalna średnica uszczelnienia wynosi $\varnothing 50 \text{ mm}$. W układzie magnetycznym uszczelnienia wykorzystano magnesy neodymowe N38 firmy ENES [103]. Posiadają one następujące parametry: szczątkowa indukcja magnetyczna $B_r = 1,25 \text{ T}$, natężenie koercyjne $H_c = 912 \text{ kA/m}$. Obwód magnetyczny zamyka się po przez tuleje (2) i (3) oraz ciecz MR znajdującą się na występach uszczelniających (5).



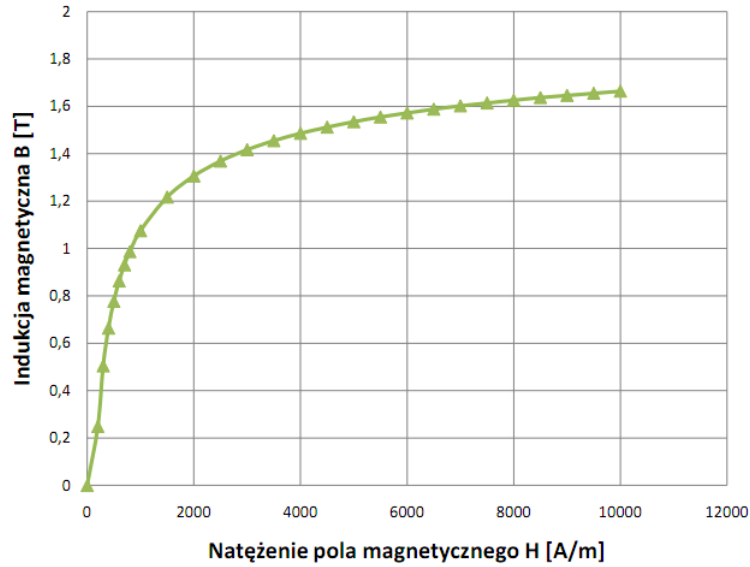
Rys.6.4. Schemat geometrii uszczelnienia użyty do analiz rozkładu pola magnetycznego

Analizy numeryczne uwzględniają różną liczbę występów uszczelniających oraz różne wysokości szczeliny uszczelniającej. Warianty te zestawione są w poniższej tabelicy (Tab.6.3)

Tab.6.3. Zestawienie wariantów uszczelnień do analiz numerycznych.

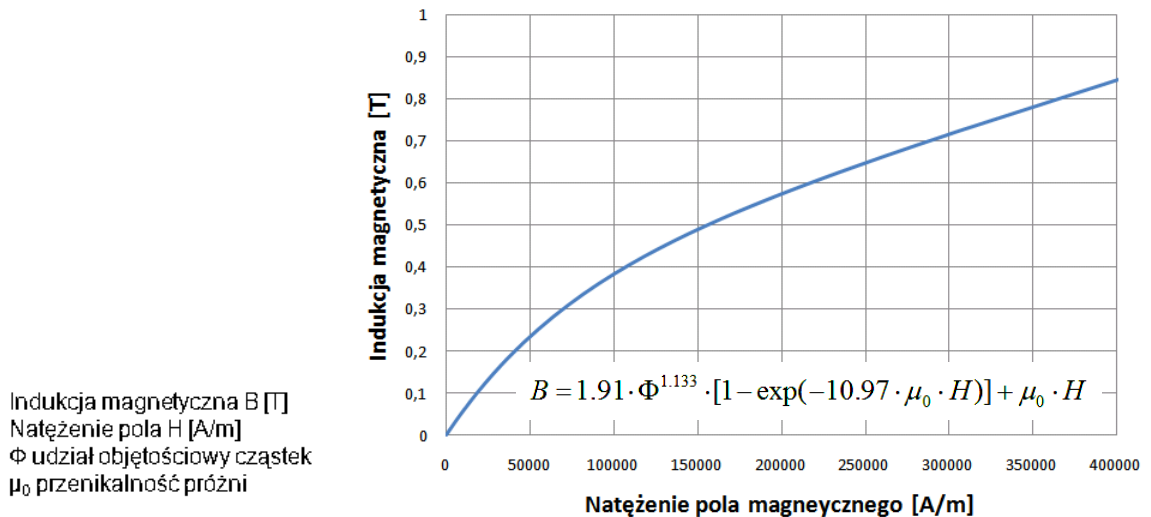
Lp.	Warianty uszczelnienia (liczba występów po obu stronach) $Z_B \times Z$	Wysokość szczeliny δ [mm]		
		0,15	0,3	0,5
1	6x1	0,15	0,3	0,5
2	6x2	0,15	0,3	0,5
3	6x3	0,15	0,3	0,5
4	6x4	0,15	0,3	0,5
5	6x5	0,15	0,3	0,5
6	1x1	0,15	0,3	0,5
7	2x2	0,15	0,3	0,5
8	3x3	0,15	0,3	0,5
9	4x4	0,15	0,3	0,5
10	5x5	0,15	0,3	0,5

Nabiegunniki i tuleje z występami uszczelniającymi wykonane są ze stali konstrukcyjnej niskowęglowej o zawartości do 0,27% węgla, o charakterystyce B-H przedstawionej na rys.6.5 [18].

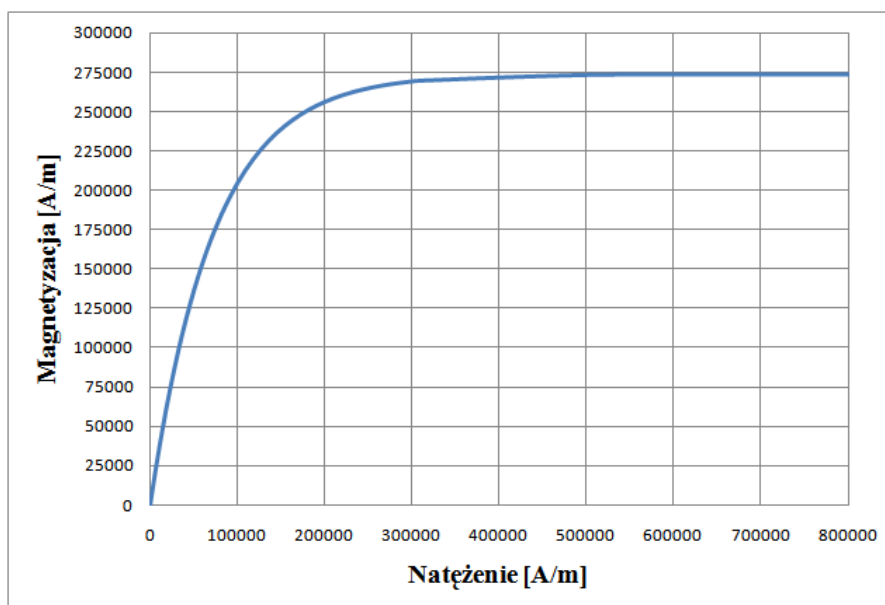


Rys.6.5. Krzywa magnetyzacji elementów stalowych uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną [18]

W procesie symulacji wprowadzono dane odpowiadające parametrom cieczy magnetoreologicznej firmy LORD MRF-122EG o charakterystyce B-H oraz krzywej nasycenia przedstawionej na rys.6.6. i rys.6.7.



Rys.6.6. Krzywa magnetyzacji (B-H) cieczy magnetoreologicznej MRF-122EG firmy LORD [100]



Rys.6.7. Krzywa nasycenia cieczy (M-H) magnetoreologicznej MRF-122EG firmy LORD [100]

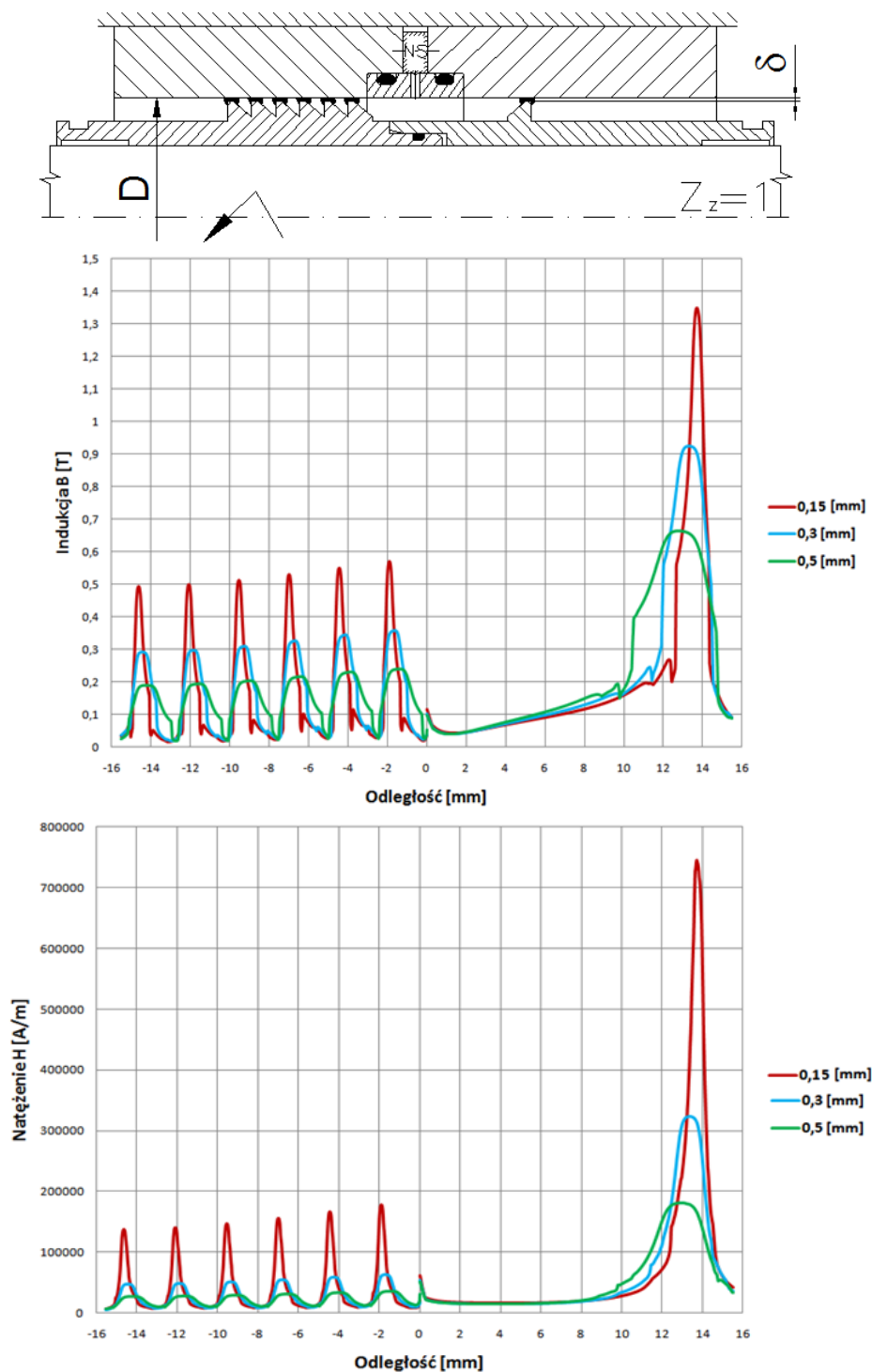
Dla pozostałych niemagnetycznych elementów takich jak powietrze i aluminium przyjęto względną przenikalność magnetyczną $\mu_r = 1$ [102].

Do obliczeń numerycznych rozkładu pola magnetycznego, metodą elementów skończonych użyto pakietu ANSYS Multiphysics, wersja 11, dodatek Electromagnetics. Problem obliczeniowy potraktowano jako nieliniowy, płaski, osiowo-symetryczny. Dla uproszczenia symulacji zamiast krążków przyjęto równoważny pierścień magnetyczny o objętości równej sumie objętości krążków magnesów. Siatkę obliczeniową utworzono na bazie elementów w kształcie wieloboku o 8 węzłach. W pobliżu występów uszczelniających siatkę zagęszczono. Wprowadzono zerowe warunki brzegowe Dirichleta, tzn. przyjęto, że kierunek strumienia magnetycznego jest równoległy do brzegów analizowanego obszaru, oraz wartość strumienia na granicach obszaru przyjmuje wartość zero.

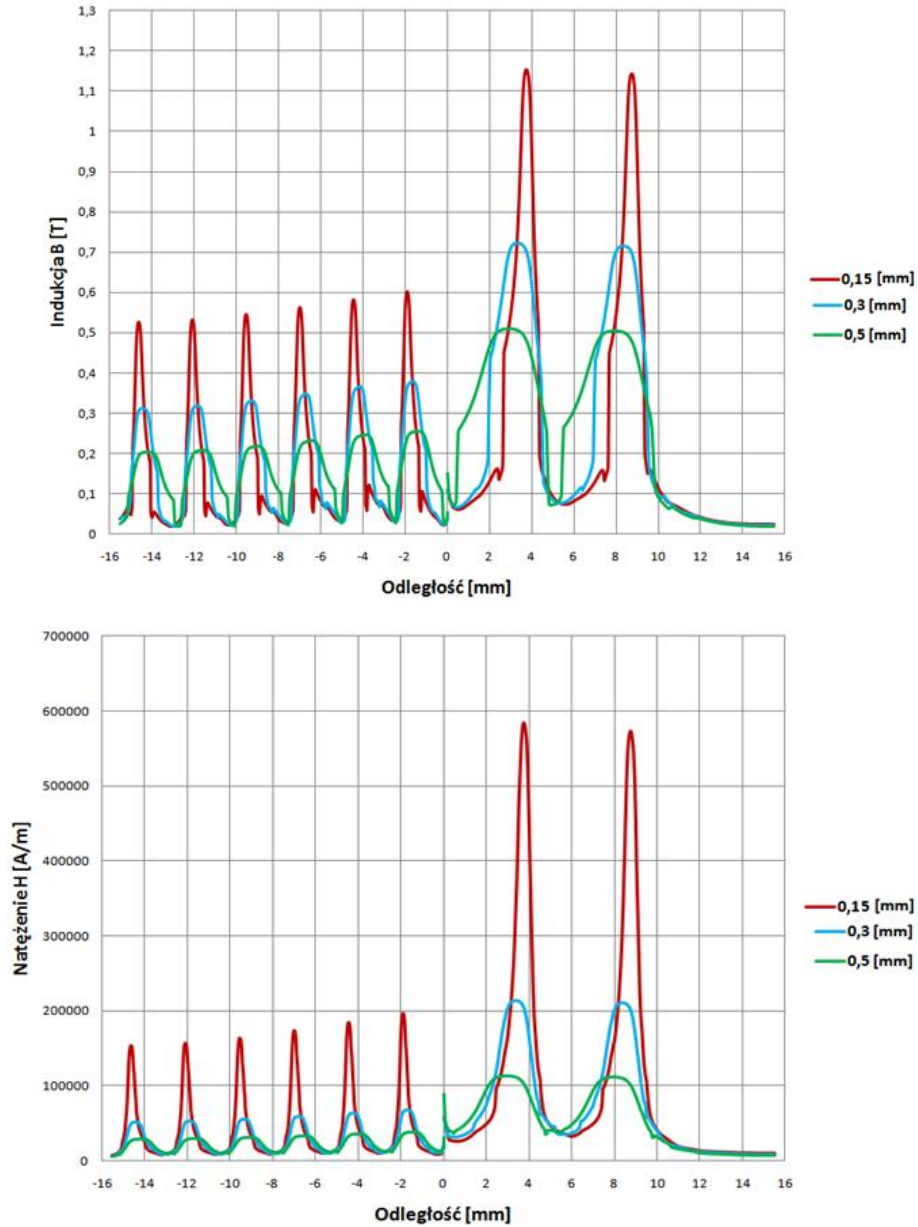
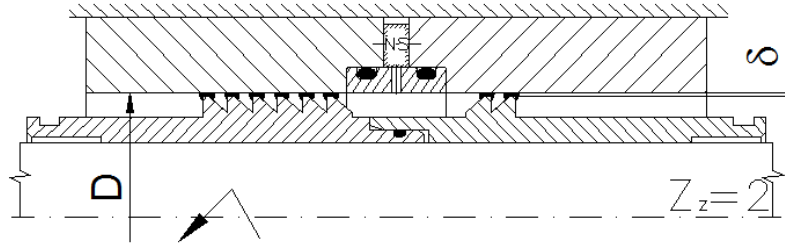
W wyniku obliczeń określono rozkład indukcji B i natężenia pola magnetycznego H w badanych uszczelnieniach.

Na rysunkach rys.6.8 - rys.6.17 przedstawiono geometrię uszczelnień stosowanych w badaniach i odpowiadające im rozkłady natężenia pola magnetycznego H , uzyskane w procesie symulacji numerycznych.

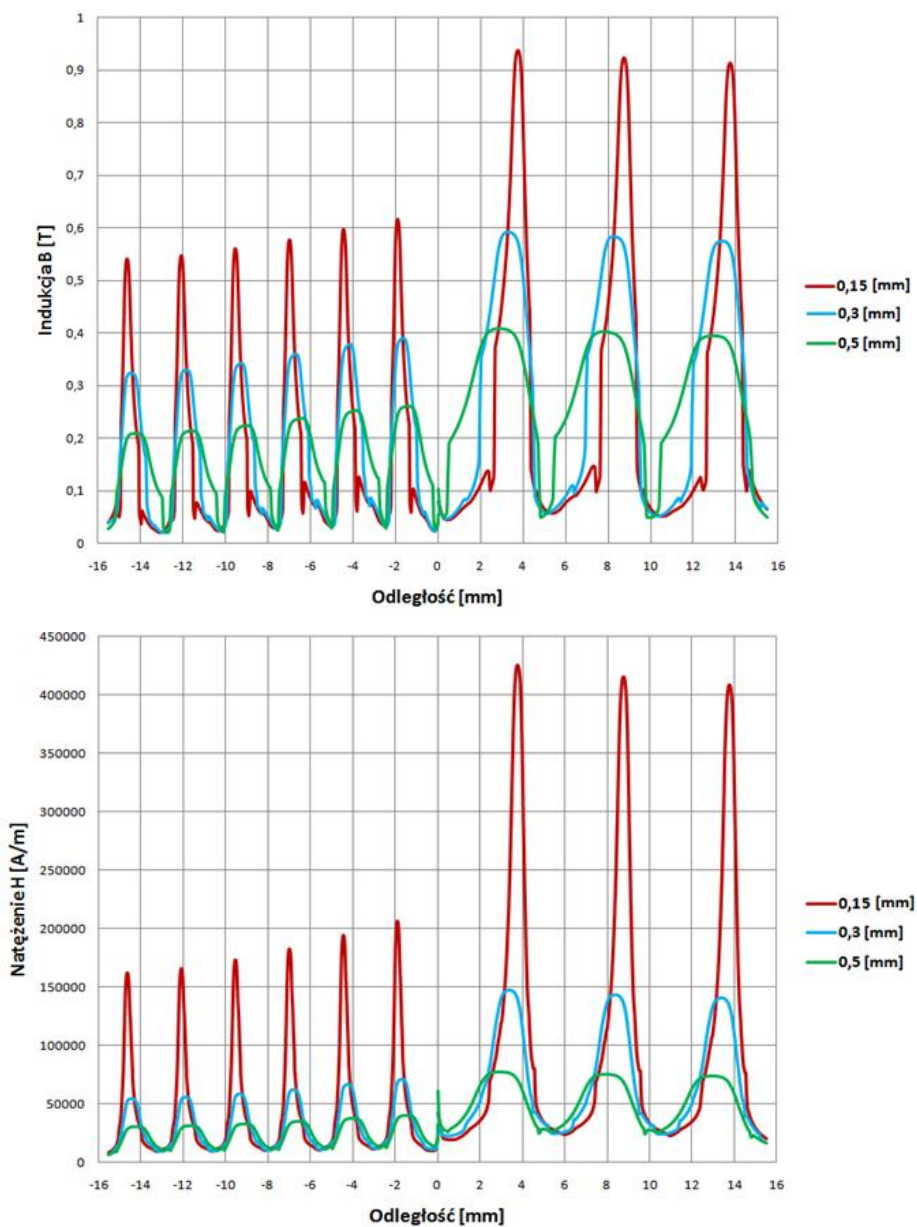
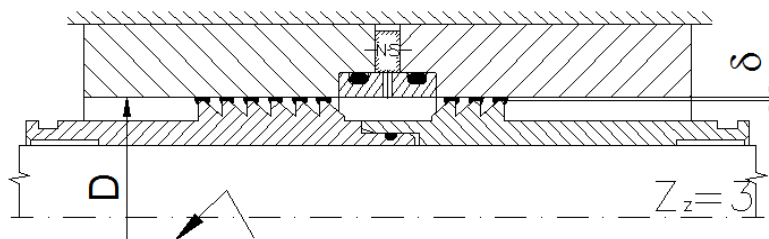
Rozkład indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego w szczelinach pomiarowych dla uszczelnień w układzie niesymetrycznym (do badania ciśnienia krytycznego)



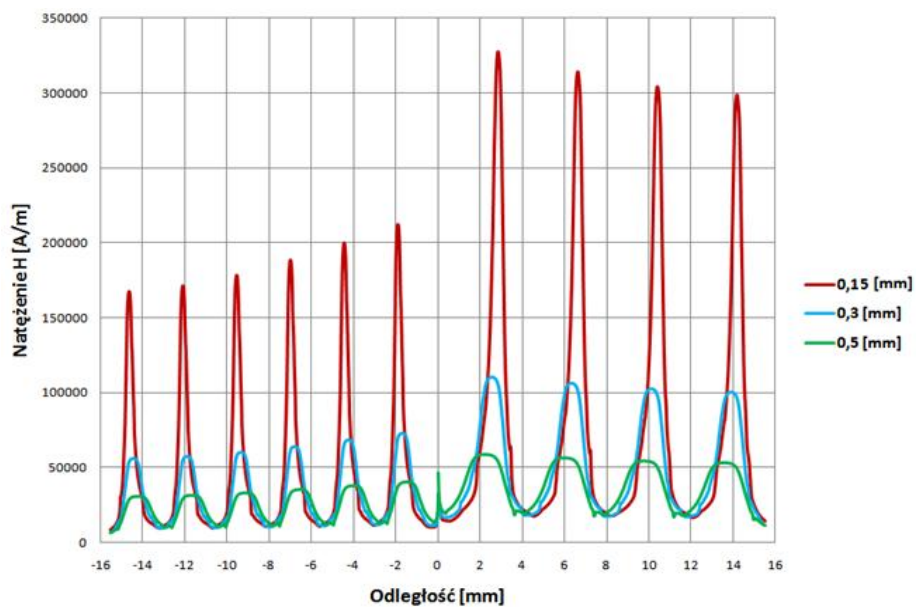
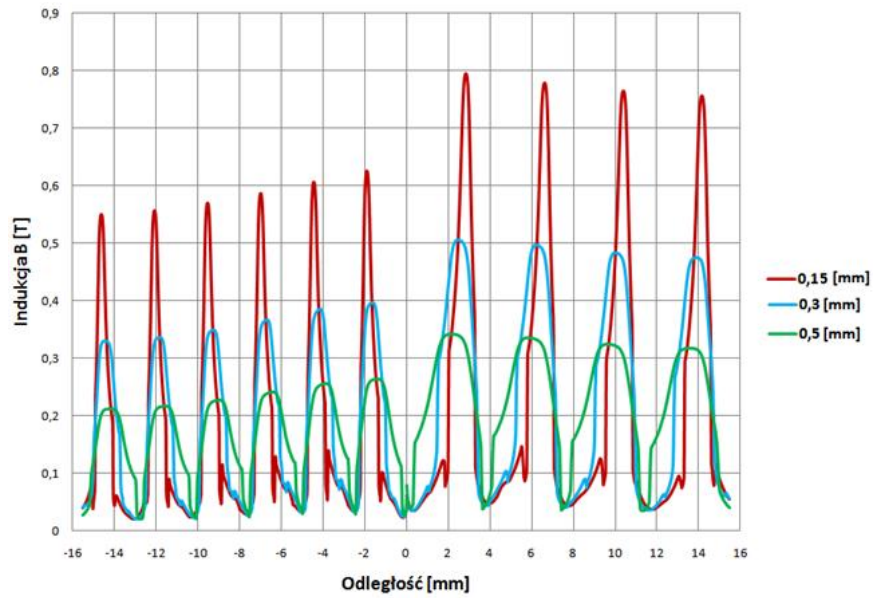
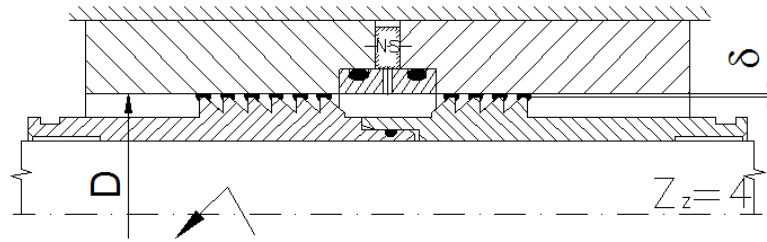
Rys.6.8. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 6$, $Z = 1$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm



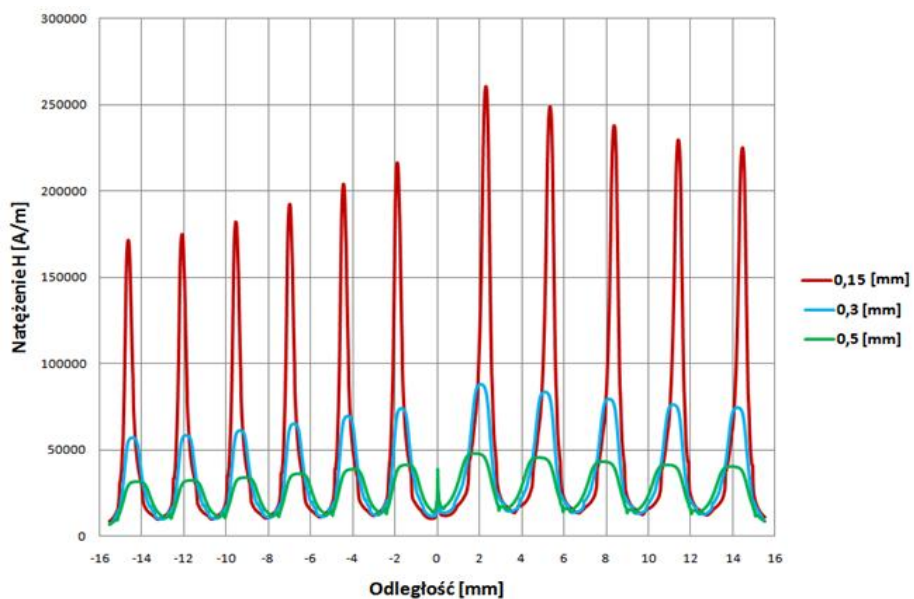
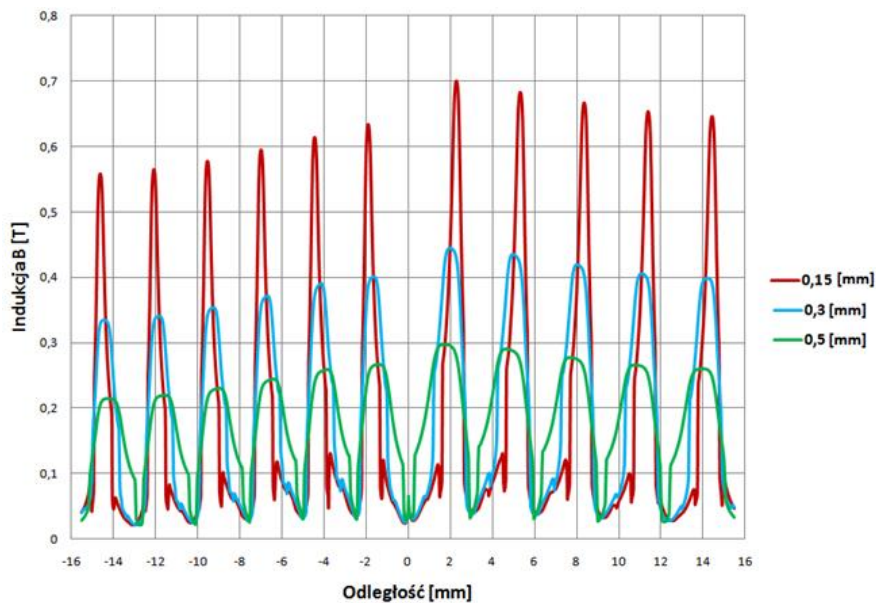
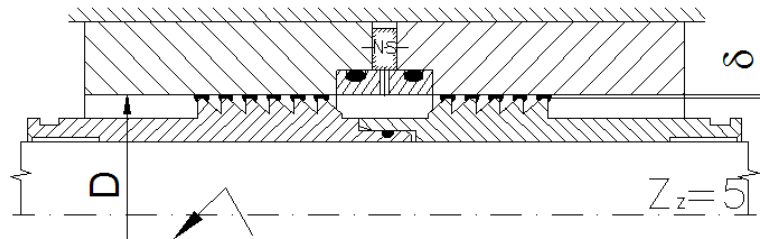
Rys.6.9. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 6$, $Z = 2$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm



Rys.6.10. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z ciecżą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 6$, $Z_z = 3$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm

