

Na prawach rękopisu

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW

Raport z serii **PREPRINTY** nr 13/2005

WPLYW STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI SPRĘŻYSTYCH MATERIAŁU
USZCZELNIEŃ SPOCZYNKOWYCH NA ICH SZCZELNOŚĆ

Janusz BLACHURA

Słowa kluczowe: uszczelnienie spoczynkowe,
wyciek, porowatość

Praca doktorska

Promotor: dr hab. inż. Marek GAWLIŃSKI

Wrocław, 2005

Spis treści

1.	Wstęp.....	4
2.	Analiza stanu obciążenia połączenia kołnierzewego.....	8
2.1.	Analiza pracy uszczelnienia w połączeniu kołnierzewym.....	14
3.	Struktura materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe	17
4.	Drogi wycieku z połączenia kołnierzewego	23
4.1.	Wyciek wzdłuż powierzchni styku uszczelnienie - kołnierz	25
5.	Cel, tezy oraz zakres pracy.....	30
6.	Stanowiska badawcze.....	31
6.1.	Stanowisko do badania wycieku ze złącza kołnierzewego.....	31
6.1.1	Metodyka prowadzenia badań wycieku całkowitego z uszczelnienia zamontowanego w połączeniu kołnierzewym	35
6.1.2	Metodyka prowadzenia badań wycieku na wskroś materiału z uszczelnienia zamontowanego w połączeniu kołnierzewym	38
6.2.	Stanowisko do określania charakterystyk sprężystych materiału	38
6.2.1	Metodyka prowadzenia badań charakterystyk sprężystych badanych materiałów uszczelniających.....	41
7.	Model matematyczny przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty	43
7.1.	Teoria homogenizacji.....	43
7.1.1	Założenia ogólne teorii homogenizacji	44
7.1.2	Zastosowanie teorii homogenizacji dla przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty	46
7.2.	Model przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty w kształcie pierścienia.....	57
7.3.	Paradoks stałości wycieku podczas odciążania uszczelnienia	62
8.	Wyniki badań i ich analiza	65
8.1.	Wyciek całkowity oraz wyciek na wskroś z połączenia kołnierzewego	65
8.2.	Charakterystyka sprężysta materiału.....	75
8.3.	Określenie współczynnika przepuszczalności oraz średniego wymiaru porów.....	77
8.4.	Weryfikacja danych.....	81
8.5.	Porównanie wartości wycieku na wskroś materiału przy różnych nadciśnieniach...	84
9.	Wnioski	88
10.	Literatura	90
11.	Załącznik Nr 1.....	93

Wykaz ważniejszych oznaczeń:

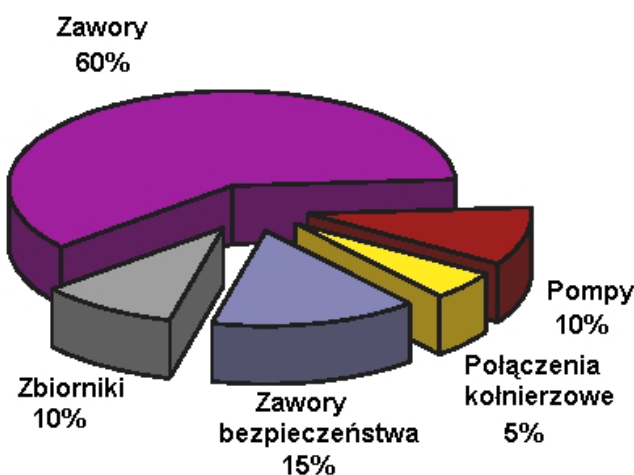
- A – powierzchnia; m^2 ,
 A_c – nominalna powierzchnia styku kołnierza z uszczelnieniem; m^2 ,
 b – stała zależna od rodzaju materiału podczas obciążania uszczelnienia,
 B – obwód uszczelnienia; m,
 c – stała Kozeni,
 C – sztywność; $N \cdot m^{-1}$,
 D_w – wewnętrzna średnica uszczelnienia; m,
 D_z – zewnętrzna średnica uszczelnienia; m,
 E – moduł sprężystości wzdłużnej; Pa,
 f – stała zależna od rodzaju materiału podczas obciążania,
 F_m – obciążenie montażowe śruby; N,
 F_r – obciążenie robocze w śrubie; N,
 F_z – siła zacisku resztkowego; N,
 H – wysokość rozporządzalna; m,
 H_0 – wysokość uszczelnienia w stanie swobodnym (przed badaniami); m,
 H_1 – wysokość uszczelnienia po badaniach; m,
 H_2 – wysokość uszczelnienia odpowiadająca obciążeniu montażowemu F_m ; m,
 H_3 – wysokość uszczelnienia odpowiadająca obciążeniu roboczemu F_r ; m,
 k – współczynnik filtracji; $m \cdot s^{-1}$,
 K – współczynnik przepuszczalności; m^2 ,
 l – wymiar charakterystyczny obszaru mikroskopowego; m,
 l_u – szerokość uszczelnienia; m,
 l_r – długość rurki kapilarnej; m,
 l_1 – długość odcinka śruby; m,
 l_2 – długość elementów łączonych; m,
 L – wymiar charakterystyczny obszaru makroskopowego, wyciek; m, $Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$,
 m – porowatość materiału,
 p – ciśnienie; Pa,
 q_c – wyciek całkowity; $kg \cdot s^{-1}$,
 q_p – wyciek pomiędzy powierzchniami kołnierza a powierzchniami uszczelnienia; $kg \cdot s^{-1}$,
 q_w – wyciek na wskroś materiału uszczelnienia, $kg \cdot s^{-1}$,
 Q – wyciek z uszczelnienia; $m^3 \cdot s^{-1}$,
 R_t – maksymalna wysokość profilu; m,

- R_z – parametr chropowatości; m,
 R_0 – wewnętrzny promień uszczelnienia; m,
 R_1 – zewnętrzny promień uszczelnienia; m,
 S – pole przekroju warstwy porowatej; m²,
 U – stała zależna od rodzaju materiału podczas odciażania uszczelnienia,
 v – prędkość; m·s⁻¹,
 V – stała zależna od rodzaju materiału podczas odciażania uszczelnienia,
 V_g^* – objętość dolin profilu niewypełnionych przez materiał uszczelnienia; m³,
 V_m^* – objętość nierówności powierzchni kołnierza wciśniętych w materiał uszczelnienia; m³,
 V_{LS} – wyciek (strumień objętości) gazu z uszczelnienia odniesiony do warunków normalnych; cm³·s⁻¹,
 V_{LSp} – wyciek (strumień objętości) gazu pomiędzy powierzchniami kołnierza a powierzchniami uszczelnienia odniesiony do warunków normalnych; cm³·s⁻¹,
 V_{LSw} – wyciek (strumień objętości) gazu na wskroś odniesiony do warunków normalnych; cm³·s⁻¹,
 w – współczynnik zależny od obrabianej powierzchni,
 x – bezwymiarowa zmienna makroskopowa,
 X – wymiarowa zmienna makroskopowa; m,
 y – bezwymiarowa zmienna mikroskopowa,
 Y – wymiarowa zmienna mikroskopowa; m,
 z – stała krzywej nośności profilu powierzchni kołnierza,
 ε - odkształcenie, parametr w teorii homogenizacji,
 λ - współczynnik ściśliwości,
 λ_p – podatność; m·N⁻¹,
 μ, η - dynamiczny współczynnik lepkości; Pa·s,
 ν - stała krzywej nośności profilu powierzchni kołnierza,
 θ - współczynnik Poisson,a,
 ρ - gęstość; kg·m⁻³,
 σ - naprężenie; Pa,
 τ - współczynnik zwilżalności powierzchni,
 Ψ - bezwymiarowy współczynnik kształtu

1. Wstęp

Uszczelnienia stanowią nieodzowną część każdej maszyny. Stosuje się je w celu niedopuszczenia do wycieku czynnika do atmosfery lub zabezpieczenia wnętrza maszyny przed działaniem otoczenia. Uszczelnienia można podzielić na uszczelnienia stykowe i bezstykowe. Do uszczelnień stykowych należą uszczelnienia spoczynkowe. Uszczelnienia spoczynkowe to takie, w których powierzchnie tworzące szczelinę stykają się ze sobą i nie przemieszczają się względem siebie. Jedyne możliwe ruchy jakie mogą się pojawić wynikają ze sztywności łączonych elementów oraz właściwości materiału stosowanego na uszczelnienie.

Uszczelnienia spoczynkowe spotkać można w urządzeniach stosowanych we wszystkich gałęziach przemysłu. Stosuje się je w: połączeniach odcinków rurociągów, zaworach, pompach, silnikach spalinowych (uszczelnienie głowic), turbinach itp. Należą więc one do grupy najczęściej stosowanych uszczelnień w przemyśle. Badania nad szczelnością prowadzone w rafineriach [1] wykazały, że 5 % całkowitego mierzonego wycieku stanowi wyciek z połączeń kołnierzowych (rys.1).

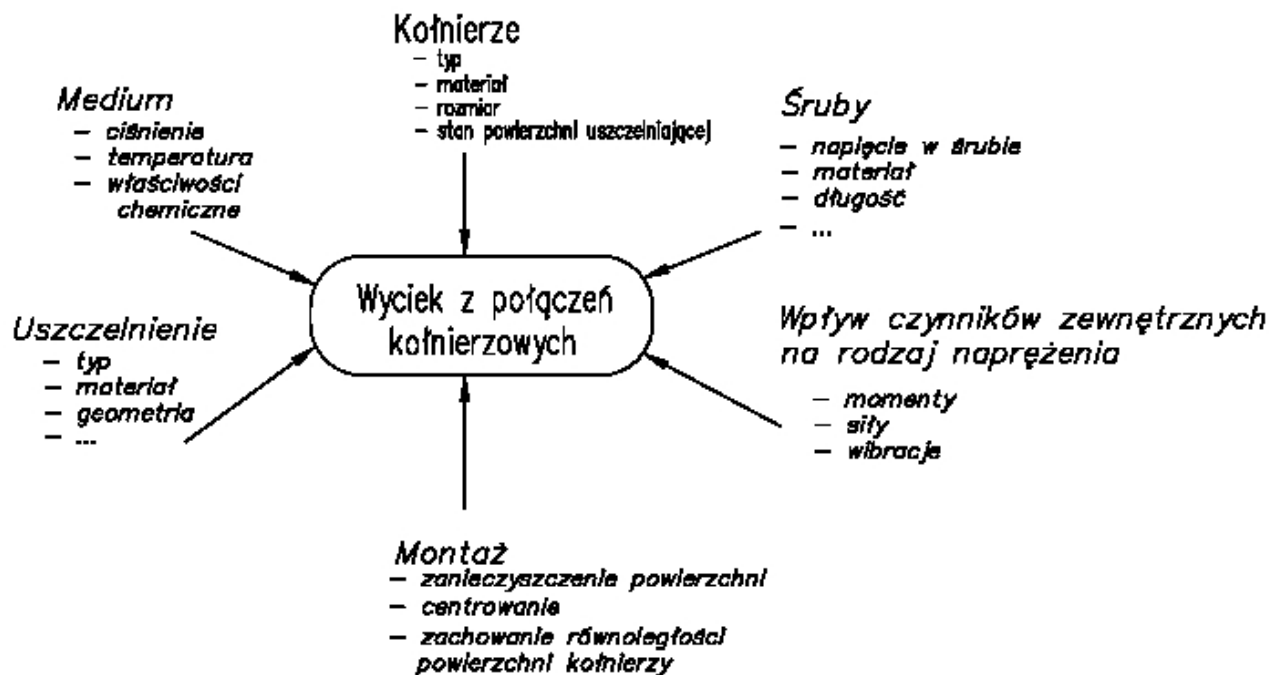


Rys. 1. Procentowe udziały emisji/wycieku w urządzeniach stosowanych w rafineriach

W skład zaworów, zbiorników oraz pomp wchodzi również połączenia kołnierzowe, więc część wycieku z tych urządzeń należy również do wycieku z połączeń kołnierzowych. Należy zaznaczyć, że w średniej wielkości rafinerii jest zainstalowanych około 4000 zaworów. W skład zaworu wchodzi zazwyczaj 3 połączenia kołnierzowe, więc dla przykładowej wielkości rafinerii ilość połączeń kołnierzowych stosowanych tylko w zaworach wynosi około 12000. W pracy [2] podano wyniki badań nad wyciekami w zakładach produkujących związki winylowe, okazało się, że aż 51 % całkowitego wycieku ze

sprawdzanych urządzeń stanowi wyciek z połączeń kołnierzowych. W przeliczeniu, wyciek ten szacuje się na ok. 3000 Mg/rok.

Na rys. 2 [3] przedstawiono wpływ różnorodnych czynników, które decydują o wartości wycieku z połączenia kołnierzowego. Wśród głównych cech uszczelnienia należy wymienić typ uszczelnienia, właściwości materiału oraz gabaryty.



Rys. 2. Wpływ czynników na wyciek z połączenia kołnierzowego

W maju 2004 roku Polska dołączyła do krajów Unii Europejskiej, której przepisy dotyczące emisji z urządzeń są bardziej rygorystyczne w stosunku do obowiązujących poprzednio. W roku 2007 [4] planowane jest zakończenie wdrożenia Dyrektywy Nr 96/61 dotyczącej Zintegrowanej Prewencji i Kontroli Zanieczyszczeń, normuje ona problem wycieku do wody, powietrza i ziemi substancji szkodliwych, w skład których wchodzi Lotne Składniki Organiczne (VOC). VOC wynikają głównie z wycieku nieprzewidywalnego z zaworów, pomp i złączy kołnierzowych. Zakłada się, że wielkość emisji VOC z europejskich rafinerii wynosi od 600 do 10000 ton rocznie.

Do wyrażania wycieku w technice uszczelniania [5] stosuje się następujące miary: $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ i klasy szczelności (rys.3) [6]. Z definicji klasa szczelności to maksymalny dopuszczalny zakres wycieku dla poszczególnych zastosowań.

Używa się dwóch parametrów charakteryzujących klasy szczelności. Pierwszy parametr oznaczony symbolem L , oparty na DIN, ma wymiar $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ i wyraża ilość

wyciekającego płynu w czasie odniesionego do jednostki obwodu uszczelnienia. Wyróżnia się tutaj 3 zakresy klas szczelności a mianowicie:

- $L_{1,0} \leq 1,0, \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,
- $L_{0,1} \leq 0,1, \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,
- $L_{0,01} \leq 0,01, \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

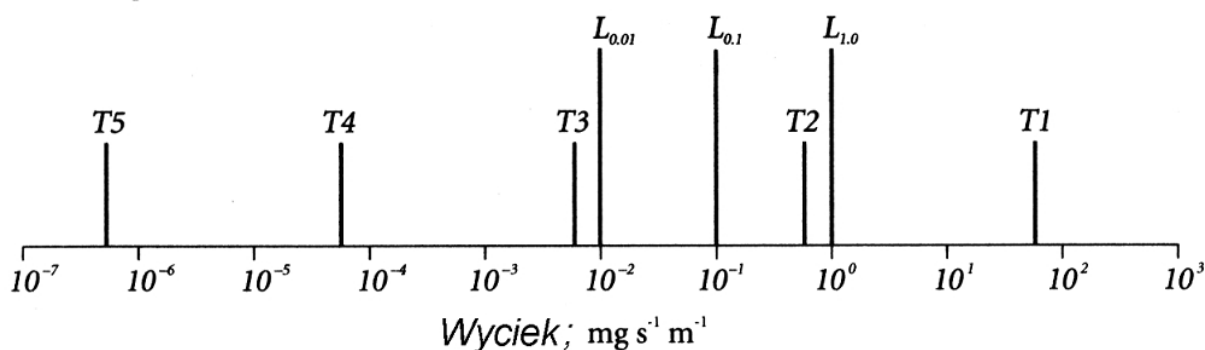
Drugi parametr oznaczony symbolem T , wprowadzony przez PVRC (Pressure Vessel Research Code), wyrażony jest w $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Wprowadzono tutaj 5 klas szczelności, przy czym im wyższa klasa tym mniejszy wyciek:

- $T1$ – klasa ekonomiczna - $\leq 2\cdot 10^{-1} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$,
- $T2$ – klasa standardowa - $\leq 2\cdot 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$,
- $T3$ – klasa szczelna - $\leq 2\cdot 10^{-5} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$

dalsze dwie klasy („bardzo szczelne”) wprowadzono dodatkowo:

- $T4$ – $\leq 2\cdot 10^{-7} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$,
- $T5$ – $\leq 2\cdot 10^{-9} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$.

Porównanie przyjętych klas przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Relacja pomiędzy klasami szczelności wg DIN oraz PVRC

Zgodnie z zaleceniami „TA – Luft” (Techniczne Wskazówki Kontroli Jakości Powietrza) [7] poziom szczelności dla uszczelnień spoczynkowych wykonanych z PTFE wynosi $1\cdot 10^{-2} \text{ mg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ uszczelnianego czynnika.

Do niedawna najczęściej stosowanym materiałem na uszczelnienia spoczynkowe był azbest. Wykazywał się on bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi (niska ściśliwość), odpornością na prawie wszystkie związki chemiczne spotykane w przemyśle oraz dobrą odpornością na temperaturę (do 425°C). Jednakże mimo tych wszystkich zalet został on wycofany z użycia ze względu na rakotwórcze oddziaływanie na człowieka.

Wśród obecnie stosowanych rodzajów uszczelnień spoczynkowych należy wymienić[8]:

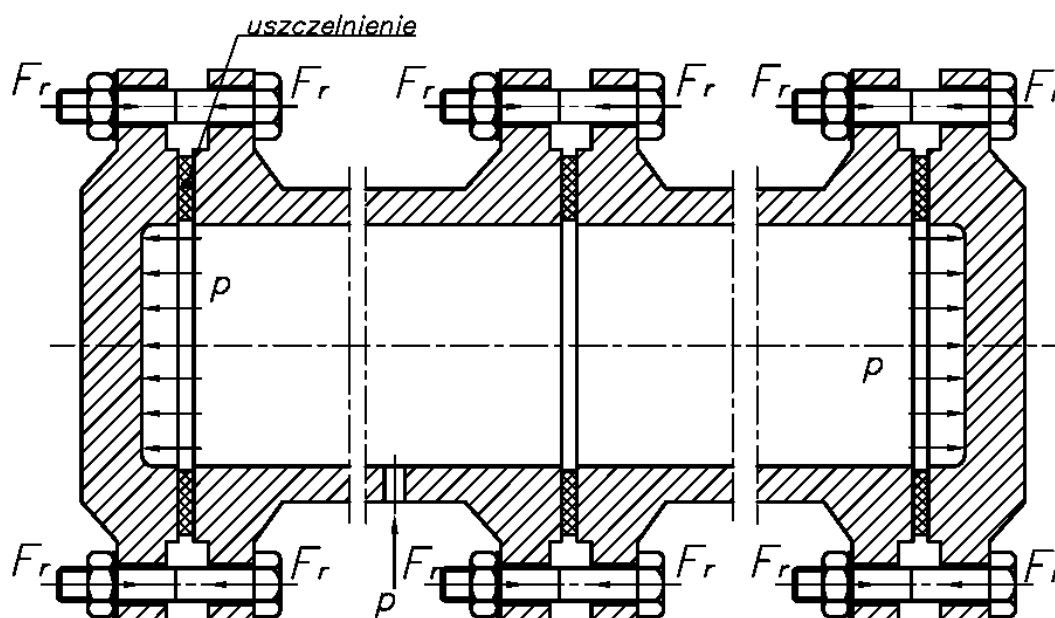
- uszczelnienia niemetalowe
- uszczelnienia półmetaliczne,
- uszczelnienia metalowe.

Uszczelnienia niemetalowe wykonywane są z materiałów stanowiących substytutu azbestu: są to zazwyczaj kompozyty, których głównymi składnikami są różnego rodzaju włókna jak np. włókna aramidowe, szklane, grafitowe itp. W skład tej grupy zaliczyć też należy uszczelnienia wykonane z grafitu rozprężonego.

W niniejszej pracy autor podjął temat dotyczący oceny przyczyn wycieku ze złącza kołnierzonego z uszczelnieniem niemetalowym. Przyjął on, że jednym z najważniejszych czynników determinujących wartość wycieku jest struktura materiału, z którego wykonano uszczelnienie. Założono, że materiał uszczelnienia można traktować jak złożę porowate, przez które czynnik przepływa na wskroś. Podobnie scharakteryzowano obszar styku uszczelnienia z powierzchniami kołnierzy. Takie podejście umożliwiło przyjęcie współczynnika przepuszczalności K za jedyny parametr charakteryzujący strukturę materiału oraz obszar styku uszczelnienia z powierzchnią kołnierza w warunkach jego obciążenia. Należało zatem określić związek ilościowy pomiędzy współczynnikiem przepuszczalności K a średnim promieniem porów. W tym celu wykorzystano teorię homogenizacji, w której ciało niejednorodne w skali mikro można sprowadzić do ciała jednorodnego w skali makro. Wyprowadzony w ten sposób związek umożliwia prognozowanie wartości współczynnika przepuszczalności na podstawie znajomości średniej średnicy porów wyznaczonej metodą porozymetrii rtęciowej. Wyprowadzone związki i wyniki zweryfikowano na podstawie wycieku z uszczelnień wykonanych z materiałów o zróżnicowanej strukturze.

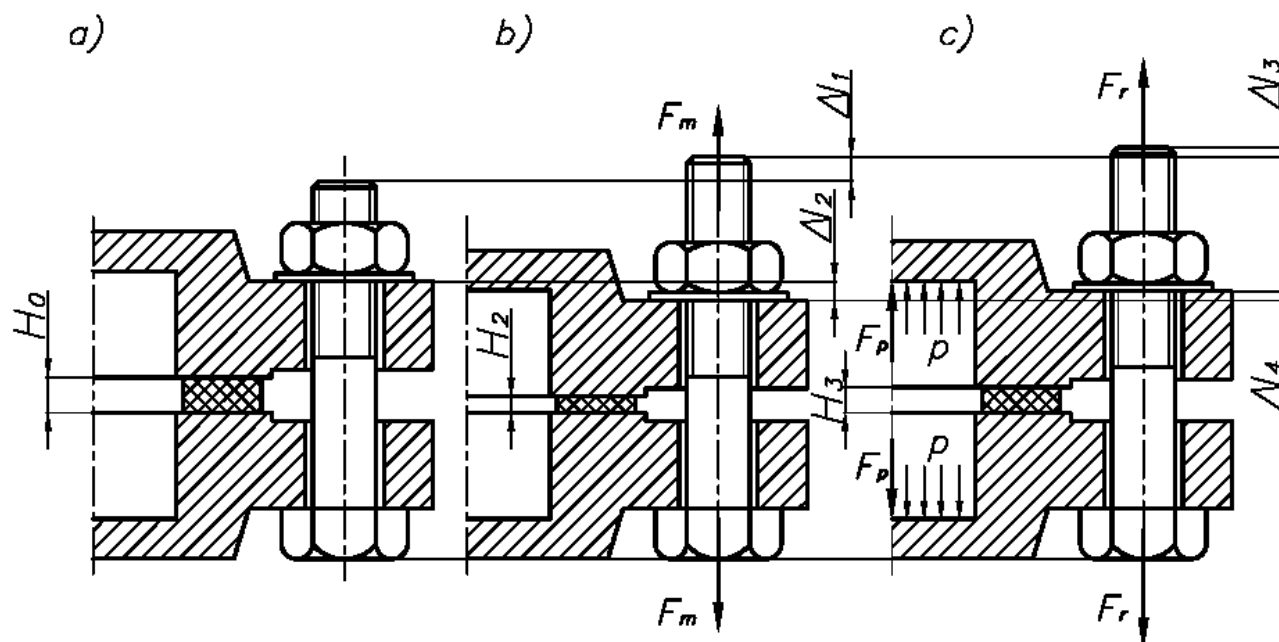
2. Analiza stanu obciążenia połączenia kołnierowego

Uszczelnienie spoczynkowe jest nieodzownym elementem każdego połączenia kołnierowego. Obciążenie wywierane na uszczelnienie umieszczone pomiędzy dwoma powierzchniami kołnierzy wynika z napięcia śrub łączących kołnierze. Na rys. 4 przedstawiono uproszczony model rurociągu wraz z ogólnym rozkładem sił. Ciśnienie czynnika roboczego p powoduje powstanie takich samych sił obciążających w poszczególnych częściach rurociągu. Oznacza to, że obciążenie połączeń kołnierzowych pracujących w rurociągu można sprowadzić do przypadku obciążenia kołnierzy z pokrywami pomiędzy którymi umieszczono uszczelnienie spoczynkowe (rys. 5).