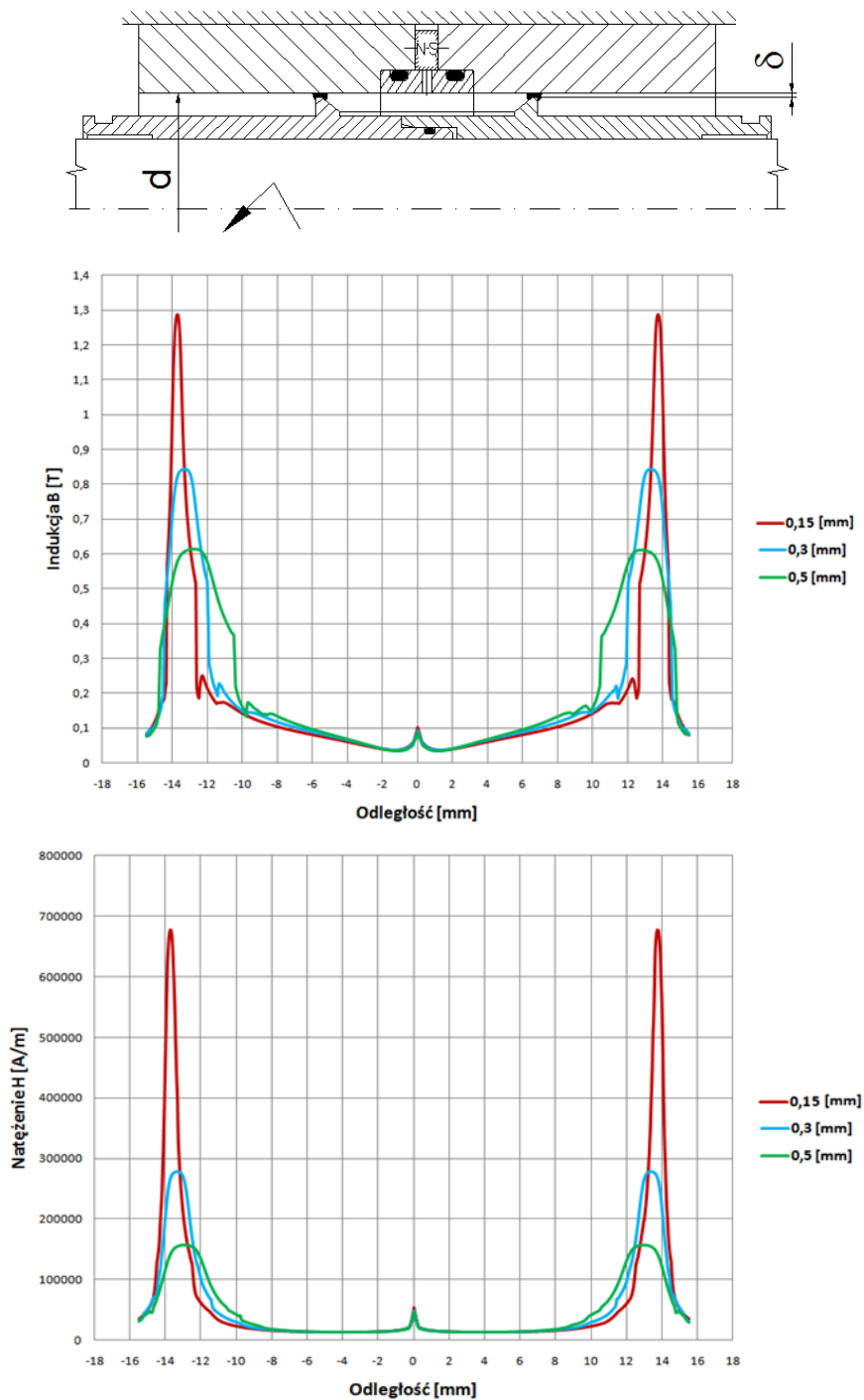


Rys.6.11. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 6$, $Z = 4$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm

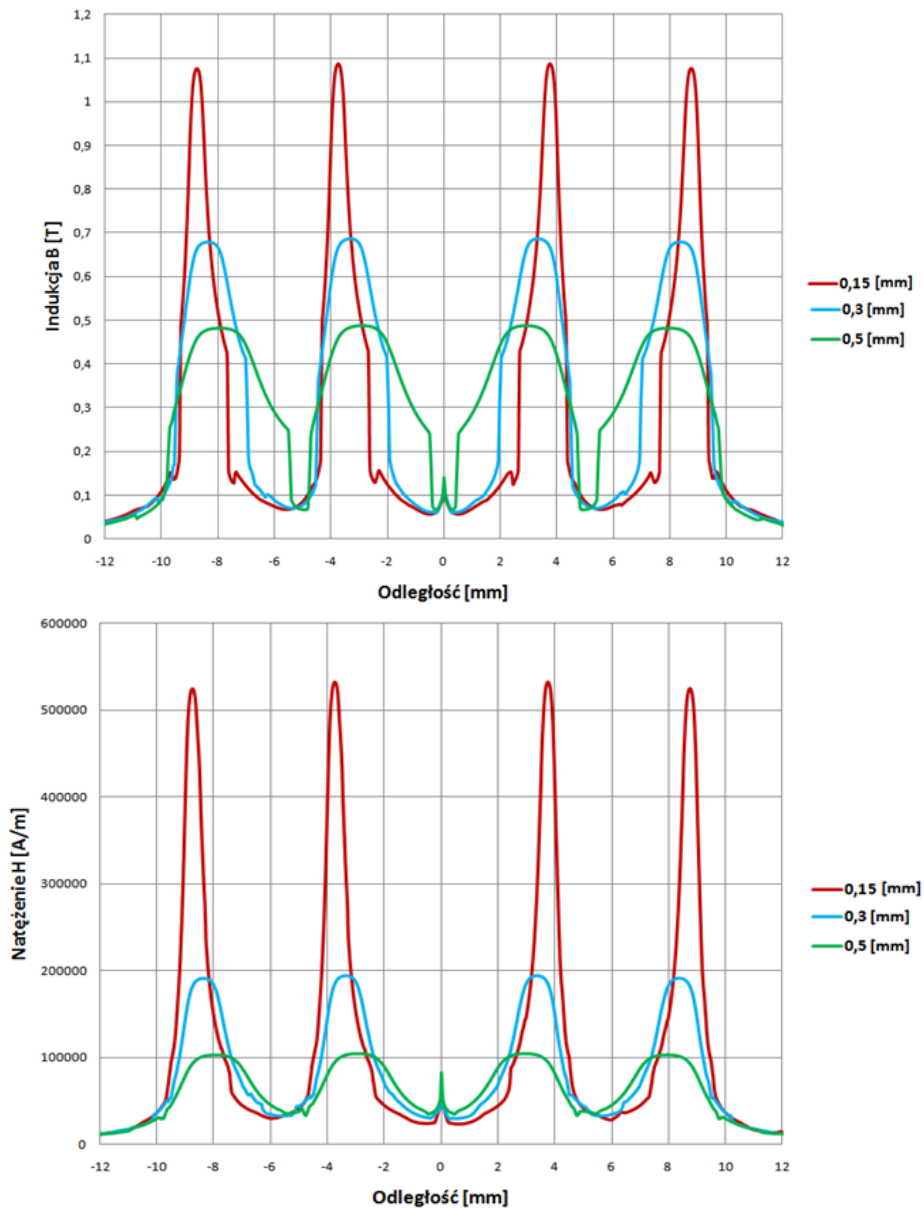
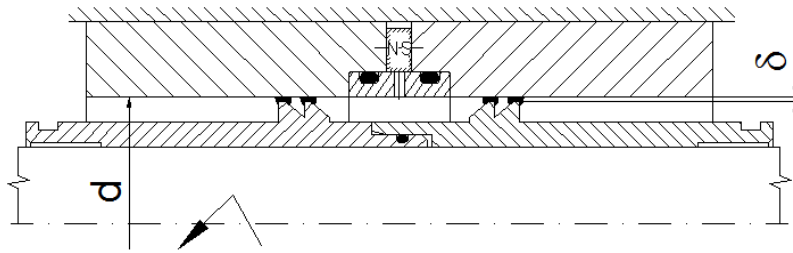


Rys.6.12. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 6$, $Z = 5$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm

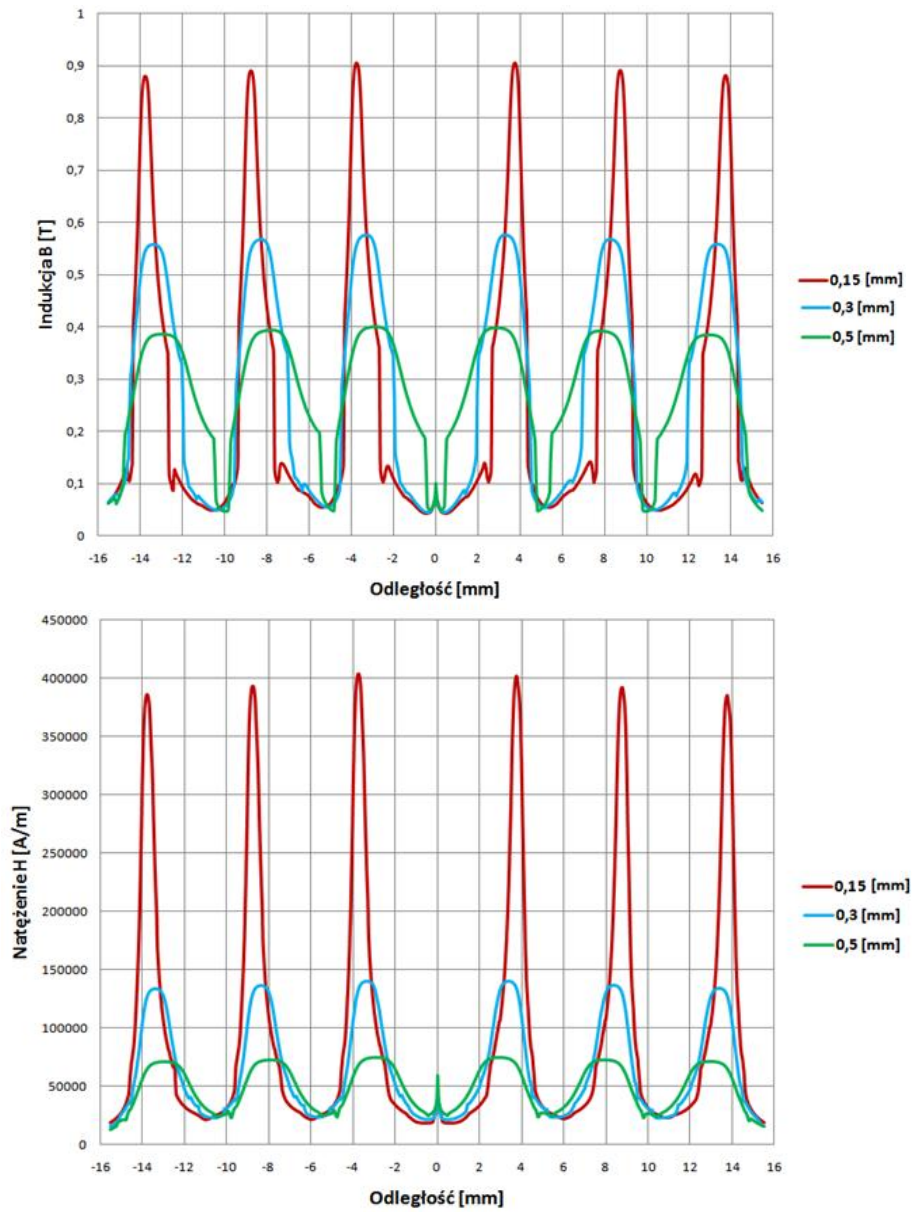
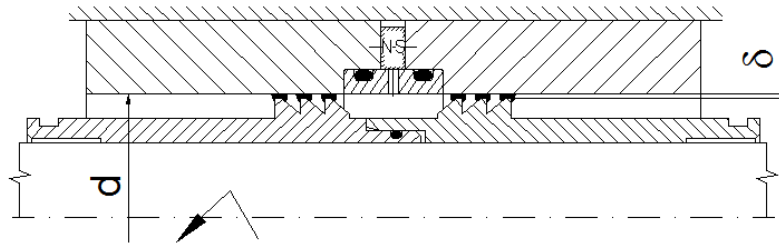
Rozkład indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego w szczelinach pomiarowych dla uszczelnień w układzie symetrycznym (do badania oporów tarcia)



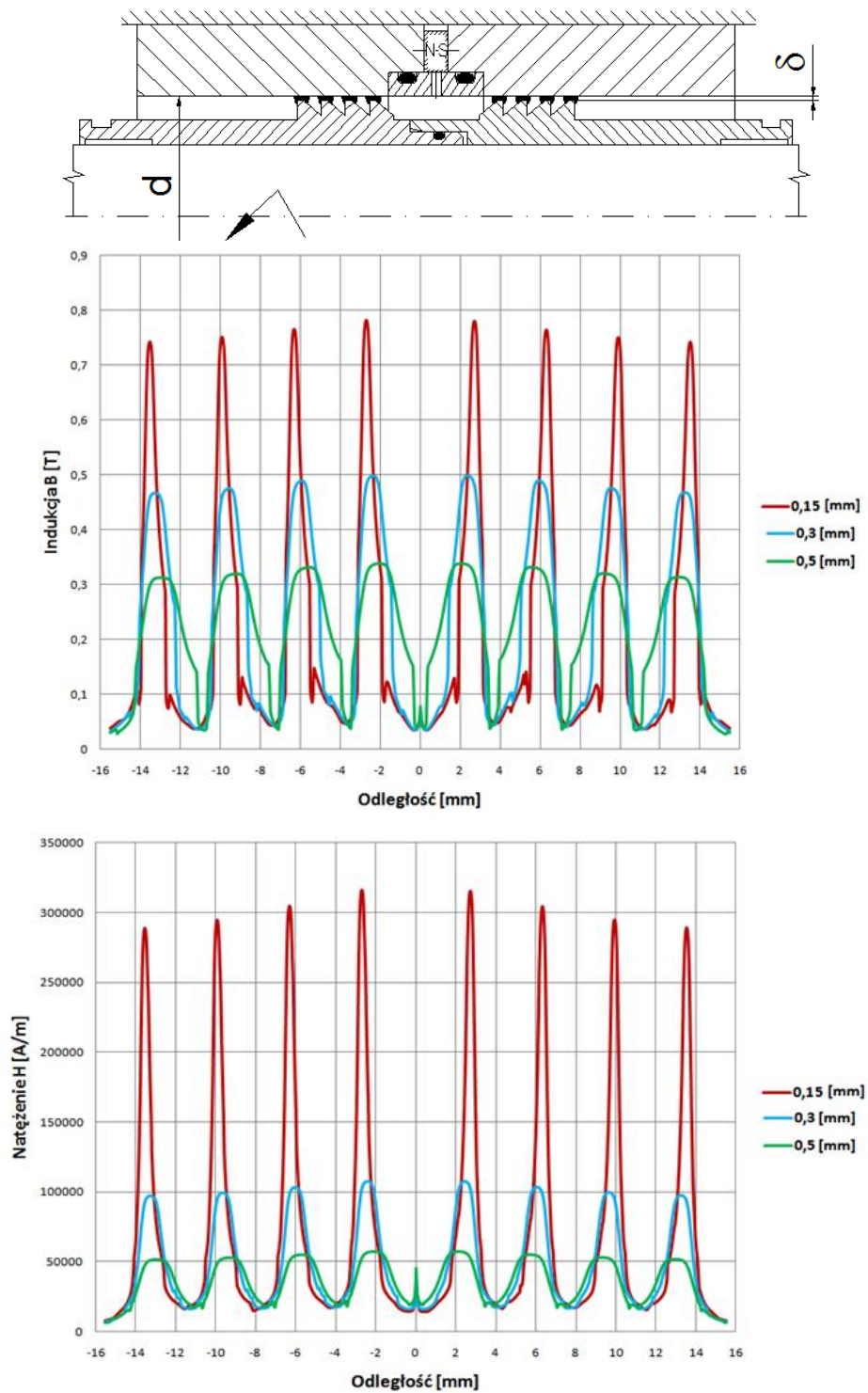
Rys.6.13. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 1$, $Z = 1$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm



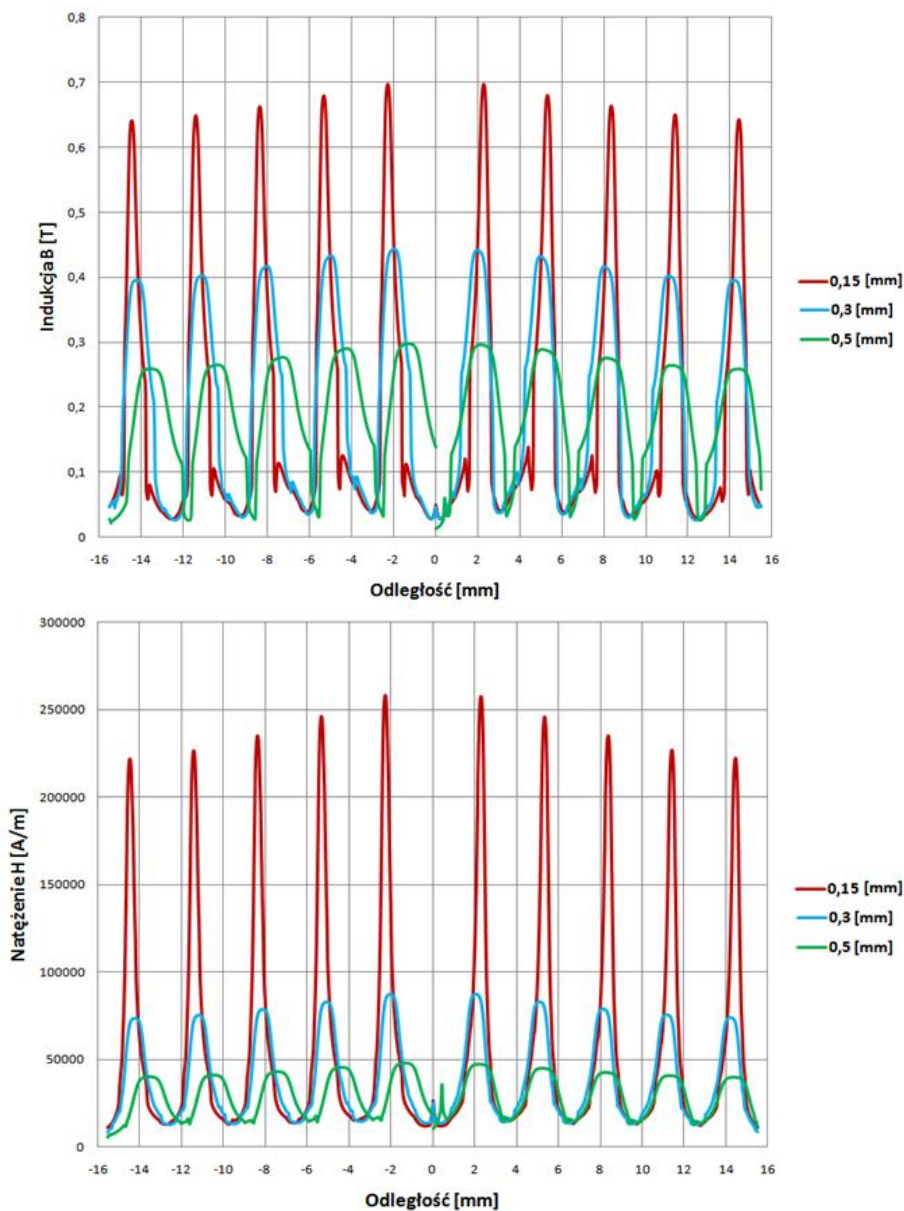
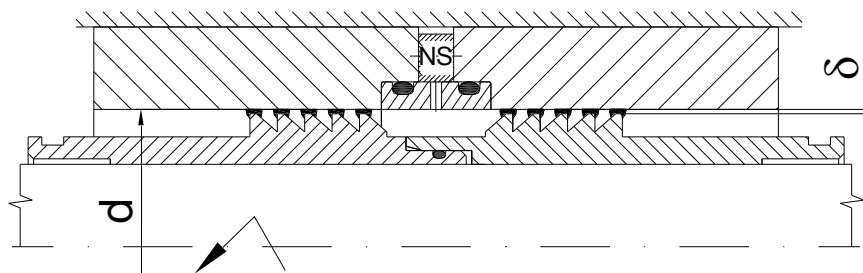
Rys.6.14. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występow uszczelniających $Z_B = 2$, $Z = 2$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm



Rys.6.15. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występow uszczelniających $Z_B = 3$, $Z = 3$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm



Rys.6.16. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 4$, $Z = 4$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $0,3$; $0,5$ mm



Rys.6.17. Rozkład indukcji magnetycznej B i natężenia pola magnetycznego H w uszczelnieniu z cieczą MR dla liczby występów uszczelniających $Z_B = 5$, $Z = 5$ i wysokości szczeliny $\delta = 0,15$; $\delta = 0,3$; $\delta = 0,5$ mm

W tabelicy 6.4 zestawiono maksymalne wartości indukcji magnetycznej B_{\max} i maksymalne wartości natężenia pola H_{\max} , dla różnej liczby występów Z i różnych wysokości szczelin δ . Podane wyniki podzielono na dwie grupy: dla

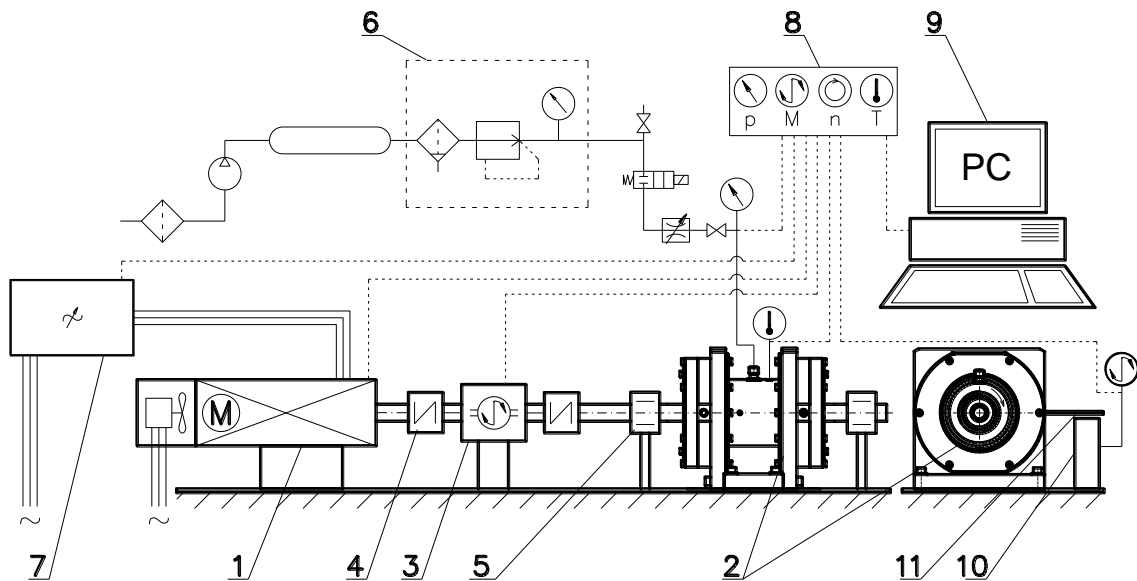
układu uszczelnienia niesymetrycznego o liczbie występów tulei bazowej $Z_B=6$ i pomiarowej $Z=1,2,3,4,5$ oraz dla układu symetrycznego, gdzie $Z_B=Z=1,2,3,4,5$:

Tab.6.4. Parametry magnetyczne badanych uszczelnień

Liczba występów uszczelniających tulei pomiarowej	Wysokość szczeliny	Parametry magnetyczne			
		układ uszczelnienia niesymetryczny $Z_B=6$		układ uszczelnienia symetryczny $Z_B=Z$	
Z	δ [mm]	B_{max} [T]	H_{max} [kA/m]	B_{max} [T]	H_{max} [kA/m]
1	0,15	1,35	750	1,3	680
	0,3	0,92	325	0,85	280
	0,5	0,67	180	0,62	155
2	0,15	1,15	570	1,1	525
	0,3	0,72	210	0,68	190
	0,5	0,5	112	0,48	105
3	0,15	0,92	420	0,9	390
	0,3	0,58	145	0,57	140
	0,5	0,41	76	0,4	74
4	0,15	0,78	315	0,77	310
	0,3	0,5	105	0,48	105
	0,5	0,33	56	0,33	55
5	0,15	0,67	240	0,67	240
	0,3	0,42	80	0,42	80
	0,5	0,28	43	0,27	43

6.5. Stanowisko do badań uszczelnień z cieczą MR

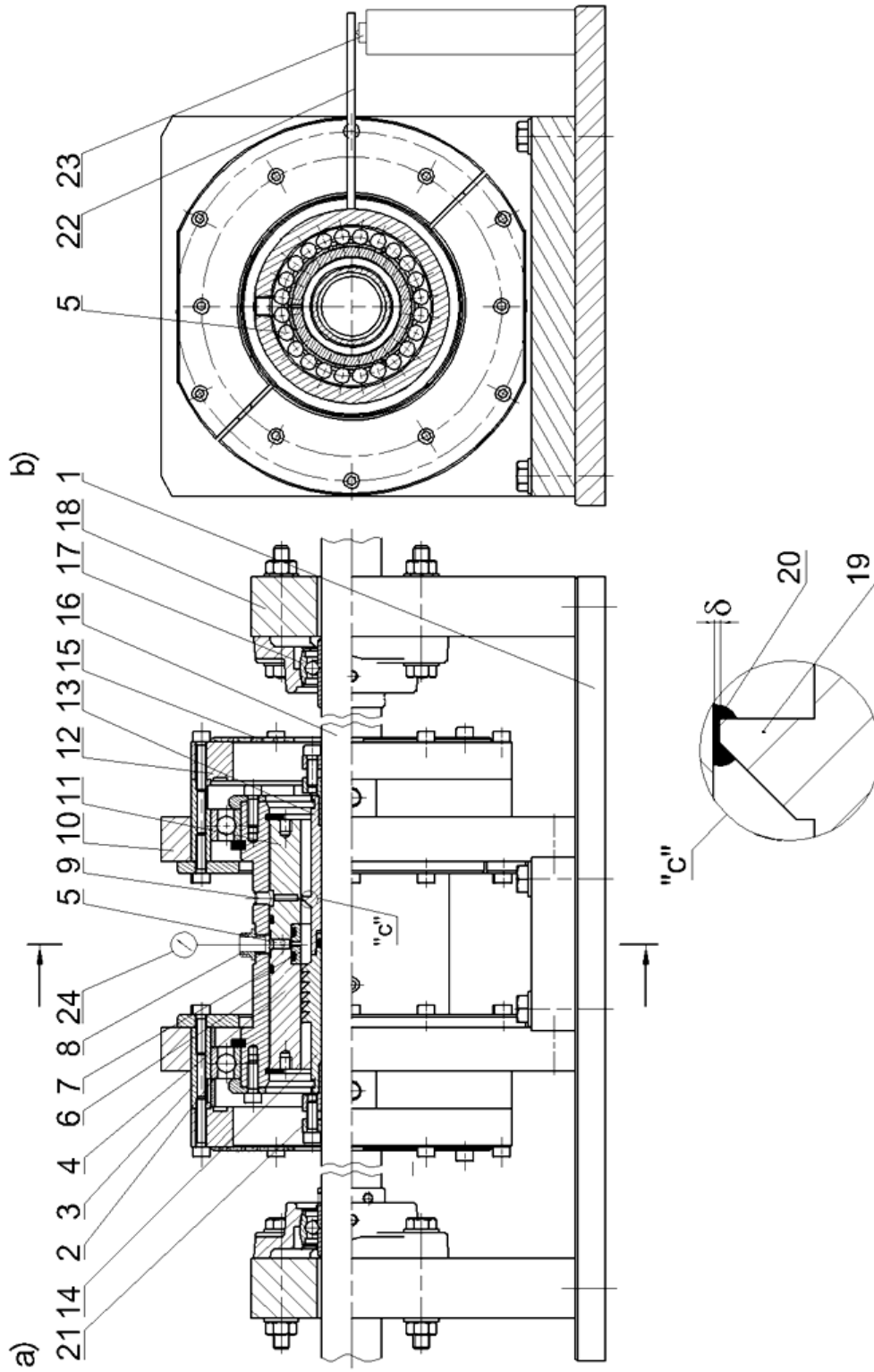
Na rys.6.18, przedstawiono schemat stanowiska do badania uszczelnień z cieczą magneto-reologiczną. Składa się ono z głowicy badawczej, układu napędowego, układu zasilania powietrzem oraz komputerowego układu pomiarowego.



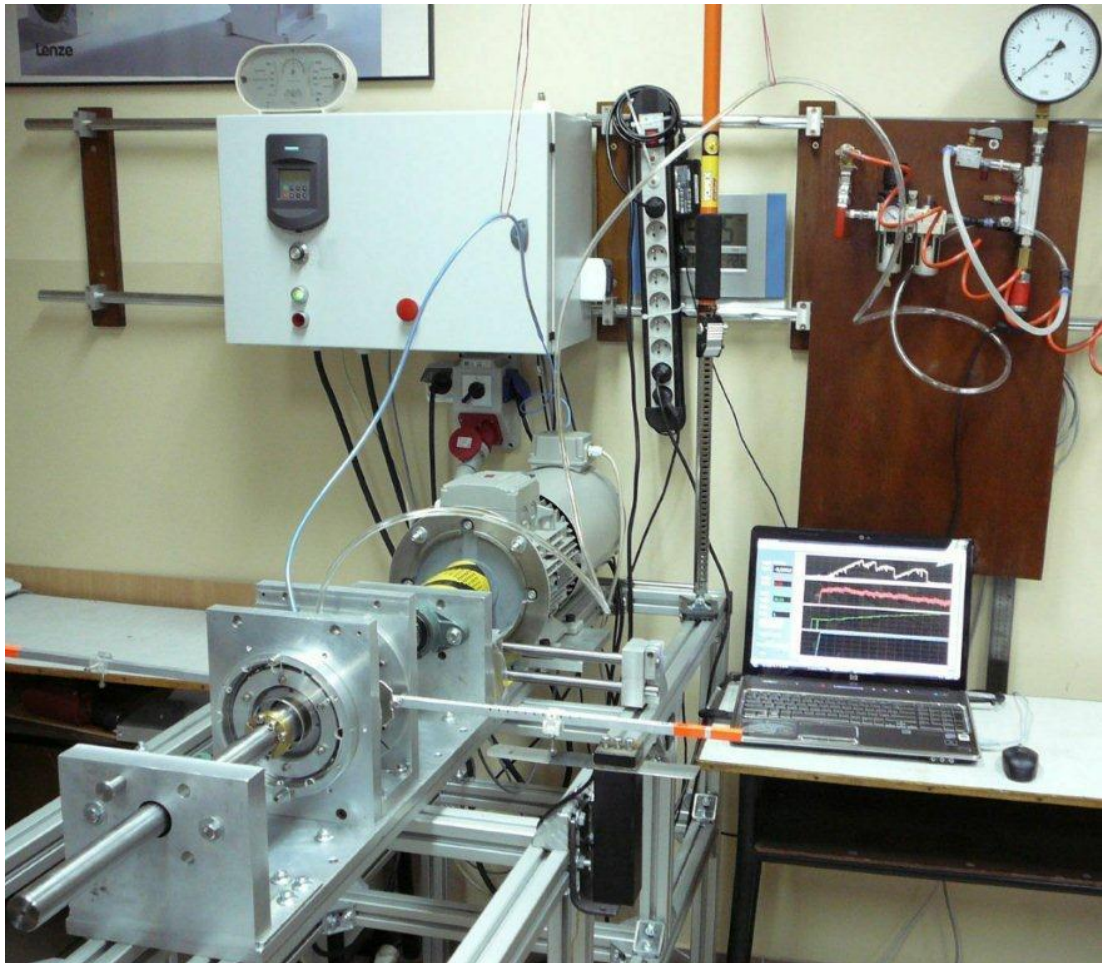
Rys.6.18. Schemat stanowiska badawczego; 1 – silnik, 2 – głowica badawcza, 3 – momentomierz, 4 – sprzęgło, 5 – łożysko toczne, 6 – układ zasilania powietrzem, 7 – przemiennik częstotliwości, 8 – karta pomiarowa, 9 – komputer rejestrujący, 10 – czujnik nacisku, 11 – dzwignienka naciskowa

Rys.6.19a przedstawia konstrukcję głowicy pomiarowej stanowiska do badania uszczelnień z cieczą MR w półprzekroju osiowym, przy czym szczegół „c” pokazuje w powiększeniu występ uszczelniający wypełniony cieczą magnetyczną w badanym uszczelnieniu, a rys.6.19b przedstawia głowicę w półprzekroju poprzecznym. Tulejowy korpus głowicy 6 osadzony jest w łożyskach tocznych 2 umieszczonych w oprawach 3, przymocowanych do wsporników 10. Wewnątrz korpusu 6 znajduje się wał 16 osadzony obrotowo na łożyskach tocznych wahlowych 17 przymocowanych do wsporników 18. Korpus głowicy 6 zamknięty jest z obu stron od czoła pokrywą 12 wraz z przezroczystą osłoną 15. Wał 16 na jednym końcu ma czop służący do połączenia go z napędem ruchu obrotowego. Drugi koniec wału 16 wprowadzony jest w przestrzeń korpusu głowicy 6, gdzie nasunięte są na niego tuleje badawcze 13,14 z występami uszczelniającymi. Do mocowania tulei badawczych 13,14 na wale 16 służą pierścienie zaciskowe 21. Tuleje 13,14 wykonane są z luzem względem wewnętrznych powierzchni walcowych nabiegunników 4,11, osadzonych w korpusie 6. Między nabiegunnikami 4,11 umieszczony jest magnes trwały 5 lub układ magnesów trwałych spolaryzowany poosiowo. Pierścieniowe szczeliny δ pomiędzy występami uszczelniającymi tulei 13,14,

a wewnętrznymi powierzchniami walcowymi nabiegowników wypełnione są cieczą magnetyczną 20, utrzymywaną w nich siłami pola magnetycznego. Temperatura pracy badanego uszczelnienia mierzona jest przy pomocy termopary, wprowadzanej w otwór 9, wykonany w nabiegowniku 11. Ciśnienie gazu doprowadzane jest do przestrzeni pomiędzy nabiegownikami 4,11, a występami uszczelniającymi obu tulei pomiarowych 13,14 przez otwór wykonany w tulejce izolacyjnej 7 umieszczonej pomiędzy nabiegownikami. W środkowej części korpusu 6 umocowany jest króciec przyłącza zasilającego 8, łączącego głowicę 6 ze źródłem gazu o regulowanym ciśnieniu. Zmiany ciśnienia gazu w badanym uszczelnieniu rejestrowane są przez przetwornik ciśnienia 24. Moment tarcia w uszczelnieniu wyznaczany był pośrednio przez pomiar siły przekazywanej z korpusu głowicy 6 poprzez dźwignię 22 na tensometryczny czujnik siły 23 lub bezpośrednio za pomocą momentomierza umieszczonego pomiędzy wałem 16, a wałem silnika. widok ogólny stanowiska badawczego pokazano na rys.6.20.



Rys.6.19. Konstrukcja głowicy pomiarowej stanowiska do badania uszczelnień z cieczą magnetoologiczną, a) przekrój wzdłużny, b) przekrój poprzeczny; 1–podstawa, 2-łożysko toczne, 3–oprawa łożyska, 4-nabiegownik, 5–magnes trwały, 6–korpus głowicy, 7–tulejka izolacyjna, 8–przyłącze zasilające, 9–termopara, 10–wspornik, 11-nabiegownik, 12–pokrywa, 13–tuleja pomiarowa, 14–tuleja bazowa, 15–osłona, 16–wał, 17–łożysko toczne, 18–wspornik łożyska, 19–występ uszczelniający, 20–ciecz magnetyczna, 21–pierścień zaciskowy, 22–dźwignia, 23–tensometryczny czujnik siły, 24–przetwornik ciśnienia, δ - szczelina pierścieniowa,



Rys.6.20. Widok ogólny stanowiska badawczego.

6.6. Procedura badawcza

Badania krytycznego ciśnienia (ciśnienia przebiccia) i momentu tarcia uszczelnienia przeprowadzone będą zgodnie z poniżej przedstawioną procedurą badawczą. Pomiary będą dokonywane przy płynnie zwiększonym ciśnieniu sprężonego powietrza w komorze pomiarowej, do chwili utraty szczelności przez uszczelnienie. Za utratę szczelności przyjęto wystąpienie spadku ciśnienia w układzie doprowadzającym powietrze. Parametry badawcze, np. ilość cieczy magnetoreologicznej aplikowanej do uszczelnienia, liczba występów uszczelniających, prędkość obrotowa wału itp. były określone, zgodnie z programem badań, zależnie od wykonywanego badania.

W trakcie badań temperatura otoczenia mieściła się w przedziale 20 – 25°C, którą rejestrowano za pomocą termometru rtęciowego i termopary połączonej z kartą pomiarową i układem rejestrującym. Temperatura uszczelnienia

rejestrowana była za pomocą termopary w specjalnie przygotowanym otworze w głowicy badawczej.

Próby badawcze były powtarzane. Jeżeli wynik pierwszego badania i powtórzenia różnił się o więcej niż 10% przeprowadzano jedną lub więcej prób uzupełniających.

Dla uzyskania wiarygodnych wyników pomiarów wszystkie badania wykonano według procedury badawczej:

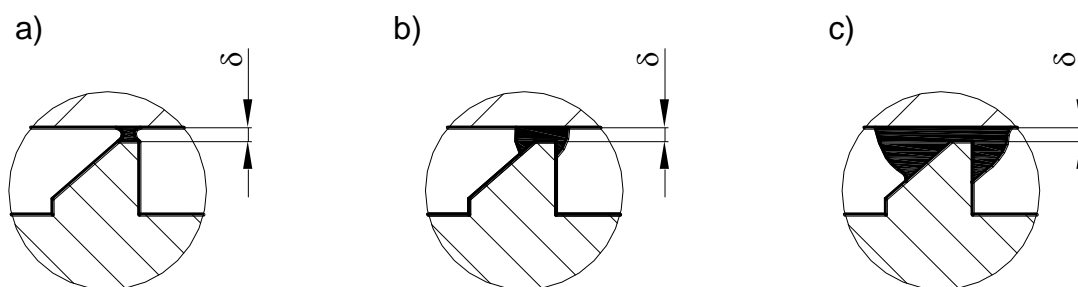
1. Zamontowanie tulei badawczych na wale w głowicy stanowiska: tuleję pomiarową z występami uszczelniającymi w liczbie $Z=1÷5$ oraz tuleję bazową z występami $Z_B=6$ dla badania ciśnienia, lub $Z_B=Z$ dla badania momentu tarcia.
2. Rozmieszanie cieczy magnetoreologicznej dla ujednorodnienia zawiesiny.
3. Zaaplikowanie równomiernie na obwodzie szczeliny na każdy występ uszczelniający odmierzonych ilości cieczy MR.
4. Rozpędzenie wału do $n=1000\text{min}^{-1}$ w czasie 20s dla równomiernego rozprowadzenia cieczy w szczelinie, zatrzymanie obrotów i pozostawienie na czas 600s, w celu stabilizacji cieczy.
5. Uruchomienie trybu pomiaru w panelu kontrolno-sterującym i w programie rejestrującym Labview.
6. Włączenie obrotów wału o zadanej prędkości obrotowej przy badaniu ciśnienia dynamicznego i momentu tarcia, lub pominięcie tego kroku przy badaniu ciśnienia statycznego.
7. Otworzenie dopływu sprężonego powietrza,
 - a) dla badania ciśnienia: ustawienie dławienia przepływu, aby szybkość wzrostu ciśnienia wynosiła ok 0,1 kPa/s lub
 - b) dla badania momentu tarcia: ustawienie stałego zadanego ciśnienia.
8. Rejestrowanie przebiegu badania i zakończenie badania:
 - a) dla badania ciśnienia: po osiągnięciu przecieku uszczelnienia pod wpływem wzrostu ciśnienia do poziomu krytycznego p_{kr} , z jednoczesną obserwacją spadku ciśnienia w układzie,
 - b) dla badania momentu tarcia: po upływie czasu 1500s
9. Wyłączenie silnika i zatrzymanie trybu pomiaru programu Labview.

10. Odczytanie z zarejestrowanych danych wartości ciśnienia krytycznego p_{kr} (przy którym nastąpiło przebicie uszczelnienia) lub momentu tarcia M_t uszczelnienia.
11. Zdemontowanie uszczelnienia i oczyszczenie benzyną ekstrakcyjną tulei badawczych i powierzchni nabiegunników.

6.7. Badania pilotażowe

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych wykonane będą badania pilotażowe, mające na celu oszacowanie wpływu wysokości szczeliny i ilości cieczy magnetoreologicznej aplikowanej do uszczelnienia, na uzyskiwane ciśnienia krytyczne. Badania te obejmują wyznaczenie ciśnienia krytycznego dla trzech wysokości szczelin. W pierwszej kolejności przeprowadzone będą badania przy stałej objętości cieczy, a następnie przy stałym współczynniku wypełnienia szczeliny.

Można przypuszczać że ilość aplikowanej cieczy MR w rejon szczeliny roboczej odgrywa znaczącą rolę dla poprawności pracy uszczelnienia. Zbyt mała objętość cieczy MR może doprowadzić do nierównomiernego wypełnienia szczeliny i zmniejszenia skuteczności uszczelniania (rys.6.21.a). Nadmierna ilość cieczy natomiast może powodować zwiększenie oporów ruchu, nie wpływając istotnie na poprawienie skuteczności uszczelniania (rys.6.21.c).



Rys.6.21. Model wypełnienia szczeliny pomiarowej różnymi objętościami cieczy MR
 a) zbyt mała objętość cieczy, b) właściwa objętość cieczy, c) nadmierna objętość cieczy

Istotne znaczenie ma również dokładność i sposób aplikowania cieczy do uszczelnienia (zaprawiania). Dozowanie odpowiedniej ilości cieczy MR na występy uszczelniające realizowano za pomocą dozownika laboratoryjnego LabMATE LM100, zapewniającego dokładność podawania $\pm 2\mu\text{l}$. Ten sposób

dozowania zapewnił jednolitość wypełnienia szczeliny w poszczególnych seriach badawczych.

Badania przeprowadzono dla uszczelnień jednowystępowych (liczba występów uszczelniających na tulei pomiarowej $Z=1$), przy prędkości obrotowej wału $n=1000\text{obr/min}$.

- Badania ciśnienia krytycznego dla stałej objętości cieczy MR ($v=\text{const}$)

Dla porównywalności prowadzonych prac badawczych, badania będą wykonywane w warunkach analogicznych do badań uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną, prowadzonych wcześniej w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn AGH, w ramach realizacji projektów badawczych. Badaniu poddano trzy wielkości szczeliny promieniowej $\delta = 0,15\text{mm}$; $\delta = 0,3\text{mm}$ i $\delta = 0,5\text{mm}$. Do szczeliny roboczej zaaplikowano stałą objętość cieczy MR niezależnie od wielkości szczeliny. Objętość cieczy ustalono na $v=150\mu\text{l}$, podobnie jak we wcześniej realizowanych w AGH pracach badawczych.

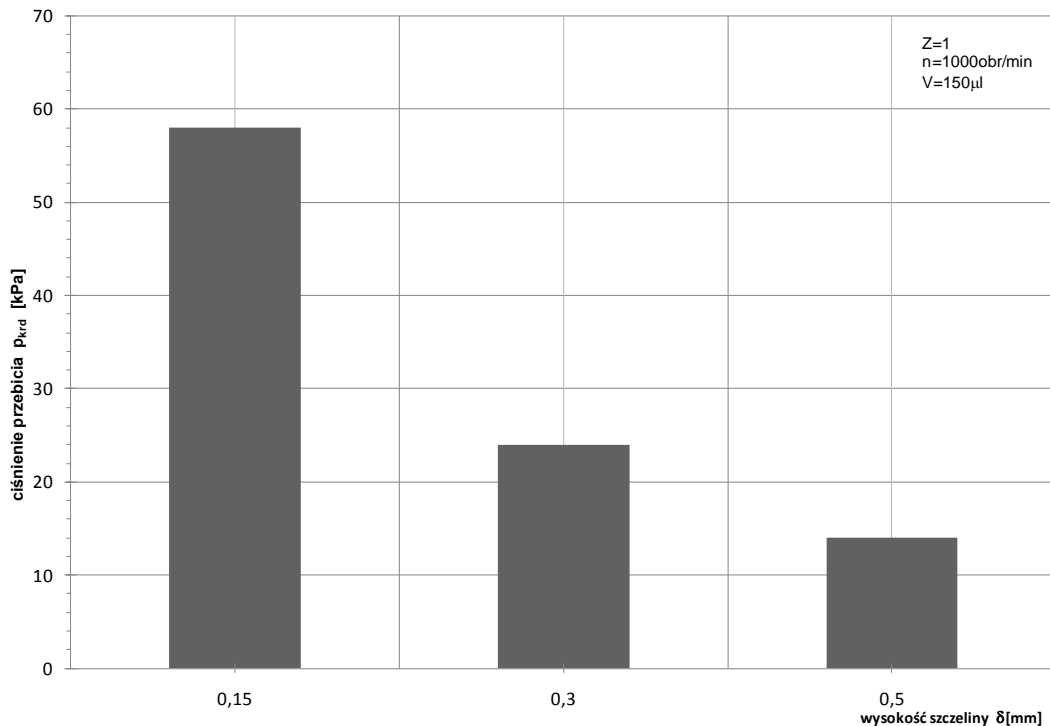
W tabelicy (Tab.6.5.) przedstawiono wyniki pomiarów dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} , dla szczelin o wysokościach $\delta = 0,15\text{mm}$; $\delta = 0,3\text{mm}$ i $\delta = 0,5\text{mm}$. Badania przeprowadzono dla uszczelnienia jednowystępowego (jednostopniowego – liczba występów uszczelniających $Z=1$).

Tab.6.5. Zestawienie wyników pomiarów dynamicznego ciśnienia krytycznego dla $V=150\mu\text{l}$

Wysokość szczeliny δ [mm]	Objętość cieczy aplikowanej do szczeliny V [μl]	Liczba występów uszczelniających		Dynamiczne ciśnienie krytyczne p_{krd} [kPa]
		Z_B	Z	
0,15	150	6	1	58
0,3	150	6	1	24
0,5	150	6	1	14

Na wykresie rys.6.22. przedstawiono wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnień jednowystępowych dla trzech wysokości szczeliny

δ przy stałej objętości cieczy $V=150\mu\text{l}$ i przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$.



Rys.6.22. Ciężnienia krytyczne uszczelnienia jednowystępowego dla trzech wysokości szczeliny $\delta = 0,15\text{mm}$; $\delta = 0,3\text{mm}$ i $\delta = 0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$ i stałej objętości cieczy MR ($V=150\mu\text{l}$)

Badania ze stałą wartością objętości cieczy MR aplikowanej do szczeliny roboczej pozwoliły zauważyć znaczny spadek uzyskiwanych ciężnień krytycznych ze wzrostem szczeliny, wynikający najprawdopodobniej z niedostatecznego wypełnienia cieczą MR większych szczelin.

- Badania ciężnienia krytycznego dla założonego współczynnika wypełnienia cieczą ($\frac{V}{V_n}=\text{const}$)

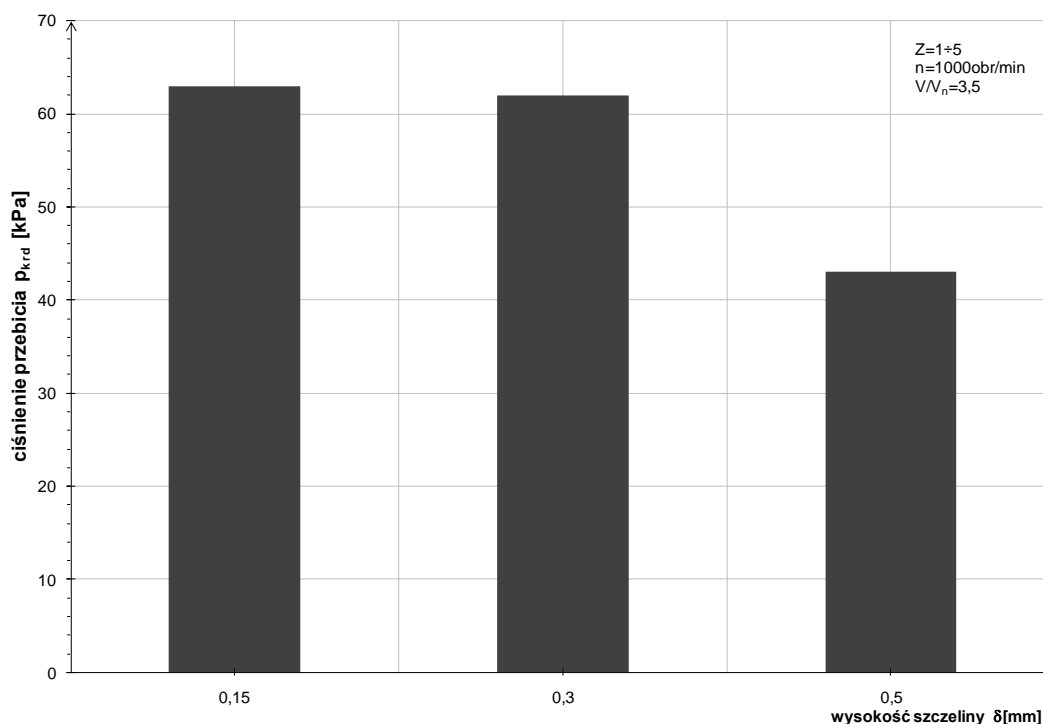
W kolejnym kroku wykonano badania ciężnienia przy stałym nadmiarze objętości cieczy MR (krotności) w odniesieniu do wielkości szczeliny. Badania przeprowadzono dla uszczelnień jednowystępowych (liczba występow uszczelniających $Z=1$) przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 3,5$. Obszerniejsze wyniki badań zostały przedstawione w publikacji [42].

W tabelicy (Tab.6.6.) zestawiono wyniki pomiarów dynamicznego ciężnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia, dla wysokości szczelin $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$.

Tab.6.6. Zestawienie wyników dynamicznego ciśnienia krytycznego dla współczynnika $\frac{V}{V_n} = 3,5$

Wysokość szczeliny δ [mm]	Nominalna objętość cieczy w szczelinie V_n [μ l]	Współczynnik wypełnienia cieczy MR V/V_n	Objętość cieczy aplikowanej do szczeliny V [μ l]	Liczba występów uszczelniających		Dynamiczne ciśnienie krytyczne p_{krd} [kPa]
				Z_B	Z	
0,15	14,2	3,5	50	6	1	63
0,3	56,5	3,5	200	6	1	62
0,5	157,1	3,5	550	6	1	43

Wykres na rys.6.23. pokazuje wartości ciśnień krytycznych p_{krd} uszczelnień jednowystępowych ($Z=1$), dla trzech wysokości szczeliny δ , przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$ i stałym współczynnikiem $\frac{V}{V_n} = 3,5$.



Rys.6.23. Ciśnienia krytyczne uszczelnienia jednowystępowego dla trzech wysokości szczeliny $\delta = 0,15\text{mm}$; $\delta = 0,3\text{mm}$ i $\delta = 0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$ i założonym współczynnikiem wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 3,5$

Otrzymane wyniki wskazują, że ilość cieczy aplikowanej do szczeliny roboczej uszczelnienia jest istotnym czynnikiem i konieczne są badania pozwalające określić właściwą objętość cieczy dla danej geometrii uszczelnienia.

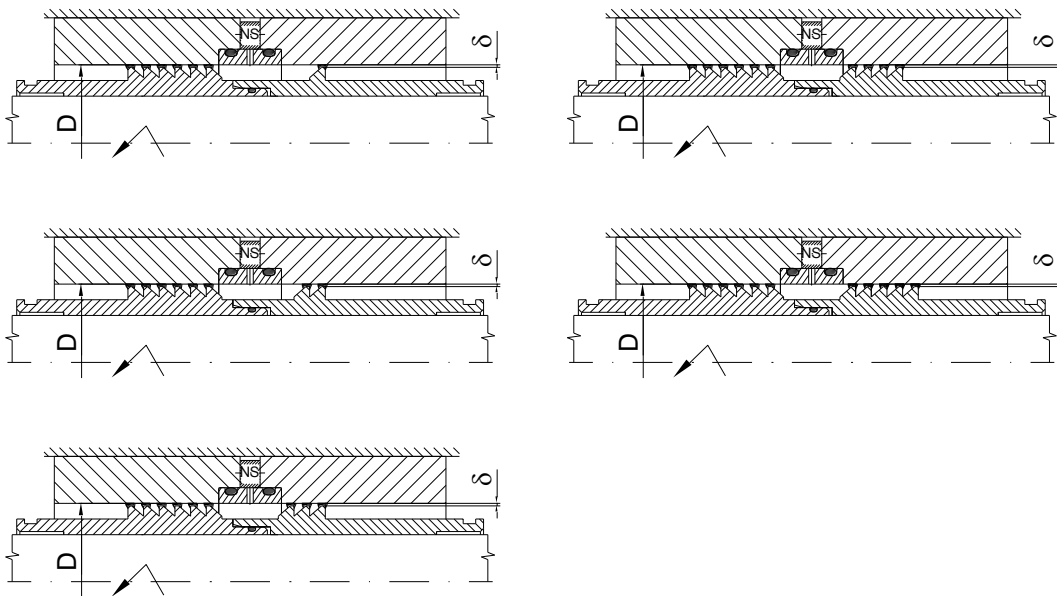
Przy małej objętości cieczy $V=150\mu\text{l}$, przy wzroście wysokości szczeliny następuje znaczny spadek ciśnienia krytycznego. Przy przyjętym współczynnikiem wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 3,5$ ten wpływ jest znacznie mniejszy.

7. CIŚNIENIE KRYTYCZNE W USZCZELNIENIU Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ

Na podstawie wniosków z badań pilotażowych oraz sformułowanego wcześniej celu pracy i w oparciu o przyjęty program badań, przedstawiono w podrozdziale 7.2. szczegółowy zakres badań ciśnienia krytycznego.

7.1. Układ tulei badawczych

Badania przeprowadzono z zastosowaniem układu dwu połączonych tulei; bazowej o stałej liczbie występów uszczelniających $Z_B=6$, i pomiarowej z różną liczbą występów $Z=1÷5$, (rys.7.1). Taki układ badawczy pozwalał na bezawaryjną pracę węzła uszczelniającego w obszarze tulei bazowej. Wykonano serie badań w stanie statycznym ($n=0\text{obr/min}$) oraz dynamicznym, głównie przy prędkości obrotowej wału $n=1000\text{obr/min}$. Wartość prędkości obrotowej przyjęto ze względu na jej dużą powszechność w zastosowaniach praktycznych.



Rys.7.1. Geometria badanego uszczelnienia z cieczą MR stosowana przy pomiarach ciśnienia krytycznego, z tulejami niesymetrycznymi o różnej liczbie występów uszczelniających

Parametry geometryczne badanych uszczelnień podano w tablicy (Tab.6.1)

7.2. Badania ciśnienia krytycznego przy ustalonym współczynniku wypełnienia

Zakres badań ciśnienia krytycznego

Zakres badań doświadczalnych ciśnienia krytycznego obejmuje zgodnie z przyjętym w podrozdziale 6.2. programem badań:

1) Określenie wpływu objętości cieczy magnetoreologicznej aplikowanej do szczeliny roboczej na ciśnienie krytyczne uszczelnienia w warunkach statycznych – p_{kr1s} ($n=0$) i w warunkach dynamicznych – p_{kr1d} ($n=1000$ obr/min). Badanie wykonano z jednowystępowym uszczelnieniem z cieczą MR ($Z=1$), dla trzech wysokości szczeliny: $\delta = 0,15mm$; $\delta = 0,3mm$ i $\delta = 0,5mm$, z różnymi objętościami V cieczy MR;

2) Wyznaczenie wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} dla różnej ilości występów uszczelniających przy ustalonych warunkach pracy; n , $\frac{V}{V_n}$. Dla wielowystępowych uszczelnień z cieczą MR (liczba występów uszczelniających $Z=1,2,3,4,5$) i trzech wysokości szczeliny promieniowej $\delta = 0,15mm$; $\delta = 0,3mm$ i $\delta = 0,5mm$, wypełnionych objętością cieczy MR odpowiadającą ustalonemu dla każdej szczeliny współczynnikowi wypełnienia $\frac{V}{V_n}$.

3) określenie wpływu prędkości obrotowej na wartość ciśnienia krytycznego w uszczelnieniach z cieczą MR przy różnej wysokości szczeliny:

określenie ciśnienia krytycznego p_{kr1d} w warunkach dynamicznych ($n=1000;2000;3000$ obr/min) jednowystępowego uszczelnienia z cieczą MR (liczba występów uszczelniających $Z=1$) dla trzech wysokości szczeliny promieniowej $\delta = 0,15mm$; $\delta = 0,3mm$ i $\delta = 0,5mm$ wypełnionych objętością cieczy MR odpowiadającą ustalonemu dla każdej szczeliny współczynnikowi wypełnienia $\frac{V}{V_n}$.

Dla uzyskanych wyników badań określono przedziały ufności na podstawie rozkładu „t Studenta” zmiennej dla małych prób o $n < 10$. Przedziały

ufności wyznaczono przy założonym poziomie istotności $\xi=0,05$ i oznaczono na wykresach. Oznaczenie przedziałów ufności pominięto na wykresach zestawieniowych dla trzech wysokości szczelin, w celu zwiększenia ich przejrzystości, [81].

Wyniki badań

1. Badania ciśnienia krytycznego uszczelnienia dla różnych objętości cieczy MR.

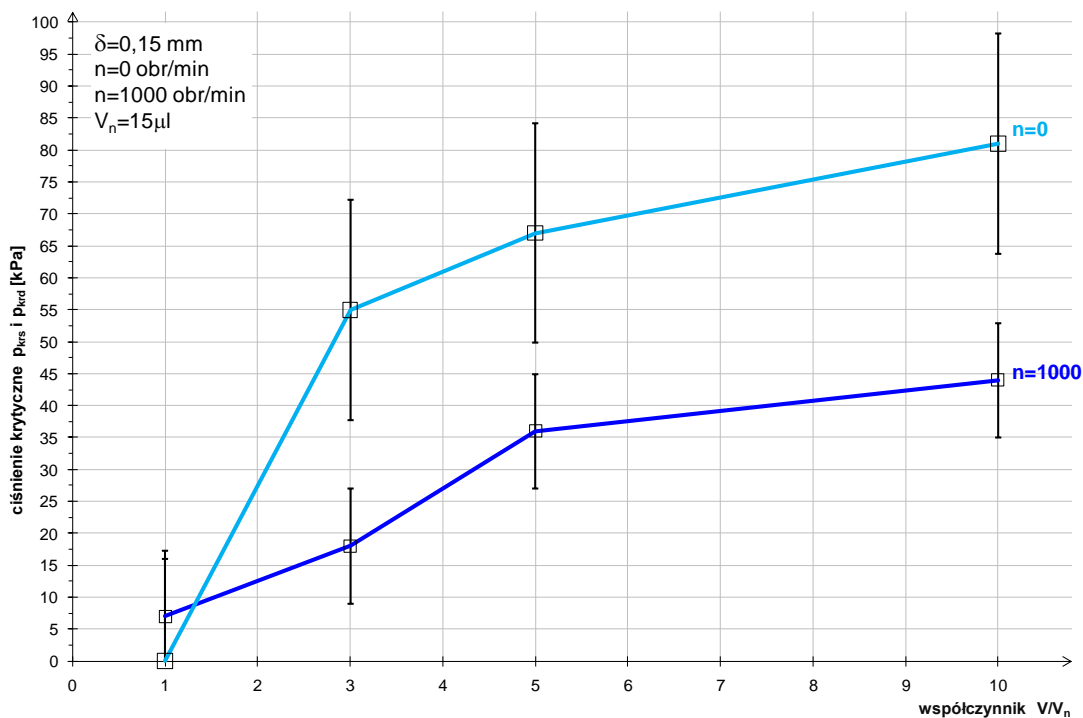
W tabelicy (Tab.7.1) zestawiono wyniki pomiarów ciśnienia krytycznego statycznego p_{krs} ($n=0 \text{ obr/min}$) i dynamicznego p_{krd} ($n=1000 \text{ obr/min}$), dla uszczelnienia jednowystępowego, przy wysokościach szczeliny $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$. Na każdy występ uszczelnienia aplikowano objętość cieczy magnetoreologicznej odpowiadającą współczynnikowi wypełnienia o wartościach $\frac{V}{V_n}=1, 3, 5$ i 10 .