Rys. 4. Uproszczony model rurociągu z rozkładem działających sił, p – ciśnienie czynnika roboczego, F_r – napięcie robocze w śrubie.

Rozkład sił i odpowiadających im odkształceń w poszczególnych fazach pracy połączenia kołnierowego pokazano na rys. 5 [9]. Po umieszczeniu uszczelnienia na kołnierzu, montuje się drugi kołnierz a następnie łączy się oba kołnierze śrubami lekko je dokręcając. Uszczelnienie nie jest poddane działaniu żadnej siły co pokazano na rys. 5a. W wyniku dokręcenia nakrętki dochodzi do odkształcenia śruby i wywołania towarzyszącego mu obciążenia montażowego F_m (rys. 5b). Taka siła działa na powierzchnię uszczelnienia.



Rys. 5. Rozkład sił w połączeniu kołnierowym, a) złącze nieobciążone, b) złącze obciążone siłą zacisku wstępnego (montażowego) F_m , c) połączenie kołnierowe po zadaniu ciśnienia czynnika p

W wyniku działania siły montażowej F_m śruba ulega wydłużeniu o Δl_1 . Wydłużenie Δl_1 śruby można określić ze wzoru:

$$\Delta l_1 = \sum \varepsilon_{li} \cdot l_{li} = \frac{\sum \sigma_{ri} \cdot l_{li}}{E_1} = \frac{F_m}{E_1} \sum \frac{l_{li}}{A_{li}} = \frac{F_m}{C_1} = F_m \cdot \lambda_{p1} \quad (2.1)$$

gdzie:

ε_{li} – odkształcenie względne poszczególnych odcinków śruby o danym przekroju,

l_{li} – długość poszczególnych odcinków śruby o danym przekroju; m,

E_1 – moduł Young'a materiału śruby; Pa,

σ_{ri} – naprężenie rozciągające w poszczególnych odcinkach śruby o danym przekroju; Pa,

A_{li} – przekrój poszczególnych odcinków śruby; m²,

C_1 – sztywność śruby; N/m,

λ_{p1} – podatność śruby; m/N.

Sztywnością śruby nazywa się stosunek obciążenia do odkształcenia jakie obciążenie to powoduje. Związek pomiędzy sztywnością a podatnością określa wzór (2.2), zaś sztywność śruby można zdefiniować za pomocą wzoru (2.3).

$$C = \frac{1}{\lambda_p} \quad (2.2)$$

$$C_1 = \frac{F_m}{\Delta l_1} = \frac{E_1}{\sum \frac{l_{1i}}{A_{1i}}} \quad (2.3)$$

Pod wpływem działania tej samej siły montażowej F_m elementy łączone ulegają skróceniu o wartość Δl_2 (rys. 5b). W skład elementów łączonych wchodzi: kołnierze, podkładki oraz uszczelnienie. Ścisnięcie elementów łączonych można oszacować ze wzoru:

$$\Delta l_2 = \sum \varepsilon_{2i} \cdot l_{2i} = \sum \frac{\sigma_{ci} \cdot l_{2i}}{E_{2i}} = F_m \sum \frac{l_{2i}}{E_{2i} \cdot A_{2i}} = \frac{F_m}{C_2} = F_m \cdot \lambda_{p2} \quad (2.4)$$

gdzie:

- ε_{2i} – odkształcenie względne poszczególnych części łączonych,
- l_{2i} – grubość początkowa poszczególnych części łączonych; m,
- σ_{ci} - naprężenie ściskające w poszczególnych częściach łączonych; Pa,
- E_{2i} – moduł Young'a poszczególnych materiałów części łączonych; Pa,
- A_{2i} – przekroje poszczególnych elementów łączonych; m²,
- C_2 – sztywność elementów łączonych; N/m,
- λ_{p2} – podatność elementów łączonych; m/N.

Po doprowadzeniu do złącza płynu roboczego o ciśnieniu p powstaje dodatkowa siła pochodząca od jego działania na zaślepienie końce kołnierzy F_p (rys. 5c). Wartość siły F_p można obliczyć ze wzoru:

$$F_p = p \cdot A_{UDw} \quad (2.5)$$

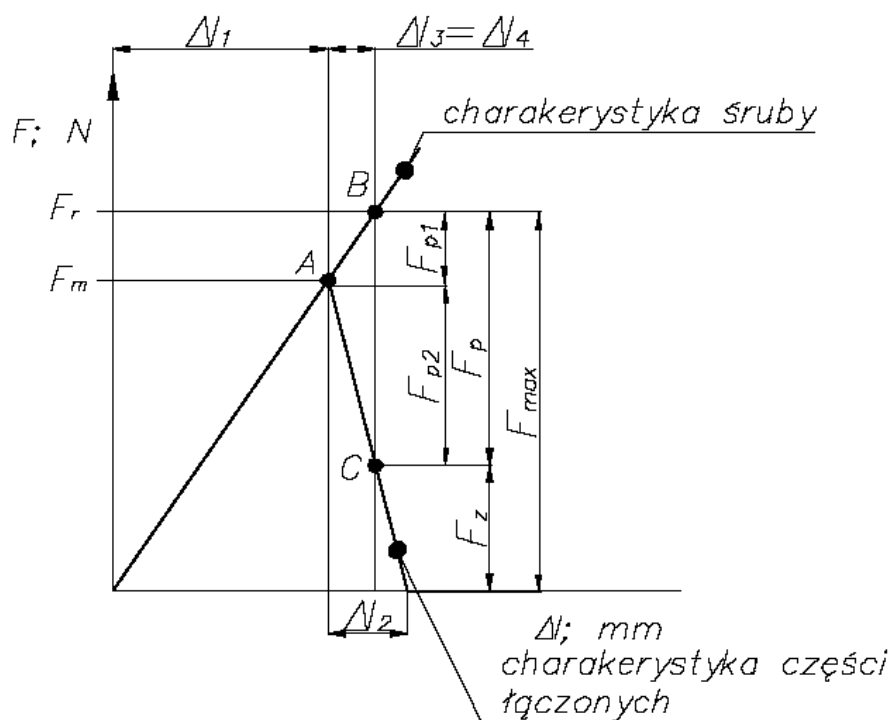
gdzie:

$$A_{UDw} - \text{wewnętrzna powierzchnia uszczelnienia} - \pi D_w^2 / 4; \text{ m}^2.$$

Siła F_p powoduje dodatkowe obciążenie rozciągające śruby i w wyniku działania tej siły śruba wydłuża się o wartość Δl_3 . Całkowite wydłużenie śruby Δl_s w stanie roboczym wynosi:

$$\Delta l_s = \Delta l_1 + \Delta l_3$$

W wyniku wydłużenia śrub następuje zmniejszenie odkształcenia elementów łączonych o wartość Δl_4 w wyniku czego następuje odciążenie części łączonych. Wartość dodatkowego wydłużenia śrub Δl_3 równa jest wartości zmniejszonego odkształcenia elementów łączonych Δl_4 . Graficzne przedstawienie pracy złącza kołnierzewego podano na wykresie sztywności współpracujących elementów (rys. 6), [9, 10, 11, 12].



Rys. 6. Graficzne przedstawienie odkształcenia elementów złącza kołnierzewego.

Na wykresie obrazującym pracę złącza kołnierzewego (rys. 6) sile montażowej F_m odpowiada punkt oznaczony literą A. Po doprowadzeniu do złącza czynnika roboczego o ciśnieniu p następuje zwiększenie wydłużenia śrub o wartośc Δ_3 .  ruba zostaje obciążona dodatkową si  pochodzącą od naporu ci snienia, lecz nie ca  wartośc si  F_p zostaje przeniesiona na  rub .  ruba zostaje dociążona składową F_{p1} si  F_p . W wyniku wyd wienia śruby następuje odciążenie cz ci  czonych o si  F_{p2} . Wartości sił F_{p1} i F_{p2} zależą od sztywności śruby oraz elementów  czonych:

$$F_{p1} = C_1 \cdot \Delta_3 \quad (2.6)$$

$$F_{p2} = C_2 \cdot \Delta_4 \quad (2.7)$$

Si  F_p stanowi sumę si  F_{p1} oraz F_{p2} .

$$F_p = F_{p1} + F_{p2} \quad (2.8)$$

Na wykresie (rys. 6) punkt B odpowiada dodatkowemu obciążeniu śruby, za  punkt C - końcowemu obciążeniu elementów  czonych. Si  zacisku resztkowego, dzia uj c  na elementy  czone oznaczono jako F_z . Si  maksymalna dzia uj c  na  rub  podczas pracy złącza wynosi:

$$F_{\max} = F_p + F_z \quad (2.9)$$

Korzystając z (2.6, 2.7) oraz warunku $\Delta l_3 = \Delta l_4$ składową F_{p1} można przedstawić w postaci:

$$F_{p1} = F_p \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (2.10)$$

Wydłużenie śruby pod wpływem siły F_{p1} powoduje, że obciążenie elementów łączonych wynosi F_z . Siłę zacisku resztkowego określić można ze wzoru:

$$F_z = F_m - F_{p2} = F_m - F_p \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.11)$$

W skrajnym przypadku, przy zwiększaniu ciśnienia płynu roboczego, wartość siły zacisku resztkowego może spaść do zera. Dalsze zwiększanie wartości ciśnienia spowoduje powstanie luzu pomiędzy częściami łączonymi. Dla złączy kołnierzowych musi więc być spełniony warunek:

$$F_z \geq 0 \quad \text{czyli}$$

$$F_m > F_p \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.12)$$

W połączeniach kołnierzowych sztywność śruby C_1 powinna być jak najmniejsza. W tym celu stosuje się tuleje, które pozwalają na stosowanie dłuższych śrub od tych wynikających z grubości kołnierzy. Zmniejszenie sztywności śrub pozwala na obniżenie wartości siły F_{p1} przenoszonej przez śrubę a tym samym na ograniczenie wpływu zjawisk zmęczeniowych materiału śruby. Dla małej wartości sztywności śruby w porównaniu do sztywności elementów łączonych, wartość siły F_{p1} jest mała i można przyjąć, że:

$$F_{p2} \approx F_p \quad (2.13)$$

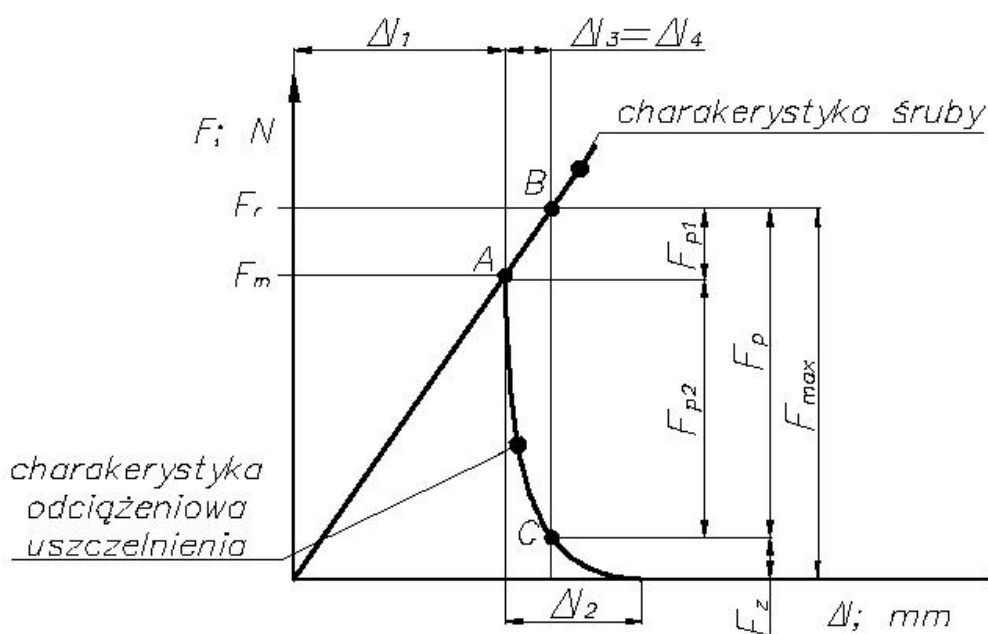
Z przeprowadzonej analizy wynika, że pracy złącza kołnierzowego odpowiadają dwa etapy. W pierwszym etapie, podczas dokręcania nakrętek, śruby ulegają rozciąganiu zaś elementy łączone ściskaniu. W drugim etapie, po doprowadzeniu czynnika o ciśnieniu p ,

następuje spadek wartości siły działającej na elementy łączone zaś śruby ulegają dociążeniu. Należy przy tym pamiętać, że aby nie doszło do rozszczelnienia złącza musi istnieć pewna siła obciążająca elementy łączone, do których zalicza się kołnierze, podkładki oraz uszczelnienie.

2.1. Analiza pracy uszczelnienia w połączeniu kołnierзовym

Uszczelnienie spoczynkowe stosowane jest w każdym złączu kołnierзовym. Zazwyczaj podczas obliczeń połączeń kołnierзовych oraz doboru materiału uszczelnienia nie bierze się pod uwagę jego sztywności. Sztywność części łączonych zależy od ich modułów sprężystości wzdłużnej. Kołnierze, podkładki oraz tuleje wykonywane są ze stali. Moduł Young'a stali wynosi około $2,1 \cdot 10^5$ MPa [13], zaś moduł Young'a materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe zawiera się w przedziale $E_U = (1 \cdot 10^1 \div 1 \cdot 10^3)$ MPa [14]. Uwzględniając fakt, że stosunek modułu Young'a stali do modułu uszczelnienia wynosi od 2 do 4 rzędów, można dojść do wniosku, analizując wzór (2.4), że największy wpływ na sztywność elementów łączonych ma materiał uszczelnienia, element o najmniejszym module Young'a.

W analizie stanu obciążenia połączenia kołnierowego wykazano, że po dokręceniu śrub siłą zacisku montażowego oraz po doprowadzeniu czynnika o ciśnieniu p , elementy łączone ulegają odciążeniu. Z przedstawionej powyżej analizy wynika że, krzywą sztywności elementów łączonych można zastąpić krzywą odciążania materiału uszczelnienia (rys. 7).



Rys. 7. Wykres sztywności połączenia kołnierowego z zamontowanym uszczelnieniem spoczynkowym.

Stopień ściśnięcia elementów łączonych będzie w głównej mierze zdeterminowany przez zmianę wysokości uszczelnienia. Zmianę grubości elementów łączonych pod wpływem działania siły montażowej F_m (rys. 5), po przyjęciu powyższego uproszczenia, można zapisać jako:

$$\Delta l_2 = H_0 - H_2 \quad (2.1.1)$$

Po zadaniu ciśnienia p czynnika roboczego nastąpi przyrost grubości elementów łączonych o wartość Δl_4 , którą po powyższym uproszczeniu można sprowadzić jedynie do zmiany grubości uszczelnienia. Wartość tę można określić z zależności:

$$\Delta l_4 = H_3 - H_2 \quad (2.1.2)$$

Napięcie śruby podczas pracy złącza kołnierzewego może również ulec zmianie w wyniku obciążenia cieplnego złącza. Pod wpływem podwyższenia temperatury następuje wydłużenie cieplne śruby oraz kołnierza w wyniku czego następuje spadek siły obciążającej materiał uszczelnienia. Zmiana wartości siły obciążającej ulega również zmianie w wyniku pełzania oraz relaksacji materiału uszczelnienia [15]. Pełzanie to powolne odkształcanie się ciał stałych pod wpływem obciążeń długotrwałych [16], zaś relaksacją nazywa się zjawisko zmiany naprężenia w materiale pod wpływem stałego odkształcenia. W uszczelnieniach spoczynkowych zjawiska pełzania i relaksacji przebiegają równolegle i w wyniku występowania tych zjawisk następuje, między innymi, zmniejszenie grubości uszczelnienia wywołujące spadek wartości siły działającej na powierzchnię uszczelnienia. Wynikiem tego jest zmniejszenie stopnia wypełnienia nierówności na powierzchni kołnierzy przez materiał uszczelnienia i w rezultacie może dojść do wzrostu wartości wycieku z uszczelnienia. Istnieje wiele różnych prac poświęconych zjawiskom reologicznym w materiałach stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe. Połączenie kołnierzowe wraz ze śrubami oraz uszczelnieniem traktuje się jako system reologiczny. W pracy [17] zaproponowano opis pracy tego systemu za pomocą reologicznego modelu Maxwella, zaś w [18] za pomocą modelu Burgersa. Na zjawiska reologiczne wpływa również grubość materiału uszczelnienia co opisano w [19]. Materiały stosowane na uszczelnienia spoczynkowe są kompozytami, w skład których wchodzi również polimery. W pracy [20] dotyczącej polimerów konstrukcyjnych

zaproponowano opis zjawisk pełzania i relaksacji wykorzystując teorię dziedziczności. Do opisu zjawisk reologicznych wykorzystuje się również metody stochastyczne [21].

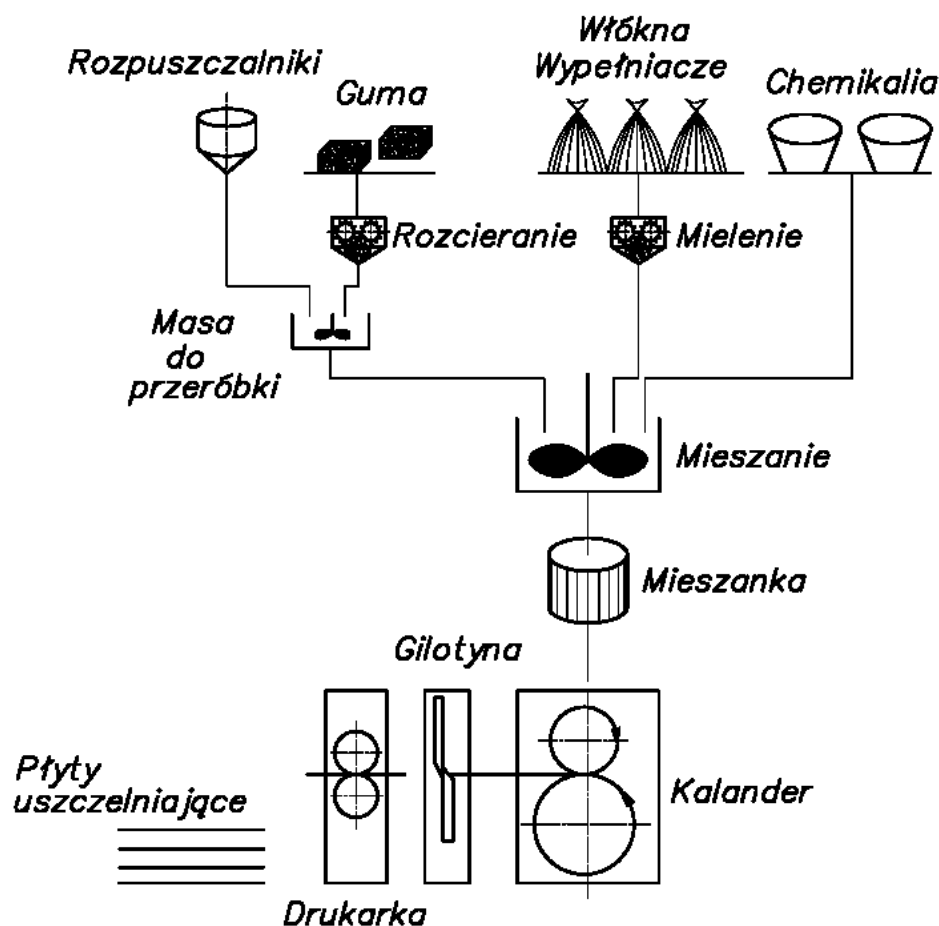
Podwyższenie temperatury pracy złącza powoduje przyspieszenie procesów pełzania i relaksacji materiału uszczelnienia oraz jego twardnienia co ma wpływ na wielkość wycieku.

W cytowanej literaturze przedmiotu zajęto się reologicznymi aspektami pracy połączenia kołnierzewego z uszczelnieniem spoczynkowym, dość dobrze rozwinięte są metody opisu oraz badania zjawisk reologicznych w nim zachodzących, brak jest natomiast informacji na temat struktury materiału oraz jej zmian pod wpływem pracy połączenia kołnierzewego jako systemu.

Procesy pełzania i relaksacji materiału uszczelnienia zależą niewątpliwie od jego struktury. Strukturę tę modelowano za pomocą systemu sprężyn i hydraulicznych tłumików, prace te poświęcone były konkretnym materiałom. Nie rozważano niestety zmiany struktury materiału, do której musiało dojść w rezultacie ściśnięcia uszczelnienia i postępującego dalej procesu pełzania.

3. Struktura materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe

Obecnie stosowane materiały na uszczelnienia spoczynkowe to kompozyty. Ich struktura wynika z zastosowanych materiałów składowych oraz z technologii produkcji. Materiał uszczelnienia składa się ze szkieletu, matrycy oraz wypełniaczy. Szkielet wykonuje się różnego rodzaju włókien, którymi mogą być włókna aramidowe, szklane lub węglowe, matrycę stanowi guma, zaś na wypełniacze stosuje się glinokrzemiany, grafit, talk.



Rys. 8. Proces produkcji płyt uszczelniających.