Tab.7.1. Wyniki pomiarów statycznego i dynamicznego ciśnienia krytycznego uszczelnienia

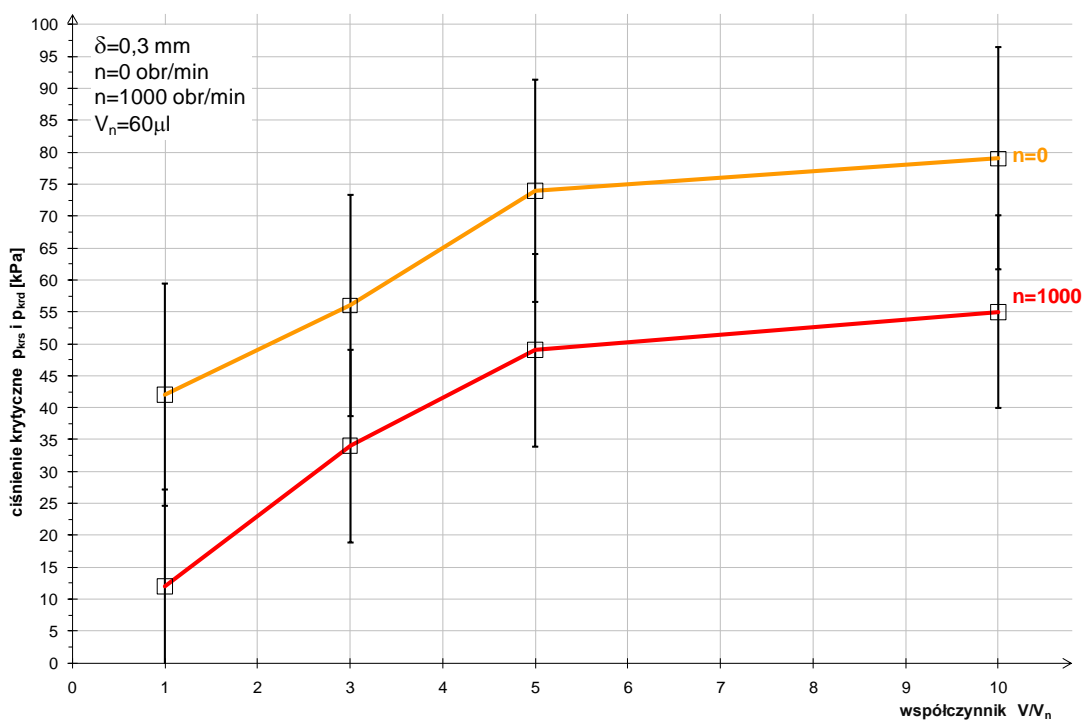
Liczba występów uszczelniających		Wysokość szczeliny δ [mm]	Nominalna objętość cieczy w szczelinie V_n [μl]	Współczynnik wypełnienia cieczy MR V/V_n	Objętość cieczy aplikowanej do szczeliny V [μl]	Statyczne ciśnienie krytyczne p_{krs} [kPa]	Dynamiczne ciśnienie krytyczne p_{krd} [kPa]
Z_B	Z						
6	1	0,15	15	1	15	0	7
				3	45	55	18
				5	75	67	36
				10	150	81	44
6	1	0,3	60	1	60	42	12
				3	180	56	34
				5	300	74	49
				10	600	79	55
6	1	0,5	160	1	160	34	14
				3	500	81	38
				5	800	87	42
				10	1600	98	42

Na wykresach pokazanych na rys.7.2., rys.7.3. i rys.7.4. przedstawiono wartości statycznego p_{krs} i dynamicznego p_{krd} ciśnienia krytycznego uszczelnienia jednowystępowego ze szczeliną o wysokościach $\delta=0,15\text{mm}$; $\delta=0,30\text{mm}$

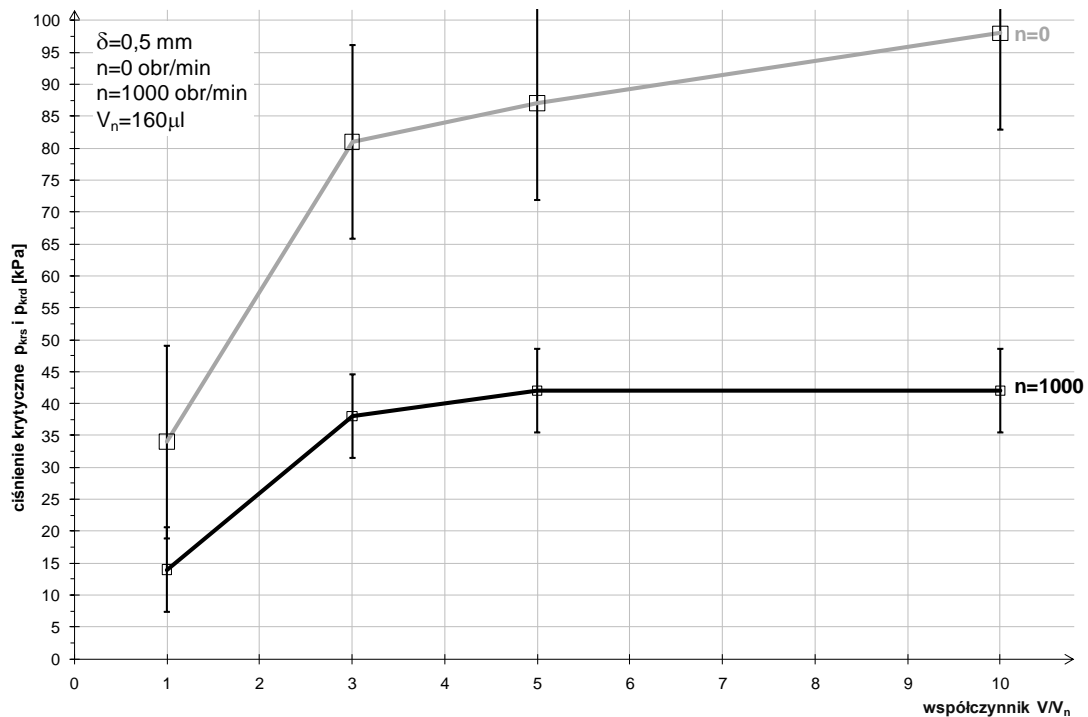
i $\delta=0,50\text{mm}$, w zależności od współczynnika wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ cieczy MR, przy prędkości obrotowej $n=0\text{ obr/min}$ i $n=1000\text{ obr/min}$.



Rys.7.2. Ciśnienie krytyczne p_{krs} i p_{krd} uszczelnienia o liczbie występów $Z=1$, ze szczeliną $\delta=0,15\text{mm}$, w zależności od wsp. wypełnienia cieczą MR $\frac{V}{V_n}$, przy prędkości obrotowej $n=0\text{ obr/min}$ i $n=1000\text{ obr/min}$



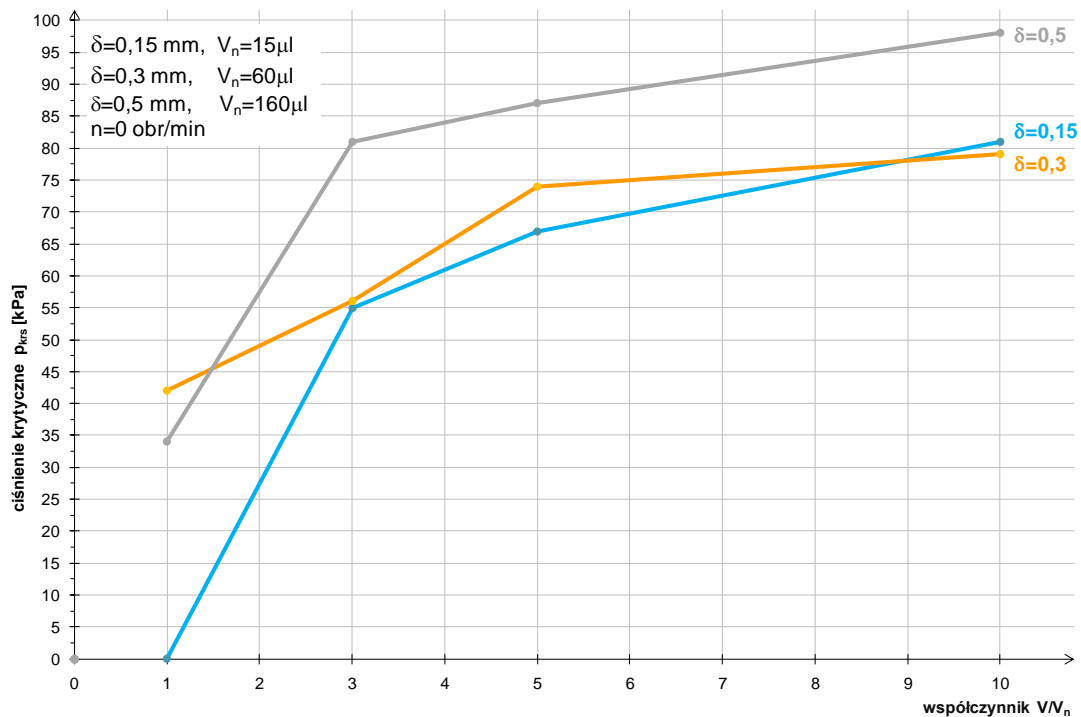
Rys.7.3. Ciśnienie krytyczne p_{krs} i p_{krd} uszczelnienia o liczbie występów $Z=1$, ze szczeliną $\delta=0,3\text{mm}$, w zależności od wsp. wypełnienia cieczą MR $\frac{V}{V_n}$, przy prędkości obrotowej $n=0\text{ obr/min}$ i $n=1000\text{ obr/min}$



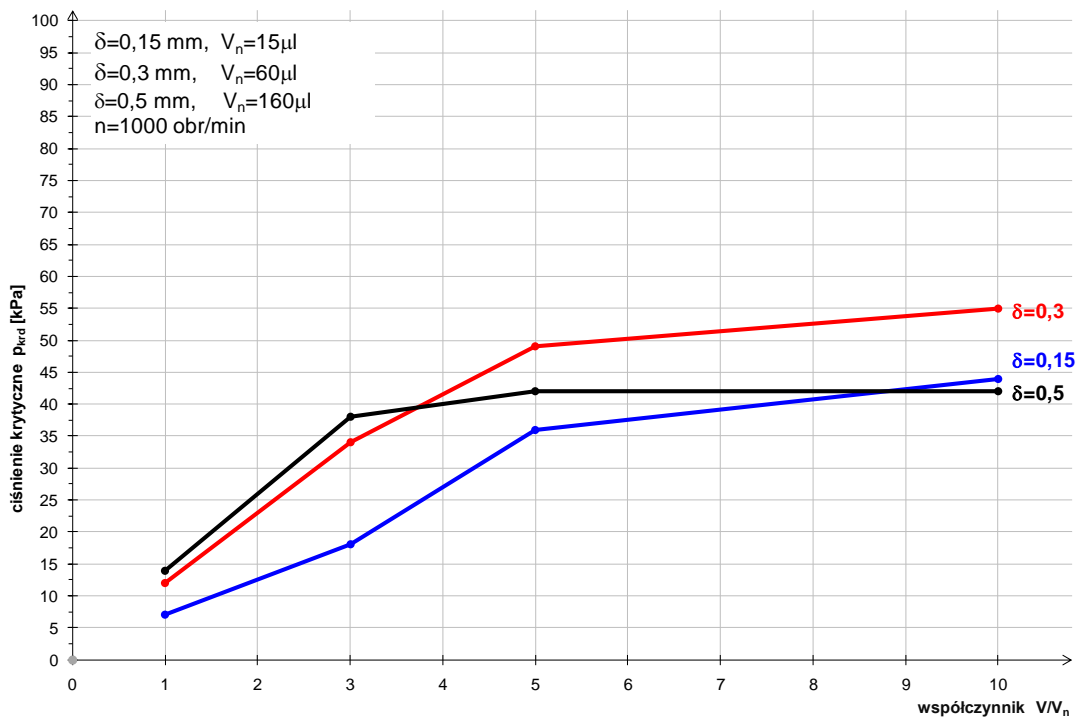
Rys.7.4. Ciśnienie krytyczne p_{krs} i p_{krd} uszczelnienia o liczbie występow $Z=1$, ze szczeliną $\delta=0,5\text{mm}$, w zależności od wsp. wypełnienia cieczą MR $\frac{V}{V_n}$, przy prędkości obrotowej $n=0$ obr/min i $n=1000$ obr/min

Na wykresie rys.7.5. zestawiono wartości statycznego ciśnienia krytycznego p_{krs} uszczelnień jednowystępowych ze szczeliną o wysokościach $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=0$ obr/min, w zależności od wsp. wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ cieczą MR.

Wykres na rys.7.6. pokazuje zestawienie wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnień jednowystępowych ze szczeliną o wysokościach $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=0$ obr/min, w zależności od wsp. wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ cieczą MR.



Rys.7.5. Wykres porównawczy statycznego ciśnienia krytycznego p_{krs} uszczelnienia o liczbie występów $Z=1$, przy prędkości obrotowej $n=0 \text{ obr/min}$ w zależności od wsp. wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ cieczą MR



Rys.7.6. Wykres porównawczy dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia o liczbie występów $Z=1$, przy prędkości obrotowej $n=1000 \text{ obr/min}$ w zależności od wsp. wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ cieczą MR.

Wyniki uzyskanego ciśnienia krytycznego dla różnych wartości współczynnika wypełnienia pokazują, że zwiększanie objętości cieczy pozwala uzyskiwać coraz wyższe wartości ciśnień krytycznych. Jednak po przekroczeniu pewnej objętości cieczy dalszy wzrost ciśnienia krytycznego jest już nieznaczny. Analizując uzyskane wyniki rys.7.5 i 7.6, stwierdzono, że dla każdej wysokości szczeliny δ , możliwe jest wyznaczenie właściwej dla niej objętości cieczy w uszczelnieniu, w postaci ustalonego współczynnika wypełnienia $\frac{V}{V_n}$,

W przypadku badanych szczelin są to:

Tab.7.2. wartości ustalonych współczynników wypełnienia

wysokość szczeliny	ustalony współczynnik wypełnienia
$\delta=0,15\text{mm}$	$\frac{V}{V_n}=10$
$\delta=0,30\text{mm}$	$\frac{V}{V_n}=5$
$\delta=0,50\text{mm}$	$\frac{V}{V_n}=3$

2. Wyznaczenie wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} dla różnej ilości występów uszczelniających przy stałej prędkości obrotowej i przy ustalonym współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n}$

Badania przeprowadzono dla uszczelnień o liczbie występów uszczelniających na tulei pomiarowej $Z=1, 2, 3, 4$ i 5 . Na każdy występ uszczelnienia aplikowano objętość cieczy MR odpowiadającą ustalonej wartości współczynnika wypełnienia $\frac{V}{V_n}$, dla danej wysokości szczeliny δ .

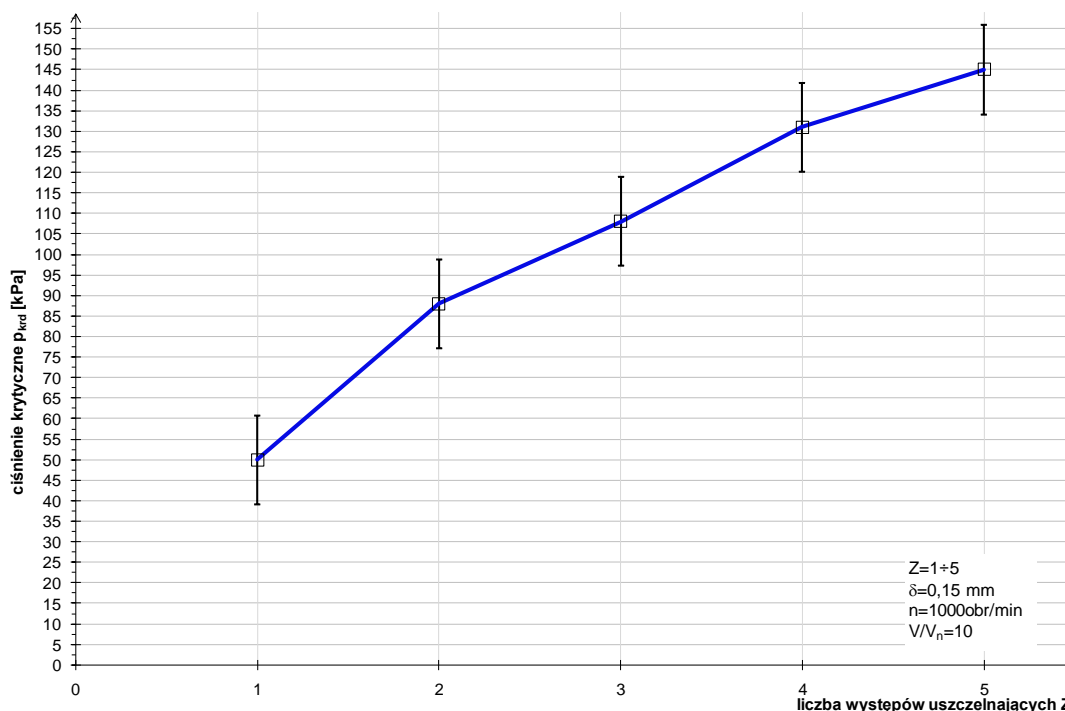
Wyniki pomiarów dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} , dla wysokości szczelin $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej wału $n=1000 \text{ obr/min}$ zestawiono w Tab.7.3.

Poniżej na wykresie rys.7.7. pokazano wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia wielowystępowego ze szczeliną $\delta=0,15\text{mm}$, przy

współczynnika wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 10$ ($V=150\mu\text{l}$) i prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$.

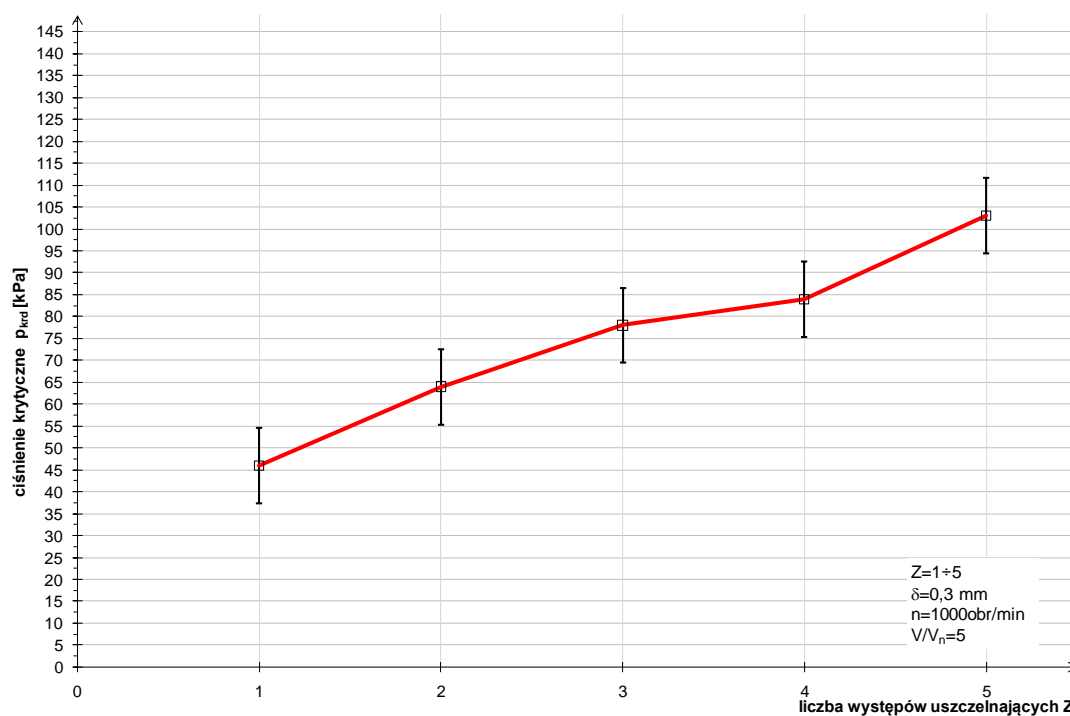
Tab.7.3. Zestawienie wyników pomiarów dynamicznego ciśnienia krytycznego

Liczba występów uszczelniających		Wysokość szczeliny δ [mm]	Nominalna objętość cieczy w szczelinie V_n [μl]	Współczynnik wypełnienia cieczy MR V/V_n	Objętość cieczy aplikowanej do szczeliny V [μl]	Dynamiczne ciśnienie krytyczne p_{krd} [kPa]
Z_B	Z					
6	1	0,15	15	10	150	50
		0,3	60	5	300	46
		0,5	160	3	500	36
6	2	0,15	15	10	150	88
		0,3	60	5	300	64
		0,5	160	3	500	38
6	3	0,15	15	10	150	108
		0,3	60	5	300	78
		0,5	160	3	500	48
6	4	0,15	15	10	150	132
		0,3	60	5	300	84
		0,5	160	3	500	50
6	5	0,15	15	10	150	145
		0,3	60	5	300	103
		0,5	160	3	500	50



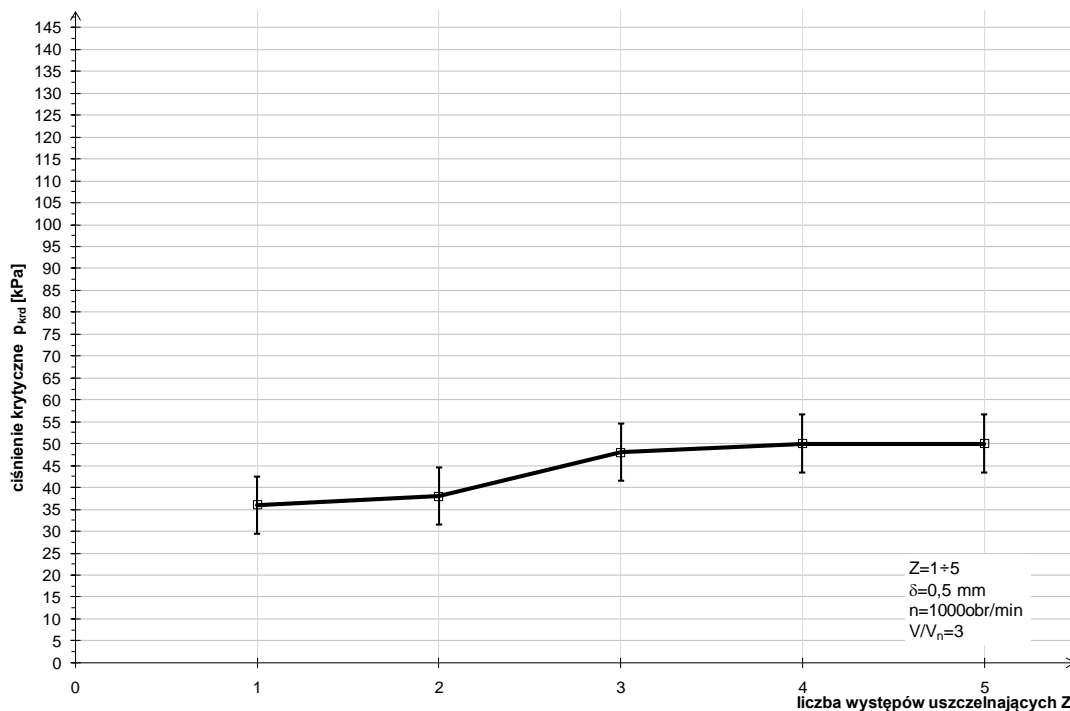
Rys.7.7. Wpływ liczby występów Z na dynamiczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,15\text{mm}$, przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 10$ i prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$

Na wykresie rys.7.8. przedstawiono zależność dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia wielowystępowego ze szczeliną o wysokości $\delta=0,30\text{mm}$, od liczby występów uszczelniających Z , przy objętości cieczy MR $V=300\mu\text{l}$ ($\frac{V}{V_n}=5$) i prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$.



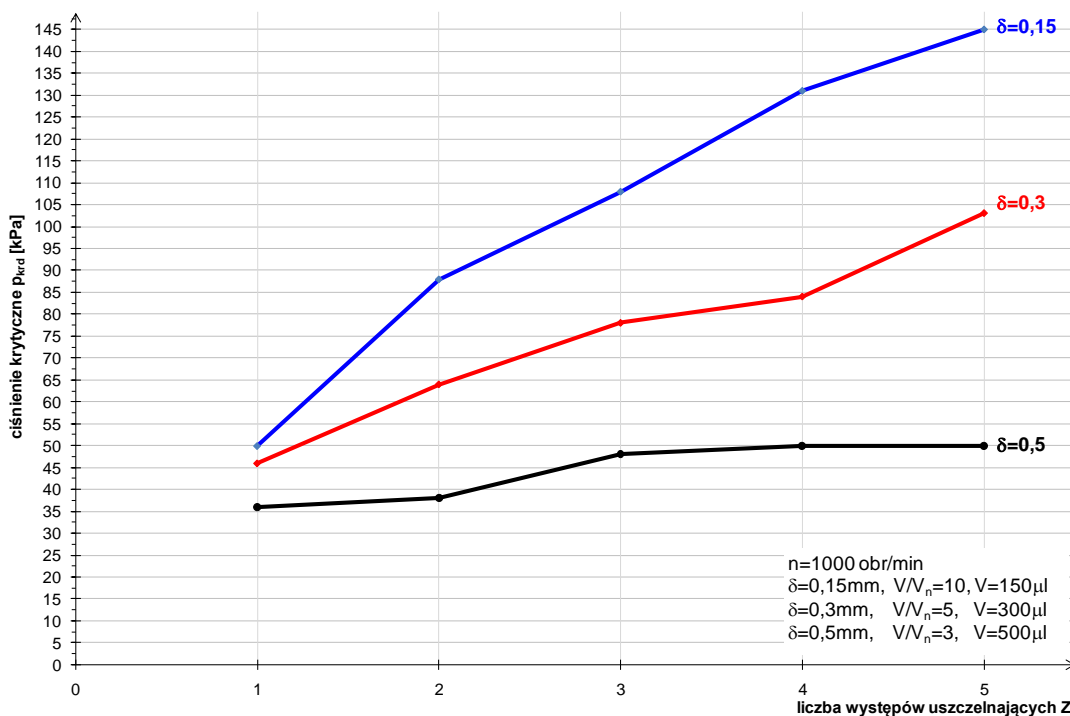
Rys.7.8. Wpływ liczby występów Z na dynamiczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,3\text{mm}$, przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n}=5$ i prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$

Wykres (rys.7.9) przedstawia zależność dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia wielowystępowego ze szczeliną o wysokości $\delta=0,5\text{mm}$, od liczby występów uszczelniających Z , przy objętości cieczy MR $V=500\mu\text{l}$ ($\frac{V}{V_n}=3$) i prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$.



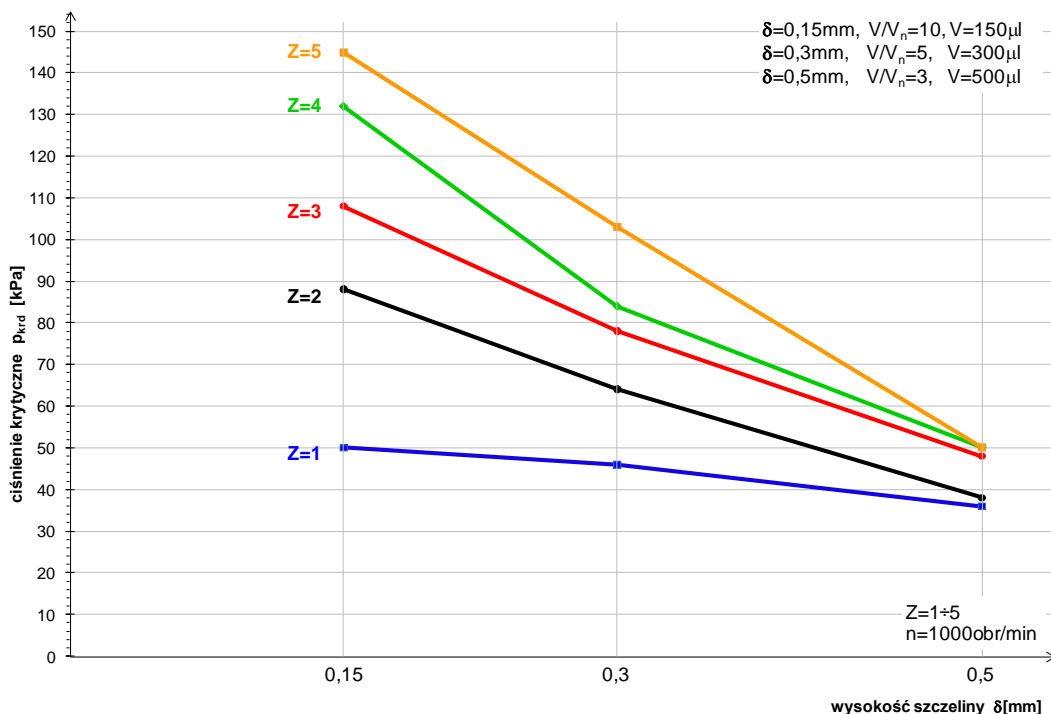
Rys.7.9. Wpływ liczby występów Z na dynamiczne ciśnienie krytyczne uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,5\text{mm}$, przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 3$ i prędkości $n=1000\text{obr/min}$

Na wykresie (rys.7.10). przedstawiono porównanie zależności dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnień wielowystępowych od liczby występów uszczelniających Z dla trzech wysokości szczeliny δ .



Rys.7.10. Wykres porównawczy wartości dynamicznych ciśnień krytycznych uszczelnień w zależności od liczby występów Z dla wysokości szczeliny $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$

Zależność dynamicznego ciśnienia krytycznego od wysokości szczeliny przy różnej ilości występów przedstawiono na rys.7.11. Widoczny jest spadek wpływu ilości występów w miarę wzrostu wysokości szczeliny.



Rys.7.11. Porównanie dynamicznego ciśnienia krytycznego uszczelniających o liczbie występów uszczelniających Z=1, 2, 3, 4 i 5, dla różnych wysokości szczelin δ, przy prędkości obrotowej n=1000obr/min

Wyniki badań uszczelnień wielowystępowych dla trzech wysokości szczelin przy ustalonym współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n}$, pozwalają zaobserwować, że ciśnienie krytyczne uszczelnienia wyraźnie wzrasta wraz ze zwiększaniem liczby występów uszczelniających.

Wzrost ten widocznie się osłabia przy coraz większej liczbie występów. Szczególnie ma to miejsce przypadku największej szczeliny δ=0,5mm, dla której powyżej trzech występów Z=3 wzrost ciśnienia krytycznego jest niewielki. Taka sytuacja może wynikać z rozproszenia pola magnetycznego na większej ilości występów i zmniejszenia koncentracji pola magnetycznego dla pojedynczych szczelin. Przy tak dużej wysokości szczeliny natężenie pola może spadać poniżej wartości magnetyzacji nasycenia cieczy, co potwierdza również przeprowadzona wcześniej symulacja numeryczna rozkładu pola magnetycznego.

3. określenie wpływu prędkości obrotowej na uzyskiwane wartości ciśnienia krytycznego p_{krd} w uszczelnieniach z cieczą MR przy różnej wysokości szczeliny

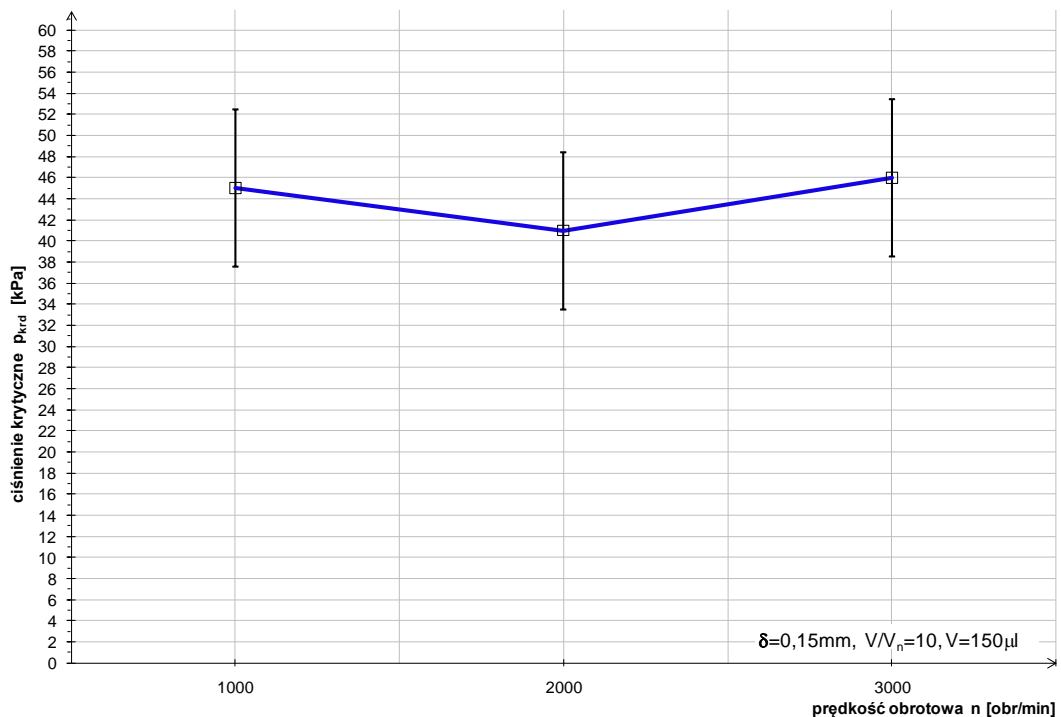
Badanie wykonano przy prędkości wału $n=1000\text{obr/min}$, $n=2000\text{obr/min}$ i $n=3000\text{obr/min}$ dla jednowystępowego uszczelnienia z cieczą MR, i trzech wysokości szczeliny promieniowej $\delta = 0,15\text{mm}$; $\delta = 0,3\text{mm}$ i $\delta = 0,5\text{mm}$.

Wyniki badań przedstawiono w Tab.7.3., w której zestawiono wartości ciśnienia krytycznego p_{krd} . Na każdy występ uszczelniający aplikowano objętość cieczy magnetoreologicznej V , odpowiadającą ustalonemu wcześniej (w punkcie 1) współczynnikowi wypełnienia $\frac{V}{V_n}$, dla każdej wysokości szczeliny δ .

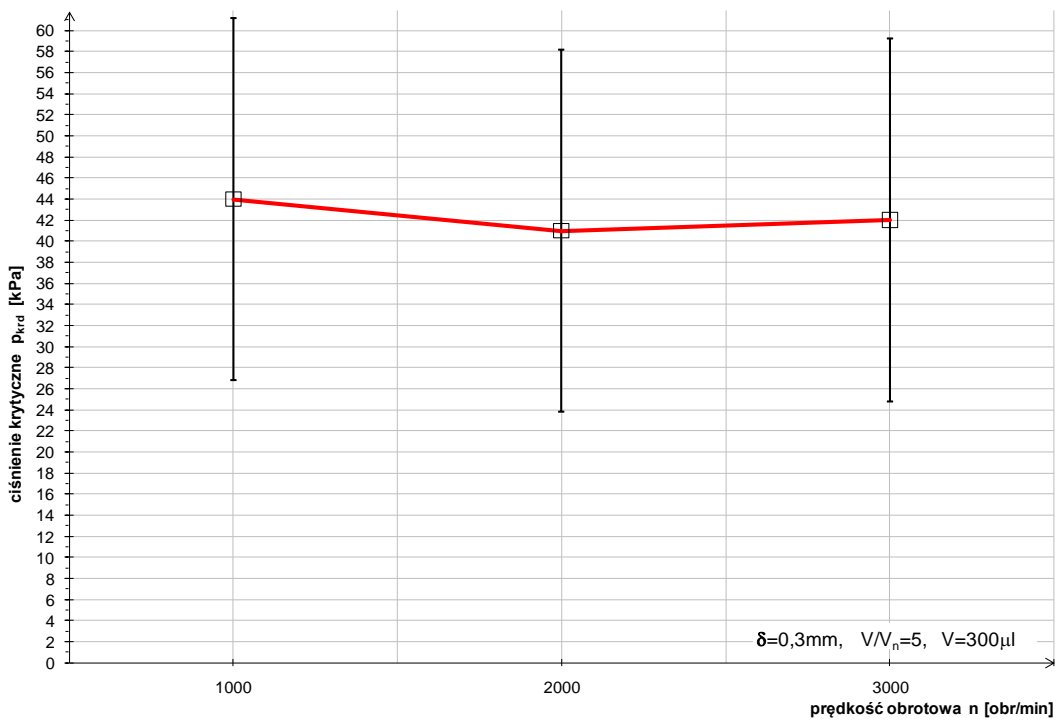
Tab.7.3. Zestawienie wyników pomiarów dynamicznego ciśnienia krytycznego

Liczba występów uszczelniających		Wysokość szczeliny δ [mm]	Nominalna objętość cieczy w szczelinie V_n [μl]	Współczynnik wypełnienia cieczy MR V/V_n	Objętość cieczy aplikowanej do szczeliny V [μl]	Dynamiczne ciśnienie krytyczne p_{krd} [kPa]		
Z_b	Z					prędkość obrotowa $n=1000$ obr/min	prędkość obrotowa $n=2000$ obr/min	prędkość obrotowa $n=3000$ obr/min
6	1	0,15	15	10	150	45	41	46
6	1	0,3	60	5	300	44	41	42
6	1	0,5	160	3	500	38	36	35

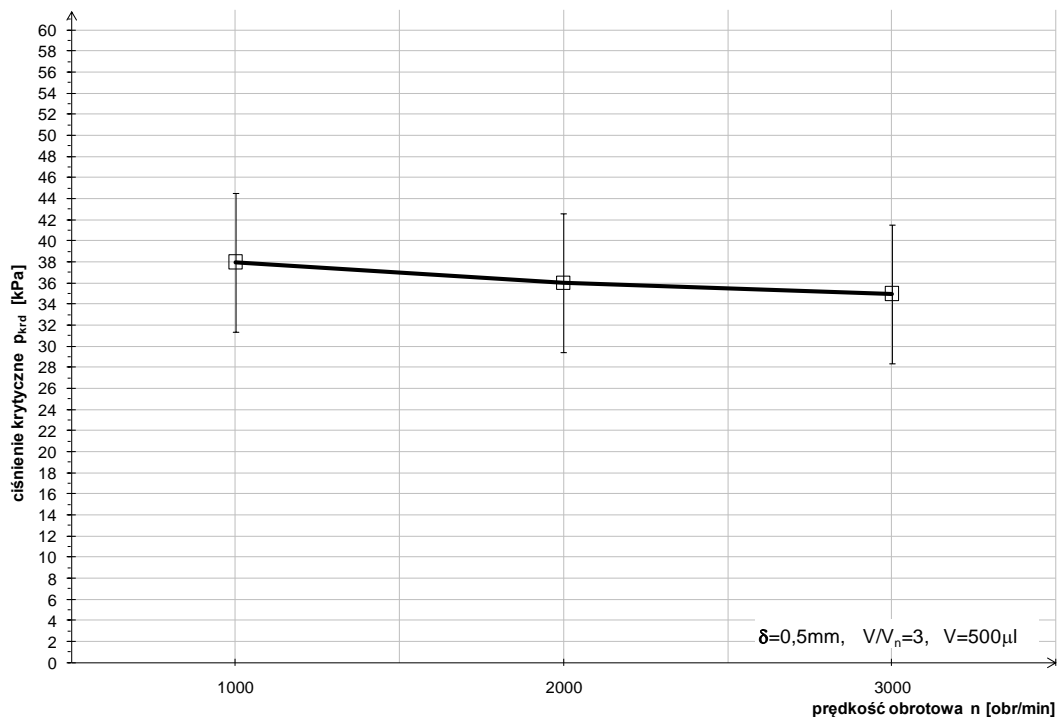
Wykresy rys.7.12, 7.13 i 7.14 przedstawiają zależność dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} w uszczelnieniu jednowystępowym od prędkości obrotowych wału n dla szczeliny o wysokości $\delta=0,15\text{mm}$ $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$.



Rys.7.12. Wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego w uszczelnieniu ze szczeliną $\delta=0,15\text{mm}$, dla prędkości obrotowych $n=1000\text{obr/min}$, $n=2000\text{obr/min}$ i $n=3000\text{obr/min}$ przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 10$



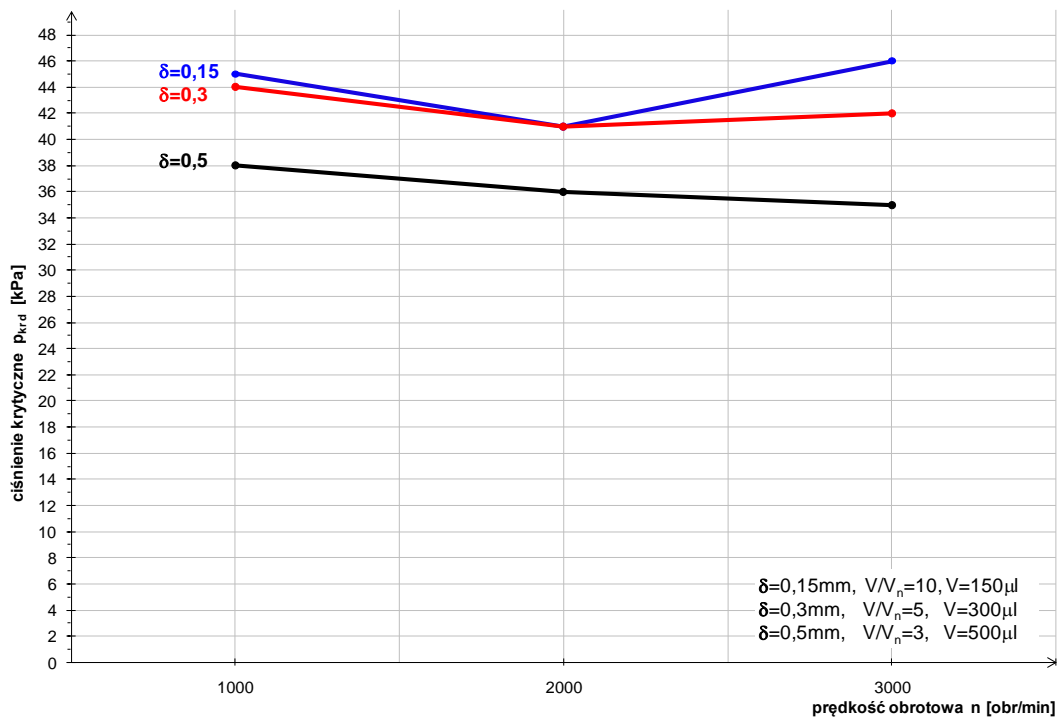
Rys.7.13. Wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego w uszczelnieniu ze szczeliną $\delta=0,3\text{mm}$, dla prędkości obrotowych $n=1000\text{obr/min}$, $n=2000\text{obr/min}$ i $n=3000\text{obr/min}$ przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 5$



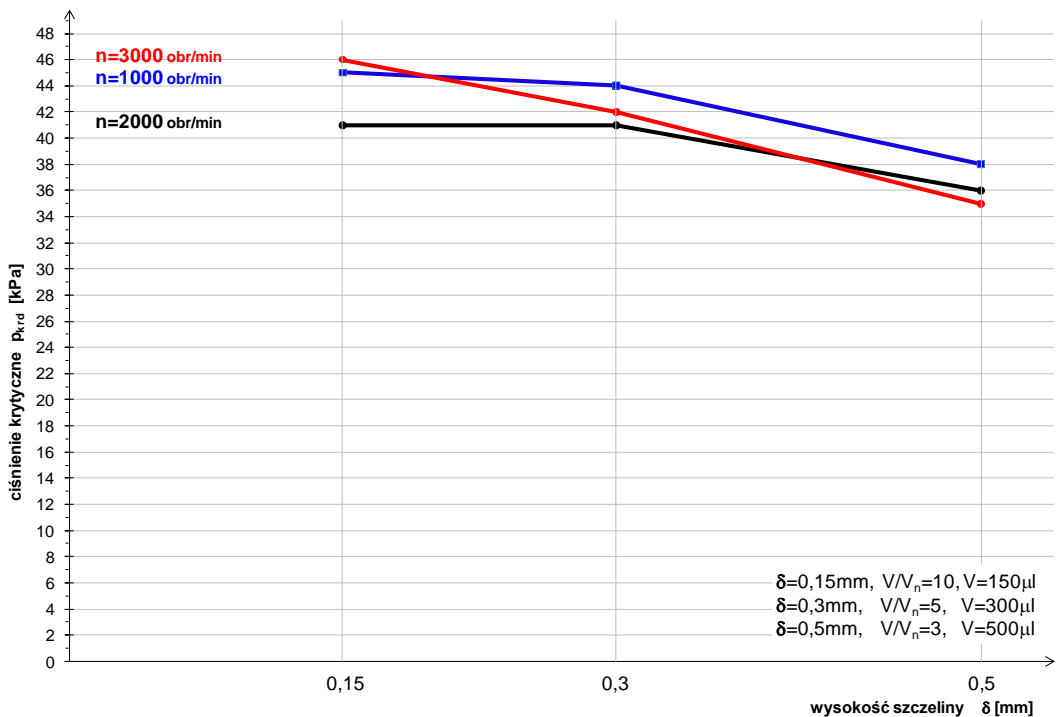
Rys.7.14. Wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego w uszczelnieniu ze szczeliną $\delta=0,5\text{mm}$, dla prędkości obrotowych $n=1000\text{obr/min}$, $n=2000\text{obr/min}$ i $n=3000\text{obr/min}$ przy współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n} = 3$

Dla porównania uzyskanych wyników, na wykresie rys.7.15. pokazano zestawienie dynamicznego ciśnienia krytycznego w uszczelnieniu jednowystępowym, w funkcji prędkości obrotowej wału n , dla wysokości szczeliny $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$.

Te same wartości ciśnienia krytycznego zestawiono również na wykresie rys.7.16, w zależności od wysokości szczeliny δ , przy prędkościach obrotowych wału $n=1000\text{obr/min}$, $n=2000\text{obr/min}$ i $n=3000\text{obr/min}$.



Rys.7.15. Wykres porównawczy wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia o liczbie występów $Z=1$, w zależności od prędkości obrotowej n , dla wysokości szczeliny $\delta=0,15$ mm, $\delta=0,3$ mm i $\delta=0,5$ mm



Rys.7.16. Wykres porównawczy wartości dynamicznego ciśnienia krytycznego p_{krd} uszczelnienia o liczbie występów $Z=1$, w zależności od wysokości szczeliny δ , przy prędkościach obrotowych $n=1000$ obr/min, $n=2000$ obr/min i $n=3000$ obr/min

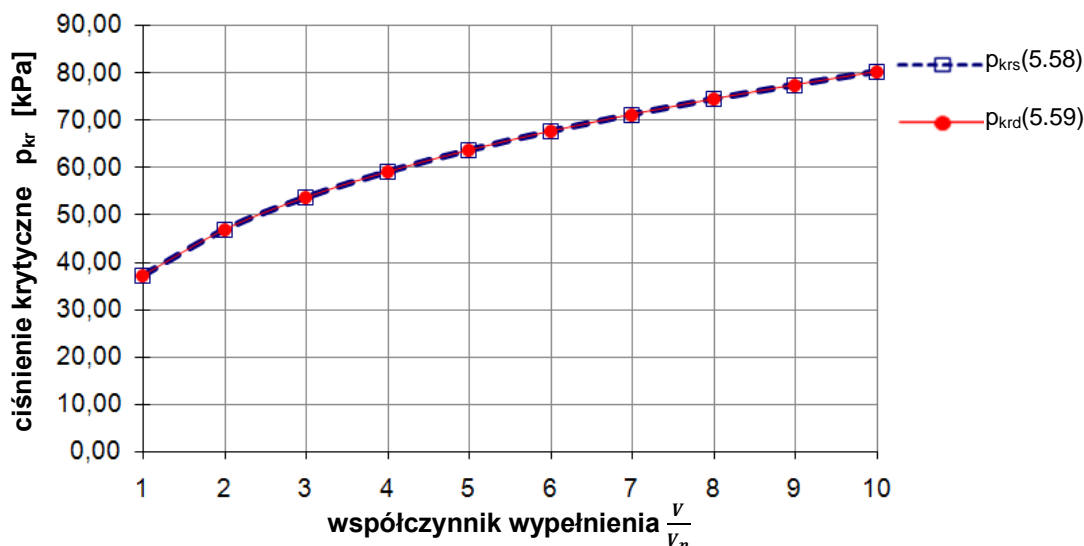
Wyniki badań uszczelnień jednowystępowych z trzema wysokościami szczelin $\delta=0,15mm$, $\delta=0,3mm$ i $\delta=0,5mm$, przy trzech prędkościach obrotowych wału $n=1000, 2000, 3000$ obr/min, wskazują że uzyskiwane wartości ciśnienia krytycznego dla tych prędkości są zbliżone. Można zatem uznać, że ciśnienie krytyczne badanych uszczelnień nie zależy istotnie od prędkości w tym zakresie obrotów. Można również dostrzec tendencję do niewielkiego spadku ciśnienia krytycznego w miarę wzrostu wysokości szczeliny, przy ustalonych współczynnikach wypełnienia.

7.3. Weryfikacja modelu matematycznego wyznaczania ciśnienia krytycznego

Poniżej przeprowadzono weryfikację zależności analitycznych na zależność ciśnienia krytycznego od objętości cieczy V aplikowanej do szczeliny i od liczby występow uszczelniających Z , z danymi uzyskanymi na podstawie eksperymentu. Parametry magnetyczne dla wszystkich wariantów uszczelnień zostały zamieszczone w Tab.6.4. (Rozdz. 6.4) dla układu niesymetrycznego. Według zależności (5.58) na wyznaczenie statycznego ciśnienia krytycznego konieczne będzie określenie wartości współczynnika C_s , w oparciu o wyniki badań doświadczalnych. Analizując uzyskane wyniki przyjęto wartości C_s zamieszczone w tablicy (Tab.7.4).

Na rys.7.17. przedstawione zostało porównanie zależności (5.58) i (5.59), które pokazało, że w równaniu (5.59) wkład dynamicznej składowej, opisującej oddziaływanie siły odśrodkowej, jest bardzo słaby i nie odpowiada rzeczywistości. Dlatego konieczne stało się wprowadzenie współczynnika korygującego C_d . Jego wartości zamieszczone w tablicy (Tab.7.4). Równanie (5.59) można wówczas zapisać w postaci:

$$p_{kr1d} = p_{kr1s} + C_d \frac{\rho \omega^2 R_1^4}{(R_2^2(B) - R_1^2)^2} \left(\frac{R_1^2}{2} - 2R_2^2(B) \ln \frac{R_1}{R_2(B)} - \frac{R_2^4(B)}{2R_1^2} \right) \quad (7.1)$$



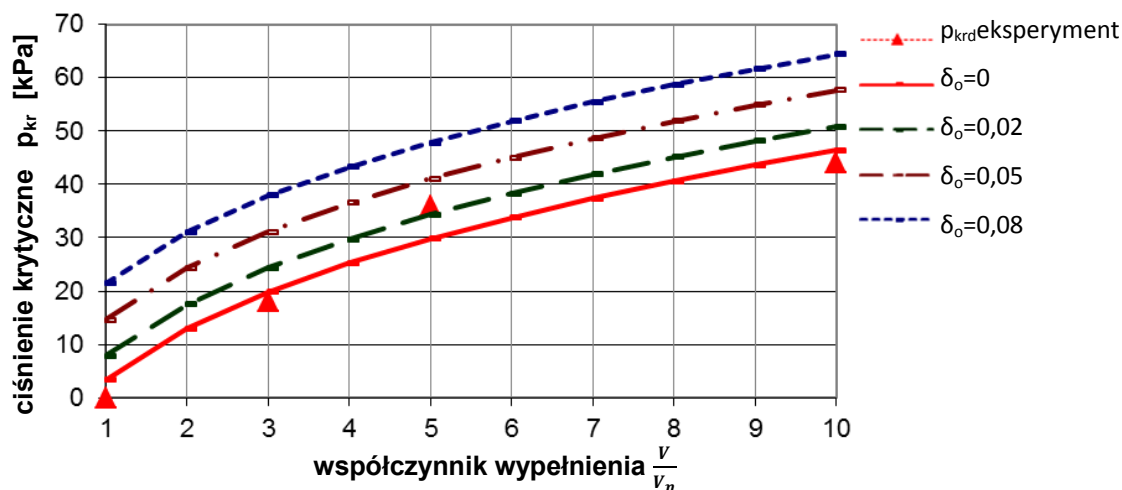
Rys.7.17. Zależność ciśnienia krytycznego p_{krs} (5.58) i p_{krd} (5.59) od objętości V cieczy MR w szczelinie dla: $Z = 1$, $n = 1000$ obr/min, $M_s = 270$ kA/m, $B_{max} = 1,35$ T, $V_n = 15\mu\text{l}$, $\delta = 0,15$ mm, $\delta_o = 0$ mm, $t = 0,6$ mm, $C_s = 0,01$.

Poniżej zostanie podana analiza porównawcza zależności analitycznych (5.58) i (7.1) z danymi laboratoryjnymi.

Na rys.7.18 przedstawiono również wpływ grubości warstwy ciała quasi-stałego $\delta_o(B)$ na zależność ciśnienia krytycznego p_{kr1d} jednowystępowego uszczelnienia, dla różnych współczynników wypełnienia cieczą $\frac{V}{V_n}$, w stanie dynamicznym $n=1000$ obr/min, na podstawie wyników badań oraz z zależności (7.1). Zwiększenie grubości δ_o powoduje wzrost dynamicznego ciśnienia krytycznego. W przypadku braku danych, na podstawie których można byłoby obliczyć δ_o , ten wpływ jak pokazała analiza może być uwzględniony doбором odpowiedniej wartości współczynnika korygującego C_d . Na przykład identyczne wartości ciśnienia krytycznego można otrzymać dla $\delta_o=0,05$ mm przy $C_d=1570$ jak i dla $\delta_o=0$ przy $C_d=1050$. Z tego powodu dalej będą przedstawione zależności teoretyczne, przyjmując $\delta_o=0$. Analizy dla pozostałych szczelin potwierdziły, że dla odpowiednio dobranych wartości współczynników korygujących C_s i C_d można również przyjąć grubość warstwy $\delta_o=0$. Wartości tych współczynników, dla każdej wysokości szczeliny, zamieszczono w tabelicy 7.4.

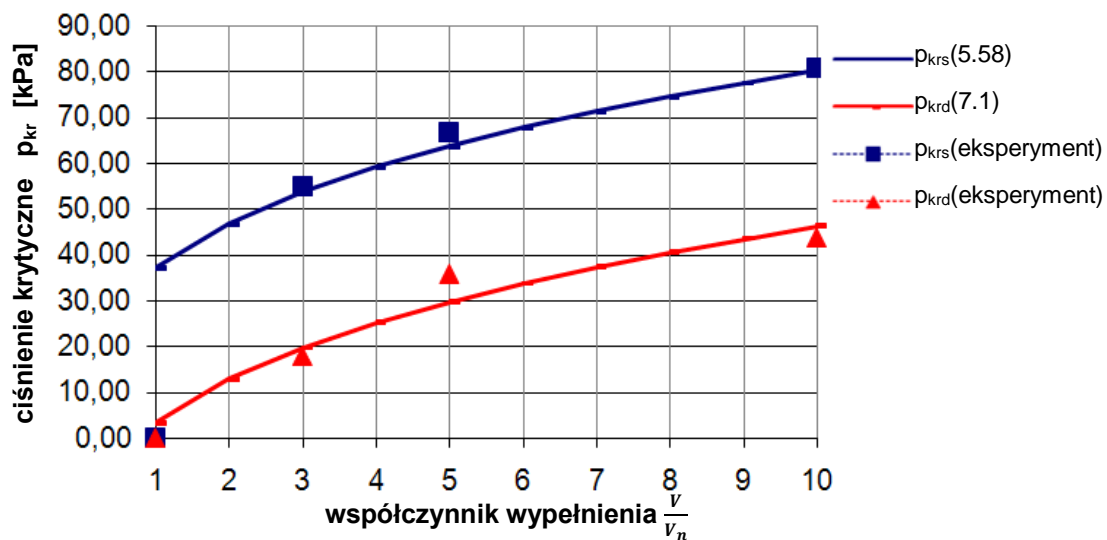
Tab.7.4. Wartości współczynników korygujących C_s i C_d dla różnych wysokości szczelin δ .

Wysokość szczeliny δ [mm]	współczynnik korygujący	
	C_s	C_d
0,15	0,01	1050
0,3	0,0147	400
0,5	0,0265	400

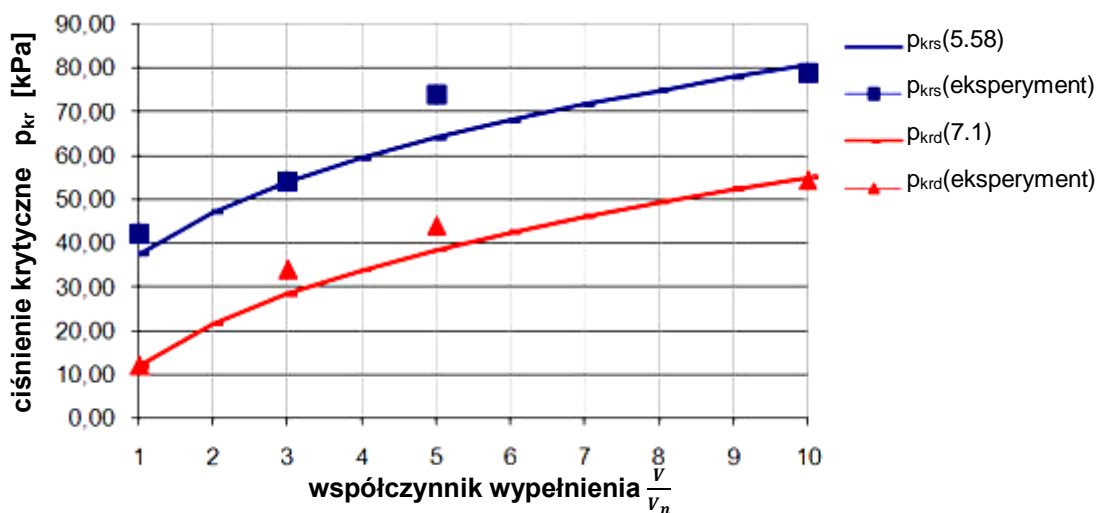


Rys.7.18. Wartości ciśnienia krytycznego p_{krd} wg (7.1) uszczelnienia jednowystępowego, przy różnych współczynnikach wypełnienia cieczą MR, dla kilku wielkości δ_o , przy parametrach: $n=1000$ obr/min, $M_s=270$ kA/m, $B_{max}=1,35$ T, $V_f=15\mu$ l, $\delta=0,15$ mm, $t=0,6$ mm, $C_s=0,01$, $C_d=1050$

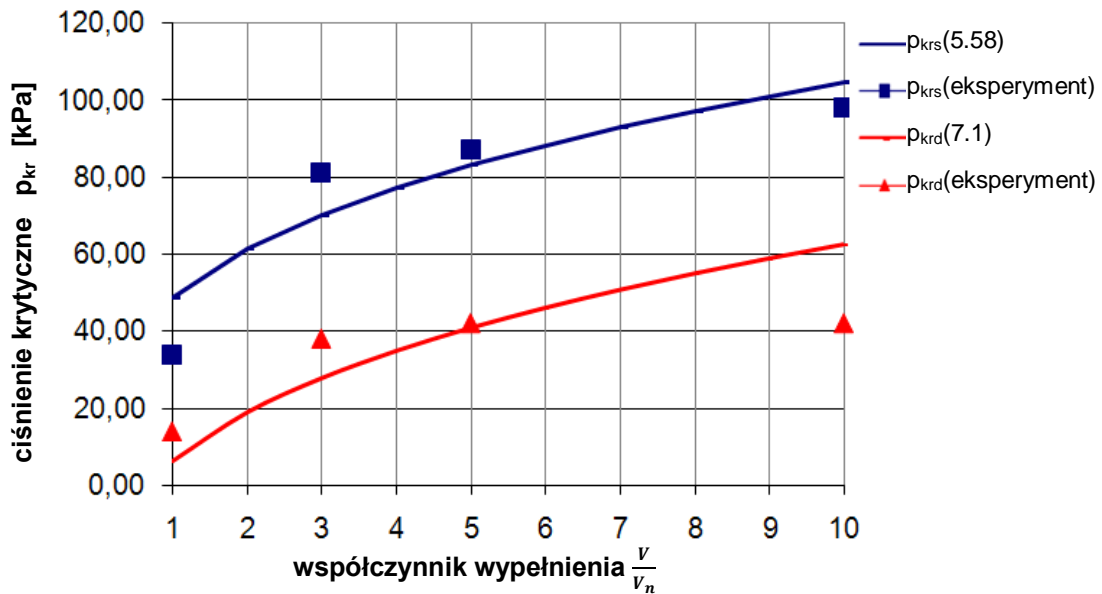
Na rys.7.19-7.21 podane zostały wartości ciśnienia krytycznego wyznaczonego dla jednowystępowego uszczelnienia przy różnym współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ cieczą MR i prędkości obrotowej wału $n=0$ i $n=1000$ obr/min. W postaci punktów zamieszczono wyniki z doświadczeń, a linie ciągłe reprezentują wartości ciśnienia krytycznego wyznaczonego z zależności (5.58) i (7.1).