Na rys. 8 [12] przedstawiono schemat typowego procesu produkcji materiałów uszczelniających. W skład materiałów wejściowych wchodzi rozpuszczalniki (np. toluen), guma (np. nitrylowa NBR, fluorowa FPM), włókna, wypełniacze, oraz różnego rodzaju składniki uszlachetniające (np. środki powierzchniowo - czynne). Po rozdrobnieniu oraz zmieleniu składników stałych, komponenty trafiają do mieszalnika, podczas mieszania dodaje

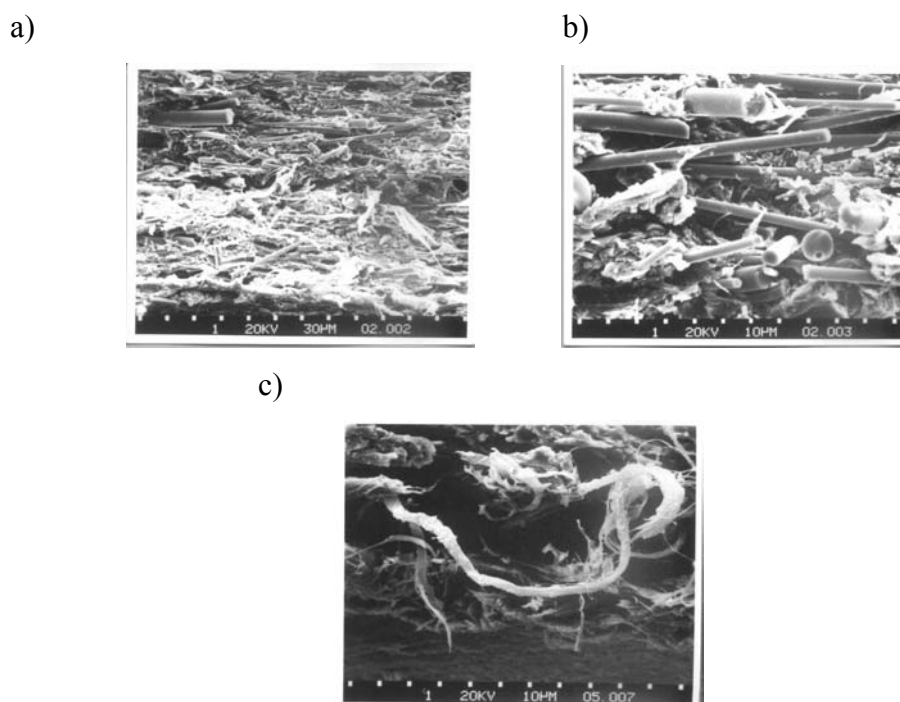
się rozpuszczalnik (zazwyczaj toluen) Tak przygotowana pulpa podawana jest do kalandra. Kalandry stanowią dwa walce, z których jeden jest podgrzewany, walce dociskane są do siebie z określoną siłą, w wyniku czego możliwe jest zagęszczenie mieszanki. Produktem wyjściowym z procesu produkcyjnego są płyty, z których wycina się uszczelnienia stosowane w złączach kołnierзовych. Na wejściu do kalandra w mieszance włókna są dowolnie ułożone, podczas kalandrowania następuje ukierunkowanie włókien w kierunku walcowania. Pod wpływem ciężaru walców kalandra dochodzi do ich ugięcia. Efektem tego jest nierównomierny nacisk na całej ich długości a zagęszczenie produkowanej płyty również jest nierównomierne. W tej części płyty, która poddana została większemu naciskowi zagęszczenie materiału będzie większe, analogicznie dla miejsc mniej obciążonych zagęszczenie będzie mniejsze. Mniejszy stopień zagęszczenia materiału wpływa na właściwości mechaniczne uszczelnień wyciętych z tych miejsc płyty oraz na ich szczelność.

Właściwości mechaniczne materiału zdeteminowane są przez właściwości materiałów składowych oraz przez ich procentowe udziały. Procentowe udziały składników w mieszaninie stanowią tajemnicę firm produkujących uszczelnienia. Analizę wpływu udziału włókien mineralnych i aramidowych na wytrzymałość oraz wyciek podano w [22]. Zwiększenie ilości włókien mineralnych (włókna szklane), przy bardzo drobnym materiale wypełniającym zmniejsza odkształcenie trwałe oraz poziom wycieku.

W efekcie procesu technologicznego oraz zastosowanych komponentów, materiały stosowane na uszczelnienia spoczynkowe mają strukturę porowatą. Zastosowanie gumy jako środka wiążącego wpływa na elastyczność materiału oraz na wyciek z uszczelnienia. Większa jej ilość powoduje zwiększenie elastyczności materiału uszczelnienia oraz zmniejszenie wycieku. Stanowi ona wypełnienie pustych miejsc pomiędzy włóknami szkieletu i w wyniku tego ogranicza przepływ czynnika. Duża jednak jej ilość powoduje znacznie szybsze twardnienie materiału w wyższych temperaturach prowadzące do pęknięcia uszczelnienia.

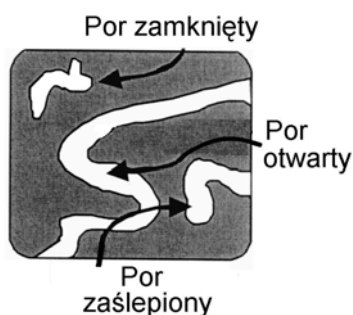
Na rys. 9 przedstawiono zdjęcia skaningowe materiału uszczelnienia spoczynkowego. Rys. 9a przedstawia widok ogólny przelomu próbki, wyróżnić tutaj można ukierunkowanie włókien szklanych wynikające z kalandrowania. Na rys. 9b przedstawiono powiększenie fragmentu z widoku ogólnego, włókna szklane wykazują słabe oddziaływanie adhezyjne z gumą (guma nie „przykleja się do powierzchni włókien szklanych). Rys. 9c przedstawia włókna aramidowe zaś za włóknami można zaobserwować istniejący por. Słabe oddziaływanie adhezyjne gumy i włókien wpływa na wytrzymałość próbki oraz na utworzenie dróg przepływu czynnika, efektem tego, przy przyłożeniu odpowiednio wysokiej siły ściskającej próbkę, może dojść do rozwarstwienia uszczelnienia. Podczas rozwarstwiania

uszczelnienia pojawiać się będą mikroszczeliny, których ilość oraz wielkość wpłynie na wartość wycieku. Im więcej porów i im większe są ich wymiary, tym większy wyciek.



Rys. 9. Zdjęcia skaningowe przelomu materiału uszczelnienia, a) widok ogólny, b) powiększenie części z widoku a) z widocznymi włóknami szklanymi, c) widoczne włókna aramidowe.

Z powyższego wynika, że materiały stosowane na uszczelnienia spoczynkowe to materiały porowate, tzn. takie, w których wyróżnić można dużą liczbę pustych przestrzeni zwanych porami o wielkościach względnie małych w porównaniu z wymiarem charakterystycznym uszczelnienia jakim może być jego szerokość lub grubość [23]. W typowym materiale porowatym wyróżnić można trzy rodzaje porów: pory zamknięte, zaślepione oraz pory otwarte (rys. 10) [24]. Pory otwarte stanowią potencjalną drogę przepływu płynu przez materiał porowaty.

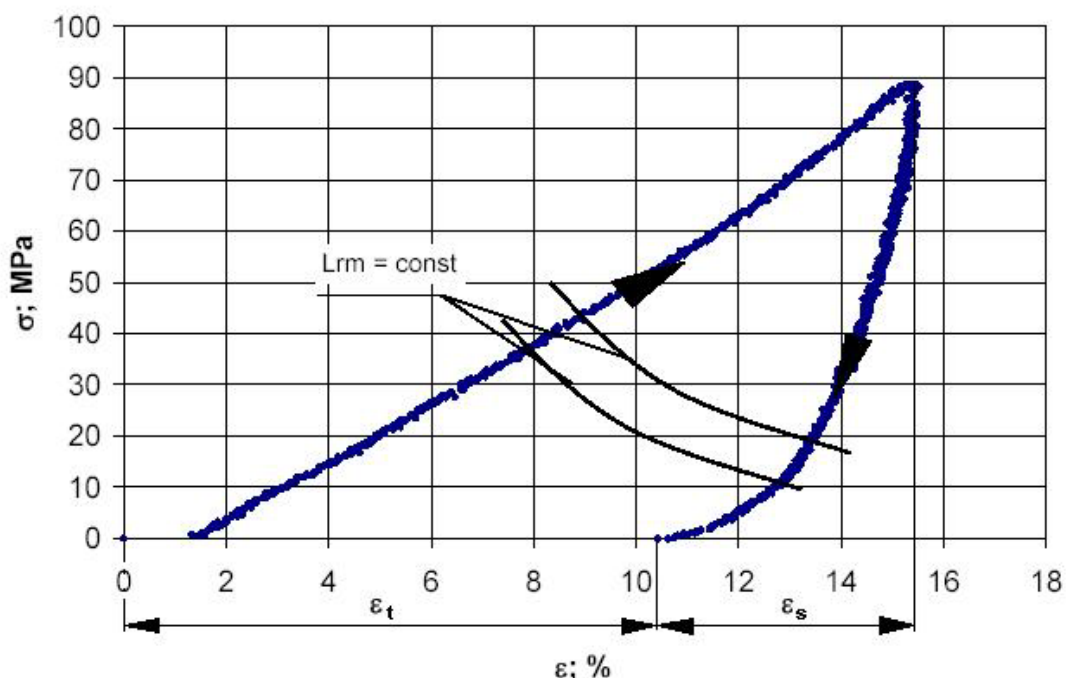


Rys. 10. Rodzaje porów w materiale porowatym

Jednymi z parametrów charakteryzujących ciała porowate są porowatość i przepuszczalność. Zależnie od rodzajów porów wyróżnia się porowatość całkowitą, rzeczywistą oraz zamkniętą. Porowatością całkowitą nazywa się objętość wszystkich porów zawartą w jednostce objętości zaś porowatością rzeczywistą określa się stosunek objętości porów otwartych do całkowitej objętości ciała. Porowatość zamknięta stanowi różnicę pomiędzy porowatością całkowitą oraz porowatością rzeczywistą.

Drugim parametrem jest przepuszczalność warstwy porowatej K , który mówi o zdolności przepuszczania gazów i cieczy przez pory otwarte pod wpływem różnicy ciśnień przed oraz za warstwą. Parametr ten jest podstawowym parametrem charakteryzującym ciała porowate. Jeżeli przyjąć, że materiał na uszczelnienie jest ciałem porowatym to do opisu tej porowatości można przyjąć współczynnik przepuszczalności K .

Materiały wykonane z substytutu azbestu wykazują się właściwościami nieliniowymi. Przeprowadzenie testu polegającego na obciążeniu badanego materiału do pewnego nacisku stykowego a następnie jego odciążeniu wykazuje, że krzywe obciążania oraz odciążania nie pokrywają się ze sobą (rys. 11). Właściwości nieliniowe materiałów wykonanych z substytutów azbestu wynikają z ich składu, z zagęszczenia materiału oraz z towarzyszącego temu trwałemu odkształceniu materiału.



Rys. 11. Charakterystyka obciążeniowo – odciążeniowa uszczelnienia z naniesionymi liniami stałego wycieku $L_{rm} = const$

Na całkowite odkształcenie materiału uszczelnienia, pod wpływem działania maksymalnego nacisku, składa się odkształcenie trwałe ε_t oraz odkształcenie sprężyste ε_s (rys. 11). Odkształcenie trwałe to takie odkształcenie, które pozostaje po całkowitym odciążeniu materiału uszczelnienia. Oznacza to, że pewne zagęszczenie materiału po próbie ściskania ma stały charakter. Odkształcenie trwałe obliczyć można ze wzoru:

$$\varepsilon_t = \frac{H_1}{H_0} \cdot 100; \% \quad (3.1)$$

gdzie:

H_0 – wysokość materiału przed próbą ściskania; mm,

H_1 – wysokość materiału po przeprowadzonej próbie; mm.

Odkształcenie sprężyste (powrót sprężysty) obliczyć można ze wzoru:

$$\varepsilon_s = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \cdot 100; \% \quad (3.2)$$

Po przekroczeniu pewnej wartości nacisku stykowego, zależnej od rodzaju materiału, dochodzi do zniszczenia jego struktury. Efektem tego jest brak powrotu sprężystego materiału lub jego bardzo mała wartość.

Odkształcenie trwałe oraz powrót sprężysty są podstawowymi parametrami mechanicznymi opisującymi przydatność materiału na uszczelnienie spoczynkowe. Podczas pracy złącza kołnierzonego, po zadaniu ciśnienia czynnika roboczego, dochodzi do wydłużenia śrub. Aby zapobiec nadmiernemu wyciekowi ze złącza, materiał uszczelnienia powinien „śledzić” przemieszczanie się powierzchni kołnierzy. Parametrem charakteryzującym zdolność materiału do „śledzenia” powierzchni kołnierzy jest powrót sprężysty materiału uszczelnienia. Im większy powrót sprężysty, tym większe może być wydłużenie śrub a tym samym większa wartość ciśnienia czynnika roboczego (rys. 7). Dzięki sprężystości powrotnej możliwe jest uzyskanie wypełnienia nierówności powierzchni kołnierzy przez materiał uszczelnienia pomimo pewnego wzrostu wydłużenia śrub. Należy przypuszczać, że wzrost wysokości uszczelnienia po jego odciążeniu może mieć wpływ na stopień zagęszczenia materiału.

Parametrem opisującym zachowanie się materiału uszczelnienia poddanego stałemu naciskowi w czasie jest względna zmiana grubości uszczelnienia wyznaczana podczas testu pełzania. Norma [25] dotycząca próby pełzania materiałów w podwyższonych temperaturach

stanowi, iż najwyższa dopuszczalna względna zmiana grubości próbki w próbie pełzania dla płyt uszczelniających typu TF (materiały wykonane na bazie teflonu) nie powinna być większa niż 15%, a dla typu AF (materiały bez udziału azbestu) – $\varepsilon \leq 10\%$.

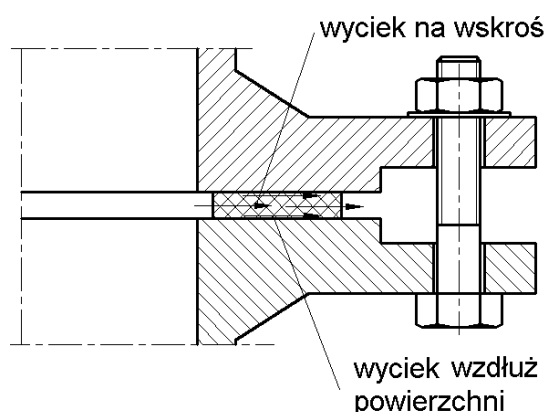
Na krzywą obciążenie – odciążenie uszczelnienia (rys. 11) nałożono krzywe stałego wycieku $L_{rm} = const$. Można zauważyć niezwykle interesujące zjawisko, a mianowicie: osiągnięcie danego wycieku $L_{rm} = const$ podczas próby obciążania uszczelnienia wymaga przyłożenia znacznie większego obciążenia aniżeli, dla tego samego wycieku, podczas próby odciążania. W literaturze [26] skomentowano to bardzo krótko podając, że o szczelności w większym stopniu decyduje odkształcenie uszczelnienia aniżeli nacisk wywierany na nie. Wydaje się, że przyczyną tego zjawiska jest zmniejszenie porowatości materiału uszczelnienia.

4. Drogi wycieku z połączenia kołnierzego

W poprzednim rozdziale wykazano, że materiały stosowane na uszczelnienia to materiały porowate, należy więc oczekiwać, że część całkowitego wycieku stanowić będzie wyciek przez materiał uszczelnienia a więc wyciek ze złoża porowatego. Literatura przedmiotu [27, 22, 28, 14] podaje, że na wyciek całkowity wpływa składowa wycieku na wskroś materiału ale brak jest informacji na temat wartości tego wycieku oraz metod badawczych pozwalających na jej oszacowanie.

Można przyjąć, że wyciek całkowity z połączenia kołnierzego z uszczelnieniem spoczynkowym stanowi sumę wycieku pomiędzy powierzchniami uszczelnienia a powierzchniami kołnierzy q_p oraz wycieku na wskroś materiału uszczelnienia q_w (rys. 12).

$$q_c = q_p + q_w \quad (4.1)$$



Rys. 12. Składowe wycieku z połączenia kołnierzego z uszczelnieniem spoczynkowym

Badacze zajęli się przede wszystkim oceną wycieku całkowitego przy czym można wyróżnić dwa podejścia:

- wyciek całkowity bez rozgraniczenia na składową na wskroś i pomiędzy uszczelnianymi powierzchniami,
- wyciek całkowity sprowadzony jedynie do wycieku pomiędzy uszczelnianymi powierzchniami (w podejściu tym uważa się, że wyciek na wskroś materiału nie istnieje).

W pracy [14] zaproponowano inny opis wycieku w przypadku narastania nacisku stykowego oraz inny w przypadku zmniejszania nacisku, przy czym wyciek potraktowano jako wyciek całkowity bez rozgraniczenia na składową wzdłuż powierzchni oraz składową na wskroś. Dla przypadku narastania obciążenia na powierzchnię uszczelnienia, do oszacowania wycieku można posłużyć się wzorem:

$$L = \frac{p}{e \cdot \frac{(\sigma-f)}{b}} \quad (4.2)$$

gdzie:

- σ - nacisk na powierzchnię uszczelnienia,
- f, b – stałe zależne od rodzaju materiału,
- L – wyciek,
- p – ciśnienie wewnątrz kołnierza.

Podczas odciążania materiału uszczelnienia wyciek można obliczyć z zależności:

$$L = U \cdot \sigma^{-V} \cdot p \quad (4.3)$$

gdzie:

- U, V – stałe zależne od rodzaju materiału,

Ponadto w [14] zaznaczono, że w przyszłości należy zająć się, między innymi, określeniem wpływu struktury materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe traktowanej jako struktury porowatej.

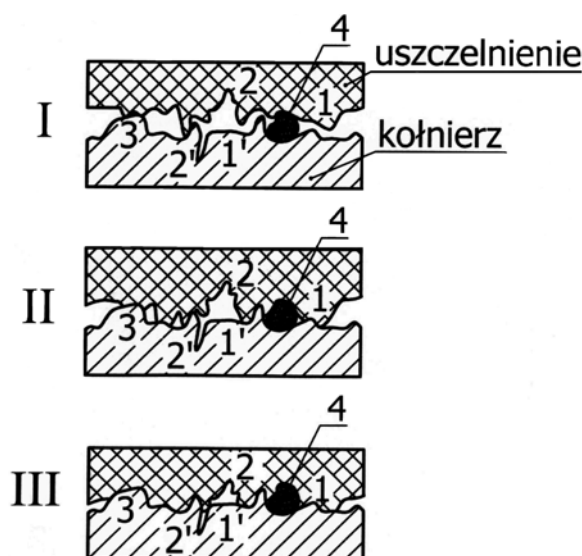
Z powodu braku informacji na temat wycieku na wskroś materiału, w p. 4.1 przedstawiono jedynie poglądy na temat wycieku pomiędzy powierzchniami uszczelnienia a powierzchniami kołnierzy.

4.1. Wyciek wzdłuż powierzchni styku uszczelnienie - kołnierz

Wyciek pomiędzy powierzchniami kołnierza a powierzchniami uszczelnienia wynika z:

- chropowatości oraz falistości powierzchni kołnierzy,
- obcych wtrąceń na powierzchniach kołnierzy oraz uszczelnienia,
- przypadkowych defektów struktury,
- mikrotwardości powierzchni uszczelnienia.

Efekt wywołania szczelności pomiędzy powierzchniami kołnierza a powierzchniami uszczelnienia uzyskuje się poprzez wypełnienie wszystkich nierówności oraz przypadkowych defektów powierzchni kołnierzy przez materiał uszczelnienia. Proces zwiększania szczelności pomiędzy powierzchniami uszczelnienia i kołnierzy można podzielić na trzy etapy (rys. 13) [29].



Rys. 13. Mechanizm uszczelniania pomiędzy powierzchniami kołnierzy a powierzchniami uszczelnienia, I – faza zagęszczania materiału uszczelnienia, II, III – fazy właściwego odkształcenia i wypełniania nierówności powierzchni; 1, 1' – nierówności na powierzchni uszczelnienia i kołnierza; 2, 2' – przypadkowe zagłębienia i rysy; 3 – występy na powierzchni kołnierza; 4 – obce wtrącenia

Pierwszy etap stanowi faza zagęszczania materiału oraz wnikania najwyższych występów powierzchni kołnierzy w materiał uszczelnienia, przy czym w okresie tym dochodzi do styku

powierzchni uszczelnienia z nierównościami kołnierza równymi wysokości nierówności R_z . W wyniku tego, tworzy się system połączonych ze sobą mikrokanalów o kształtach płaskich szczelin.

Drugi i trzeci etap stanowi fazę właściwego odkształcania materiału uszczelnienia oraz wypełniania pozostałych nierówności powierzchni kołnierza przez materiał uszczelnienia. W etapach tych dochodzi do zamykania mikrokanalów. Można stwierdzić, że porowatość warstw przypowierzchniowych kołnierza i uszczelnienia zmalała.

W [29] podano 2 metody szacowania wartości wycieku z uszczelnienia kołnierzowego, przy czym zakłada się, że wyciek płynu występuje tylko pomiędzy powierzchniami kołnierza a powierzchniami uszczelnienia.

W pierwszej metodzie zajęto się zjawiskiem przepływu czynnika przez system mikroszczelin a w drugiej przepływem czynnika przez złożę porowate, przy czym obszar między powierzchniami uszczelnienia i kołnierzy zamodelowano jako warstwę porowatą.

Dla oszacowania wartości wycieku wg pierwszej metody można posłużyć się wzorem:

$$Q = \Psi_x \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{l_u \cdot \mu} \cdot R_z^3 \quad (4.1.1)$$

gdzie:

- Ψ_x – współczynnik kształtu, charakteryzujący: stan powierzchni (przepuszczalność mikrokanalów), właściwości materiałów (moduły Young'a E_1, E_2 , współczynniki Poisson'a) oraz nacisk stykowy p_k
- B – obwód uszczelnienia,
- l_u – szerokość uszczelnienia,
- R_z – parametr chropowatości,
- Δp – różnica ciśnień przed oraz za uszczelnieniem,
- μ - współczynnik lepkości dynamicznej płynu.

Współczynnik kształtu Ψ_x przedstawia się jako sumę:

$$\Psi_x = \Psi_p + \Psi_D \quad (4.1.2)$$

gdzie:

- Ψ_p – składowa współczynnika kształtu uwzględniająca obecność mikrokanalów wynikających z występowania śladów regularnej obróbki,

Ψ_D – składowa współczynnika kształtu uwzględniająca wpływ przypadkowych defektów na powierzchni kołnierza

Dla uszczelnień spoczynkowych zaproponowano wzór:

$$\Psi_p = \Psi_0 \cdot e^{-3p_k/wE} \quad (4.1.3)$$

gdzie:

Ψ_0, w – współczynniki zależne od jakości obrobionej powierzchni

Wartość współczynnika w zawiera się w przedziale $w = (0,1 - 0,3)$.

Jeżeli we wzorze (4.1.1) uwzględnić wzór (4.1.3) wówczas otrzymamy:

$$Q = \Psi_0 \cdot \frac{B \cdot \Delta p}{l_u \cdot \mu} \cdot R_z^3 \cdot e^{-3p_k/wE} \quad (4.1.4)$$

Z powyższej zależności wynika, że jeżeli nacisk stykowy p_k będzie podobnej wartości co iloczyn $w \cdot E$ ($p_k \cong w \cdot E$) wówczas wyciek z uszczelnienia zmniejszy się o 2 rzędy, bowiem $e^{-3} = 5 \cdot 10^{-2}$.

Uwzględniając przypadkowe defekty struktury powierzchni (np. rysy, ślady korozji) oraz wyrażenie (4.1.3) wzór (4.1.2) przyjmie postać:

$$\Psi_x = \Psi_0 \cdot e^{-3p_k/wE} + \Psi_D \quad (4.1.5)$$

zaś współczynnik Ψ_D oszacować można ze wzoru:

$$\Psi_D = \frac{1}{12} \sum \frac{B_D}{B} \cdot \left(\frac{\delta_D}{R_z} \right)^3 \quad (4.1.6)$$

gdzie:

B_D – szerokość defektu

δ_D – wysokość defektu.

Przykładowo dla $B = 100$ mm: dla defektu $z_1 = 1$ ($\delta_1 = 50$ μm , $B_{D1} = 0,1$ mm), dla defektu $z_2 = 2$ ($\delta_2 = 20$ μm , $B_{D2} = 0,01$ mm) oraz dla chropowatości $R_z = 10$ μm , współczynnik Ψ_D

równa się $\Psi_D = 10^{-2}$. Oznacza to, że współczynniki Ψ_p oraz Ψ_D są tego samego rzędu wielkości.

W drugiej metodzie do określenia wycieku pomiędzy powierzchniami uszczelnienia a powierzchniami kołnierza stosuje się prawo Darcy'ego. W teorii Kozeni – Karmana porowate środowisko przedstawia się w postaci zbioru kapilarnych rurek o równej długości l_r i dowolnym przekroju. Parametry te uwzględnia się we wzorze na przepuszczalność warstwy porowatej K . Natężenie przepływu można obliczyć z równania:

$$Q = K \cdot \frac{S \cdot \Delta p}{\mu \cdot l_r} \quad (4.1.7)$$

Kozeni ustalił następującą zależność dla współczynnika przepuszczalności:

$$K = \frac{c \cdot m^3}{\tau \cdot s^2}; \text{ m}^2 \quad (4.1.8)$$

gdzie:

c – bezwymiarowa stała Kozeni zależna od kształtu kapilary

dla kapilar o przekroju kołowym $c = 0,5$

dla kapilar o przekroju kwadratowym $c = 0,56$

dla kapilar o przekroju trójkątnym $c = 0,597$

m – porowatość materiału

S – pole przekroju warstwy porowatej, m^2 ;

s – jednostkowa powierzchnia materiału równa stosunkowi pola powierzchni wewnętrznej porów do jednostki objętości, m^{-1} ,

τ – współczynnik zwilżalności powierzchni.

W podsumowaniu analizy literatury należy stwierdzić, iż szczelność złącza kołnierzowego zależy, przede wszystkim, od stanu obciążenia uszczelnienia oraz od struktury i właściwości materiału, z którego zostało ono wykonane. Stan obciążenia uszczelnienia zmienia się w rezultacie działania ciśnienia czynnika uszczelnianego oraz postępującego w czasie pełzania materiału. Stwierdzono, że podczas zmiany tego obciążenia wyciek może pozostawać stały. Istnieje zgoda co do tego, że zarówno obszar styku powierzchni kołnierzy i uszczelnienia jak i materiał uszczelnienia można traktować jako złożę porowate. To stwierdzenie pozwala na wyodrębnienie dwóch składowych wycieku a mianowicie wycieku

między powierzchniami uszczelnienia i powierzchniami kołnierzy oraz wycieku na wskroś materiału uszczelnienia. Wyjaśnienia wymaga, czy zasadne jest uwzględnienie wycieku na wskroś materiału uszczelnienia, jaka jest przyczyna utrzymywania się niezmiennego wycieku pomimo spadku nacisku stykowego oraz w jaki sposób charakteryzować właściwości materiałów na uszczelnienia

5. Cel, tezy oraz zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest wykazanie, iż obszar styku powierzchni kołnierzy z uszczelnieniem jak również sam materiał uszczelnienia można traktować jak złożę porowate. Porowatość obu złożów zależy, przede wszystkim, od struktury materiału uszczelnienia. Zrealizowanie pracy wymaga dowiedzenia słuszności następujących tez:

1. wyciek na wskroś materiału stanowi znaczną część wycieku całkowitego z uszczelnienia spoczynkowego zamontowanego w złączu kołnierzowym,
2. znajomość średniego promienia kanalików porowatości umożliwia prognozowanie wartości współczynnika przepuszczalności,
3. współczynnik przepuszczalności K można uznać za podstawowy parametr oceny przydatności materiału na uszczelnienia spoczynkowe.

Zakres pracy obejmuje:

- przeprowadzenie pomiarów wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś w uszczelnieniach o różnej strukturze materiału,
- opracowanie metody badania wycieku na wskroś materiału uszczelnienia,
- przeprowadzenie oceny charakterystyk sprężystych materiałów,
- opracowanie modelu matematycznego materiału uszczelnienia,
- zastosowanie teorii homogenizacji do oceny rzędu współczynnika przepuszczalności,
- przeprowadzenie oceny porowatości materiału na uszczelnienia,
- opracowanie i analiza wyników badań.

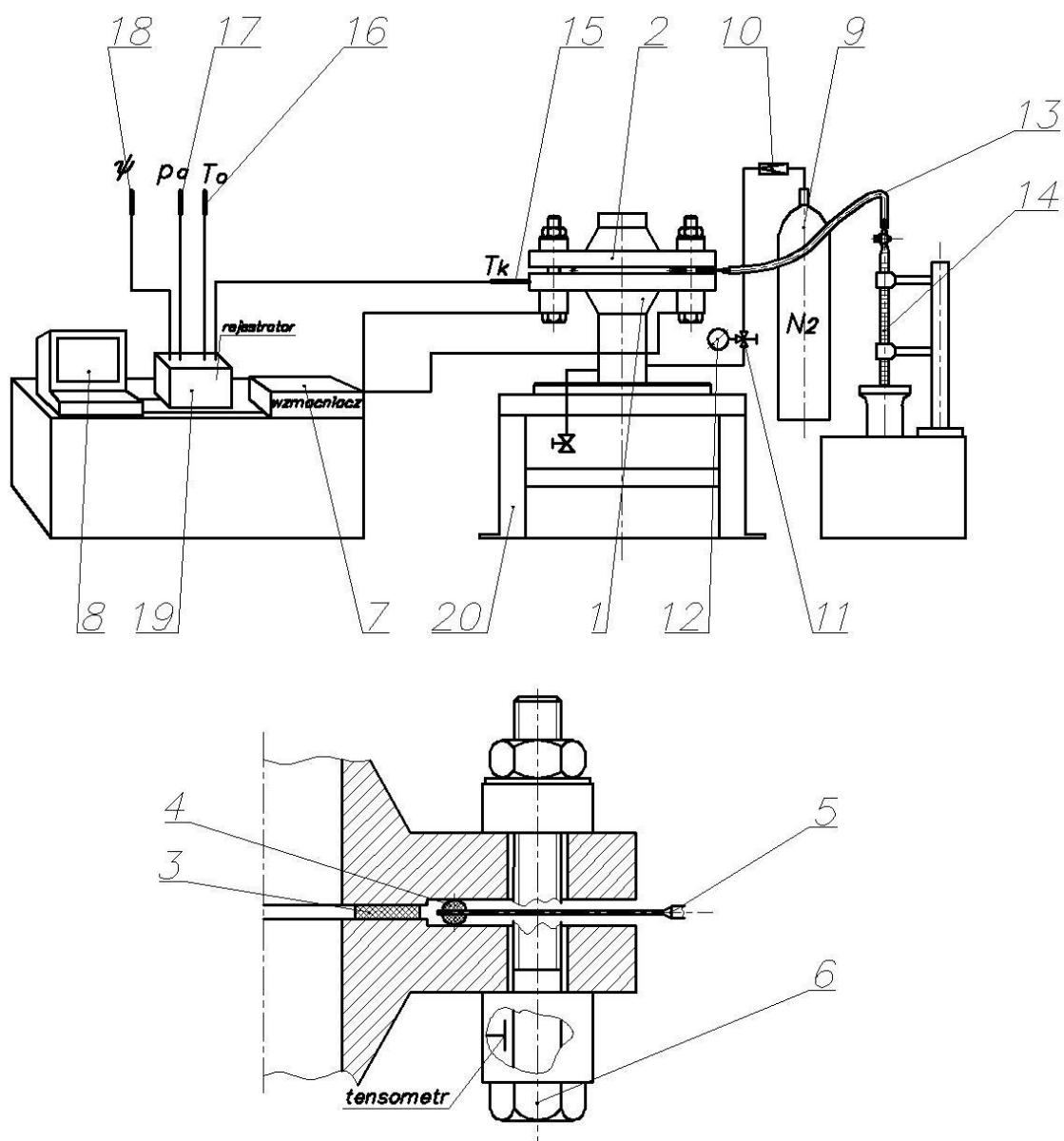
6. Stanowiska badawcze

Stanowiska badawcze, na których prowadzono badania uszczelnień spoczynkowych, znajdują się w Laboratorium Techniki Uszczelniania Maszyn i Urządzeń Politechniki Wrocławskiej. Badania prowadzono na dwóch stanowiskach. Pierwsze stanowisko, w skład którego wchodziło między innymi połączenie kołnierzone, stosowano w celu określenia wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś materiału uszczelniającego. Drugie stanowisko utworzono z maszyny wytrzymałościowej, na której wyznaczano charakterystyki sprężyste badanych uszczelnień. Wyznaczenie charakterystyk sprężystych badanych materiałów uszczelniających było niezbędne do określenia zmiany grubości materiału w zależności od przyłożonego obciążenia.

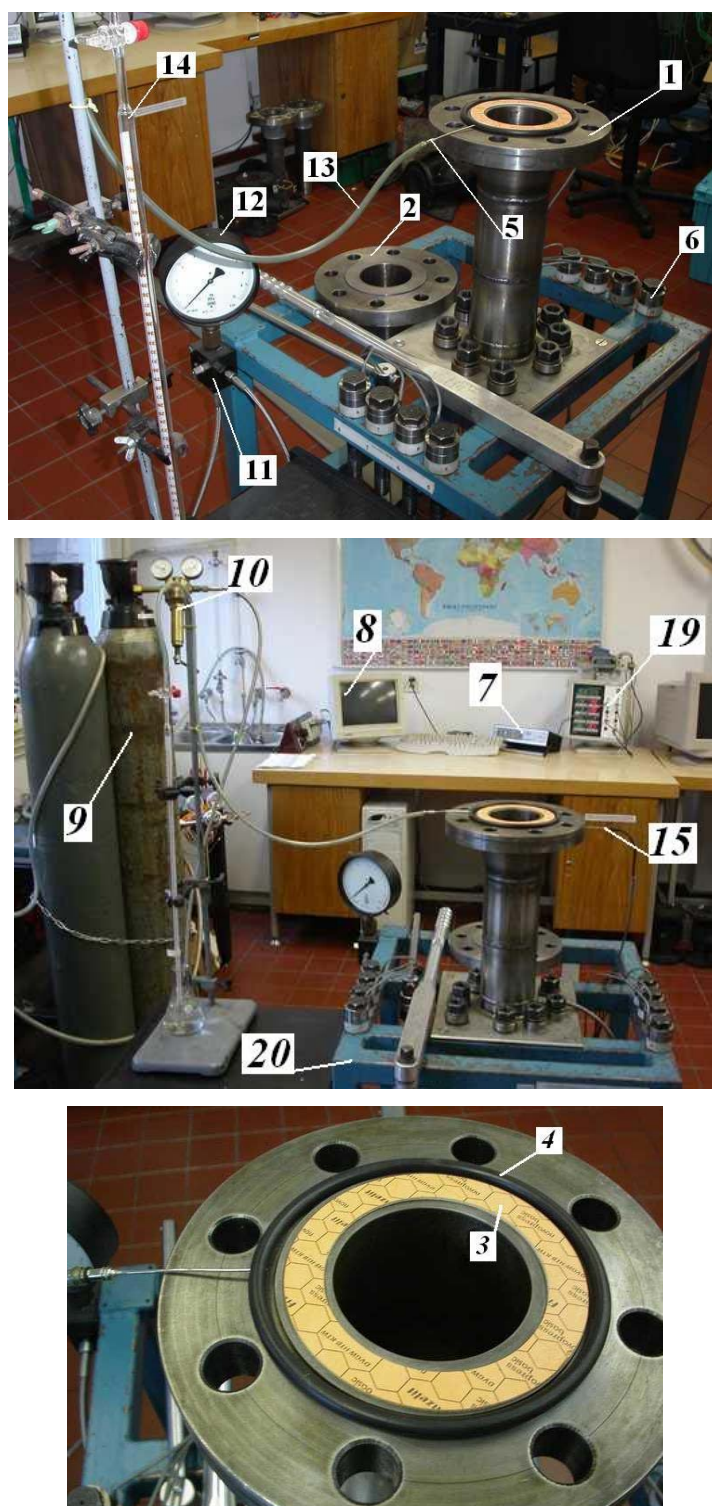
6.1. Stanowisko do badania wycieku ze złącza kołnierzonego

Stanowisko badawcze (rys. 14, rys. 15) stanowi połączenie kołnierzone. Autor pracy konstrukcję stanowiska oparł na normie [30] dotyczącej pomiaru wycieku z uszczelnienia zamontowanego w złączu kołnierzowym. Komorę badawczą tworzy przestrzeń zawarta pomiędzy kołnierzem dolnym **1** przymocowanym do podstawy stanowiska **20** oraz kołnierzem górnym **2**. Kołnierze wykonano ze stali 35HGS ulepszonej cieplnej zgodnie z zaleceniami [31] dla wymiaru DN100. Chropowatość powierzchni uszczelniających wynosiła $R_a = 10 \mu\text{m}$. Badane uszczelnienie **3** oraz uszczelnienie wtórne **4** umieszczono na dolnym kołnierzu a następnie, po założeniu górnego kołnierza, skręceno oba kołnierze ośmioma śrubami **6** o średnicy M24 x 3. Uszczelnieniem wtórnym **4** był gumowy pierścień o przekroju okrągłym, którego zadaniem było szczelne oddzielenie badanego uszczelnienia od otoczenia. Dzięki zastosowaniu uszczelnienia wtórnego możliwe było zebranie wyciekającego gazu przez badane uszczelnienie. W pierścień wtórny wbito igłę **5**, którą za pośrednictwem polietylenowego węża **13** połączono ze szklaną biuretą pomiarową **14** typu A. Objętość biurety wynosiła 50 cm^3 . Gazem badawczym był azot podawany z butli **9** poprzez zawór redukcyjny **10** oraz zawór trójdrożny **11**. Ciśnienie azotu w komorze badawczej mierzono za pomocą manometru sprężynowego **12** (klasa pomiarowa 0,6). Nacisk na powierzchnię uszczelnienia wywierano za pomocą śrub z naklejonymi tensometrami, dzięki temu możliwe było dokładne określenie wartości siły wywieranej na uszczelnienie. Sygnały

z tensometrów wzmacniano we wzmacniaczu sygnałów statycznych 7 i rejestrowano w komputerze 8. Każdą śrubę wycechowano na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron znajdujące się w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Przykładową charakterystykę śruby pokazano na rys. 16. Tensometry (firmy Vishay) naklejone na śruby połączone w układzie pełnego mostka. Śruby wykonano w klasie wytrzymałości 12.9 [32].



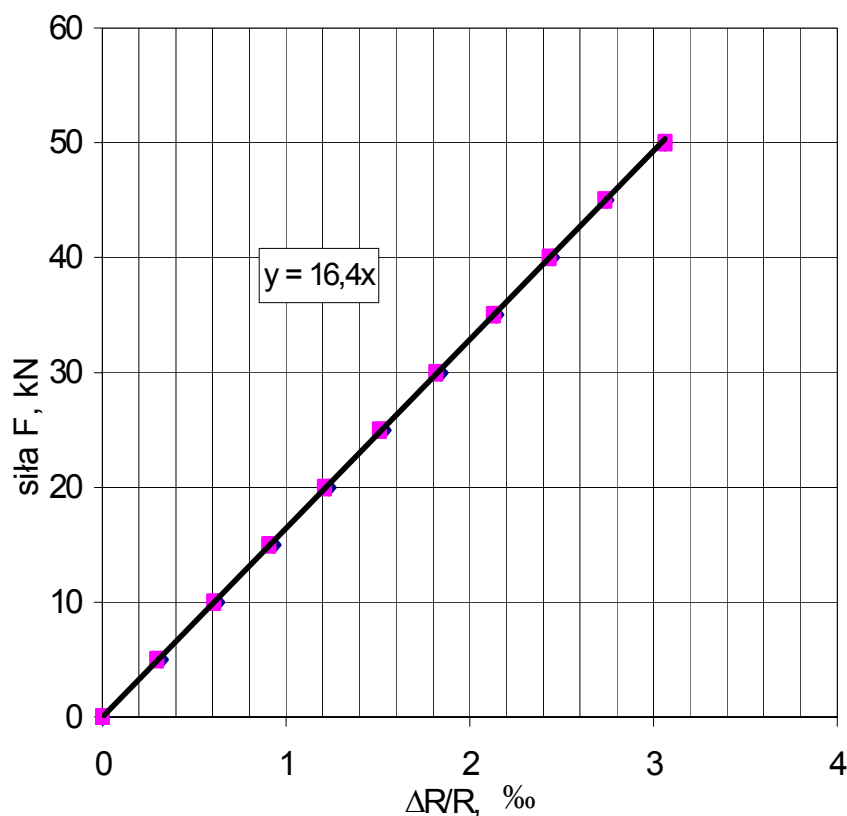
Rys. 14. Schemat stanowiska pomiarowego do określenia wycieku ze złącza kołnierzewego.
 1 - kołnierz dolny, 2 - kołnierz górny, 3 - badane uszczelnienie, 4 - uszczelnienie wtórne,
 5 - igła, 6 - śruba z naklejonym tensometrem, 7 - wzmacniacz sygnałów statycznych,
 8 - komputer, 9 - butla z azotem, 10 - reduktor, 11 - zawór trójdrożny, 12 - manometr,
 13 - waga polietylenowa, 14 - biureta pomiarowa, 15 - termometr Pt100 temperatury
 kołnierza, 16 - termometr Pt 100 temperatury otoczenia, 17 - barometr,
 18 - wilgotnościomierz, 19 - rejestrator, 20 - podstawa stanowiska.



Rys. 15. Zdjęcie stanowiska do określenia wycieku ze złącza kołnierzego. Oznaczenia części jak na rys. 14.

Temperaturę kołnierza oraz temperaturę otoczenia mierzono za pomocą termometrów Pt100 **15**, **16**. Termometr do pomiaru temperatury kołnierza umieszczono w dolnym kołnierzu. Wilgotność mierzono za pomocą wilgotnościomierza **18** (firmy MERA – KFAP Kraków) podłączonego do rejestratora **19**. Ciśnienie atmosferyczne określano za pomocą barometru **17** (MBS-03 produkcji Zakładu Automatyki i Urządzeń Pomiarowych w Gdańsku).

a)



b)



c)



Rys. 16. Charakterystyka sprężysta śruby nr 1 a), widok śruby b), oraz powiększenie obszaru naklejenia tensometru c)

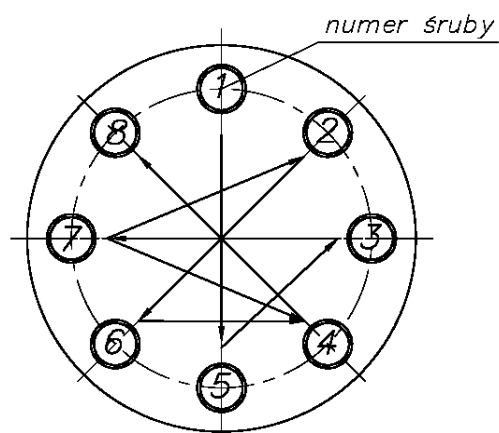
6.1.1 Metodyka prowadzenia badań wycieku całkowitego z uszczelnienia zamontowanego w połączeniu kołnierzowym

Metodę przeprowadzenia oceny wycieku całkowitego z połączenia kołnierzowego oparto na normie [30] oraz na procedurze [33] wyznaczania współczynników m oraz y uszczelnień spoczynkowych opracowanej w Laboratorium Techniki Uszczelniania Maszyn i Urządzeń Politechniki Wrocławskiej.

Ocenę wycieku całkowitego w złączu kołnierzowym prowadzono stosując uszczelnienia spoczynkowe o średnicach, zewnętrznej $\phi 153$ mm, oraz wewnętrznej $\phi 113$ mm i grubości 2 mm zgodnych z [30]. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia. W celu wywołania jednakowego odkształcenia wstępnego badanych uszczelnień zdecydowano się obciążać uszczelnienia do wartości nacisku wstępnego 51,1 MPa. Przy tym obciążeniu nie mierzono wycieku gazu. Celem było zapewnienie jednakowego zagęszczenia materiału niezależnie od przewidywanego ciśnienia azotu podczas badania wycieku.

Przed badaniami określano grubość badanych uszczelnień, oraz średnice, wewnętrzną i zewnętrzną, w trzech miejscach co 120° suwmiarką elektroniczną (firmy Mitutoyo) o dokładności 0,01 mm, oraz zerowano sygnały z tensometrów naklejonych na śruby. Sygnał podawany ze wzmacniacza sygnałów statycznych określany był w $\%$ $\Delta R/R$ (zmiana oporności mostka tensometrycznego do oporności podstawowej mostka). Znając charakterystykę każdej ze śrub przypisano odpowiednie wartości sygnałów z tensometrów do wartości sił. Po oczyszczeniu powierzchni uszczelniających kołnierzy rozcieńczalnikiem acetonowym umieszczano badane uszczelnienie na dolnym kołnierzu, centrowano je, umieszczano uszczelnienie wtórne, zakładano górny kołnierz, montowano śruby i dokręcano je rękami. Następnie w trzech krokach dokręcano śruby kluczem dynamometrycznym z momentem skręcającym odpowiednio 30, 60 oraz 100 % momentu całkowitego. Zadany moment był określony analitycznie i odpowiadał wartości siły naciągu śruby. Określenie wartości napięcia śruby poprzez zadanie określonego momentu skręcającego traktowano jako ocenę zgrubną. Rzeczywiste wartości sił występujących w śrubach odczytywano na ekranie komputera na podstawie wskazań tensometrów. Ostatnim krokiem, podczas dokręcania śrub, było doprowadzenie do uzyskania w każdej ze śrub maksymalnej wartości siły zapewniającej nacisk montażowy 51,1 MPa na uszczelnienie. Założono, że dokładność dokręcania śrub nie powinna przekraczać $\pm 0,02 \%$. Kolejność dokręcania śrub realizowano według schematu pokazanego na rys. 17 [1] zaczynając od śruby nr 1 (strzałki określają kolejność dokręcania

śrub). Po odczekaniu 30 minut zmniejszono nacisk na powierzchnię uszczelnienia do wartości odpowiadającej naciskowi roboczemu 30 MPa. Po dokręceniu śrub odczytywano siłę napięcia w każdej ze śrub a następnie doprowadzano do złącza kołnierzonego azot o ciśnieniu 2 lub 4 MPa poprzez zawór redukcyjny oraz zawór trójdrożny. W celu wywołania zadanego obciążenia roboczego na powierzchnię uszczelnienia wywierano większy nacisk montażowy a po doprowadzeniu do złącza azotu pod odpowiednim ciśnieniem następowało wydłużenie śrub zaś powierzchnia uszczelnienia ulegała odciążeniu.