Rys.7.19. Wartości ciśnienia krytycznego p_{krs} i p_{krd} przy różnych współczynnikach wypełnienia cieczą MR, dla: $Z=1$, $n=0$ i $n=1000$ obr/min, $M_s=270$ kA/m, $B_{max}=1,35$ T, $V_r=15\mu$ l, $\delta=0,15$ mm, $\delta_o=0$ mm, $t=0,6$ mm, $C_s=0,01$, $C_d=1050$.



Rys.7.20. Wartości ciśnienia krytycznego p_{krs} i p_{krd} przy różnych współczynnikach wypełnienia cieczą MR, dla: $Z=1$, $n=0$ i $n=1000$ obr/min, $M_s=270$ kA/m, $B_{max}=0,92$ T, $V_r=60\mu$ l, $\delta=0,3$ mm, $\delta_o=0$ mm, $t=1,2$ mm, $C_s=0,0147$, $C_d=400$.



Rys.7.21. Wartości ciśnienia krytycznego p_{krs} i p_{krd} przy różnych współczynnikach wypełnienia cieczą MR, dla: $Z=1$, $n=0$ i $n=1000$ obr/min, $M_s=270$ kA/m, $B_{max}=0,67$ T, $V_n=160$ μ l, $\delta=0,5$ mm, $\delta_0=0$ mm, $t=2$ mm, $C_s=0,0265$, $C_d=400$.

Wartości ciśnienia krytycznego wyznaczone na podstawie zależności analitycznych wyprowadzonych w rozdziale 5.2, wykazują dostateczną zgodność z wynikami badań uszczelnień przy różnych objętościach cieczy w szczelinie. Zgodność ta występuje zarówno dla ciśnień statycznych p_{krs} , (uszczelnienie w stanie spoczynku) jak i dla ciśnień dynamicznych p_{krd} (uszczelnienie w ruchu). W obliczeniach analitycznych przyjęto grubość warstwy ciała quasi-stałego $\delta_0=0$ i wartości współczynników korygujących C_s i C_d na podstawie tablicy 7.4.

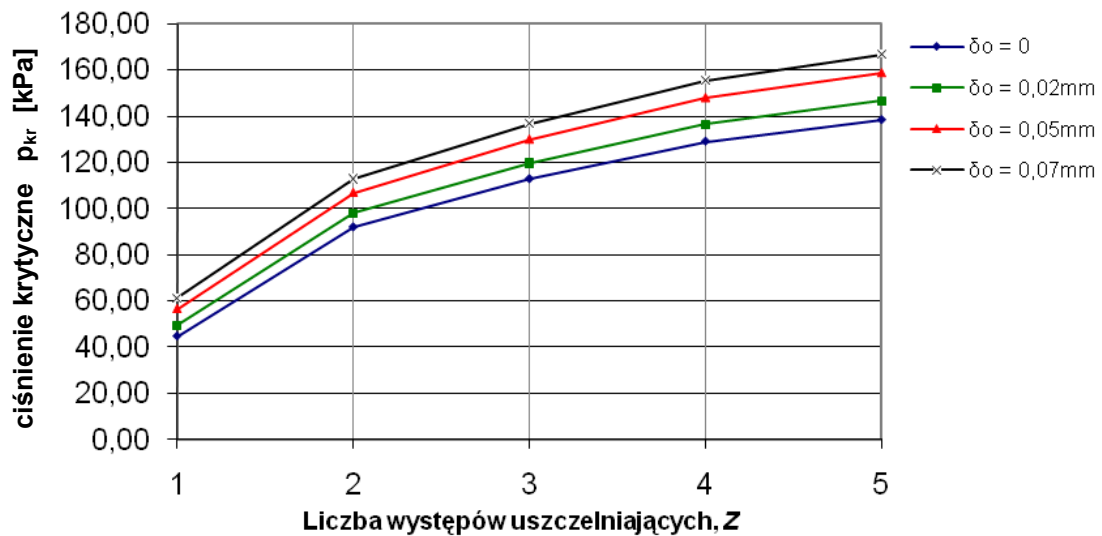
W przypadku uszczelnień wielowystępowych badania ciśnienia krytycznego uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną nie potwierdziły poprawności zależności (5.23) podawanej w literaturze dla uszczelnienia z cieczą ferromagnetyczną. Dlatego w przypadku takiego uszczelnienia z Z-występami uszczelniającymi, zastosowano zmodyfikowany wzór (7.1) w postaci:

$$p_{krZd} = p_{krZs} + C_d \sqrt[3]{Z} \rho A^2 \left(\frac{R_1^2}{2} - 2R_2^2(B) \ln \frac{R_1}{R_2(B)} - \frac{R_2^4(B)}{2R_1^2} \right) \quad (7.2)$$

gdzie:
$$p_{krZs} = Z \cdot p_{kr1s} \quad (7.3)$$

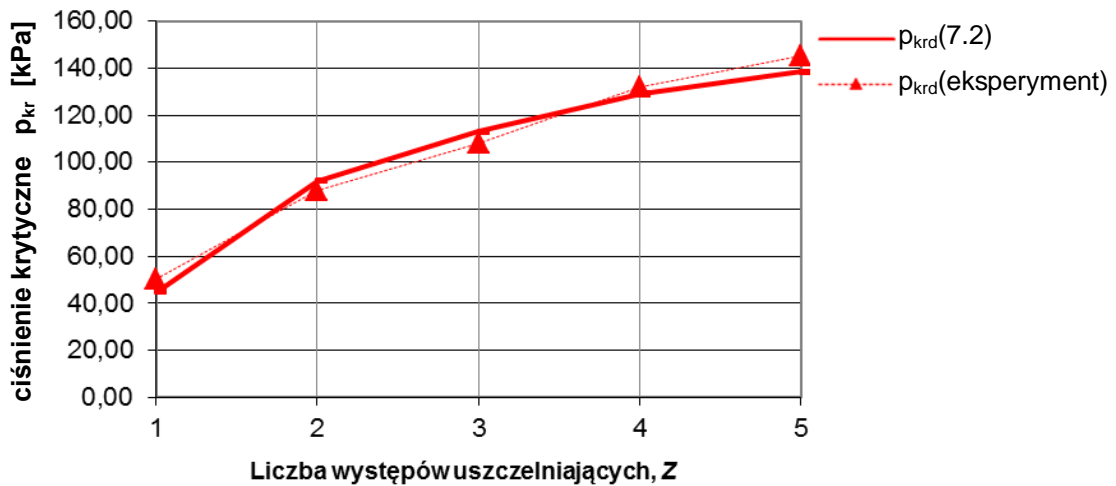
$$A = \frac{\omega R_1^2}{R_2^2(B) - R_1^2} \quad (7.4)$$

Na podstawie zależności (7.2) na rys.7.22. pokazano wpływ grubości warstwy quasi-stałej δ_0 na ciśnienie krytyczne uszczelnienia w stanie dynamicznym, dla różnej liczby występów uszczelniających. Widać że tak jak i dla uszczelnienia jednowystępowego ciśnienie krytyczne p_{krZd} jest wyższe przy wyższych wartościach δ_0 .

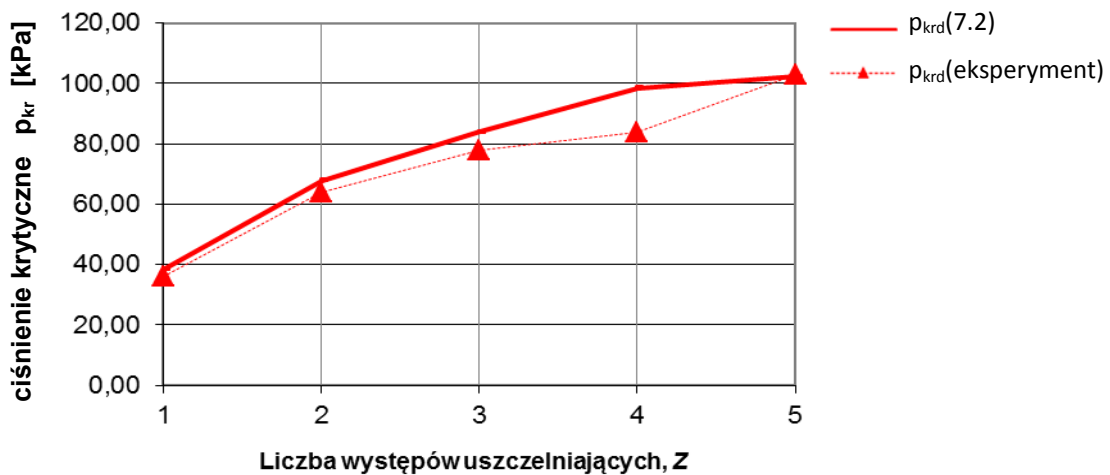


Rys.7.22. Wartości ciśnienia krytycznego p_{krZd} wg (7.2) przy różnej liczbie występów uszczelniających Z, dla kilku wielkości δ_0 , przy parametrach: $n=1000\text{obr/min}$, $M_s=270\text{ kA/m}$, $\frac{v}{v_n}=10$, $\delta=0,15\text{mm}$, $t=0,6\text{ mm}$, $C_s=0,01$, $C_d=1050$.

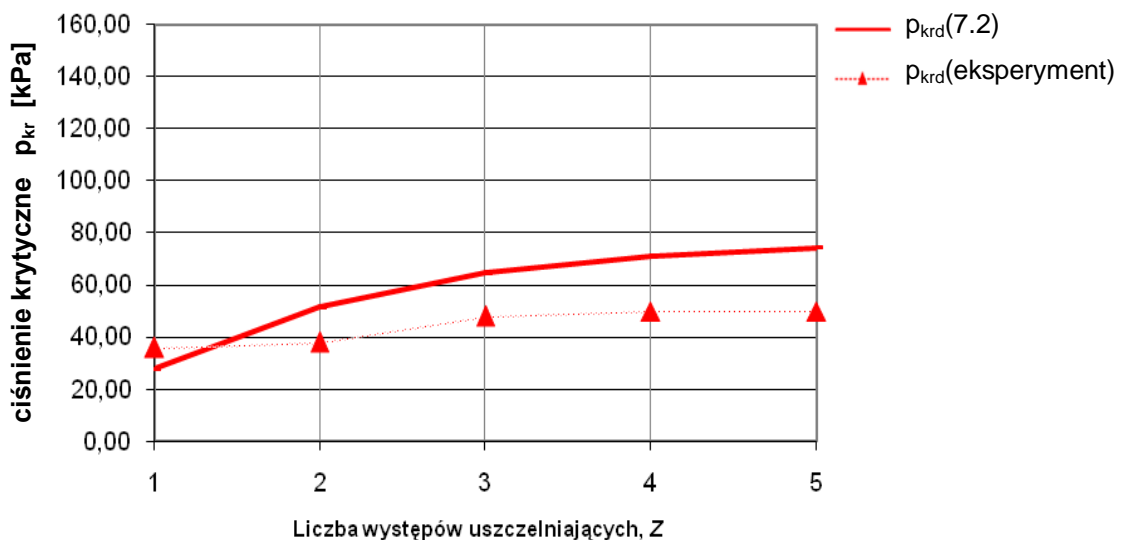
Poniżej na rysunkach 7.23-7.25 podana została analiza porównawcza zależności ciśnienia krytycznego wyznaczonego na podstawie (7.2) i wyników laboratoryjnych w funkcji liczby występów Z w uszczelnieniu wypełnionych cieczą magnetoreologiczną dla różnych wysokości szczeliny δ . Wartość grubości warstwy quasi-stałej przyjęto $\delta_0 = 0$. Współczynniki korygujące C_s i C_d zastosowano takie jak dla uszczelnień jednowystępowych (tab.7.4).



Rys.7.23. Zależność ciśnienia krytycznego p_{krZd} (7.2) od liczby występów uszczelniających Z dla: $n=1000\text{obr/min}$, $M_s=270\text{kA/m}$, $\frac{V}{v_n}=10$, $\delta=0,15\text{mm}$, $t=0,6\text{ mm}$, $C_s=0,01$, $C_d=1050$



Rys. 7.24. Zależność ciśnienia krytycznego p_{krZd} (7.2) od liczby występów uszczelniających Z dla: $n=1000\text{obr/min}$, $M_s=270\text{kA/m}$, $\frac{V}{v_n}=5$, $\delta=0,3\text{mm}$, $t=1,2\text{mm}$, $C_s=0,0147$, $C_d=400$



Rys.7.25. Zależność ciśnienia krytycznego p_{krZd} (7.2) od liczby występów uszczelniających Z dla: $n=1000\text{obr/min}$, $M_s=270\text{kA/m}$, $\frac{V}{v_n}=3$, $\delta=0,5\text{mm}$, $t=2\text{mm}$, $C_s=0,0265$, $C_d=400$

W przypadku uszczelnień wielowystępowych wartości ciśnienia krytycznego wyznaczone na podstawie zależności analitycznych, również z dostateczną dokładnością są zgodne z wynikami badań przy różnej liczbie występów uszczelniających. Największe rozbieżności wartości analitycznych i wyników badań doświadczalnych występują dla największej wysokości szczeliny. Może to być związane z rozdziałem pola magnetycznego na poszczególne występy, co powoduje zmniejszenie jego maksymalnych wartości na pojedynczych występach.

7.4. Podsumowanie

Badania uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną pozwoliły określić wartości ciśnień jakie mogą być uzyskane dla tego typu uszczelnień w badanych warunkach pracy. Umożliwiły również pokazanie wpływu objętości cieczy w uszczelnieniu na wartości ciśnień i wyznaczenie objętości cieczy wystarczającej dla uzyskania zadanych parametrów pracy uszczelnienia. Zwiększenie liczby występów w uszczelnieniach wielowystępowych, powoduje wzrost ciśnienia krytycznego uszczelnienia, przy czym wyniki badań wskazują, że istnieje granica wzrostu ciśnienia związana z energią układu magnetycznego.

Przeprowadzone badania pozwoliły zweryfikować znane z literatury technicznej zależności i uzyskać inne ich formy na wyznaczenie ciśnienia krytycznego dla uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną, uwzględniające objętość cieczy aplikowanej do szczeliny roboczej, geometrię tej szczeliny oraz liczbę występów uszczelniających w uszczelnieniach wielowystępowych.

Wyniki badań, wskazują, że poprawny jest model, w którym do obliczeń ciśnienia krytycznego można przyjąć grubość warstwy obszaru quasi-stałego $\delta_0=0$, przy uwzględnieniu odpowiednich wartości współczynników korygujących C_s i C_d .

8. OPORY RUCHU W USZCZELNIENIU Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ

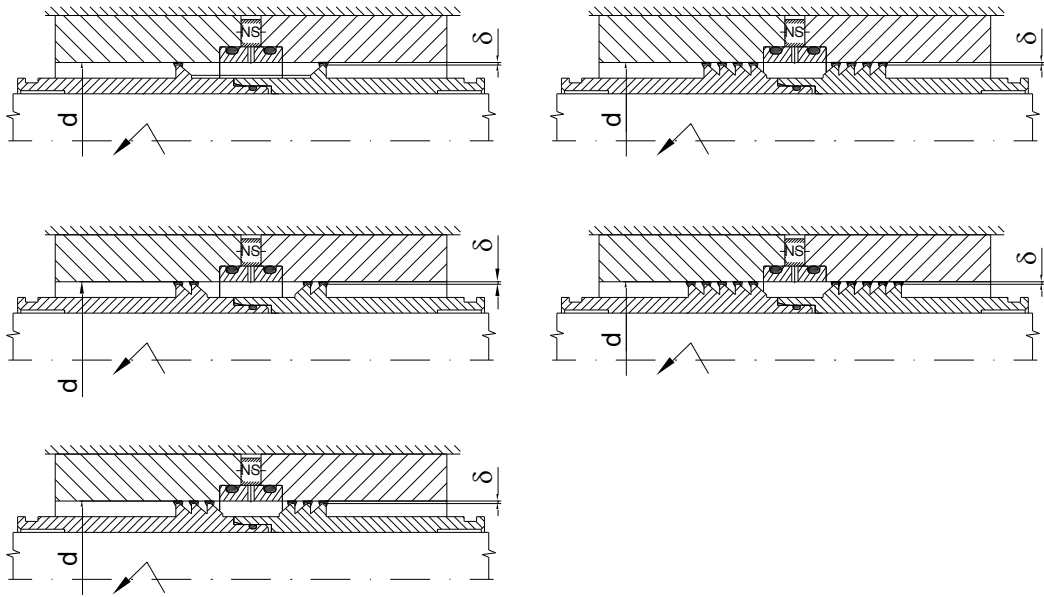
Opory ruchu w uszczelnieniu z cieczą magnetoreologiczną dla wałów obrotowych określone są momentem tarcia, jaki przenoszony jest przez ciecz podczas ruchu obrotowego wału.

Do badań wykorzystano stanowisku, które przedstawiono na rys.6.18, z identyczną głowicą badawczą, dla której zastosowano niżej opisane układy tulei badawczych.

8.1. Układ tulei badawczych

Ze względu na cechy konstrukcyjne stanowiska zastosowano układ symetryczny tulei uszczelniających, w którym liczba występów na tulei bazowej i tulei pomiarowej była jednakowa $Z_B=Z$ (rys.8.1). Uzyskany wynik podzielono na pół otrzymując moment oporowy dla pojedynczej tulei uszczelniającej o danej liczbie występów $Z=1,2,3,4,5$. Liczby występów uszczelniających i wielkości szczelin roboczych dobrane zostały podobnie jak przy badaniu ciśnień krytycznych.

Badania przeprowadzono dla prędkości obrotowej wału $n=1000\text{obr/min}$. Pomiar momentu realizowany był przy wykorzystaniu wysokiej klasy precyzyjnego momentomierza Torquemaster TMB 306/411 szwajcarskiego producenta MAGTROL. Dodatkowo wynik pomiaru momentu był kontrolnie sprawdzany przy wykorzystaniu układu dźwigniowego głowicy i czujnika nacisku FT-5102 – rys.6.18.



Rys.8.1. Geometria badanego uszczelnienia z cieczą MR stosowana przy pomiarach momentu tarcia, z tulejami w układzie symetrycznym, o różnej liczbie występów uszczelniających

Parametry geometryczne badanych węzłów uszczelniających, przyjęto takie same jak przy badaniu ciśnień krytycznych. Ich wartości: D , δ , t , b oraz α ; zamieszczone zostały w tablicy (tab.6.1).

8.2. Badania oporów ruchu w uszczelnieniu z cieczą MR

Badania oporów ruchu uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną obejmowały - wyznaczenie momentu tarcia M_t w uszczelnieniu wielowystępowym, przy różnej liczbie występów uszczelniających.

Badania przeprowadzono przy ciśnieniu czynnika roboczego wynoszącym $p = 0,5p_{krd}$, którym było sprężone powietrze.

Podobnie jak w przypadku badania ciśnienia krytycznego – rozdział 7, dla uzyskanych wyników badań określono przedziały ufności dla poziomu istotności $\xi=0,05$ i oznaczono je na wykresach, [81].

Badania przeprowadzono dla uszczelnień o liczbie występów uszczelniających $Z=1, 2, 3, 4$ i 5 . Na każdy występ uszczelnienia aplikowano ciecz magnetoreologiczną w objętości odpowiadającej ustalonemu współczynnikowi wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ dla danej wysokości szczeliny δ , podobnie jak w rozdziale 7.2. Pomiary momentu tarcia M_t w uszczelnieniu przeprowadzono

dla szczelin o wysokości $\delta=0,15\text{mm}$, $\delta=0,3\text{mm}$ i $\delta=0,5\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$. Uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 8.1.

Tab.8.1. Zestawienie wyników pomiarów momentów tarcia w uszczelnieniu z cieczą MR przy stałej prędkości obrotowej $n=1000\text{ obr/min}$

Liczba występów $Z_B=Z$	Wys. szczeliny $\delta[\text{mm}]$	Nominalna objętość cieczy w szczelinie $V_n [\mu\text{l}]$	Wsp. wypełnienia V/V_n	Objętość cieczy w szczelinie $V [\mu\text{l}]$	Całkowity moment tarcia $M [\text{Nm}]$	Moment tarcia uszczelnienia na tulei pomiarowej $M_t [\text{Nm}]$	Czas pomiaru $t_p [\text{s}]$	Temp.	
								$T_p [^\circ\text{C}]$	$T_k [^\circ\text{C}]$
1	0,15	15	10	150	1,48	0,74	1500	29,0	40,3
	0,3	60	5	300	1,20	0,60	1500	27,5	44,7
	0,5	160	3	500	0,89	0,45	1500	27,5	38,8
2	0,15	15	10	150	1,74	0,87	1500	29,4	52,1
	0,3	60	5	300	1,30	0,65	1500	28,7	46,3
	0,5	160	3	500	1,03	0,52	1500	21,6	36,2
3	0,15	15	10	150	1,80	0,90	1500	25,7	40,3
	0,3	60	5	300	1,30	0,65	1500	26,2	44,0
	0,5	160	3	500	1,02	0,51	1500	20,6	36,2
4	0,15	15	10	150	1,60	0,80	1500	27,0	48,7
	0,3	60	5	300	1,17	0,59	1500	28,4	43,8
	0,5	160	3	500	0,95	0,48	1500	21,1	35,5
5	0,15	15	10	150	1,50	0,75	1500	29,7	48,6
	0,3	60	5	300	1,10	0,55	1500	26,0	40,8
	0,5	160	3	500	0,88	0,44	1500	20,8	34,1

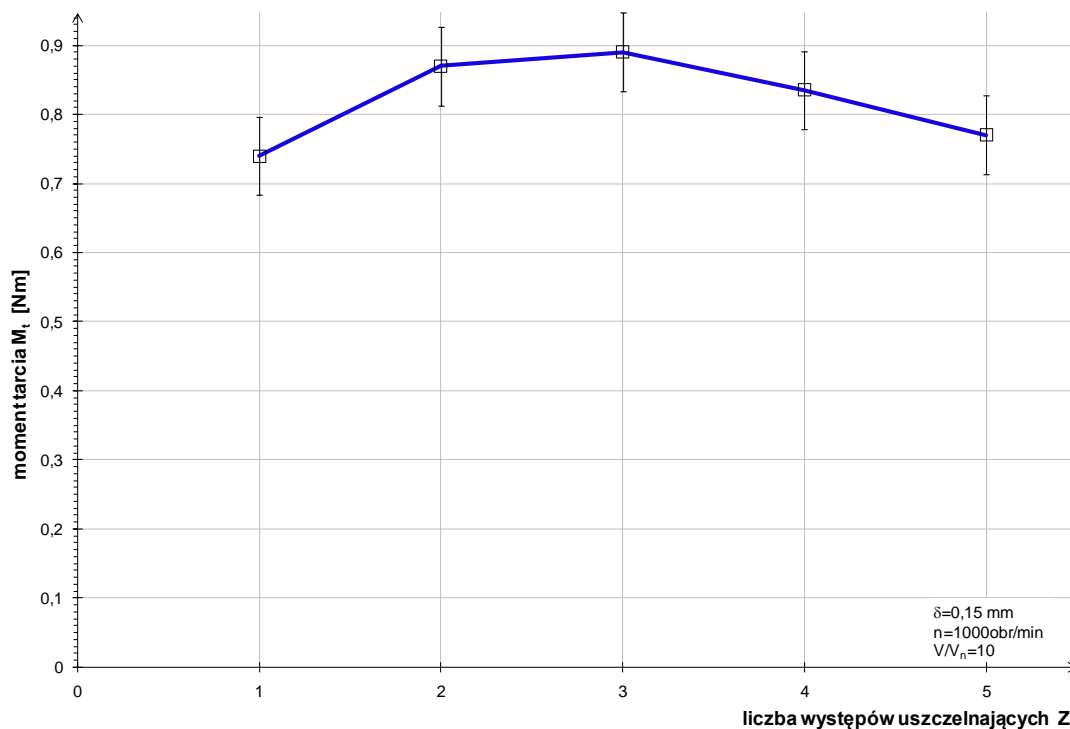
Na wykresie (rys.8.2) pokazano zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia wielowystępowego ze szczeliną o wysokości $\delta=0,15\text{mm}$ od liczby występów uszczelniających Z . Objętość cieczy MR aplikowana na każdy występ uszczelniający wynosiła $V=150\mu\text{l}$ (współczynnik $\frac{V}{V_n}=10$).

Wykres (rys.8.3) przedstawia zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia wielowystępowego ze szczeliną o wysokości $\delta=0,3\text{mm}$ od liczby występów uszczelniających Z . Objętość cieczy MR aplikowana na każdy występ uszczelniający wynosiła $V=300\mu\text{l}$ (współczynnik $\frac{V}{V_n}=5$).

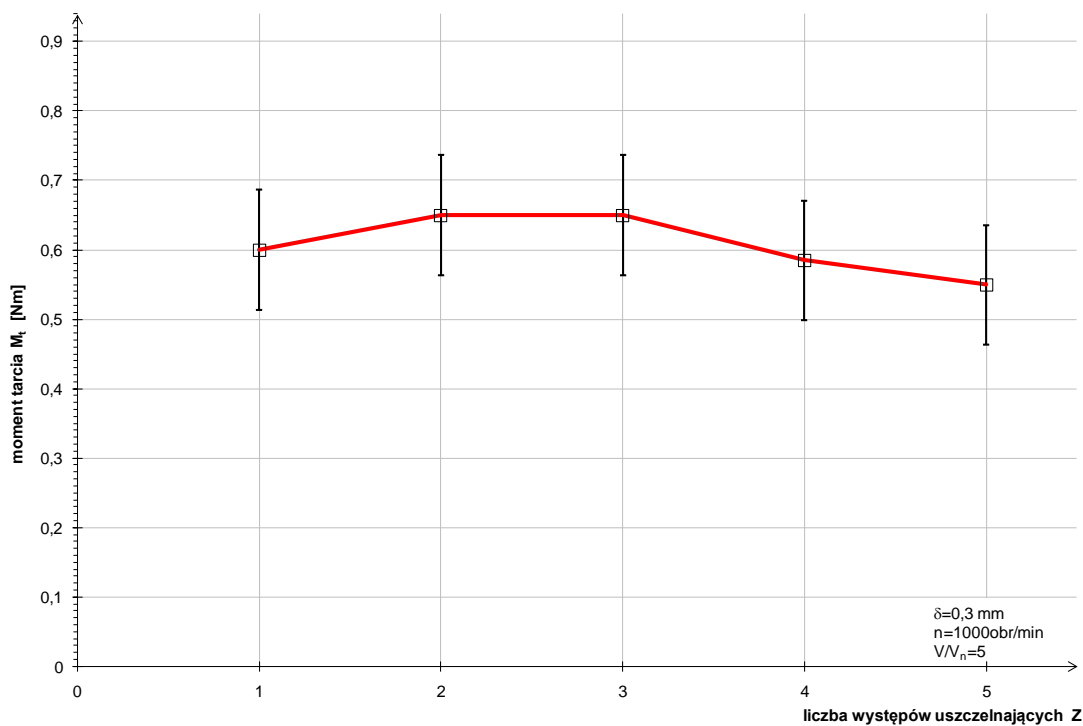
Zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia wielowystępowego ze szczeliną o wysokości $\delta=0,5\text{mm}$ od liczby występów uszczelniających Z jest pokazana na wykresie (rys.8.4). Objętość cieczy MR aplikowana na każdy występ uszczelniający wynosiła $V=500\mu\text{l}$ (współczynnik $\frac{V}{V_n}=3$).

Na wykresie pokazanym na rys.8.5. zestawiono zależności momentu tarcia M_t uszczelnień wielowystępowych od liczby występów uszczelniających Z dla szczelin o wysokościach $\delta=0,15; 0,3; 0,50\text{ mm}$, natomiast na wykresie

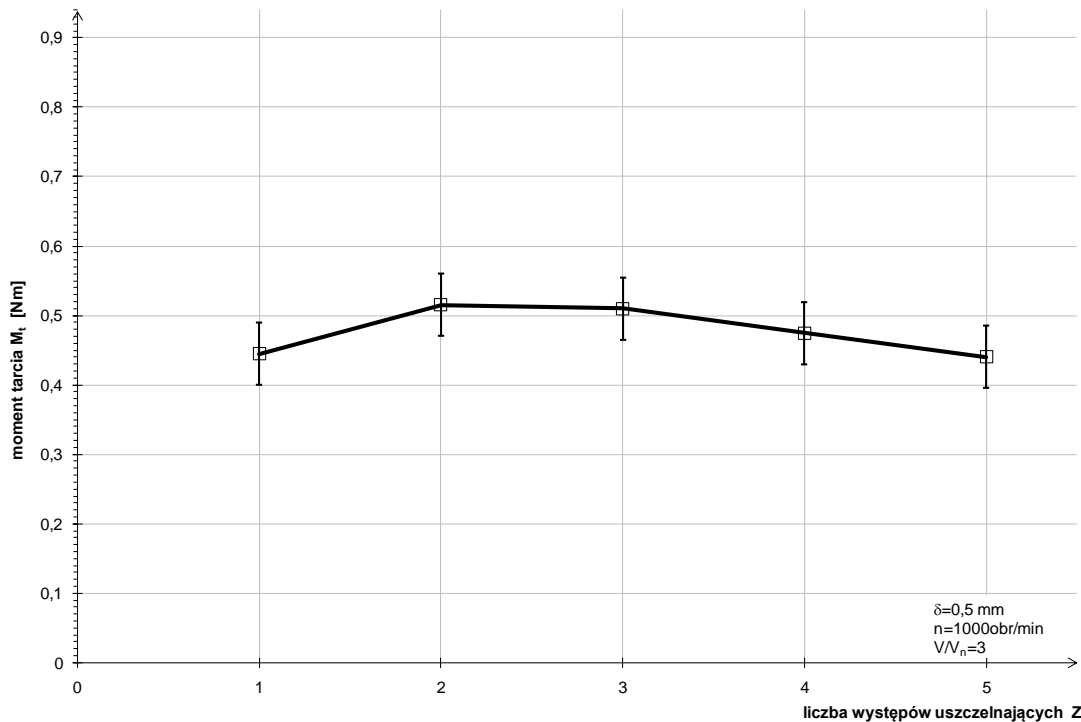
pokazanym na rys.8.6. przedstawiono zależności momentu tarcia M_t uszczelnień wielowystępowych ($Z=1, 2, 3, 4, 5$) od wysokości szczeliny δ .