Rys. 17. Schemat kolejności dokręcania śrub w złączu kołnierzym

Po zassaniu słupa destylowanej wody do biurety pomiarowej do wysokości odpowiadającej 50 cm^3 , łączono biuretę pomiarową z igłą wbity w uszczelnienie wtórne. Po otwarciu zaworu w biurecie, odczytywano wysokość słupa wody h_2 . Dzięki wytworzeniu niewielkiego podciśnienia zasysano wyciekający azot z przestrzeni pomiędzy badanym uszczelnieniem a uszczelnieniem wtórnym. Po 30 minutach odczytywano wysokość h_3 słupa wody w biurecie pomiarowej. Różnica wysokości słupa wody $h_2 - h_3$ określała ilość wyciekającego gazu przez badane uszczelnienie. Ilość wyciekającego gazu, odniesiona do warunków normalnych, obliczona była z równania [30]:

$$V_{LS} = \left\{ \left[\frac{(p_a - \rho \cdot g \cdot h_2) \cdot (C_1 - C_2)}{\rho \cdot g \cdot h_2} \right] \cdot p_a \cdot \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_3} \right) + (C_2 - C_3) \right\} \cdot \frac{p_3 \cdot T_S}{p_S \cdot T_a \cdot t}; \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.1.1.1)$$

gdzie:

p_a – ciśnienie atmosferyczne, Pa;

h_2 – wysokość słupa wody po otwarciu zaworu, mm;

h_3 – wysokość słupa wody po 30 minutach, mm;

- C_1 – wskazanie na biurecie na początku, cm^3 ;
 C_2 – wskazanie na biurecie po otwarciu zaworu, cm^3 ;
 C_3 – wskazanie na biurecie po 30 minutach, cm^3 ;
 p_3 – ciśnienie w rurce przy wysokości h_3 , kPa;
 p_2 – ciśnienie w rurce przy wysokości h_2 , kPa;
 p_1 – ciśnienie w rurce przy wysokości h_1 , kPa;
 T_A – temperatura otoczenia, K;
 T_3 – temperatura badań, K;
 p_S – ciśnienie normalne, kPa;
 T_S – temperatura normalna, K.
 t – czas przeprowadzania pomiaru, s.

W przypadku spadku słupa wody w czasie krótszym niż 30 minut, określano czas odpowiadający spadkowi słupa wody do objętości 10 cm^3 . Po zakończonym teście układ rozszczelniano (za pomocą zaworu trójdrożnego) a uszczelnienie odciążano poprzez odkręcenie śrub do całkowitego ich poluzowania. Następnie całą procedurę powtarzano dla niższego nacisku podanego w tabeli 1 na powierzchnię uszczelnienia. Obciążenie montażowe w każdym kroku było tak dobrane, by po wypełnieniu złącza azotem nacisk roboczy na powierzchnię uszczelnienia był równy wartościom podanym w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości nacisku na powierzchnię uszczelnienia w stanie roboczym

Numer kroku	nacisk; MPa
1	51,1
2	30
3	25
4	20
5	14
6	10
7	6

6.1.2 Metodyka prowadzenia badań wycieku na wskroś materiału z uszczelnienia zamontowanego w połączeniu kołnierзовym

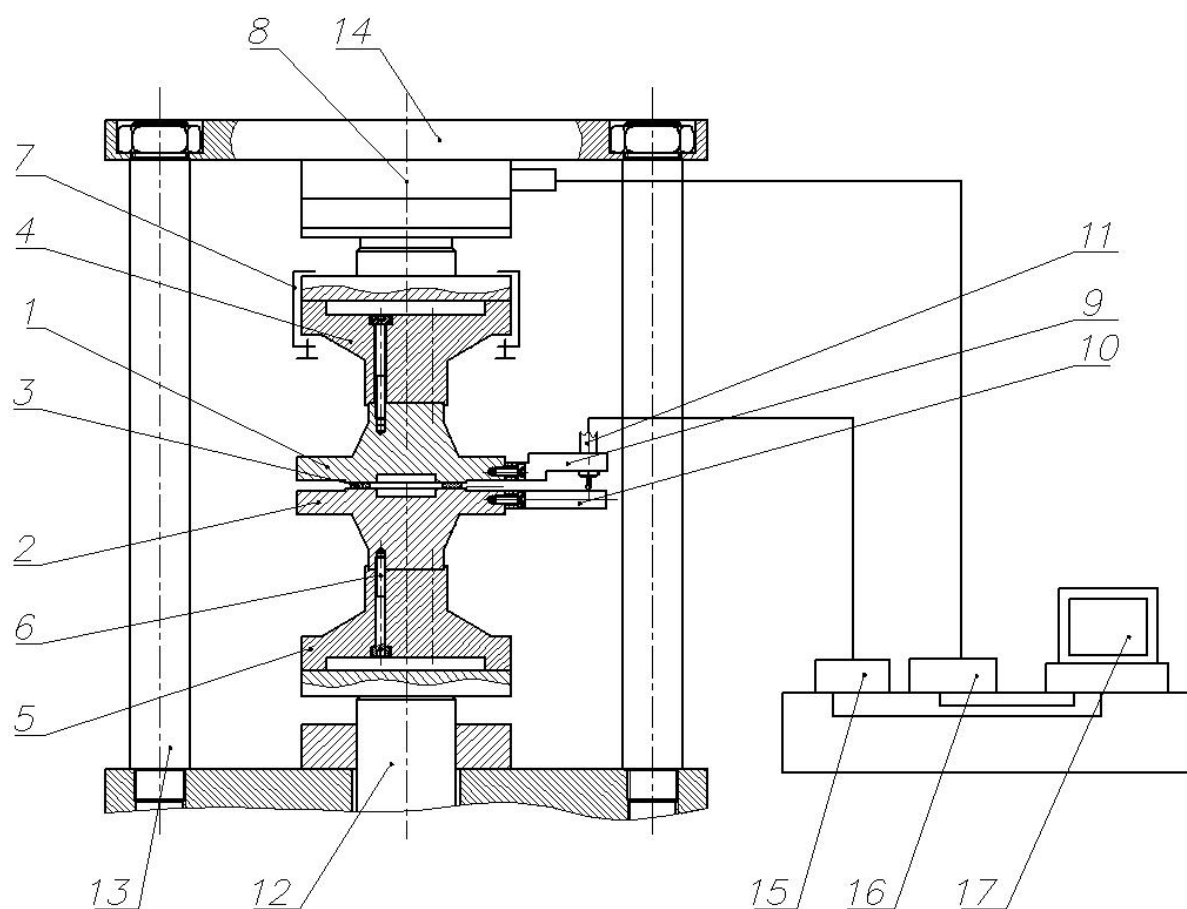
Metodę prowadzenia badań wycieku na wskroś materiału w połączeniu kołnierзовym opracował autor pracy. Badania prowadzono na uszczelnieniach o wymiarach identycznych jak przy określaniu wycieku całkowitego z połączenia kołnierowego. Przed badaniami określano wymiary uszczelnienia oraz zerowano sygnały z mostków tensometrycznych. W celu wyeliminowania składowej wycieku, występującego pomiędzy powierzchniami uszczelnienia a powierzchniami uszczelniającymi kołnierzy, przyklejano badane uszczelnienie do dolnego kołnierza za pomocą kleju Loctite Nr 454. Po umieszczeniu uszczelnienia wtórnego pokrywano górną powierzchnię uszczelnienia klejem, po czym montowano górny kołnierz. W pierwszym kroku wywoływano nacisk montażowy 51,1 MPa na uszczelnienie. Procedura dokręcania śrub była identyczna z procedurą opisaną w punkcie 6.1.1. Po odczekaniu 30 minut, odciążano badane uszczelnienie do następnego poziomu nacisku roboczego. Podczas odciążania uszczelnienia nie luzowano całkowicie śrub ponieważ mogłoby to doprowadzić do rozwarstwienia przyklejonej uszczelki do powierzchni kołnierzy. Po zassaniu wody do biurety pomiarowej oraz wypełnienia połączenia kołnierowego azotem, przeprowadzano pomiar wycieku identycznie jak w punkcie 6.1.1. Po przeprowadzonym teście rozszczelniano układ a następnie odciążano powierzchnię uszczelnienia do następnego poziomu nacisku (patrz tab. 1). Po uzyskaniu odpowiedniej siły na powierzchni uszczelnienia, przeprowadzano procedurę oceny szczelności w sposób opisany powyżej.

6.2. Stanowisko do określania charakterystyk sprężystych materiału

Stanowiskiem do określenia charakterystyk sprężystych materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe była maszyna wytrzymałościowa (rys. 18, rys. 19) znajdująca się w Laboratorium Techniki Uszczelniania Maszyn i Urządzeń. Celem badań było wyznaczenie charakterystyk, obciążenie – odkształcenie materiałów uprzednio badanych na stanowisku do wyznaczania wycieku.

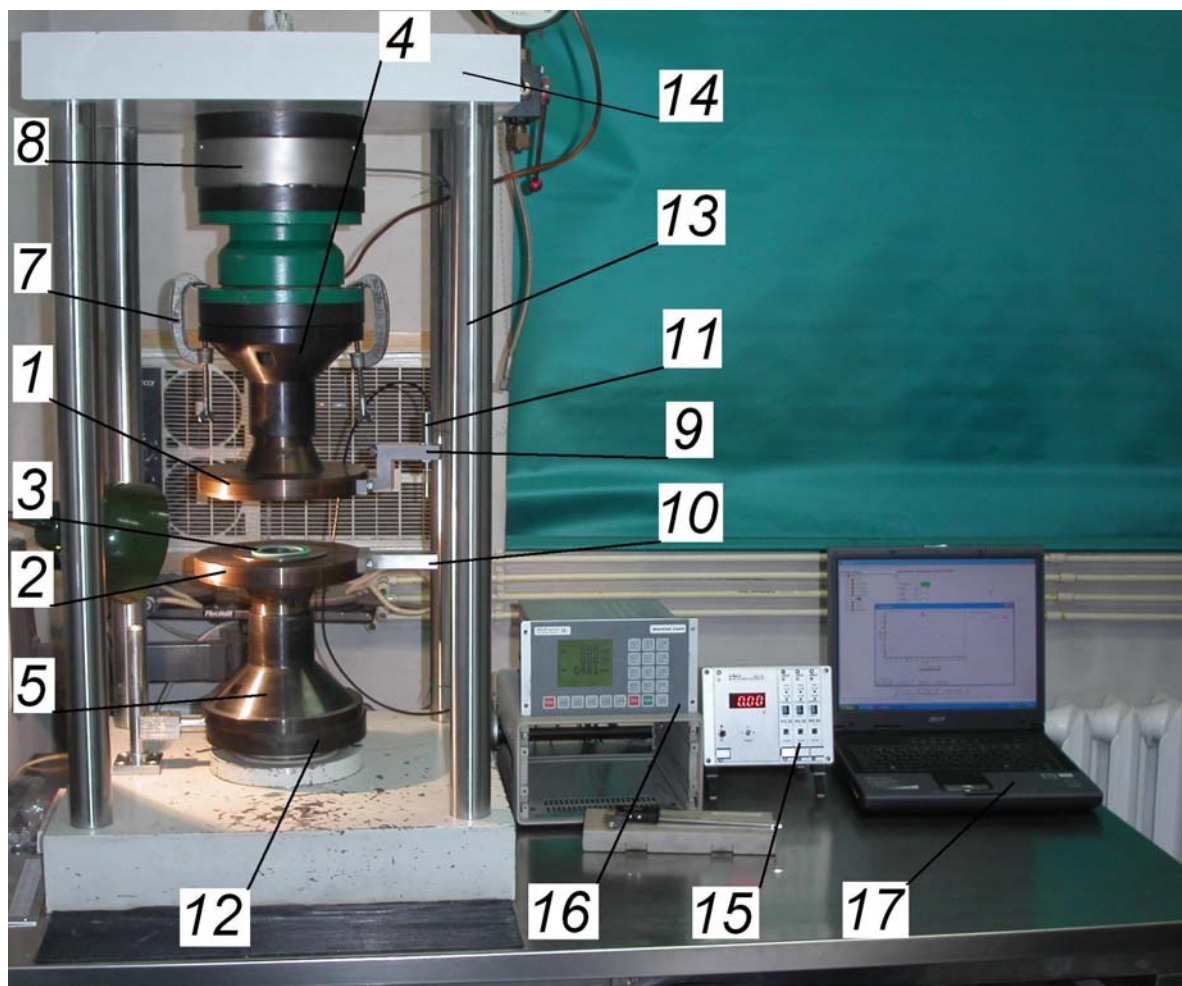
Badane uszczelnienie **3** umieszczano na dolnym kołnierzu **2**, który za pośrednictwem głowicy dolnej **5** spoczywał na końcówce tłoczyska **12** siłownika hydraulicznego. Kołnierz dolny był przymocowany do głowicy dolnej poprzez 3 śruby mocujące **6**. Kołnierz górny **1**

poprzez głowicę górną przymocowany był na stałe do głowicy czujnika siły **8** za pomocą 2 imadeł zaciskowych **7**. Kołnierze pomiarowe wykonano zgodnie z zaleceniami [25]. Chropowatość powierzchni roboczych obu kołnierzy wynosiła $R_z = 6,3 \mu\text{m}$. Czujnik siły zamocowano do płyty górnej **14**, którą połączono z podstawą stanowiska za pomocą 4 belek wspornikowych **13**. Czujnikiem siły była tensometryczna głowica pomiarowa (Load Cell FL75UM(C1) – 2SGKB Firmy Strain Sert), którą podłączono do programowalnego sterownika **16** DIGICON 2000 (Wüst Engineering AG - Szwajcaria) maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 18. Schemat stanowiska do określania charakterystyk sprężystych materiałów uszczelniających. 1 – kołnierz górny, 2 – kołnierz dolny, 3 – badane uszczelnienie, 4 – głowica górna, 5 – głowica dolna, 6 – śruby mocujące, 7 – imadło zaciskowe, 8 – głowica czujnika siły, 9 – belka mocująca czujnik przemieszczeń, 10 – belka oporowa czujnika przemieszczeń, 11 – czujnik przemieszczeń, 12 – tłoczyisko siłownika hydraulicznego, 13 – belki wspornikowe, 14 – płyta górna, 15 – czytnik czujnika przemieszczenia, 16 – sterownik maszyny wytrzymałościowej, 17 – komputer

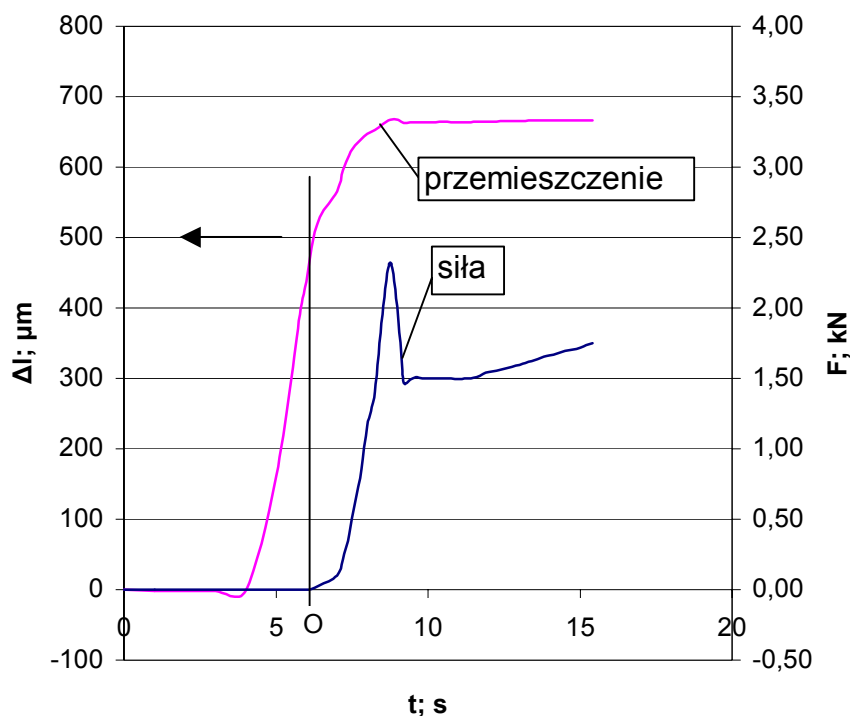
Sterownik maszyny pozwalał na programowanie prowadzonych testów oraz umożliwiał odczyt aktualnej siły. Do pomiaru odkształcenia badanych uszczelnień stosowano transformatorowy czujnik przemieszczeń liniowych **11** (PLx6 firmy PELTRON) o dokładności pomiarowej 1 μm . W celu wyeliminowania pomiaru odkształcenia elementów pośrednich przenoszących obciążenie, czujnik przemieszczeń zamocowano za pośrednictwem belki mocującej **9** do górnego kołnierza. Podczas pomiaru końcówka pomiarowa czujnika przemieszczeń stykała się z belką oporową **10** zamocowaną do kołnierza dolnego. Sygnał z czujnika przemieszczeń wzmacniany był w czytniku **15** (MPL 703 firmy Peltron). Sygnały z czujnika przemieszczeń oraz z czujnika siły poprzez czytnik oraz sterownik maszyny przesyłano do komputera **17** oraz rejestrowano je.



Rys. 19. Zdjęcie stanowiska do określania charakterystyk sprężystych materiałów uszczelniających. Oznaczenia jak na rys. 18

6.2.1 Metodyka prowadzenia badań charakterystyk sprężystych badanych materiałów uszczelniających

Metodę prowadzenia badań opracował autor pracy. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia. Badane próbki miały kształt pierścieni o średnicy wewnętrznej $\phi 50$ mm oraz zewnętrznej $\phi 75$ mm zgodnych z [25]. Próbki wykonano z płyt o grubości 2 mm z których wykonane były uszczelnienia badane na stanowisku do określenia wycieku. Przed badaniami suwmiarką elektroniczną określano grubość badanych próbek oraz średnice, wewnętrzną i zewnętrzną z dokładnością 0,01 mm. W celu wyeliminowania przywierania próbki do powierzchni kołnierzy pokrywano powierzchnie próbek cienką warstwą sproszkowanego grafitu. Po zaprogramowaniu sterownika, umieszczano badaną próbkę na dolnym kołnierzu, po czym uruchamiano program wytrzymałościowy za pomocą sterownika. Zadany program wytrzymałościowy symulował pracę materiału uszczelniającego w złączu kołnierzowym. Obciążenie na powierzchnię próbki było identyczne z obciążeniem stosowanym w teście szczelności (tabela 1). Podczas testu rejestrowano siłę wywieraną na powierzchnię próbki oraz zmianę jej grubości. Sygnały siły oraz przemieszczenia przetwarzane były za pomocą karty pomiarowej oraz zapisywane na dysku komputera. W pierwszym kroku zadawano nacisk 51,1 MPa na powierzchnię badanego pierścienia z prędkością narastania nacisku 2 MPa/s [25]. Po uzyskaniu wartości nacisku na badaną próbkę równej 51,1 MPa, odczekiwano 30 minut po czym następowało odciążenie próbki do następnego poziomu nacisku (patrz tab. 1). Po uzyskaniu odpowiedniej wartości nacisku odczekiwano 30 minut a procedurę odciążania powtarzano ponownie. Po zakończeniu testu określano wymiary próbki suwmiarką tzn. jej grubość oraz średnice. Najniższa siła, jaką może wywrzeć maszyna wytrzymałościowa, wynosi 1,5 kN co po przeliczeniu na nacisk wywierany na powierzchnię badanych próbek wynosi 0,735 MPa. W obszarze od 0 do 0,735 MPa nacisku na powierzchnię uszczelnienia zachodzi duże zagęszczenie materiału i z tego względu obszaru tego nie można pominąć. Sposób oszacowania wartości odkształcenia uszczelnienia w obszarze od 0 do 0,735 MPa pokazano na rys. 20.



Rys. 20. Sposób wyznaczania odkształcenia próbki w obszarze nacisku od 0 do 0,735 MPa na powierzchnię uszczelnienia dla badanego materiału

Po uruchomieniu maszyny, kołnierze nie stykają się ze sobą. W chwili zetknięcia się czujnika przemieszczeń z belką oporową sygnał przemieszczenia zaczyna wzrastać (linia różowa) liniowo z tym, że w danym obszarze nie dochodzi do styku górnej powierzchni próbki z górnym kołnierzem. W punkcie „O” dochodziło do zetknięcia górnej powierzchni badanej próbki z powierzchnią górnego kołnierza, co oznaczało że po przekroczeniu tego punktu następował wzrost siły działającej na powierzchnię uszczelnienia. Podczas badań odnoszono z punktu „O” pionową linię do krzywej przemieszczenia i wartość tę przyjmowano jako punkt zerowy przemieszczenia.

Badania charakterystyk sprężystych prowadzono w celu określenia zmiany grubości materiału uszczelnienia w zależności od przyłożonej siły. Badania nad określeniem wycieku na wskroś oraz zmianą grubości materiału pod wpływem przyłożonego obciążenia były niezbędne do określenia współczynnika przepuszczalności oraz jego zmiany wraz z przyłożonym obciążeniem.

7. Model matematyczny przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty

Materiał uszczelnienia należy traktować jako materiał niejednorodny w skali mikroskopowej. Wynika to ze złożonej jego struktury. W materiale tym można wyróżnić włókna związane z matrycą elastomerową oraz wypełniacze. Pomędzy tymi składnikami istnieją miejsca puste tworzące pory, przez które możliwy jest przepływ płynu.

Współczynnika przepuszczalności K nie można wyznaczyć bezpośrednio, jego wartość oblicza się ze wzoru np. Darcy'ego na podstawie znajomości wycieku. Zdecydowano zastosować teorię homogenizacji aby nie tylko określić prawo przepływu płynu ściśliwego przez złożę porowate ale, przede wszystkim, aby oszacować relację pomiędzy współczynnikiem przepuszczalności a rzędem średniej średnicy porów. Ustalenie takiego związku pozwoliłoby na ocenę współczynnika przepuszczalności K wyłącznie na podstawie badań porozymetrycznych materiału uszczelnienia. Oznaczałoby to możliwość zrezygnowania z długotrwałych badań wycieku z uszczelnień.

7.1. Teoria homogenizacji

Wszystkie materiały można sklasyfikować jako ciała niejednorodne, ponieważ wszystkie, w określonej skali, wykazują się pewnym stopniem niejednorodności. Korzystając z teorii homogenizacji i stosując podstawowe zależności obowiązujące dla materiałów jednorodnych, można przejść ze skali mikroskopowej (ciało niejednorodne) do skali makroskopowej (ciało jednorodne). Uzyskane rozwiązania obowiązują dla opisu procesów zachodzących w skali makroskopowej w ośrodkach niejednorodnych. Rozwiązanie metodą homogenizacji polega na znalezieniu modelu ekwiwalentnego ośrodka jednorodnego dla rozważanego ośrodka niejednorodnego.

Wśród wielu technik przejścia ze skali mikro do skali makro w teorii homogenizacji na szczególną uwagę zasługują:

- metoda rozwinięć asymptotycznych [34], [35],
- metoda homogenizacji bezpośredniej,
- metoda homogenizacji ośrodków stochastycznych [36].

W pracy wykorzystano metodę rozwinięć asymptotycznych zaproponowaną w [35], [37].

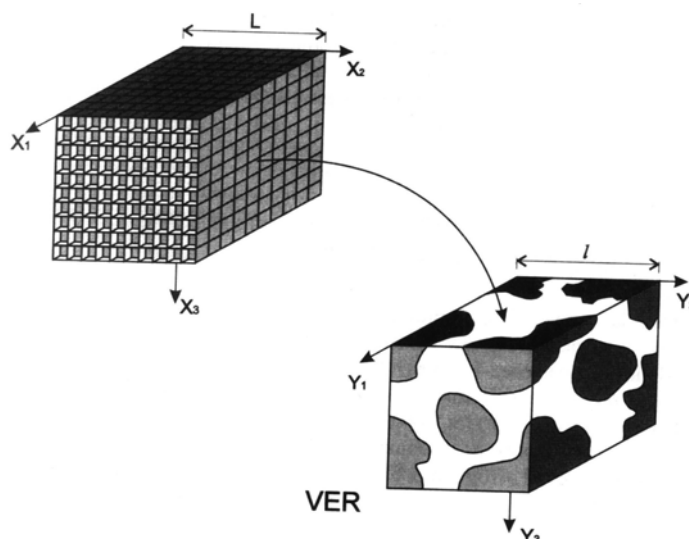
Postępowanie w przypadku rozwiązania zagadnienia metodą homogenizacji polega na określeniu równań konstytutywnych rozpatrywanego zagadnienia, wprowadzeniu zmiennych

bezwymiarowych (makroskopowej i mikroskopowej) oraz na zastosowaniu odpowiedniej metody określenia równań końcowych opisujących zachodzące zjawisko w makroskali.