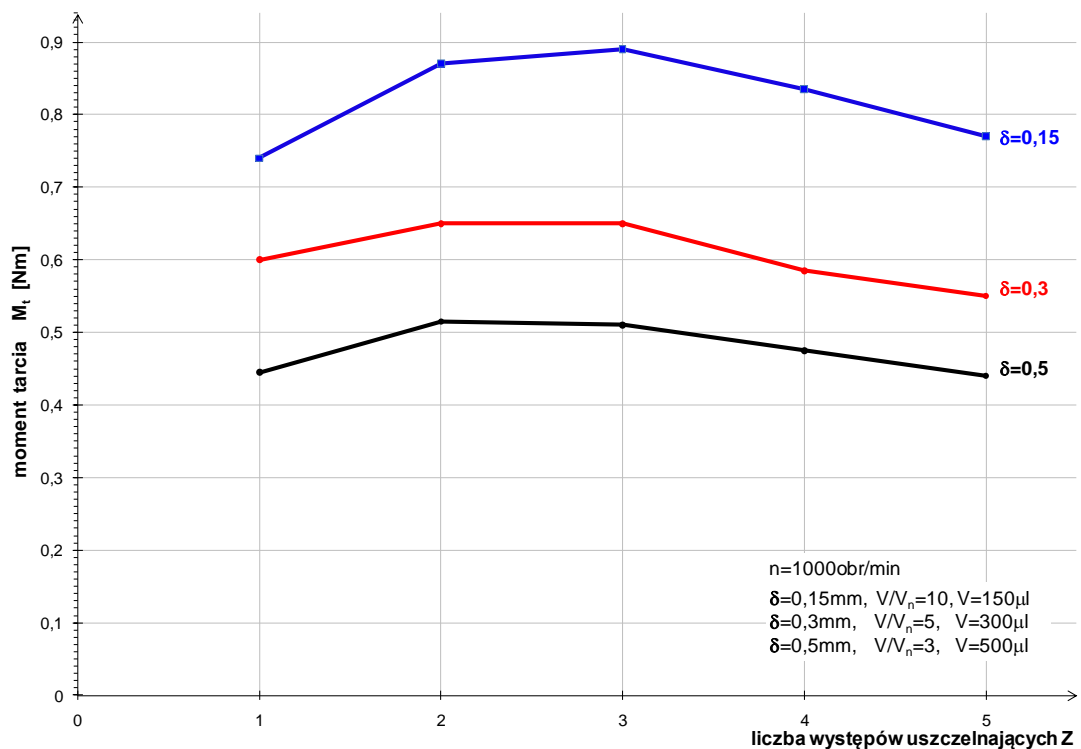
Rys.8.2. Zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,15$ mm od liczby występów Z , przy objętości cieczy MR $V=150\mu\text{l}$ ($\frac{V}{V_n} = 10$) i prędkości obrotowej $n=1000$ obr/min



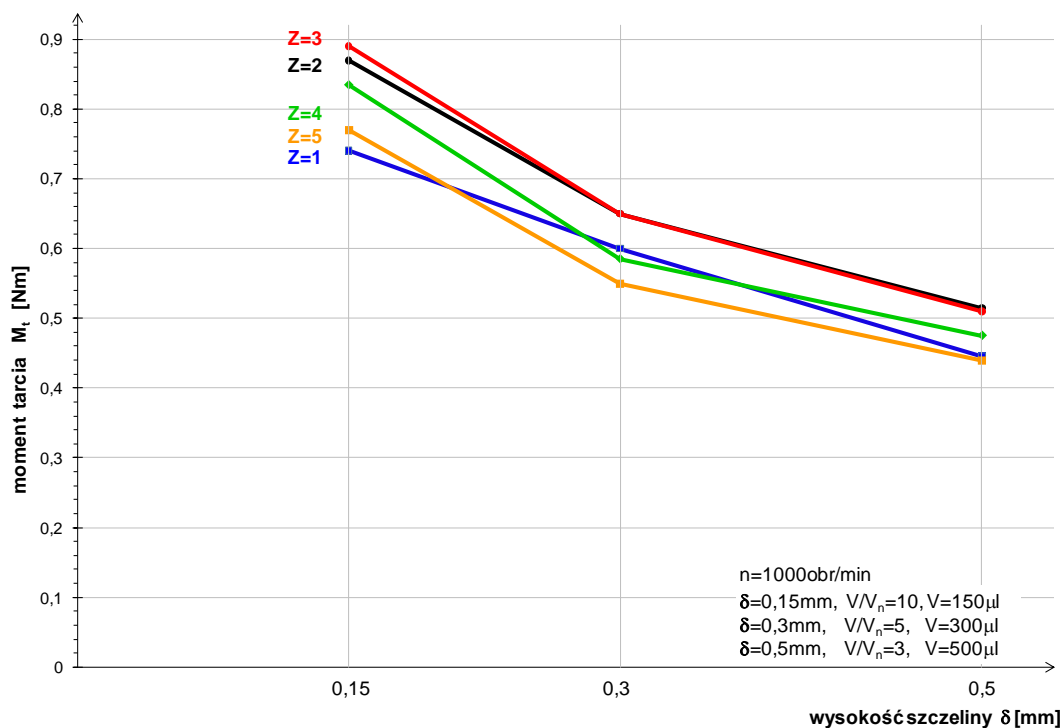
Rys.8.3. Zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,3$ mm od liczby występów Z , przy objętości cieczy MR $V=300\mu\text{l}$ ($\frac{V}{V_n} = 5$) i prędkości obrotowej $n=1000$ obr/min



Rys.8.4. Zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,5 \text{ mm}$ od liczby występów Z, przy objętości cieczy MR $V=500 \mu\text{l}$ ($\frac{V}{V_n} = 3$) i prędkości obrotowej $n=1000 \text{ obr/min}$



Rys.8.5. Wykres porównawczy wartości momentów tarcia M_t uszczelnień w zależności od liczby występów Z, dla wysokości szczeliny $\delta=0,15 \text{ mm}$, $\delta=0,3 \text{ mm}$ i $\delta=0,5 \text{ mm}$, przy prędkości obrotowej $n=1000 \text{ obr/min}$



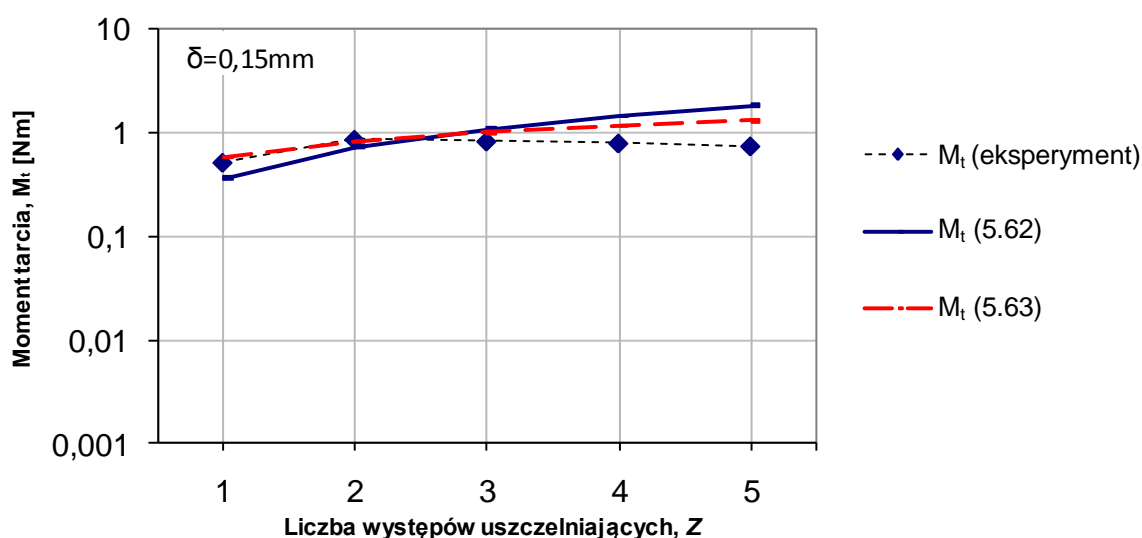
Rys.8.6. Zależność momentu tarcia M_t uszczelnienia o liczbie występów $Z=1, 2, 3, 4$ i 5 , od wysokości szczeliny δ , przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$.

Wyniki badań momentu tarcia w uszczelnieniu przy różnej liczbie występów uszczelniających pokazują, że wraz ze zwiększaniem liczby występów moment tarcia początkowo się zwiększa, a przy liczbie występów powyżej $Z=3$ zatrzymuje się i następnie zaczyna maleć. Wzrost momentu jest związany z większą objętością cieczy w uszczelnieniu i taka tendencja powinna się utrzymać. Natomiast spadek wartości oporów może być spowodowany tym, że przy stałym układzie magnetycznym, zwiększenie liczby występów uszczelniających Z w uszczelnieniu powoduje zmniejszenie koncentracji pola magnetycznego w szczelinie na poszczególnych występach, poniżej magnetyzacji nasycenia cieczy MR. Zauważalne jest to również przy numerycznych symulacjach rozkładu pola magnetycznego (rozdział 6.4). Prowadzi do spadku jej współczynnika lepkości dynamicznej η , która wyraźnie wpływa na naprężenia styczne w cieczy i opory tarcia w uszczelnieniu.

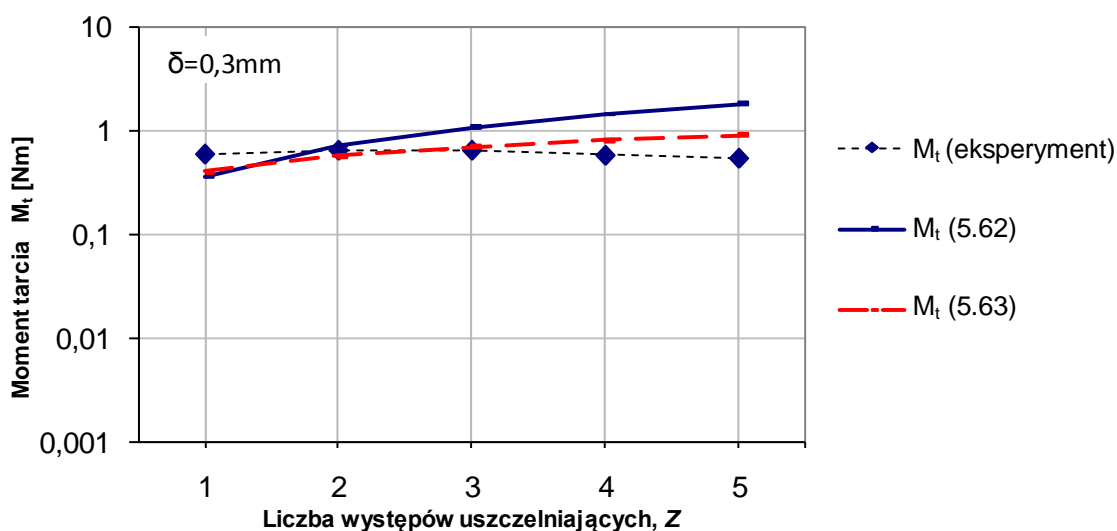
Przy ustalonych współczynnikach wypełnienia, zauważalna jest również tendencja do spadku wartości momentu tarcia, wraz ze zwiększaniem wysokości szczeliny.

8.3. Weryfikacja analitycznych zależności do obliczania momentu tarcia

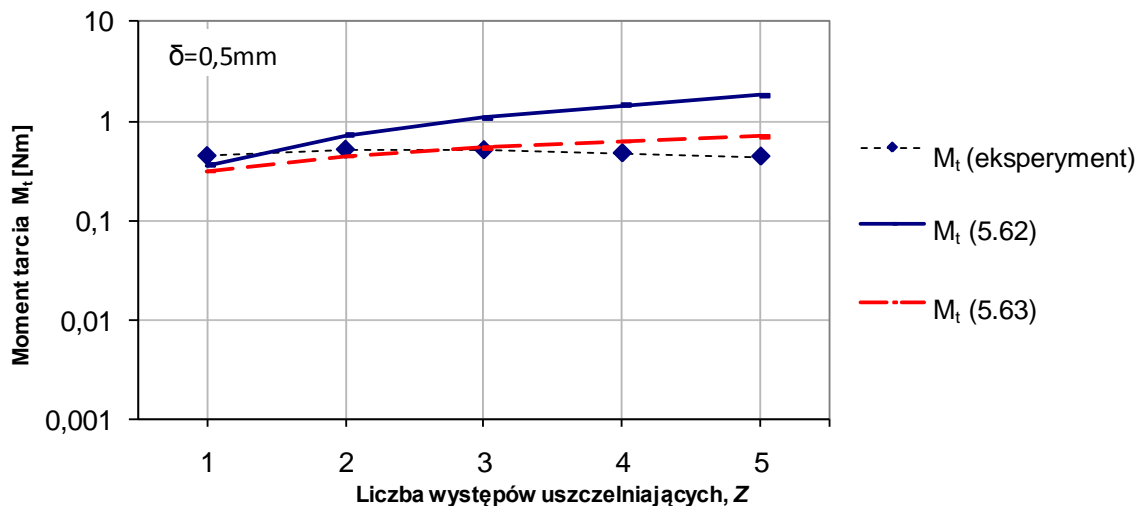
Poniżej na rys.8.7-r98 przedstawiono porównanie wartości momentów tarcia M_t w uszczelnieniu z cieczą MR wyznaczonych z zależności (5.62) i (5.63) z wynikami badań laboratoryjnych. Parametry magnetyczne dla wszystkich wariantów uszczelnień zostały zamieszczone w Tab.6.4. dla układu symetrycznego. Do wyznaczenia wartości analitycznych momentu tarcia M_t korelujących z wynikami laboratoryjnymi metodą kolejnych przybliżeń dobrano współczynnik korygujący $C_t=2$.



Rys.8.7. Zależność momentu tarcia M_t od liczby występów uszczelniających Z dla: $n=1000\text{obr/min}$, $M_s = 270\text{ kA/m}$, $V= 150\ \mu\text{l}$, $\delta= 0,15\text{ mm}$, $C_t = 2$.



Rys.8.8. Zależność momentu tarcia M_t od liczby występów uszczelniających Z dla: $n = 1000\text{ obr/min}$, $M_s = 270\text{ kA/m}$, $V= 300\ \mu\text{l}$, $\delta= 0,30\text{mm}$, $C_t = 2$.



Rys.8.9. Zależność momentu tarcia M_t od liczby występów uszczelniających Z dla: $n = 1000$ obr/min, $M_s = 270$ kA/m, $V = 500$ μ l, $\delta = 0,50$ mm, $C_t = 2$.

Uzyskane wartości momentu tarcia wyznaczone z zależności analitycznych (5.62) i (5.63), wskazują na dostateczną zgodność z wartościami uzyskanymi doświadczalnie, przy wartości współczynnika $C_t = 2$. Najlepsza zgodność występuje dla małej liczby występów uszczelniających $Z=1,2,3$. Przy większej liczbie występów Z , pojawiają się odchylenia związane z rozdzieleniem pola magnetycznego na poszczególne występy, co powoduje zmniejszenie jego maksymalnych wartości na pojedynczych występach.

8.4. Podsumowanie

Literaturowe informacje oraz badania lepkości dynamicznej opisane w rozdziale 6.3, wskazują, że w wyniku oddziaływanie pola magnetycznego naprężenia styczne w cieczy magnetoreologicznej osiągną wysokie wartości, co spowoduje wystąpienie znaczących oporów ruchu uszczelnienia.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono wystąpienie wysokich oporów ruchu uszczelnienia z cieczą MR. W badaniach uszczelnień wielowystępowych stwierdzono początkowy wzrost oporów ruchu, ze wzrostem liczby występów uszczelniających, przy czym po osiągnięciu maksymalnej wartości momentu oporu, dalsze zwiększanie liczby występów powoduje jego spadek. Jest to związane ze zmniejszeniem lepkości cieczy pod wpływem pola magnetycznego o mniejszych wartościach, na poszczególnych występach uszczelniających.

Przeprowadzone badania potwierdziły zgodność wyników eksperymentu z zależnościami analitycznymi w zakresie mniejszej liczby występów (do $Z=3$). Natomiast przy liczbie występów powyżej $Z=3$ wartości uzyskane w badaniach odbiegają od przewidywań analitycznych, co prawdopodobnie ma związek z obniżeniem lepkości związanym z osłabieniem pola magnetycznego.

9. BADANIA PORÓWNAWCZE USZCZELNIEŃ Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ I FERROMAGNETYCZNĄ

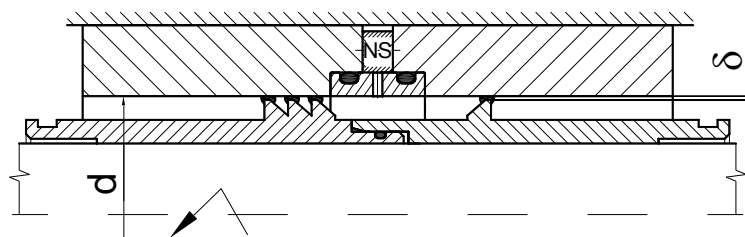
Porównania wyników badań przeprowadzonych podczas wcześniejszych projektów badawczych [85] z zastosowaniem w uszczelnieniach cieczy ferromagnetycznych z obecnymi badaniami uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną, wskazują na znaczne różnice w uzyskiwanych wartościach ciśnień krytycznych i oporów ruchu tych uszczelnień. Wynika to z dużych różnic wartości magnetyzacji nasycenia M_s i lepkości η , między cieczą magnetoreologiczną i cieczą ferromagnetyczną

Jednak w oparciu o te wyniki nie można określić jak duże są te różnice, ponieważ w badaniach tych wystąpiły odmienne warunki pracy i konstrukcja stanowisk badawczych jak również różne układy magnetyczne.

W celu porównania uszczelnień z cieczą MR w odniesieniu do uszczelnień z cieczą FF przeprowadzono również badania tych uszczelnień w identycznych warunkach pracy.

9.1. Układ tulei badawczych

Badania przeprowadzono z zastosowaniem układu dwu połączonych tulei; bazowej o liczbie występów uszczelniających $Z_B=3$, i pomiarowej z liczbą występów $Z=1$, (rys.9.1).



Rys.9.1. Układ tulei badawczych stosowanych do porównawczych badań uszczelnień z cieczą MR i z cieczą FF

9.2. Badania porównawcze uszczelnienia z cieczą MR i z cieczą FF

Do badań porównawczych użyto cieczy magnetoreologicznej MRF-122EG firmy Lord oraz cieczy ferromagnetycznej FLS 040.040 firmy Ferrolabs. Ciecz MRF-122EG została opisana w rozdziale 6.1, natomiast charakterystyka cieczy FLS 040.040 została przedstawiona poniżej:

- ciecz nośna: olej silikonowy
- współczynnik lepkości dynamicznej: $0,3 \div 0,8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- temperatura zapłonu: 200°C
- zakres temperatur pracy: $-70 \div 150^\circ\text{C}$
- magnetyzacja nasycenia: $40 \div 50 \text{ kA/m}$

Przy doborze cieczy ferromagnetycznej kierowano się między innymi wartością magnetyzacji nasycenia. FLS 040.040 należy do cieczy o jednej z najwyższych magnetyzacji nasycenia spośród z dostępnych na rynku cieczy ferromagnetycznych, [94]. W laboratorium AGH zrealizowano wcześniej obszerny program badań z jej wykorzystaniem, np.[79].

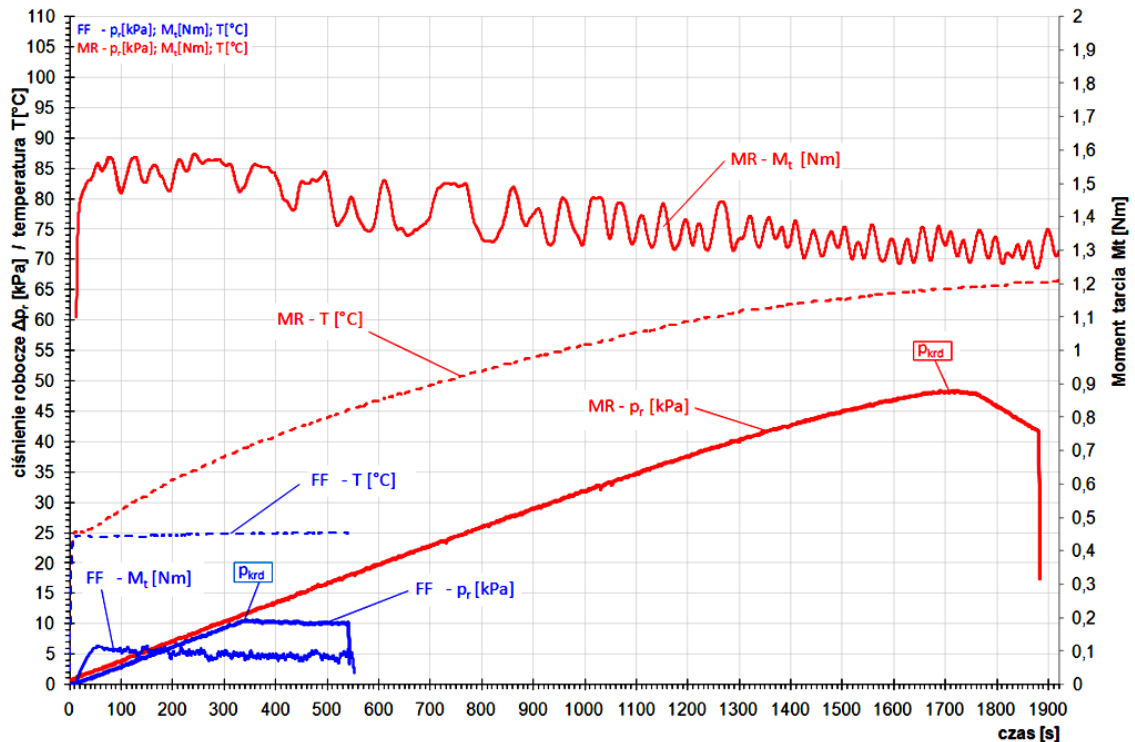
Badania porównawcze uszczelnienia jednowystępowego z cieczą magnetoreologiczną MRF-122EG i uszczelnienia z cieczą ferromagnetyczną FLS 040.040 wykonano przy prędkości obrotowej wału $n=1000\text{obr/min}$, ze szczeliną $\delta=0,15$; $\delta=0,3$ i $\delta=0,5\text{mm}$. Szczeliny robocze wypełniono objętością cieczy, odpowiednio $V_{0,15}=150\mu\text{l}$; $V_{0,3}=300\mu\text{l}$ i $V_{0,5}=500\mu\text{l}$, odpowiadającą ustalonemu współczynnikowi wypełnienia $\frac{V}{V_n}$ dla każdej szczeliny.

Badaniu porównawczemu poddano uszczelnienia jednowystępowe ($Z=1$), w związku z czym jako uszczelnienie bazowe można było zastosować mniejszą liczbę występów. Zastosowano tuleje z 3 występami uszczelniającymi ($Z_B=3$), na które aplikowano ciecz przy ustalonym współczynniku wypełnienia $\frac{V}{V_n}$, takim samym dla cieczy FF i MR.

Podstawowym mierzonym parametrem był wzrost ciśnienia roboczego p_r , zadawanego do chwili zarejestrowania spadku ciśnienia w układzie, co było oznaką utraty szczelności i osiągnięcia wartości ciśnienia krytycznego p_{krd} .

podczas badania rejestrowano również moment tarcia M_t w węźle uszczelniającym (na tulei pomiarowej i bazowej) oraz temperaturę w uszczelnieniu.

Przykładowy wykres rzeczywistej rejestracji parametrów uszczelnień z cieczą MR i FF, dla uszczelnień ze szczeliną pomiarową $\delta=0,3\text{mm}$, przy prędkości obrotowej $n=1000\text{obr/min}$ przedstawiono na rys.9.2.



Rys.9.2. Rzeczywiste wykresy z badań porównawczych uszczelnień z cieczą FF i MR. Kolorem niebieskim zaznaczono wyniki dla cieczy FF, a czerwonym wyniki dla cieczy MR; p_r -zadawane ciśnienie, M_t - moment tarcia uszczelnienia, T -temperatura w uszczelnieniu, p_{krd} -osiągnięte ciśnienie krytyczne

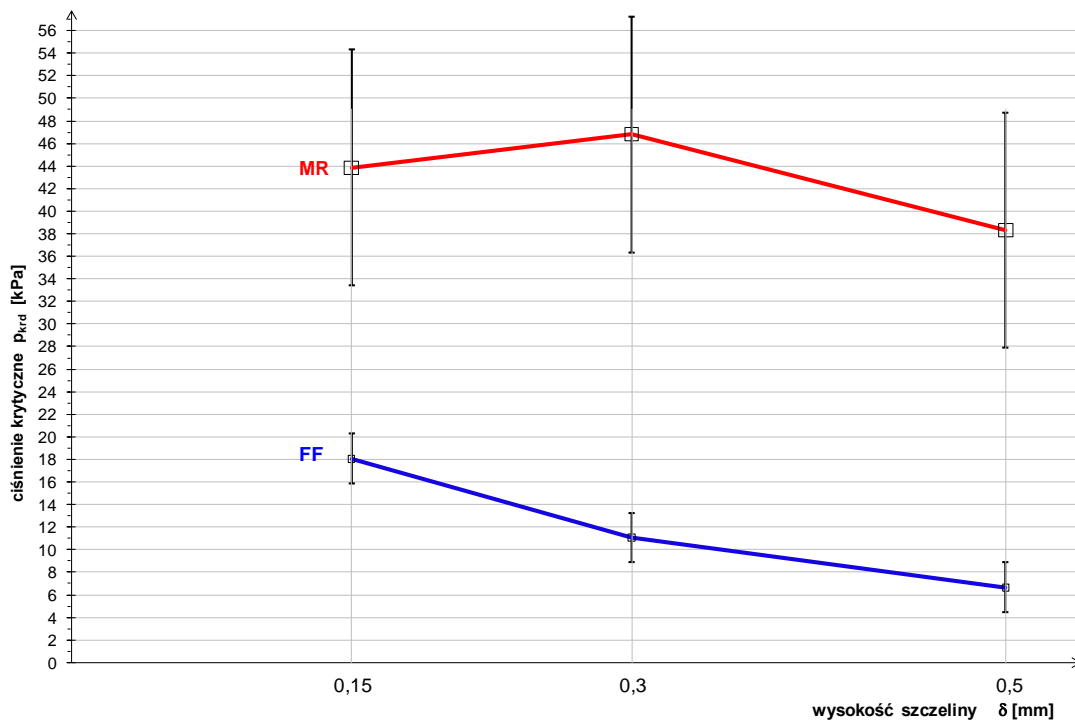
Badania powtórzono 3-krotnie, co pozwoliło potwierdzić wyniki w zakresie różnic występujących w uzyskiwanych ciśnieniach krytycznych i oporach tarcia obu rodzajów uszczelnień. Na wykresach widoczne jest, że przy tych samych warunkach pracy, uszczelnienie z cieczą magnetoreologiczną osiąga ciśnienie krytyczne około 4-krotnie wyższe niż uszczelnienie z cieczą ferromagnetyczną. Natomiast wartość momentu tarcia w uszczelnieniu z cieczą ferromagnetyczną jest ok. 13-krotnie niższa niż w uszczelnieniu z cieczą magnetoreologiczną.

W tabelicy (Tab.9.1) zestawiono wyniki badania ciśnienia krytycznego i momentu tarcia jednowystępowych uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną i magnetoreologiczną dla trzech wysokości szczeliny.