7.1.1 Założenia ogólne teorii homogenizacji

W niniejszym rozdziale przedstawiono warunki jakie muszą być przyjęte aby można było przeprowadzić proces homogenizacji metodą rozwinięć asymptotycznych.

1. Ośrodek musi być periodyczny oraz zawierać dużą liczbę niejednorodności (rys. 21) [35], [38]. W ośrodku można wyróżnić pewną objętość reprezentatywną VER, która jest mała w porównaniu z rozpatrywanym obiektem.



Rys. 21. Ośrodek periodyczny z zaznaczonymi wymiarami charakterystycznymi.

2. Objętość elementarną charakteryzuje się wymiarem charakterystycznym l , przy czym spełniony musi być warunek:

$$\frac{l}{L} = \varepsilon \ll 1 \quad (7.1.1)$$

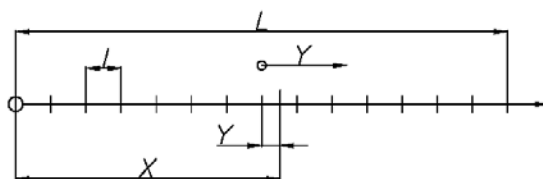
gdzie:

l – wymiar charakterystyczny obszaru mikroskopowego,

L – wymiar charakterystyczny obszaru makroskopowego.

3. Wymiarowi charakterystycznemu l obszaru mikro odpowiada przestrzenna zmienna wymiarowa X określająca położenie danego punktu względem przyjętego w skali makro

układu odniesienia, temu samemu punktowi odpowiada przestrzenna zmienna wymiarowa Y określająca jego położenie w lokalnym układzie odniesienia (rys. 22)



Rys. 22. Położenie punktu w dwóch zmiennych przestrzennych

4. Dla przyjętych zmiennych wymiarowych określa się zmienne bezwymiarowe:
bezwymiarową zmienną makroskopową:

$$x = \frac{X}{L} \quad (7.1.2)$$

oraz bezwymiarową zmienną mikroskopową:

$$y = \frac{Y}{l} \quad (7.1.3)$$

W przypadku gdy układ lokalny i makroskopowy pokrywają się ($X=Y$) to pomiędzy wymienionymi zmiennymi bezwymiarowymi zachodzi związek:

$$y = \frac{x}{\varepsilon} \quad \text{lub} \quad x = y \cdot \varepsilon \quad (7.1.4)$$

5. Funkcję Φ określającą dowolną wielkość fizyczną można przedstawić jako funkcję zmiennych bezwymiarowych x oraz y :

$$\Phi = \Phi(x, y) \quad (7.1.5)$$

6. Ze względu na periodyczność rozpatrywanego ośrodka przyjmuje się periodyczność funkcji Φ względem zmiennej bezwymiarowej y i dla przypadku gdy $\varepsilon \rightarrow 0$ zmienność funkcji Φ jest równa 0.
7. Funkcję Φ przedstawia się w postaci rozwinięcia asymptotycznego względem małego parametru ε [34], [39]:

$$\Phi(x, y) = \Phi^{(0)}(x, y) + \varepsilon \Phi^{(1)}(x, y) + \varepsilon^2 \Phi^{(2)}(x, y) + \dots \quad (7.1.6)$$

Proces homogenizacji poprzedzić należy normalizacją równań. Normalizacja równań polega na doprowadzeniu równań do postaci bezwymiarowej. Poszukiwane funkcje uzależniają się od zmiennych bezwymiarowych (x oraz y) i wówczas zakres zmienności tych funkcji zawiera się w przedziale $(0, 1)$.

7.1.2 Zastosowanie teorii homogenizacji dla przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty

Proces przepływu płynu ściśliwego w mikroskali można opisać podając następujące równania [35]:

- równanie ruchu

$$\operatorname{div} \sigma^f = \rho^f \frac{D \bar{v}^f}{Dt^f} \quad (7.1.7)$$

gdzie:

σ^f – tensor naprężenia w płynie, indeks f oznacza fizyczną wielkość wymiarową,

ρ^f – gęstość płynu,

\bar{v}^f - wektor prędkości przepływającego płynu,

- związki konstytutywne dla cieczy Troutona z uwzględnieniem ściśliwości barotropowej:

$$\sigma^f = -p^f I + 2\mu e(\bar{v}^f) + \lambda e_{ii}(\bar{v}^f) \quad (7.1.8)$$

$$f(p^f, \rho^f) = 0 \quad (7.1.9)$$

gdzie:

I – tensor jednostkowy

- równanie zachowania masy:

$$\frac{\partial \rho^f}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^f \bar{v}^f) = 0 \quad (7.1.10)$$

- warunek, że na powierzchni prędkość jest równa 0:

$$\bar{v}^f|_{\Gamma} = 0 \quad (7.1.11)$$

- warunek periodyczności funkcji (patrz p. 7.1.1)

$$[\bar{v}^f] = 0, [p^f] = 0, [\rho^f] = 0 \quad (7.1.12)$$

Łącząc równanie (7.1.7) z równaniem (7.1.8) oraz uwzględniając (7.1.9 – 7.1.12) można dojść do układu równań opisujących przepływ płynu ściśliwego przez nieodkształcalny ośrodek porowaty:

$$\begin{aligned}
 \mu \nabla^2 \bar{v}^f - (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div} \bar{v}^f) - \text{grad} p^f &= \rho^f \left[\frac{\partial \bar{v}^f}{\partial t} + \left(\bar{v}^f \cdot \text{grad} \right) \bar{v}^f \right] \\
 \frac{\partial \rho^f}{\partial t} + \text{div}(\rho^f \bar{v}^f) &= 0 \\
 f(p^f, \rho^f) &= 0 \\
 \bar{v}^f|_{\Gamma} &= 0 \\
 \left[\bar{v}^f \right] &= 0 \\
 \left[p^f \right] &= 0 \\
 \left[\rho^f \right] &= 0
 \end{aligned} \tag{7.1.13}$$

Proces homogenizacji poprzedza się procesem normalizacji równań. W równaniach (7.1.13) wszystkie wielkości są wielkościami fizycznymi. Normalizację równań oparto na [35].

$$\begin{aligned}
 v_{\max} &= \max \left\| \bar{v}^f \right\|, \quad p_{\max} = \max \left\| p^f \right\|, \\
 \frac{v_{\max}}{l^2} &= \max \left\| \nabla^2 \bar{v}^f \right\|, \quad \frac{p_{\max}}{l} = \max \left\| \text{grad} p^f \right\| \\
 \frac{v_{\max}}{t_m} &= \max \left\| \frac{\partial \bar{v}^f}{\partial t} \right\|, \quad \frac{v_{\max}^2}{l} = \max \left\| \bar{v}^f \text{grad} \bar{v}^f \right\| \\
 \rho_{\max} &= \max \left\| \rho^f \right\|, \quad \frac{v_{\max}}{l^2} = \max \left\| \text{grad}(\text{div} \bar{v}^f) \right\|
 \end{aligned} \tag{7.1.14}$$

Wprowadzając równania (7.1.14) do (7.1.13), zakładając ruch ustalony ($\frac{\partial \bar{v}^f}{\partial t} = 0, \frac{\partial \rho^f}{\partial t} = 0$)

otrzymano:

$$\begin{aligned}
 \mu \frac{v_{\max}}{l^2} \nabla^2 \left(\frac{\bar{v}^f}{v_{\max}} l^2 \right) - (\lambda + \mu) \frac{v_{\max}}{l^2} \text{grad} \left(\text{div} \frac{\bar{v}^f}{v_{\max}} l^2 \right) - \frac{p_{\max}}{l} \text{grad} \left(\frac{p^f}{p_{\max}} l \right) &= \\
 = \rho^f \frac{v_{\max}^2}{l} \left[\left(\frac{\bar{v}^f}{v_{\max}} \cdot \text{grad} \right) \frac{\bar{v}^f}{v_{\max}} l \right] &
 \end{aligned} \tag{7.1.15}$$

zaś równanie zachowania masy z układu równań (7.1.14) przyjmie postać:

$$\operatorname{div} \left(\frac{\rho^f}{\rho_{\max}} \frac{\bar{v}^f}{v_{\max}} l \right) = 0 \quad (7.1.16)$$

W celu dokonania procesu homogenizacji należy wprowadzić wielkości bezwymiarowe prędkości, ciśnienia oraz gęstości:

$$\bar{v} = \frac{\bar{v}^f}{v_{\max}}, \quad p = \frac{p^f}{p_{\max}}, \quad \rho = \frac{\rho^f}{\rho_{\max}} \quad (7.1.17)$$

Wszystkie funkcje wielkości fizycznych definiuje się w podwójnej skali rozdzielności (X, Y) :

$$\bar{v} = \bar{v}(X, Y), \quad p = p(X, Y), \quad \rho = \rho(X, Y) \quad (7.1.18)$$

przy czym:

$X \in [0, L]$ jest zmienną przestrzenną makroskopową,

$Y \in [0, l]$ jest zmienną przestrzenną lokalną.

W procesie homogenizacji sprowadza się przestrzenne zmienne wymiarowe (makroskopową oraz mikroskopową) do postaci bezwymiarowych i przedziały ich zmienności zawierają się w granicach $(0, 1)$:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{L}; x \in [0, 1] \\ y &= \frac{Y}{l}; y \in [0, 1] \end{aligned} \quad (7.1.19)$$

Pochodną funkcji po zmiennej makroskopowej definiuje się w postaci:

$$\frac{d}{dX} = \frac{1}{l} \left[\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right] \quad (7.1.20)$$

Pozostałe operatory różniczkowania określają wzory:

$$\nabla^2 = \frac{1}{l^2} \left[\varepsilon^2 \nabla_x^2 + 2\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial y_j} + \nabla_y^2 \right] \quad (7.1.21)$$

$$\overrightarrow{\operatorname{grad}} = \frac{1}{l} \left[\varepsilon \overrightarrow{\operatorname{grad}}_x + \overrightarrow{\operatorname{grad}}_y \right] \quad (7.1.22)$$

$$div = \frac{1}{l} [\varepsilon div_x + div_y] \quad (7.1.23)$$

Do rozwiązania zagadnienia wprowadzono wielkości bezwymiarowe:

$$Q_l = \frac{\frac{p_{\max}}{l}}{\frac{\mu \cdot v_{\max}}{l^2}} \quad (7.1.24)$$

$$R_{el} = \frac{\frac{\rho^f \cdot v_{\max}^2}{l}}{\frac{\mu \cdot v_{\max}}{l^2}} \quad (7.1.25)$$

Po podstawieniu zależności (7.1.17 - 7.1.25) do (7.1.15, 7.1.16) układ równań dla ruchu ustalonego można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} & \left[\varepsilon^2 \nabla_x^2 + 2\varepsilon \nabla_{xy}^2 + \nabla_y^2 \right] \cdot \bar{v} - \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) \cdot [\varepsilon grad_x + grad_y] \cdot [\varepsilon div_x + div_y] \cdot \bar{v} - Q_l [\varepsilon grad_x + grad_y] \cdot p \\ & = R_{el} [\varepsilon \bar{v} grad_x + \bar{v} grad_y] \cdot \bar{v} \end{aligned}$$

$$\varepsilon div_x (\rho \bar{v}) + div_y (\rho \bar{v}) = 0$$

$$f(p, \rho) = 0$$

$$\bar{v}|_{\Gamma} = 0 \quad (7.1.26)$$

$$[\bar{v}] = 0$$

$$[p] = 0$$

$$[\rho] = 0$$

Powyższy układ równań przedstawia proces przepływu cieczy ściśliwej przez ośrodek porowaty w mikroskali.

W pracy [35] przedstawiono sposób postępowania w celu określenia rzędu wielkości liczby Q_l oraz liczby R_{el} . Jeżeli przyjmiemy założenie, że ściśliwość nie zmienia ich rzędu wartości to są następujące:

$$Q_l = O(\varepsilon^{-1}), \quad R_{el} = O(\varepsilon) \quad (7.1.27)$$

gdzie litera O przed nawiasem oznacza rząd wielkości.

Poszukiwane funkcje \bar{v} , p oraz ρ przedstawiono w postaci rozwinięcia asymptotycznego względem parametru ε :

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)} + \dots \\ p &= p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)} + \dots \\ \rho &= \rho^{(0)} + \varepsilon \rho^{(1)} + \varepsilon^2 \rho^{(2)} + \dots\end{aligned}\tag{7.1.28}$$

W pracy ograniczono się do rozwinięć funkcji 2 rzędu.

Po uwzględnieniu zależności (7.1.27) w bezwymiarowym układzie równań (7.1.26) oraz wprowadzeniu rozwinięć asymptotycznych (7.1.28) poszukiwanych funkcji bezwymiarowy układ równań przyjmie postać:

$$\begin{aligned}\left[\varepsilon^2 \nabla_x^2 + 2\varepsilon \nabla_{xy}^2 + \nabla_y^2\right] \cdot \left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)}\right) - \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1\right) \cdot \left[\varepsilon \text{grad}_x + \text{grad}_y\right] \cdot \left[\varepsilon \text{div}_x + \text{div}_y\right] \cdot \\ \cdot \left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)}\right) - \varepsilon^{-1} \left[\varepsilon \text{grad}_x + \text{grad}_y\right] \cdot \left(p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)}\right) = \\ = \varepsilon \left[\varepsilon \bar{v} \text{grad}_x + \bar{v} \text{grad}_y\right] \cdot \left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)}\right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon \text{div}_x \left(\left(\rho^{(0)} + \varepsilon \rho^{(1)} + \varepsilon^2 \rho^{(2)} \right) \cdot \left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)} \right) \right) + \\ + \text{div}_y \left(\left(\rho^{(0)} + \varepsilon \rho^{(1)} + \varepsilon^2 \rho^{(2)} \right) \cdot \left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)} \right) \right) = 0\end{aligned}$$

$$f \left(\left(p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)} \right), \left(\rho^{(0)} + \varepsilon \rho^{(1)} + \varepsilon^2 \rho^{(2)} \right) \right) = 0,$$

$$\left. \left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)} \right) \right|_{\Gamma} = 0\tag{7.1.29}$$

$$\left[\left(\bar{v}^{(0)} + \varepsilon \bar{v}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{v}^{(2)} \right) \right] = 0,$$

$$\left[\left(p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)} \right) \right] = 0,$$

$$\left[\left(\rho^{(0)} + \varepsilon \rho^{(1)} + \varepsilon^2 \rho^{(2)} \right) \right] = 0.$$

Powyższy układ równań przedstawia się w postaci równań odpowiadającym najwyższemu rzędowi rozwinięcia względem parametru ε i tak:

- dla rzędu ε^{-1} otrzymano:

$$\mathit{grad}_y p^{(0)} = 0 \quad (7.1.30)$$

- dla rzędu ε^0 otrzymano:

$$\nabla_y^2 \cdot \bar{v} - \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) \mathit{grad}_y \mathit{div}_y \bar{v} - \mathit{grad}_y p^{(1)} - \mathit{grad}_x p^{(0)} = 0 \quad (7.1.31)$$

$$\mathit{div}_y \left(\rho^{(0)} \cdot \bar{v}^{(0)} \right) = 0 \quad (7.1.32)$$

$$f(p^{(0)}, \rho^{(0)}) = 0 \quad (7.1.33)$$

$$\bar{v}^{(0)} \Big|_{\Gamma} = 0 \quad (7.1.34)$$

$$\left[\bar{v}^{(0)} \right] = 0 \quad (7.1.35)$$

$$\left[p^{(0)} \right] = 0 \quad (7.1.36)$$

$$\left[\rho^{(0)} \right] = 0 \quad (7.1.37)$$

- dla rzędu ε^1 otrzymano:

$$\nabla_y^2 \cdot \bar{v}^{(1)} + 2\nabla_{xy}^2 \bar{v}^{(0)} - \left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) \left[\mathit{grad}_x \mathit{div}_y \bar{v}^{(0)} + \mathit{grad}_y \mathit{div}_x \bar{v}^{(0)} + \mathit{grad}_y \mathit{div}_y \bar{v}^{(1)} \right] - \quad (7.1.38)$$

$$- \mathit{grad}_y p^{(2)} - \mathit{grad}_x p^{(1)} = \rho^{(0)} \bar{v}^{(0)} \cdot \mathit{grad}_y \bar{v}^{(0)}$$

$$\mathit{div}_y \left(\rho^{(0)} \bar{v}^{(1)} + \rho^{(1)} \bar{v}^{(0)} \right) + \mathit{div}_x \left(\rho^{(0)} \bar{v}^{(0)} \right) = 0 \quad (7.1.39)$$

$$p^{(1)} \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)^{(0)} + \rho^{(1)} \left(\frac{\partial f}{\partial p} \right)^{(0)} = 0 \quad (7.1.40)$$

$$\bar{v}^{(1)} \Big|_{\Gamma} = 0 \quad (7.1.41)$$

$$\left[\bar{v}^{(1)} \right] = 0 \quad (7.1.42)$$

$$\left[p^{(1)} \right] = 0 \quad (7.1.43)$$

$$\left[\rho^{(1)} \right] = 0 \quad (7.1.44)$$

Rozpatrując równanie (7.1.30) oraz uwzględniając warunek periodyczności (7.1.36) można dojść do wniosku, że funkcja $p^{(0)}$ nie zależy od zmiennej lokalnej y , zależy natomiast od zmiennej makroskopowej x :

$$p^{(0)} = p^{(0)}(x) \quad (7.1.45)$$

Rozpatrując równanie (7.1.33) oraz uwzględniając (7.1.37) można dojść do wniosku, że również funkcja $\rho^{(0)}$ nie zależy od zmiennej lokalnej, zależy od zmiennej makroskopowej x :

$$\rho^{(0)} = \rho^{(0)}(x) \quad (7.1.46)$$

Uwzględnienie powyższej zależności w równaniu (7.1.32) prowadzi do jego uproszczenia:

$$\operatorname{div}_y \left(\bar{v}^{(0)} \right) = 0 \quad (7.1.47)$$

Równanie to sprowadza się w skali mikro do równania ciągłości cieczy nieściśliwej.

Korzystając z (7.1.47) równanie (7.1.31) zapisać można w postaci:

$$\nabla_y^2 \cdot \bar{v} - \operatorname{grad}_y p^{(1)} - \operatorname{grad}_x p^{(0)} = 0 \quad (7.1.48)$$

bowiem człon

$$\left(\frac{\lambda}{\mu} + 1 \right) \operatorname{grad}_y \operatorname{div}_y \bar{v} = 0$$

Równanie (7.1.48) przedstawia przepływ płynu nieściśliwego przez ośrodek porowaty.

Uwzględniając powyższe zależności układ równań rzędu ε^0 można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} \nabla_y^2 \cdot \bar{v} - \operatorname{grad}_y p^{(1)} - \operatorname{grad}_x p^{(0)} &= 0 \\ \operatorname{div}_y \bar{v}^{(0)} &= 0 \\ \bar{v}^{(0)} \Big|_{\Gamma} &= 0 \\ \left[p^{(0)} \right] &= 0 \\ \left[\rho^{(0)} \right] &= 0 \\ \left[p^{(1)} \right] &= 0 \end{aligned} \quad (7.1.49)$$

Rozwiązaniem tego układu równań są:

$$\begin{aligned} \bar{v}^{(0)} &= -k(y) \text{grad}_x p^{(0)} \\ p^{(1)} &= \bar{\tau}(y) \text{grad}_x p^{(0)} + \tilde{p}^{(1)}(x) \end{aligned} \quad (7.1.50)$$

gdzie:

$k(y)$ - tensor funkcji zmiennej lokalnej y ,

$\bar{\tau}(y)$ - wektor funkcji zmiennej lokalnej y ,

$\tilde{p}^{(1)}(x)$ - funkcja zależna od zmiennej makroskopowej x .

Pierwsze rozwiązanie (7.1.50) w zapisie składowych wektora prędkości przyjmuje postać:

$$v_i^{(0)} = -k_{ij}(y) \frac{\partial p^{(0)}}{\partial x_j} \quad (7.1.51)$$

Równanie to stanowi opis matematyczny przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty w mikroskali dla ośrodka ekwiwalentnego – jednorodnego.

Równanie (7.1.51) można przedstawić w postaci zmiennych fizycznych:

$$\begin{aligned} \frac{v_i^{f(0)}}{v_{\max}} &= -k_{ij}(y) \frac{\partial \frac{p^{f(0)}}{p_{\max}}}{\partial \frac{X_j}{L}} \\ v_i^{f(0)} &= -k_{ij}(y) \frac{v_{\max}}{p_{\max}} L \frac{\partial p^{f(0)}}{\partial X_j} \end{aligned}$$

Dzieląc oraz mnożąc przez $\mu \cdot l$ otrzymano:

$$v_i^{f(0)} = \frac{-k_{ij}(y)}{\mu} \frac{v_{\max} \cdot \mu}{p_{\max} \cdot l} \cdot l \cdot L \frac{\partial p^{f(0)}}{\partial X_j} \quad (7.1.52)$$

Wprowadzając (7.1.24) oraz (7.1.4) do (7.1.52) otrzymano:

$$v_i^{f(0)} = \frac{-k_{ij}(y)}{\mu} Q_l^{-1} \cdot \varepsilon^{-1} \cdot l^2 \cdot \frac{\partial p^{f(0)}}{\partial X_j} \quad (7.1.53)$$

Po uwzględnieniu rzędu wielkości liczby Q_l równanie (7.1.53) przyjmie postać:

$$v_i^{f(0)} = -k_{ij}(y) \cdot \frac{l^2}{\mu} \cdot \frac{\partial p^{f(0)}}{\partial X_j} \quad (7.1.54)$$

Uśredniając równanie (7.1.54) ze względu na bezwymiarową współrzędną y otrzymano:

$$\langle v_i^{f(0)} \rangle = -\langle k_{ij}(y) \rangle \cdot \frac{l^2}{\mu} \cdot \frac{\partial p^{f(0)}}{\partial X_j} \quad (7.1.55).$$

Oznaczenie w nawiasach $\langle \rangle$ oznacza wartość średnią liczoną według wzoru:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} f dv \quad (7.1.56)$$

Równanie (7.1.55) można zapisać w postaci:

$$\langle v_i^{f(0)} \rangle = -\tilde{k}_{ij} \cdot \frac{\partial p^{f(0)}}{\partial X_j} \quad (7.1.57)$$

gdzie:

\tilde{k}_{ij} - tensor drugiego rzędu przepuszczalności filtracyjnej.

Równanie (7.1.57) stanowi model matematyczny przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty w makroskali. Jest ono prawem filtracji Darcy'ego [40].

Wartości liczbowe tensora filtracji są rzędu:

$$\tilde{k}_{ij} \approx O\left(\frac{l^2}{\mu}\right) \quad (7.1.58)$$

gdzie litera O w równaniu (7.1.58) oznacza, że chodziło o rząd wielkości.

\tilde{k}_{ij} jest wartością średnią $\left\langle \left(\frac{l^2}{\mu} \right) k_{ij}(y) \right\rangle$ zależną od struktury pora.

Wartości liczbowe współczynnika przepuszczalności K dla ciała jednorodnego będą rzędu:

$$K \approx O(l^2) \quad (7.1.60)$$

Zastosowanie teorii homogenizacji umożliwiło wyprowadzenie prawa przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty (niejednorodny) w mikroskali traktując go jako ciało jednorodne w skali makro.

Równanie Darcy'ego zapisane w postaci:

$$v = -k \text{ grad } H = -\frac{K \rho g}{\mu} \text{ grad } H \quad (7.1.61)$$

gdzie:

k - współczynnik filtracji; m/s,

μ - lepkość dynamiczna płynu; Pa·s,

ρ - gęstość płynu; kg/m³,

H - wysokość rozporządzalna: $H = p/\rho g + z$

$\text{grad } H$ - spadek hydrauliczny

wyprowadzono doświadczalnie dla przepływu płynu nieściśliwego przez złożę porowate, przy czym wysokość rozporządzalna uzależniona jest od gęstości płynu. Dla płynu nieściśliwego możliwe było przyjęcie następującego uproszczenia:

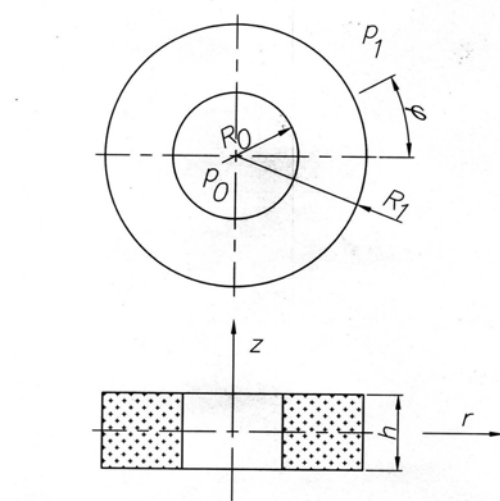
$$v = -k \text{ grad } H = -\frac{K \rho g}{\mu} \text{ grad } \frac{p}{\rho g} = -\frac{K}{\mu} \text{ grad } p \quad (7.1.62)$$

Przeprowadzenie procesu homogenizacji pozwoliło na wyprowadzenie prawa przepływu dla płynu ściśliwego przez złożę porowate. Okazało się, że końcowa postać równania przepływu płynu ściśliwego pokrywa się z równaniem (7.1.62) opisującym przepływ płynu nieściśliwego.

Na podstawie teorii homogenizacji oszacowano, że rząd wielkości współczynnika przepuszczalności, dla przepływu płynu ściśliwego, jest proporcjonalny do kwadratu średniej średnicy porów. Znając wartości współczynnika przepuszczalności, na podstawie wzoru (7.1.60), będzie można oszacować rząd wielkości średniej średnicy porów.

7.2. Model przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty w kształcie pierścienia

Przepływ przez materiał uszczelnienia potraktowano jako zagadnienie przepływu płynu ściśliwego przez pierścieniową warstwę porowatą o wysokości h i promieniach r_0 i r pod wpływem różnicy ciśnień p_0 i p_1 . Przyjęto cylindryczny układ współrzędnych (r, φ, Z) (rys. 23).



Rys. 23. Uszczelnienie spoczynkowe jako warstwa porowata.

Równania wyjściowe opisujące przepływ płynu ściśliwego:

- prawo przepływu płynu ściśliwego przez ośrodek porowaty:

$$v = -\frac{K}{\mu} \text{grad } p \quad (7.2.1)$$

gdzie:

K - współczynnik przepuszczalności; m^2 ,

μ - lepkość dynamiczna płynu; $\text{Pa}\cdot\text{s}$,

- równanie ciągłości dla płynu ściśliwego:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (7.2.2)$$

We współrzędnych cylindrycznych równanie (7.2.2) przybiera postać [41]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \rho \frac{v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_\varphi)}{r \partial \varphi} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (7.2.3)$$

Założenia:

- przepływ ustalony $\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} = 0$,
- współczynnik przepuszczalności jest stały $K = const$,
- przepływ izotermiczny $\Rightarrow \mu = const$
- z równania gazu doskonałego:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} = \frac{p_1}{\rho_1} = const \quad \Rightarrow \quad \rho = p \frac{\rho_1}{p_1} = p a$$

a - stała

- ruch odbywa się tylko w kierunku promieniowym $\Rightarrow v_\varphi = v_z = 0$, więc prędkość promieniowa v_r cząstek gazu zgodnie z (7.2.1) jest równa:

$$v_r = -\frac{K \partial p}{\mu \partial r} \quad (7.2.4)$$

Przyjęte założenia upraszczają równanie (7.2.3) do postaci:

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \rho \frac{v_r}{r} = 0 \quad (7.2.5)$$

Po podstawieniu zależności (7.2.4) do (7.2.5) otrzymamy:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\rho \frac{K \partial p}{\mu \partial r} \right) + \frac{\rho K \partial p}{r \mu \partial r} = 0 \quad (7.2.6)$$

$$\frac{K}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\rho \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\rho \partial p}{r \partial r} \right] = 0,$$

Ponieważ $\frac{K}{\mu} \neq 0$ zatem można zapisać:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\rho \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\rho}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (7.2.7)$$

Podstawiając $\rho = a p$ do (6.2.7), otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(a p \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{a p}{r} \frac{\partial p}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(p \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{p}{r} \frac{\partial p}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \quad (7.2.8)$$

Rozwiązując (7.2.8) przez podstawienie:

$$z = p \frac{\partial p}{\partial r} \quad (7.2.9)$$

dochodzimy do postaci:

$$\frac{\partial z}{\partial r} + \frac{z}{r} = 0 \quad (7.2.10)$$

Rozwiązaniem (7.2.10) jest funkcja:

$$z = \frac{C_1}{r} \quad (7.2.11)$$

Wstawiając (7.2.11) do (7.2.9), otrzymamy:

$$\begin{aligned} p \frac{\partial p}{\partial r} &= \frac{C_1}{r} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial(p^2)}{\partial r} &= \frac{C_1}{r} \\ \partial(p^2) &= \frac{C_2}{r} \partial r \end{aligned} \quad (7.2.12)$$

Rozwiązaniem (7.2.12) jest funkcja:

$$p = \sqrt{C_2 \ln(r) + C_3} \quad (7.2.13)$$

Stałe C_2 i C_3 wyznaczono z warunków brzegowych:

$$\begin{aligned} r = R_0 &\rightarrow p = p_0 \\ r = R_1 &\rightarrow p = p_1 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} C_2 &= \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln(R_1/R_0)} \\ C_3 &= \frac{p_0^2 \ln R_1 - p_1^2 \ln R_0}{\ln(R_1/R_0)} \end{aligned} \quad (7.2.14)$$

Po podstawieniu stałych C_2 i C_3 do (7.2.13) otrzymano:

$$p = \sqrt{\frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln(R_1/R_0)} \ln(r) + \frac{p_0^2 \ln R_1 - p_1^2 \ln R_0}{\ln(R_1/R_0)}} \quad (7.2.15)$$

Otrzymana zależność przedstawia rozkład ciśnienia po promieniu porowatej warstwy pierścieniowej podczas przepływu płynu ściśliwego przy przyjętych założeniach upraszczających. Wstawiając (7.2.15) do (7.2.4), wyznaczono prędkość promieniową przepływu:

$$\begin{aligned} v_r &= -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sqrt{C_2 \ln(r) + C_3} \right) \\ v_r &= -\frac{K}{\mu} \frac{C_2}{2r \sqrt{C_2 \ln(r) + C_3}} \end{aligned} \quad (7.2.16)$$

Strumień masy gazu przepływający przez porowatą warstwę pierścieniową obliczyć można z wyrażenia:

$$\begin{aligned} q_m &= \rho \cdot 2\pi r \cdot h \cdot v_r = -\frac{2\pi h K \rho}{\mu} \frac{C_2}{2r \sqrt{C_2 \ln(r) + C_3}} = \\ &= -\frac{\pi h K \rho}{\mu} \frac{C_2}{\sqrt{C_2 \ln(r) + C_3}} \end{aligned} \quad (7.2.17)$$

Ponieważ dla przepływu izotermicznego $\rho = p \frac{\rho_1}{p_1}$ wówczas po uwzględnieniu (7.2.13),

otrzymano:

$$\begin{aligned} q_m &= -\frac{\pi h K}{\mu} \frac{\rho_1}{p_1} \frac{p \cdot C_2}{\sqrt{C_2 \ln(r) + C_3}} = \\ &= -\frac{\pi h K}{\mu} \frac{\rho_1}{p_1} \frac{C_2 \cdot \sqrt{C_2 \ln(r) + C_3}}{\sqrt{C_2 \ln(r) + C_3}} = \\ &= -C_2 \frac{\pi h K}{\mu} \frac{\rho_1}{p_1} \end{aligned} \quad (7.2.18)$$

Podstawiając (7.2.14) za wielkość stałej C_2 otrzymano wzór określający strumień masy przez pierścieniową warstwę porowatą:

$$q_m = -\frac{\pi h K}{\mu} \frac{\rho_1}{p_1} \frac{p_1^2 - p_0^2}{\ln(R_1/R_0)} = \frac{\pi h K}{\mu} \frac{\rho_1}{p_1} \frac{p_0^2 - p_1^2}{\ln(R_1/R_0)} \quad (7.2.19)$$

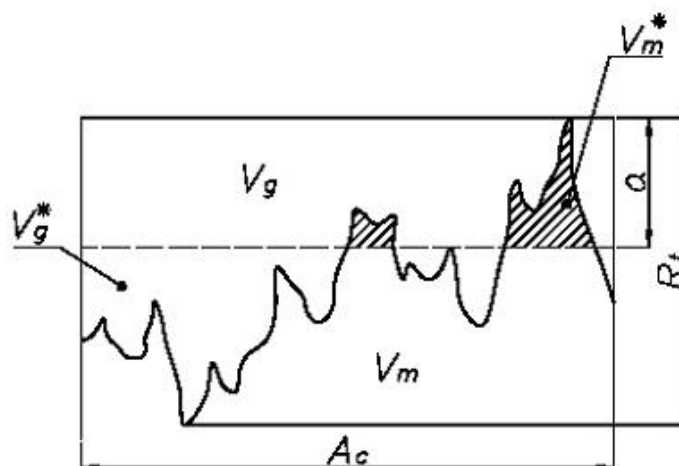
lub w prostszej formie

$$q_m = \frac{\pi h K}{\mu} \frac{1}{R \cdot T} \cdot \frac{p_0^2 - p_1^2}{\ln(R_1/R_0)} \quad (7.2.20)$$

Wzór (7.2.20) stanowi opis matematyczny przepływu płynu ściśliwego przez pierścieniowe złożo porowate utworzone przez uszczelnienie. Znajomość wartości wycieku na wskroś uszczelnienia, wyznaczonej podczas badań dla określonego nacisku roboczego, oraz zmiany grubości uszczelnienia h w zależności od tego samego nacisku pozwoli na obliczenie współczynnika przepuszczalności K z powyższej zależności. Znajomość współczynnika przepuszczalności pozwoli na prognozowanie wartości wycieku na wskroś materiału niezależnie od wymiarów uszczelnienia i od utrzymywanej różnicy ciśnień.

7.3. Paradoks stałości wycieku podczas odciażania uszczelnienia

Strukturę obszaru styku, powierzchnia kołnierza – uszczelnienie, można scharakteryzować za pomocą dwóch wskaźników: objętości V_g^* wszystkich dolin profilu niewypełnionych przez materiał uszczelnienia oraz objętości V_m^* nierówności powierzchni kołnierza wciśniętych w materiał uszczelnienia (rys. 24).



Rys. 24. Przykładowy profil chropowatej powierzchni kołnierza, a – zbliżenie powierzchni kołnierza i uszczelnienia, R_t – maksymalna wysokość profilu, V_m – objętość zajmowana przez nierówności powierzchni, V_g – objętość przestrzeni zawartej pomiędzy profilem a liniami ograniczającymi wysokość profilu

Objętość V_g^* niewypełnionych dolin będzie tym mniejsza im iloraz D będzie bliższy jedności. Iloraz D oblicza się ze wzoru:

$$D = \frac{V_m}{V_m + V_g} \quad (7.3.1)$$

Przemieszczenie powierzchni kołnierza o wartość „ a ” względem powierzchni uszczelnienia powoduje zmniejszenie objętości V_g do V_g^* :

$$V_m - V_m^* + V_g^* = A_c \cdot (R_t - a) = A_c \cdot R_t \cdot (1 - \varepsilon) \quad (7.3.2)$$

gdzie:

A_c – powierzchnia nominalna styku kołnierza z uszczelnieniem,

ε - zbliżenie względne powierzchni, $\varepsilon = \frac{a}{R_t}$.

Równanie (7.3.1) można zapisać w postaci:

$$D = \frac{V_m - V_m^*}{A_c \cdot R_t \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (7.3.3)$$

Porównując równanie (7.3.3) z równaniem (7.3.2) wyprowadzić można zależność pozwalającą określić wskaźnik V_g^* - objętości dolin niewypełnionych przez materiał uszczelnienia.

$$V_g^* = A_c \cdot (R_t - a) \cdot (1 - D) \quad (7.3.4)$$

Z kolei objętość nierówności V_m^* powierzchni wciśniętych w materiał uszczelnienia wyznaczono z zależności:

$$V_m^* = A_c \cdot R_t \cdot z \cdot \frac{\varepsilon^{\nu+1}}{\nu+1} \quad (7.3.5)$$

gdzie:

z , ν - stałe krzywej nośności profilu powierzchni kołnierza

Ze wzorów (7.3.4) oraz (7.3.5) wynika, że objętość nierówności V_m^* wciśniętych w materiał uszczelnienia wzrasta szybciej wraz ze wzrostem zbliżenia względnego ε - niż spadek objętości dolin niewypełnionych przez materiał uszczelnienia.

Zbliżenie względne ε stykających się powierzchni można obliczyć ze wzoru:

$$\varepsilon = \left(\frac{3 \cdot \pi}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{r}{R_t}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1 - \theta^2}{E}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{N}{A_c}\right)^{\frac{2}{3}} - \frac{1 - \nu}{\nu \cdot (z \cdot \nu)^{\frac{1}{\nu-1}}} \quad (7.3.6)$$

gdzie:

r - średni promień zaokrąglenia wierzchołków nierówności,

θ , E - odpowiednio współczynnik Poisson'a i moduł Young'a

N - przyłożone do uszczelnienia obciążenie.

Korzystając z zależności (7.3.6) oraz przy założeniu, że uszczelnienia będą ściskane przez powierzchnie o tej samej chropowatości udowodniono, że przyrost zbliżenia powierzchni niezbędny do tego aby przejść z klasy szczelności $L_{1,0}$ do klasy $L_{0,1}$ jest zaledwie kilkuprocentowy, natomiast objętość V_m^* nierówności powierzchni kołnierza wciśniętych w powierzchnię uszczelnienia szybciej wzrasta niż zbliżenie. Ponadto wykazano, że do uzyskania tego samego poziomu wycieku należy wywrzeć większy nacisk stykowy podczas obciążania uszczelnienia niż przy jego odciążaniu.

Dla powierzchni toczonych wykonanych w klasie 6 stałe z , ν krzywej nośności wynoszą odpowiednio 1,4 oraz 2,0 [42]. Ostatni człon równania (7.3.6) przyjmie zatem wartość $-0,18$. Jeżeli analizowane uszczelnienie będzie ściskane przez te same powierzchnie kołnierzy, to wówczas iloczyn dwóch pierwszych członów równania (7.3.6) pozostanie stałą wartością. Aby wyjaśnić dlaczego wyciek pozostaje stały jeżeli podczas odciażania uszczelnienia nacisk maleje wystarczy wykazać, iż objętość dolin niewypełnionych przez materiał uszczelnienia nie zmienia się znacząco.

Z przeprowadzonych badań wynika, że osiągnięcie klasy szczelności $L_{1,0}$ wymaga podczas obciążania i odciażania uszczelnienia wywołania odpowiedniego nacisku dla uszczelnienia z materiału AF – 200: $p_{c1} = 18$ MPa, $p_{c2} = 8$ MPa. W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że zbliżenie względne powierzchni będzie zmieniało się wraz ze zmianą przyłożonego nacisku tak, jak zmienia się następujący iloczyn ze wzoru (7.3.6)

$$\varepsilon = C \cdot \left(\frac{1 - \theta^2}{E} \right)^{2/3} \cdot (p_c)^{2/3}$$

Jeżeli zatem zbliżenie względne ε ma być podobne przy obciążeniu i odciażeniu uszczelnienia to stosunek iloczynu tych wielkości musi być zbliżony do jedności. Z obliczeń wynika:

$$\left(\frac{p_{c1}}{p_{c2}} \right)^{2/3} = \left(\frac{18}{8} \right)^{2/3} = 1,71, \quad \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{2/3} = \left(\frac{182}{434} \right)^{2/3} = 0,56 \text{ i stąd}$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 0,96$$

Okazało się, że zbliżenie względne powierzchni kołnierza i uszczelnienia pozostałe stałe przy obu wartościach nacisku stykowego głównie za sprawą nieliniowości materiału uszczelnienia.

Zwiększenie poziomu szczelności z klasy $L_{1,0}$ do $L_{0,1}$ wymaga zwiększenia wartości nacisku stykowego z 18 MPa do 30 MPa w uszczelnieniu wykonanego z tego samego (AF – 200) materiału. Przyrost zbliżenia względnego wyniósł zaledwie 0,02 natomiast objętość wciśniętego materiału powierzchni kołnierza w uszczelnienie wzrosła o 0,14. Świadczy to o wzroście odkształcenia materiału uszczelnienia i wynikającym z tego zmniejszeniu porowatości.

8. Wyniki badań i ich analiza

Przedmiotem badań były uszczelnienia wykonane z dwóch materiałów wyprodukowanych przez różnych producentów. Pierwszy materiał o nazwie Parogambit wyprodukowano na bazie włókien węglowych z niewielką domieszką włókien aramidowych, matrycę stanowiła guma NBR. Drugi materiał o nazwie FA – 150 wyprodukowano na bazie włókien szklanych z niewielką domieszką włókien aramidowych oraz gumy NBR.

8.1. Wyciek całkowity oraz wyciek na wskroś z połączenia kołnierzonego

Badania nad określeniem wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś prowadzono na stanowisku badawczym opisanym w rozdziale 6. Każde z badanych uszczelnień posiadało swój numer składający się z liter i cyfr. Pierwszą cyfrą oznaczono numer kolejny badanego uszczelnienia, drugą literą oznaczono typ badanego wycieku „c” – wyciek całkowity, „w”- wyciek na wskroś, trzecią cyfrą oznaczono nadciśnienie w komorze badawczej. Przykładowo, symbolem 2c4 oznaczono drugą próbkę dla badania wycieku całkowitego przy nadciśnieniu azotu w komorze 4 MPa. Karty pomiarowe przedstawiono w załączniku nr 1. Do każdego rodzaju badań użyto po 4 uszczelnienia. Dane otrzymane z pomiarów wstawiano do wzoru (6.1.1.1) w celu obliczenia wycieku azotu z uszczelnienia. Dla każdego nacisku obliczono odpowiadający mu wyciek po czym punkty pomiarowe przedstawiono na wykresie w układzie podwójnie logarytmicznym. Zwyczajowo w technice uszczelniania, na wykresach, wyciek przedstawia się na osi odciętych, zaś nacisk na powierzchnię uszczelnienia na osi rzędnych. Badania prowadzono przy nadciśnieniu azotu 2 oraz 4 MPa w kołnierzu; dla nadciśnienia 2 MPa punkty oznaczono kolorem niebieskim zaś dla nadciśnienia 4 MPa punkty pomiarowe oznaczono kolorem czerwonym. Nacisk na powierzchnię uszczelnienia podczas badań obliczano znając wartości sił napięcia w śrubach, oraz średnice wewnętrzną oraz zewnętrzną uszczelnienia.

Poniżej przedstawiono tok obliczeniowy dla drugiego kroku w uszczelnieniu wykonanym z materiału o nazwie Parogambit i oznaczonym symbolem 1c2. Średnia wartość średnicy wewnętrznej wynosiła $D_w = 113,24$, mm, zaś średnicy zewnętrznej $D_z = 153,00$, mm. Całkowita siła działająca na powierzchnię uszczelnienia przed wypełnieniem kołnierza

azotem była równa $F_m = 270,6$, kN. Po wypełnieniu złącza azotem o ciśnieniu $p = 2$ MPa (zgodnie z wzorem 2.5), siła działająca na powierzchnię uszczelnienia spadnie o wartość:

$$F_p = p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_w^2 = 2 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot 113,24^2 = 20132, \text{ N}$$

Całkowita siła robocza (zacisku resztkowego) działająca na powierzchnię uszczelnienia wynosi:

$$F_z = F_m - F_p = 270,6 - 20,1 = 250,5 \text{ kN}$$

Nacisk roboczy na powierzchnię uszczelnienia obliczyć można ze wzoru:

$$\sigma_r = \frac{F_z}{A_u} = \frac{F_z}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_z^2 - D_w^2)} = \frac{4 \cdot 250,5 \cdot 10^3}{3,14 \cdot (153,00^2 - 113,24^2)} = 30,1 \text{ MPa}$$

Dane potrzebne do obliczenia wycieku sprowadzonego do warunków normalnych dla nacisku 30,1 MPa:

p_a – ciśnienie atmosferyczne, $p_a = 99600$, Pa;

h_1 – początkowa wysokość słupa wody $h_1 = 521$, mm;

h_2 – wysokość słupa wody po otwarciu zaworu $h_2 = 495$, mm;

h_3 – wysokość słupa wody po 30 minutach, $h_3 = 383$, mm;

C_1 – wskazanie na biurecie na początku, $C_1 = 50$, cm³;

C_2 – wskazanie na biurecie po otwarciu zaworu, $C_2 = 47,5$, cm³;

C_3 – wskazanie na biurecie po 30 minutach, $C_3 = 36,7$, cm³;

p_3 – ciśnienie w rurce przy wysokości h_3 , $p_3 = p_a - g \cdot h_3 \cdot \rho = 99600 - 9,81 \cdot 383 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 99600 - 3757 = 95843$, Pa;

p_2 – ciśnienie w rurce przy wysokości h_2 , $p_2 = p_a - g \cdot h_2 \cdot \rho = 99600 - 9,81 \cdot 495 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 99600 - 4855 = 94745$, Pa;

T_a – temperatura otoczenia, $T_a = 295,6$ K;

p_S – ciśnienie normalne, $p_S = 101300$, Pa;

T_S – temperatura normalna, $T_S = 273,15$, K,

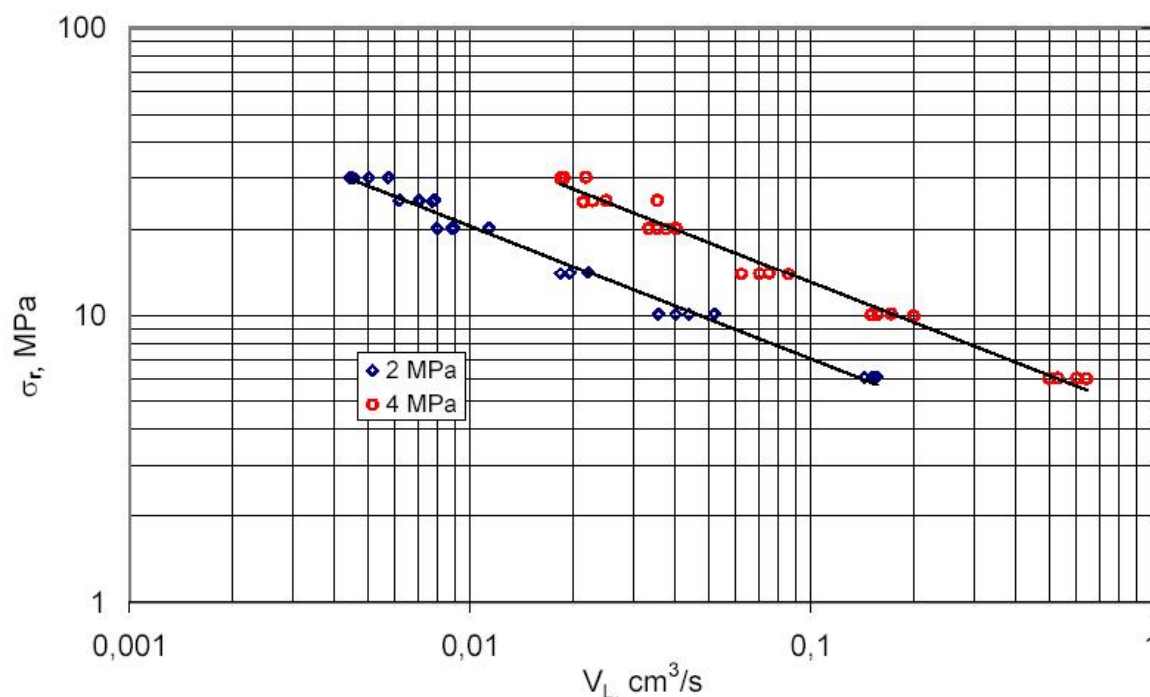
ρ - gęstość wody, $\rho = 1000$, kg·m⁻³.

t – czas trwania pomiaru, $t = 30$, min.