Tab.9.1. Zestawienie wyników pomiarów dynamicznego ciśnienia krytycznego i momentu tarcia uszczelnień z cieczą FF i MR

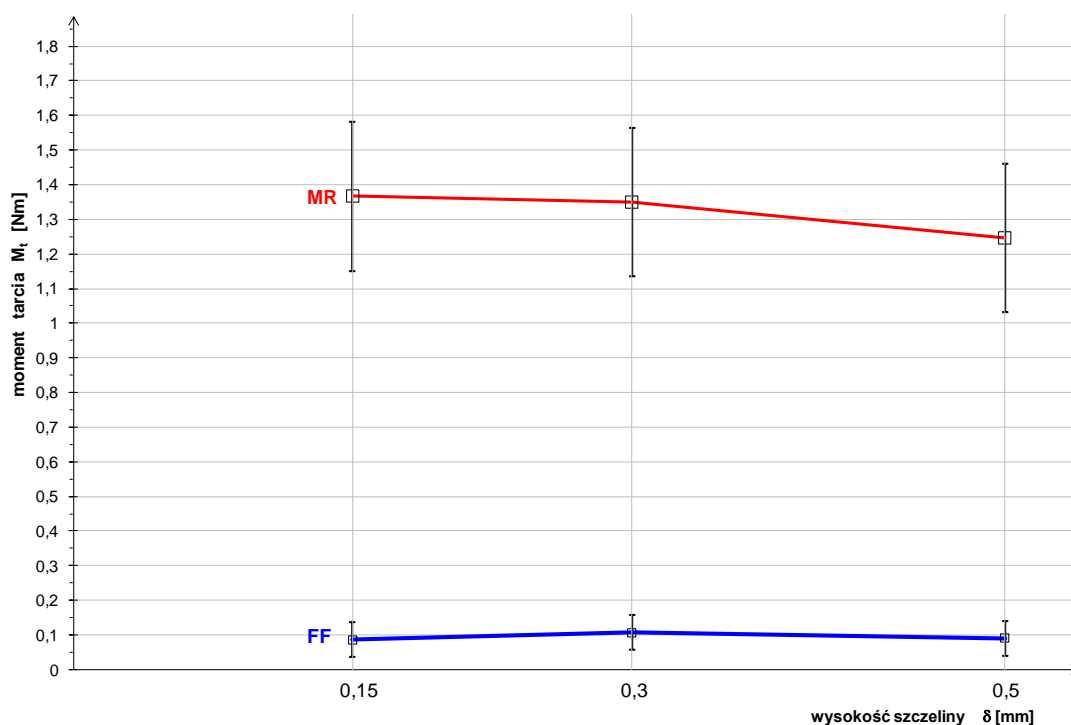
Wysokość szczeliny δ [mm]	Objętość cieczy aplikowanej do szczeliny V [μ l]	FF		MR	
		p_{krd} [kPa]	M_t [Nm]	p_{krd} [kPa]	M_t [Nm]
0,15	150	18,1	0,1	43,9	1,4
0,3	300	11,1	0,1	46,8	1,4
0,5	500	6,7	0,1	38,3	1,2

Porównanie osiąganych ciśnień krytycznych p_{krd} przez uszczelnienia z cieczą MR i FF dla trzech wysokości szczelin pomiarowych $\delta=0,15$; $\delta=0,3$ i $\delta=0,5$ mm zostało pokazane na wykresie, rys.9.3.



Rys.9.3. Ciśnienie krytyczne p_{krd} , uszczelnień jednowystępowych z cieczą MR i FF, dla wysokości szczelin $\delta=0,15$ mm; $\delta=0,3$ mm; $\delta=0,5$ mm, przy prędkości obrotowej $n=1000$ obr/min

Opory ruchu tych uszczelnień przy trzech wysokościach szczelin pomiarowych $\delta=0,15$; $\delta=0,3$ i $\delta=0,5$ mm obrazuje wykres na rys.9.4. Moment tarcia M_t mierzony był dla całego węzła uszczelnienia obejmującego 4 występy uszczelniające.



Rys.9.4. Momenty tarcia M_t , węzła uszczelniającego z 4 występami przy cieczy MR i FF, dla wysokości szczelin $\delta=0,15\text{mm}$; $\delta=0,3\text{mm}$; $\delta=0,5\text{mm}$, i prędkości obrotowej $n=1000$ obr/min

Wyniki badań porównawczych pokazują, że uzyskiwane ciśnienia krytyczne dla wszystkich badanych wysokości szczelin, są znacznie wyższe dla uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną niż dla uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną. Wyższe wartości ciśnień uzyskiwanych w badaniach z cieczą MR, wynikają z jej wyższej magnetyzacji nasycenia, około 6-krotnie wyższej od magnetyzacji nasycenia cieczy FF. Należy jednak zauważyć, że różnice wartości ciśnień krytycznych między cieczą MR i FF, nie są jednakowe. Przykładowo dla uszczelnienia ze szczeliną $\delta=0,15\text{mm}$ różnica była ok. 2,5-krotna, natomiast dla szczeliny $\delta=0,5\text{mm}$ osiągnięto blisko 7-krotnie wyższe ciśnienie krytyczne dla cieczy MR niż dla cieczy FF.

Natomiast opory ruchu uszczelnień z cieczą MR są znacznie wyższe niż opory ruchu uszczelnień z cieczą FF. Dla wszystkich badanych wysokości szczelin różnica ta jest około 13-krotna. W trakcie badania zaobserwowano także znaczny wzrost temperatury uszczelnienia z cieczą MR, co nie wystąpiło w badaniach uszczelnień z cieczą FF.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI WYNIKAJĄCE Z PRACY

Stosowanie cieczy magnetoreologicznych w układach uszczelniania jest zagadnieniem nowym i wiedza w tym zakresie jest wysoce niewystarczająca.

Poznanie procesów i zjawisk zachodzących w pracy uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną wymaga wykonania wielu prac badawczych, zarówno doświadczalnych, jak i analiz teoretycznych.

Ze względu na obszerny zakres podjętego tematu, prace badawcze zostały ograniczone do problematyki podstawowych parametrów pracy występujących w uszczelnieniach urządzeń technicznych, to jest ciśnienia krytycznego i oporów ruchu.

W trakcie przeprowadzonych badań zaobserwowano zjawiska i procesy, które nie były dotychczas obserwowane, co wymagało dużego zakresu wstępnych badań w celu ustalenia kryteriów poprawnej pracy uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną i kryteriów oceny stanu jego niezdatności.

Realizacja głównego programu badawczego wymagała wykonania około 300 badań w zakresie procesów przebiecia uszczelnień, ponad 100 badań w zakresie wyznaczania oporów ruchu oraz około 50 badań poświęconych porównaniu ciśnienia krytycznego i oporów ruchu uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną i cieczą ferromagnetyczną.

Analiza teoretyczna zagadnień związanych z procesem przebiecia i oporami ruchu umożliwiła sformułowanie modelu matematycznego i wyznaczenie zależności w zakresie ciśnienia krytycznego i momentu tarcia w uszczelnieniu.

Na podstawie wyników badań doświadczalnych przeprowadzono weryfikację opracowanych zależności analitycznych.

Wnioski ogólne

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają słuszność tezy podstawowej i tezy pomocniczej przyjętych w niniejszej pracy i pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wyniki badań ciśnienia krytycznego przedstawione w rozdziale 7, wskazują że ciecz magnetoreologiczna może być użyta jako skuteczna przegroda uszczelniająca.

2. Ciśnienie krytyczne uszczelnienia zależy od objętości cieczy w uszczelnieniu, geometrii uszczelnienia i liczby występów uszczelniających. Ciśnienie krytyczne wzrasta ze zwiększaniem objętości cieczy jak i zwiększaniem liczby występów uszczelniających. W obydwu przypadkach wzrost ciśnienia krytycznego jest ograniczony do pewnej wartości wynikającej z energii układu magnetycznego uszczelnienia. Natomiast zwiększanie wysokości szczeliny powoduje zmniejszanie ciśnienia krytycznego uszczelnienia.
3. Prędkość obrotowa w badanym zakresie wartości nie wpłynęła znacząco na wartości ciśnienia krytycznego dla badanych wysokości szczeliny.
4. Badania momentu tarcia w uszczelnieniu wskazują, że opory ruchu zależą od geometrii szczeliny i zmniejszają się ze wzrostem wysokości szczeliny.
5. Istotny wpływ na opory ruchu ma także liczba występów uszczelniających. Przy małej liczbie występów wzrost liczby występów powoduje wzrost oporów ruchu. Natomiast przy większej liczbie występów, w wyniku znacznego zmniejszenia natężenia pola, następuje spadek lepkości cieczy magnetoreologicznej i zmniejszenie oporów ruchu, pomimo wzrostu liczby występów, co pokazują wyniki badań w rozdziale 8.
6. Wyniki badań porównawczych pokazują, że wartość ciśnienia krytycznego uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną jest znacząco (2,5 do 7-krotnie) wyższa niż w przypadku uszczelnień z cieczą ferromagnetyczną dla tych samych warunków pracy. Natomiast opory ruchu w uszczelnieniach z cieczą magnetoreologiczną są znacząco (około 13-krotnie) wyższe niż w uszczelnieniach z cieczą ferromagnetyczną.
7. Wyniki badań doświadczalnych potwierdzają poprawność przyjętego modelu matematycznego i analitycznych zależności na wyznaczenie ciśnienia krytycznego i oporów ruchu w uszczelnieniu.

Wnioski aplikacyjne

Przeprowadzone badania pozwalają nas formułowanie następujących wniosków aplikacyjnych:

1. Wyniki badań wskazują, że możliwe jest stosowanie uszczelnień z cieczą MR jako rozwiązania alternatywnego dla uszczelnień z cieczą FF. Należy jednak zwrócić uwagę, że stosowanie uszczelnień z cieczą MR powinno być ograniczone do przypadków, w których występują ciśnienia o wartościach

wyższych i niskie prędkości ruchu. Jest to związane z wysoką magnetyzacją nasycenia cieczy MR i dużymi oporami ruchu.

2. Wysoka magnetyzacja nasycenia cieczy MR pozwala na stosowanie niskoenergetycznych układów magnetycznych w uszczelnieniach, dzięki czemu unika się oddziaływania pola magnetycznego uszczelnienia na sąsiadujące elementy maszyn, co może być istotne w wielu współczesnych urządzeniach.

Wnioski dotyczące dalszych badań

Uszczelnienia z cieczą magnetoreologiczną stanowią stosunkowo nowe rozwiązanie techniczne i powinny być nadal badane, w celu określenia ich właściwości i skuteczności w eksploatacji maszyn.

1. Ponieważ ciecze magnetoreologiczne wykazują silną sedymentację, należy przeprowadzić badania oddziaływania tego zjawiska na skuteczność działania uszczelnienia w polu grawitacyjnym i w polu magnetycznym.
2. Z uwagi na wysokie opory ruchu obserwuje się szybki i znaczny wzrost temperatury uszczelnienia w trakcie pracy. Należy wykonać badania wpływu tego zjawiska na ciśnienie krytyczne z uwzględnieniem dodatkowych układów chłodzenia.
3. W dalszych badaniach należałoby uwzględnić różne rodzaje cieczy magnetoreologicznych, a szczególnie wykazujących niższą sedymentację niż ciecze stosowane dotychczas.
4. Należy również przeprowadzić długotrwałe badania trwałościowe uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną.

LITERATURA

- [1] Bashtovoj V.G., Krakov M.S., Pogirnikskaja S.G.: Chislennyje issledovanija moshhnosti teplovydelenija v magnitnozhidkostnom uplotnenii s uchetom geometricheskikh faktorov. Magnitnaja gidrodinamika. 1991, № 2, s. 116-121.
- [2] Bashtowoj W.G., Berkowskij B.M.: Termomekhanika ferromagnitnykh zhidkostejj. Magnitnaja gidrodinamika, nr 3,1973, s.3-12.
- [3] Bednarek S.: Ciecze ferromagnetyczne – materiały o niezwykłych właściwościach i ich zastosowania. FOTON 104, Wiosna 2009
- [4] Berkovskij B.M., Krakov M.S., Rakhuba V.K.: Problemy razrabotki i predely ispol'zovanija magnitnozhidkostnykh uplotnenij. Magnitnaja gidrodinamika. 1982, № 1, стр. 85-93.
- [5] Berkovski B.M., Bashtovoy V.G.: Magnetic fluids and applications handbook, Begell House Inc.,New York-Wallingford, 1996
- [6] Berkovsky B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S.: Magnetic fluids; an engineering applications, Oxford Science Publications, 1993
- [7] Berkowskij B.M., Medwedew W.F., Krakow M.S.: Magnitnye zhidkosti. Khimija. Moskwa, 1989
- [8] Bydoń S.: Facility for Induction Motor Velocity Control with a Magnetorheological Brake. Process Control Club 2003, poz.22 (<http://pcc.imir.agh.edu.pl/poz22/index.htm>)
- [9] Carlson D., Catanzarite D.M., St. Clair K.A.: Commercial magneto-rheological fluid devices. Lord Corporation. 5th Int. Conf. on Electro-Rheological, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology. Sheffield, 1995
- [10] Carlson J.D., Jolly M.R.: MR Fluid, foam and elastomer devices. Mechatronics Volume: 10, Issue: 4-5, June 1, 2000, pp. 555-569
- [11] Claracq J., Sarrazin J., Montfort J.P.: Viscoelastic Properties of Magnetorheological Fluids. Rheology Acta, 43:38–49, 2004.
- [12] Dimock G. A., Lindler J. E., Wereley N. M.: Bingham Biplastic Analysis of Shear Thinning and Thickening in Magnetorheological Dampers. Norman M. Wereley, redaktor, SPIE, Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems, wolumen 3985, strony 444–455, Czerwiec 2000
- [13] Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J.: Podstawy reologii i reometrii płynów. Politechnika Łódzka, Łódź 2009
- [14] Fertman V.E. Magnitnyje zhidkosti. Minsk. 1988
- [15] Fertman V.E.: Eksperimental'noe issledovanie teplovogo rezhima magnitnozhidkostnogo uplotneniya. Magnitnaja gidrodinamika, 1979, № 4, s. 129-131
- [16] Fujita T., Yoshimura K., Seki Y., Dodbiba G., Miyazaki T.: Characterization of magnetorheological suspension of seal, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, vol.10, 1999, pp.770-774

- [17] Genc S.: Synthesis and Properties of Magnetorheological (MR) Fluids. Ph.D. thesis. University of Pittsburgh, School of Engineering, 2002
- [18] Gieras J. F., Piech Z.J., Tomczuk B.: Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, 1999
- [19] Gorodkin S.R., Kordonskij W.I., Protasewicz N.A.: Ocena wozmożności ispolzowanija magnitoreologicznych suspensij w uplotnitielnych ustrojstwach. Magnitnaja Gidrodinamika, nr 4, 1988, pp.128-131
- [20] Homik W.: Zastosowanie cieczy reologicznych w technice, a w szczególności w tłumieniu drgań mechanicznych. Przegląd Mechaniczny. Rok wyd. LXV. Zeszyt 10/2006
- [21] Kasprzak W., Lysik B.: Analiza wymiarowa w projektowaniu eksperymentu. Ossolineum, Wrocław, 1978
- [22] Kordonsky W.I., Gorodkin S.R.: Magnetorheological fluid-based seal. Proc. Of the 5th Int. Conf. On MR and ER fluids, Sheffield, UK, 1995, pp.704-709
- [23] Kordonsky W.I.: Elements and devices based on magnetorheological effect. Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, no 4, 1993, pp.65-69
- [24] Kordonsky W.I.: Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.122, 1993, pp.395-398
- [25] Kowol P., Pilch Z.: Sprzęgło magnetoreologiczne o konstrukcji tarczowej z podmagnesowaniem wykorzystującym magnes trwały. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 62. Studia i Materiały nr 28. 2008
- [26] Kromulski J., Kaźmierczak H.: Tłumienie drgań z wykorzystaniem układów z cieczą Magnetoreologiczną. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. 2006, Vol. 51(3)
- [27] Lee Dug-Young, Choi Young-Tai, Wereley Norman M.: Performance Analysis of Smart Impact Damper System Using Herschel-Bulkley Model. G. Bossis, redaktor, Proceedings of the Eighth International Conference, Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, strony 256–262. World Scientific, 2001
- [28] Lewandowski D.: Właściwości tłumiące kompozytów magnetoreologicznych. Badania, modele, identyfikacja. Praca doktorska. Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2005
- [29] Ławniczak A., Milecki A.: Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999
- [30] M. Leonowicz, J.J. Wysłocki, Współczesne magnesy, technologie, mechanizmy koercji, zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, Polska, 2005
- [31] Machowski B., Ochoński W., Czachórska E.: Uszczelnienia. PWN, Warszawa 1991
- [32] Mann T.: Why Has Our Work Has Focused on MR Fluid Technology? Lord

Corporation, Materials Division, 2002

- [33] Markiewicz M.: Hamownia z cieczą magnetoreologiczną. Scripta Comeniana Lesnensia PWSZ im. J. A. Komeńskiego w Lesznie nr 6, 2008
- [34] Materials Division Lord Corporation. Designing with MR Fluids, 1999
- [35] Matusevich N.P., Rakhuba V.K., Chernobaj V.A.: Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamicheskikh i teplovykh protsessov v magnitnozhidkostnykh uplotnenijakh. Magnitnaja gidrodinamika. 1983, № 1, s. 125-129
- [36] Michalew J., Ochoński W.: Możliwości zastosowania cieczy ferromagnetycznej w technice uszczelniania maszyn i urządzeń. Sterowanie i napęd hydrauliczny. Zeszyt 2/95, s.33-36.
- [37] Milecki A.: Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010
- [38] Moskowitz R.: Dynamic sealing with magnetic fluids. Asle Transactions. Vol.18, 2, 135-143. 1975
- [39] MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid. Lord Technical Data. Lord Corporation OD DS7027 (Rev.1 7/08). 2008
- [40] Muc A., Barski M.: Ciecze magnetoreologiczne i ich zastosowania praktyczne. Czasopismo techniczne z 1-M/2007. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2007. FOTON 104, Wiosna 2009
- [41] Nowikow W.A., Sinicin A.K., Fertman W.E.: O zawisimosti uderzhiwaemogo perepada dawlenij ot ob'ema germetizirujushhego sloja magnitnoj zhidkosti. Magnitnaja gidrodinamika, nr 3,1983, s.123-129.
- [42] Ochoński W., Potoczny M., Zachara B.: Badanie ciśnienia przebicia w uszczelnieniu z cieczą magneto-reologiczną dla wałów obrotowych. Międzynarodowa XII konferencja naukowo-techniczna. Wrocław–Kudowa Zdrój 2010. SIMP Ośrodek Doskonalenia Kadr, Wrocław 2010 – ISBN 978-83-87982-53-9 – s.121-128
- [43] Ochoński W., Salwiński J., Szydło Z., Zachara B.: Ausgewählte Probleme der Dichtheit von grossen Kugelhähnen für Erdgas-Rohrleitungen, Zeitschrift „Dichtungstechnik“, Heft 1, 2005
- [44] Ochoński W., Szydło Z., Zachara B.: Badanie szczelności i oporów tarcia w uszczelnieniu z cieczą magnetyczną. Uszczelnienia i technika uszczelniania maszyn i urządzeń; IX Międzynarodowa Konferencja. Wrocław–Polanica Zdrój 2001. SIMP Ośrodek Doskonalenia Kadr, Wrocław 2001 – ISBN 83-87982-70-9 – s.221-231
- [45] Ochoński W., Szydło Z., Zachara B.: Some new designs of ferromagnetic seals, Proc of 8th Int. Conference on Magnetic Fluids, Timisoara, 1998
- [46] Ochoński W., Szydło Z., Zachara B.: Study of sealing capability of magnetic fluid shaft seals, Proceedings of the 16th International Conference on Fluid Sealing ,BHRA, Brugge, Belgia,18-20 wrzesień 2000
- [47] Ochoński W.,Szydło Z., Zachara B.: Burst pressure of magnetic fluid rotary shaft seals. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Z.3(123), 2000
- [48] Ochoński W.: Budowa uszczelnień z cieczą magnetyczną, Przegląd Mechaniczny, nr 8, 1989

- [49] Ochoński W.: Ferromagnetiska vatskor och användningen av dessa inom tätningsteknologin. *Fluid Scandinavia*, nr 2, 2003
- [50] Ochoński W.: Fluidi magnetici per difficultà funzioni di tenuta. *Oleodinamica Pneumatica*, no 5, 2005
- [51] Ochoński W.: New designs of magnetic fluid exclusion seals for rolling bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*, vol.57, no 3, 2005
- [52] Odenbach, S. „Colloidal Magnetic Fluids“ Springer-Verlag GmbH, 2009
- [53] Orlov L.P., Fertman V.E.: Principy rascheta i konstruirovaniya magnitnozhidkostnykh uplotnenij. *Magnitnaja gidrodinamika*, 1980, № 4 s. 89-101
- [54] Orlov D.V., Podgorkov V.V. (red.): *Magnitnye zhidkosti w mashinostroenii*, Mashinostroenie, Moskva, 1993
- [55] Park J. H., Chin B. D., Park O. O.: Rheological Properties and Stabilization of Magnetorheological Fluids in a Water-in-Oil Emulsion. *Journal of Colloid and Interface Science* 240, 349–354. 2001
- [56] Park J. H., Kwon M. H., Park O. O.: Rheological Properties and Stability of Magnetorheological Fluids using Viscoelastic Medium and Nanoadditives. *Korean J. Chem. Eng.* (vol.18, No5), 580-585. 2001
- [57] Phulé P.P.: Magnetorheological (MR) fluids: Principles and applications. *Smart Materials Bulletin*. Volume: 2001, Issue: 2, February, 2001, pp. 7-10
- [58] Potoczny M., Szczęch M.: Rozkład pola magnetycznego w wielowystępowym uszczelnieniu z cieczą magnetyczną wału obrotowego. *Podstawy konstrukcji maszyn – kierunki badań i rozwoju*, T. 3, Politechnika Gdańska — Gdańsk : WM PG, 2011 - s. 427–435
- [59] Potoczny M., Szydło Z., Salwiński J.: Pomiar rozkładu pola magnetycznego i ciśnienia przebicia uszczelnienia z cieczą magnetyczną wału obrotowego - XXIII Sympozjon PKM - Rzeszów-Przemysł 2007
- [60] Qian Ji-guo, Yang Zhi-yi.: Characteristics of a magnetic fluid seal and its motion in an axial variable seal gap. *Journal of China University of Mining & Technology*. 2008, vol. 18, No. 4. 634-636
- [61] Rupeta W., Salwiński J., Łuczyński S.: Smarowanie łożysk przekładni zębatych z wykorzystaniem energii kinetycznej oleju. *Z.N. Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej*, nr 5, z.8, 2003, s.175-180
- [62] Ryś G.: Wpływ siły odśrodkowej oraz zanieczyszczeń stałych i wilgoci na skuteczność uszczelniania w uszczelnieniach zespolonych z cieczą magnetyczną. *Praca doktorska*. Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Wrocław 2005
- [63] Sapiński B., Martynowicz P., Jastrzębski Ł.: Symulacja układu redukcji drgań z tłumikiem magnetoreologicznym i przetwornikiem elektromagnetycznym. *Modelowanie Inżynierskie*. Gliwice 2010
- [64] Sapiński B., Rosół M.: MR damper performance for shock isolation. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 45, 1, pp.133-145, Warsaw 2007

- [65] Sapiński B.: An experimental electromagnetic induction device for a magnetorheological damper. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 46, 4, pp.933-947, Warsaw 2008
- [66] Sapiński B.: *Magnetorheological Damper In Vibration Control*. AGH University of Science and Technology Press, Cracow 2006
- [67] Sheng R., Flores G.A., Liu J.: In Vitro Investigation of a Novel Cancer Therapeutic Method Using Embolizing Properties of Magnetorheological Fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 194:167–175, 1999
- [68] Shulman Z.P., Kordonski W.I.: *Magnitoreologicheskij efekt*. Nauka i technika. Minsk, 1982
- [69] Skrzypek J.: *Plastyczność i pełzanie*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa, 1986
- [70] Socaciu T., Bucur M., Mihai S.: Experimental research regarding magnetorheologic fluids. *Interdisciplinarity in engineering. Scientific international conference*, Tg. Mures – Romania, 15-16 November 2007. Inter-Ing 2007
- [71] Spencer B. F. Jr., Yang G., Carlson J. D., Sain M. K.: “Smart” Dampers for Seismic Protection of Structures: A Full-Scale Study. *Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, June 28 – July 1, 1998. Proceedings, in press
- [72] Suraj S. Deshmukh, Gareth H. McKinley. Rheological Behavior of Magnetorheological Suspensions under Shear, Creep and Large Amplitude Oscillatory Shear (LAOS) Flow. *Proceedings XIVth International Congress on Rheology*. The Korean Society of Rheology, 2004
- [73] Susan-Resiga D., Vékás L., Susan-Resiga R.: A rheological model For magneto-rheological fluids. *3rd German-Romanian Workshop On Turbomachinery Hydrodynamics (141-158)*, May 10-12, 2007
- [74] Szeląg W., Nowak L., Myszkowski A.: Hamulec elektromagnetyczny z cieczą magnetoreologiczną. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 48. Studia i Materiały nr 20*. 2000
- [75] Szydło Z., Matuszewski L.: Experimental research on effectiveness of the magnetic fluid seals for rotary shafts working in water. *Polish Maritime Research ; ISSN 1233-2585*. — 2007 vol. 14 no. 4 s. 53–58
- [76] Szydło Z., Ochoński W., Zachara B.: Experiments on magnetic fluid rotary seals operating under vacuum conditions. *Tribotest journal* — 2005 vol. 11 no. 4 – s.345-354
- [77] Szydło Z., Salwiński J., Szczęch M.: Experiments on magnetic fluid seals operating in water condition. Solving friction and wear problems. *17th international colloquium Tribology, 2010 / ed. Wilfried J. Bartz — [Ostfildern : Technische Akademie Esslingen, 2010] s. 93*
- [78] Szydło Z.: High speed magnetic fluid seal operating in water environment. Solving friction and wear problems. *17th international colloquium Tribology, 2010 / ed. Wilfried J. Bartz — [Ostfildern : Technische Akademie Esslingen, 2010] s. 94*

- [79] Szydło Z., Szczęch M.: Investigation of dynamic magnetic fluid seal wear process in utility water environment. Key Engineering Materials. Vol. 490 (2012) pp. 143–155
- [80] Taketomi S., Tikadzumi S.: Magnitnye zhidkosti. Mir. Moskwa, 1993
- [81] Telejko T.: Wstęp do metod opracowania wyników pomiarów z przykładami. Wydawnictwa AGH. Kraków 1999
- [82] Tietze W.: Handbuch Dichtungspraxis. 3 Auflage. Vulkan-Verlag GmbH.Essen 2003
- [83] Wiślicki B., Lassota W.: Ciecze Magnetoreologiczne. Tribologia nr 5-2001. s.921-945
- [84] Wiślicki B.: Ciecze magnetyczne – właściwości i zastosowania. Ciecze eksploatacyjne. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji. 2002, R.11, nr 93, s.4-13.
- [85] Wyznaczanie charakterystyk tribologicznych oraz granicznych warunków pracy uszczelnień ferromagnetycznych. Projektu badawczy KBN Nr: 7T07B02412. AGH, Kraków, 2000
- [86] Wyznaczanie granicznych warunków pracy uszczelnień z cieczą magnetoreologiczną. Projekt badawczy MNiSzW Nr: 4496/B/T02/2007/33. AGH, Kraków, 2011
- [87] Xiaojie Wang, Faramarz Gordaninejad. Herschel-Bulkley Analysis of Electro- and Magneto-Rheological Controllable Fluids in Flow Mode. R. Tao, redaktor, Proceedings of the 7th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions, str 568–578. World Scientific, 1999
- [88] FerroTec. Ferrofluidic Vacuum Rotary Feedthroughs, 2001. Catalog & Product Specification
- [89] Trelleborg AB.: Uszczelnienia ruchu obrotowego. Trelleborg sealing solution, katalog Trelleborg AB, 2007
- [90] <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo.php?id=1765773> z dnia 25.07.2010
- [91] <http://www.anga.com.pl/oferta.php?language=1&rodzaj=uszczelnienia> (07.05.2011)
- [92] http://www.anga.com.pl/pdf/folder_GF_PL.pdf - folder Uszczelnienia Gazodynamiczne (12.05.2011)
- [93] <http://www.chesterton.com.pl/ochrona-lozysk/articles/uszczelnienia-labiryntowe.html> (01.05.2011)
- [94] <http://www.ferrolabs.com/en/products/> (27.10.2011)
- [95] <http://www.innowacjew.com/sinograf/Szczeliwa-Dlawnicowe.html> (12.05.2011)
- [96] http://www.inorganics.basf.com/ca/internet/en/content/Microsite/Basonetic/Product_Technology - BASF The Chemical Company: Inorganics – Product groups – Magnetorheological Fluid (MRF) – Product & Technology. (24.10.2010)
- [97] <http://www.ke-burgmann.pl/uszczelnienia-mechaniczne> (07.05.2011)

- [98] http://www.liquidsresearch.com/products/default_prods.asp (2011.05.05)
- [99] <http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-%28MR%29/MR-Products.xml> (04.05.2011)
- [100] <http://www.lordcorp.com> - Materiały informacyjne firmy Lord Corporation(USA), LORD MR Fluid, Technical Summary. 2008.
- [101] <http://www.magnes.org.pl/> z dnia 25.07.2010
- [102] <http://www.magnes-neodymowy.org.pl/> (2011.11.11)
- [103] <http://www.magnesy.pl> - Materiały informacyjne firmy ENES-Magnesy, Warszawa (12.07.2011)
- [104] <http://www.matint.pl/materialy-magnetoreologiczne.php> (27.10.2011)
- [105] http://www.samar.pl/__/__la/en/__ac/sec,4/new/12049/___Audi-R8-features-Delphis-Polish-made-MagneRide-suspension.html (05.05.2011)
- [106] http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=pl&newlink=1_0_93b (01.05.2011)
- [107] <http://www.spetech.com.pl/aktualnosci/gfo-uszczelnienia-dlawnicowe-329.html> (12.05.2011)
- [108] Patent: PL nr 187129, Uszczelnienie ferromagnetyczne połączenia kołnierzewego (W.Ochoński, Z.Szydło, B.Zachara – 2004)
- [109] Patent: PL nr 187134B1, Hybrydowe uszczelnienie łożyska tocznego (W.Ochoński, Z.Szydło, B.Zachara – 2004)
- [110] Patent: PL nr 386360A1, Hybrydowe uszczelnienie ochronne dla łożyska tocznego (W.Ochoński – 2010)
- [111] Patent: PL nr 182999, Uszczelnienie ferromagnetyczne wału obrotowego (W.Ochoński, Z.Szydło B.Zachara – 2002) ,
- [112] Patent: PL nr 183531, Uszczelnienie ferromagnetyczne spoczynkowe (W.Ochoński, B.Zachara, Z.Szydło – 2002)
- [113] Patent: PL nr 184137, Uszczelnienie czołowe ferromagnetyczne (W.Ochoński, B.Zachara, Z.Szydło – 2002)
- [114] Patent: PL nr 185033, Wielostopniowe uszczelnienie dławnicowe z cieczą ferromagnetyczną (W.Ochoński, Z.Szydło, B.Zachara – 2003)
- [115] Patent: PL nr 185488, Uszczelnienie ferromagnetyczne dla łożysk tocznych (W.Ochoński , Z.Szydło, B.Zachara – 2003)
- [116] Zgłoszenie Patentowe: nr PL 387185 A1, Uszczelnienie hybrydowe dla wału w układzie pionowym (W.Ochoński, M.Potoczny, J.Salwiński – 2010)