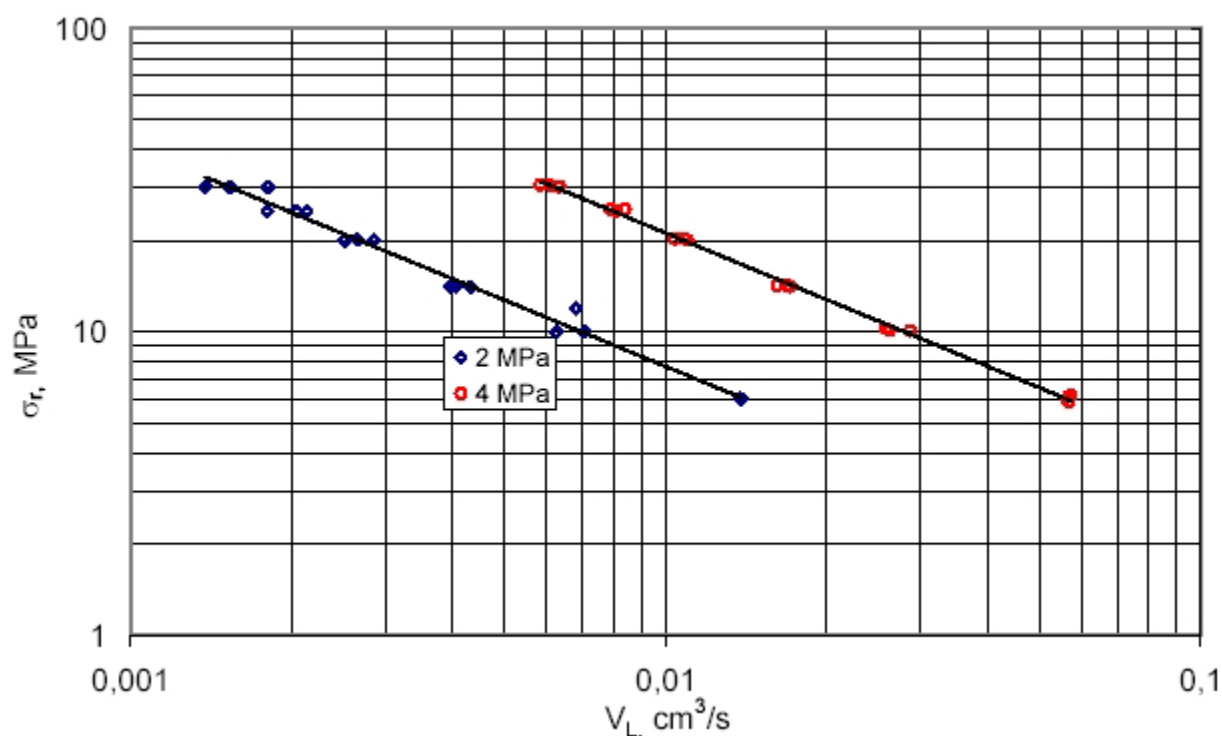
Wyciek dla podanych powyżej danych obliczono ze wzoru (6.1.1.1):

$$\begin{aligned}
 V_{LS} &= \left\{ \left[\frac{(p_a - \rho \cdot g \cdot h_2) \cdot (C_1 - C_2)}{\rho \cdot g \cdot h_2} \right] \cdot p_a \cdot \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_3} \right) + (C_2 - C_3) \right\} \cdot \frac{p_3 \cdot T_s}{p_s \cdot T_a \cdot t} = \\
 &= \left\{ \left[\frac{(99600 - 4855) \cdot (50 - 47,5)}{4855} \right] \cdot 99600 \cdot \left(\frac{1}{94745} - \frac{1}{95843} \right) + (47,5 - 36,7) \right\} \cdot \frac{95843 \cdot 273,15}{101300 \cdot 295,6 \cdot 30 \cdot 60} = \\
 &= \frac{9,96}{30 \cdot 60} = 0,00553, \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Na rys. 25 przedstawiono zależność wycieku całkowitego z uszczelnienia wykonanego z materiału Parogambit od nacisku roboczego dla ciśnienia 2 oraz 4 MPa w komorze badawczej. Charakterystyki uszczelnień są względem siebie równoległe a obniżanie nacisku powoduje wzrost wycieku. Na rys. 26 przedstawiono zależność wycieku całkowitego od nacisku roboczego dla materiału FA – 150. Podobnie jak dla materiału Parogambit charakterystyki uszczelnienia dla różnych wartości nadciśnienia w komorze są do siebie równoległe.



Rys. 25. Zależności wycieku całkowitego od nacisku roboczego dla materiału Parogambit przy nadciśnieniu w komorze badawczej 2 oraz 4 MPa.

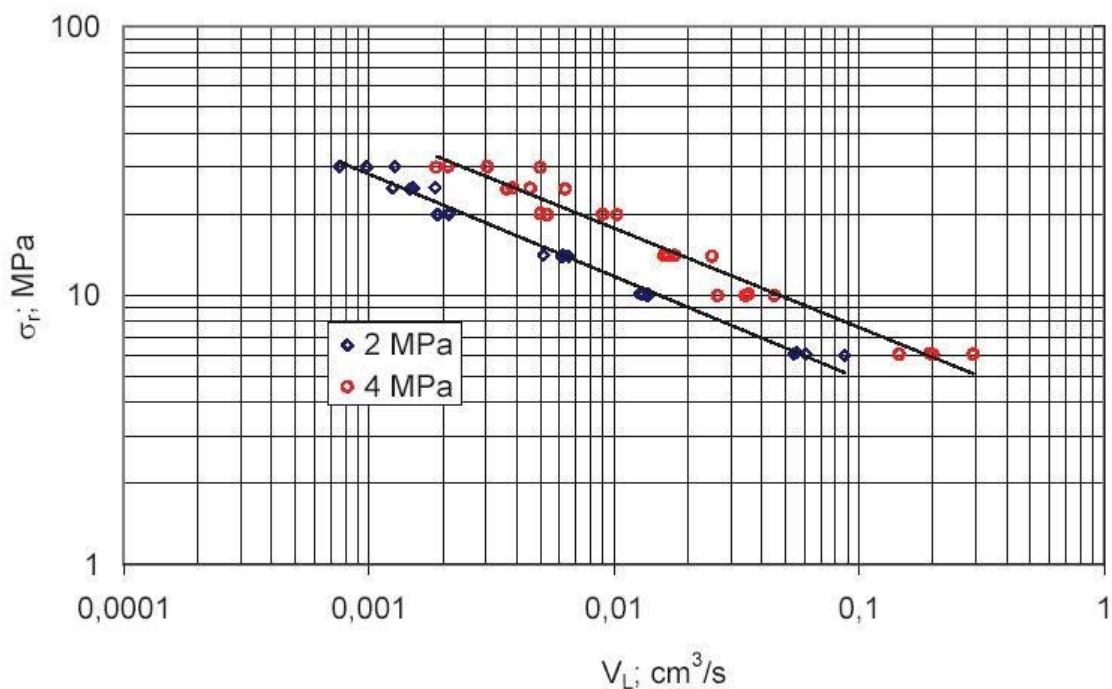


Rys. 26. Zależność wycieku całkowitego od nacisku roboczego dla materiału FA – 150 przy naciśnieniu 2 oraz 4 MPa w komorze

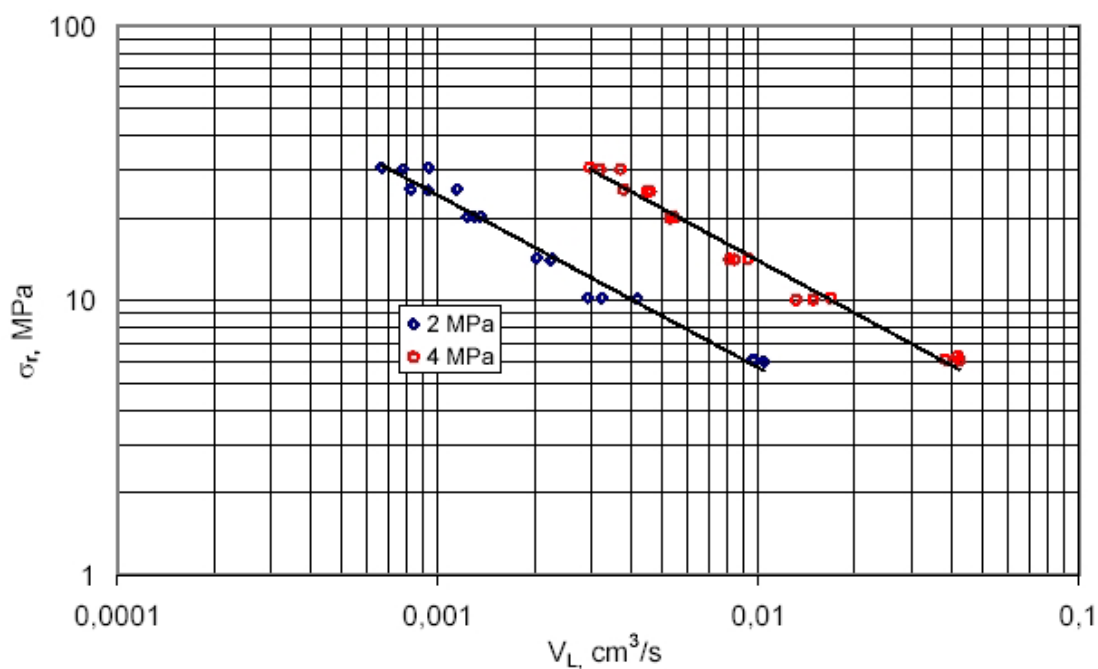
Z porównania obu wykresów wynika, że wyciek całkowity z uszczelnień wykonanych z materiału FA – 150 jest o rząd wielkości mniejszy aniżeli z uszczelnienia wykonanego z materiału Parogambit.

Wyciek na wskroś materiału spowodowany jest jego porowatą strukturą i zależy od wielkości porów otwartych oraz od utrzymywanej różnicy ciśnień. Zmieniając nacisk na powierzchnię uszczelnienia zmienia się grubość materiału a co za tym idzie zmieniają się również wymiary porów, więc dla tego samego materiału, pod wpływem takiej samej wartości nacisku, średnia wielkość porów musi być zatem podobna. Oznacza to, że o wartości średniej średnicy porów decyduje nacisk na powierzchnię uszczelnienia. Dla podobnej wartości nacisku o wycieku decyduje więc tylko wartość naciśnienia w komorze badawczej i charakterystyki uszczelnienia dla różnych wartości utrzymywanego naciśnienia muszą być do siebie równoległe. Słuszność takiego rozumowania potwierdzają wyniki badań nad określeniem wycieku na wskroś. Na rys. 27 przedstawiono zależność wycieku na wskroś materiału od nacisku roboczego na powierzchnię uszczelnienia dla materiału Parogambit, zaś na rys. 28 dla materiału FA - 150. Dla obu materiałów charakterystyki przy różnych

wartościach nadciśnienia w komorze są do siebie równoległe. Powiększenie porów wywołane spadkiem nacisku na uszczelnienie powoduje wzrost wycieku.



Rys. 27. Zależność wycieku na wskroś materiału od nacisku roboczego dla materiału Parogambit.



Rys. 28. Zależność wycieku na wskroś materiału od nacisku roboczego dla materiału o nazwie FA – 150.

Porównanie wyników badań dla nacisku 6 MPa pozwala zauważyć, że wyciek na wskroś z uszczelnień wykonanych z materiału FA – 150 jest o rząd wielkości mniejszy niż z uszczelnień wykonanych z materiału Parogambit.

Wyciek całkowity stanowi sumę wycieku pomiędzy powierzchniami uszczelnienia oraz powierzchniami kołnierzy oraz wycieku na wskroś materiału. Wyciek pomiędzy powierzchniami kołnierzy a powierzchniami uszczelnienia również traktować można jako przepływ przez złożę porowate (Rozdział 4). Niewypełnione doliny w profilu powierzchni kołnierzy, utworzone w wyniku obróbki, przez materiał uszczelnienia traktować można jako pory, których wielkość zależy od wywartego nacisku stykowego. Podobnie jak dla wycieku na wskroś, wartość wycieku całkowitego dla podobnej wartości nacisku zależy tylko od utrzymywanej różnicy ciśnień. Równoległość charakterystyk wycieku całkowitego świadczy o słuszności takiego rozumowania.

Odniesienie wycieku na wskroś do wycieku całkowitego dla materiału o nazwie Parogambit przedstawiono w tabeli 2. Procentowy udział wycieku na wskroś w wycieku całkowitym wzrasta wraz ze spadkiem wartości nacisku stykowego na powierzchnię uszczelnienia; dla nacisku $\sigma_r = 6$ MPa wynosi on około 37 %. W tabeli 3 przedstawiono procentowy udział wycieku na wskroś w wycieku całkowitym dla materiału FA – 150. Podobnie jak w materiale Parogambit procentowy udział wycieku na wskroś w wycieku całkowitym wzrasta wraz ze spadkiem wartości nacisku stykowego. Dla nacisku $\sigma_r = 6$ wynosi on aż 65 %. Takie zachowanie badanych materiałów oznacza, że zmniejszaniu nacisku towarzyszy szybki wzrost średnicy porów wewnątrz materiału. Natomiast przepuszczalność warstwy porowatej utworzonej ze styku nierówności powierzchni kołnierzy z powierzchnią uszczelnienia znacznie wolniej ulega zmianie. Przyczyną takiego zachowania się jest to, że objętość nierówności powierzchni kołnierza wciśniętych w powierzchnię uszczelnienia szybciej wzrasta aniżeli zbliżenie tych powierzchni.

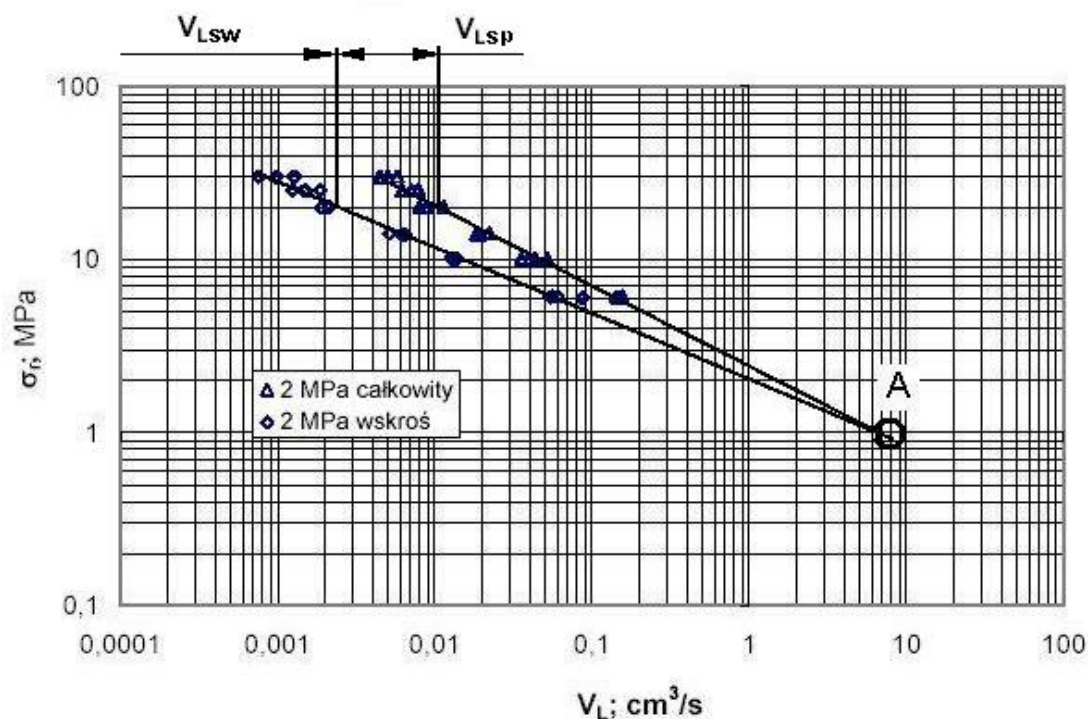
Tabela 2. Porównanie udziału wycieku na wskroś materiału do wycieku całkowitego dla materiału Parogambit

Nacisk σ_r , MPa	6	10	14	20	25	30
$\left(\frac{V_{LSW}}{V_{LSC}} \right) \cdot 100, \%$	37	29	25	21	19	17

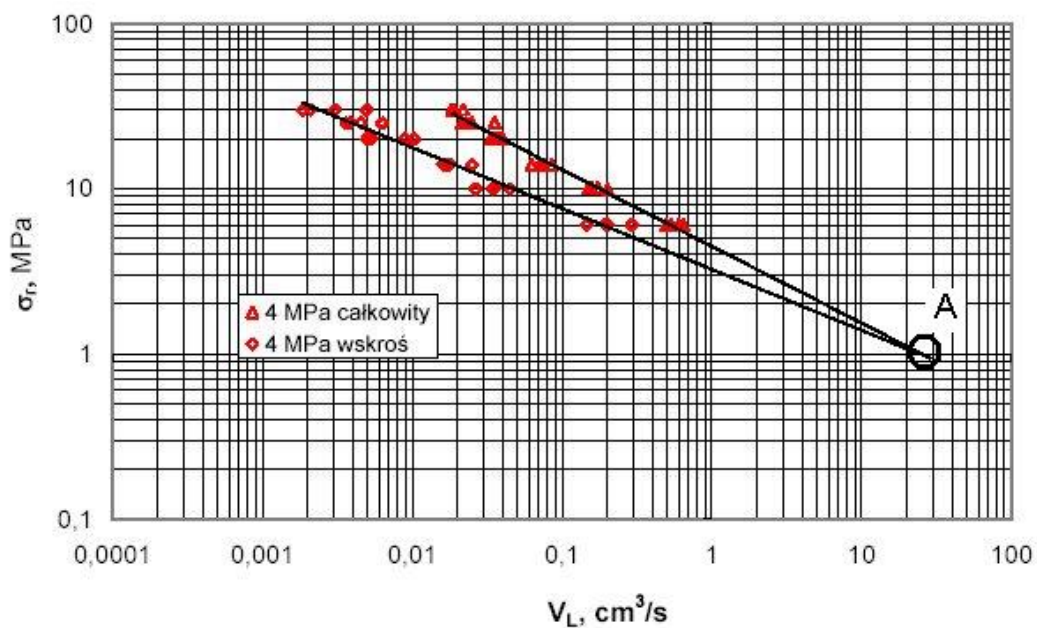
Tabela 3. Porównanie udziału wycieku na wskroś materiału do wycieku całkowitego dla materiału FA – 150

Nacisk σ_r , MPa	6	10	14	20	25	30
$\left(\frac{V_{LSW}}{V_{LSC}}\right) \cdot 100, \%$	65	59	56	52	50	48

Na rys. 29 oraz rys. 30 porównano wartości wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś dla ciśnienia w kołnierzu odpowiednio 2 oraz 4 MPa dla materiału Parogambit. Przecięcie się charakterystyki wycieku całkowitego z charakterystyką wycieku na wskroś (punkt A) występuje przy nacisku stykowym około 1 MPa, zarówno przy utrzymywanej różnicy ciśnień 2 MPa jak i 4 MPa. Analizując wykresy można zauważyć, że powyżej punktu A ze zwiększaniem nacisku stykowego udział wycieku na wskroś V_{LSW} w wycieku całkowitym maleje zaś udział wycieku pomiędzy powierzchniami uszczelnienia a powierzchniami kołnierzy V_{LSP} rośnie. Oznacza to, że pory w materiale znacznie szybciej maleją ze zwiększeniem nacisku stykowego niż pory utworzone przez niewypełnienie materiałem uszczelnienia chropowatości powierzchni kołnierzy.

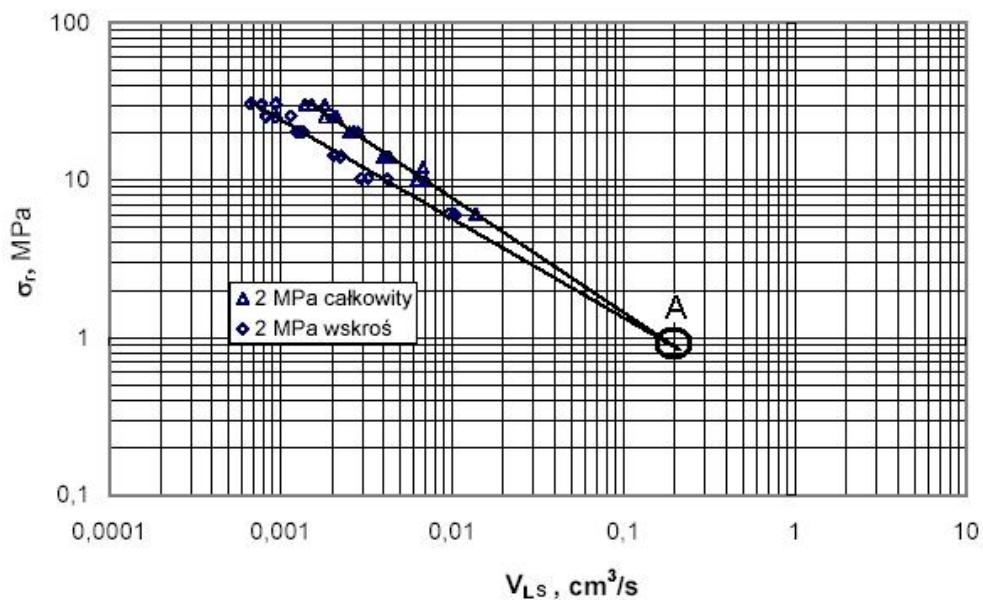


Rys. 29. Porównanie wartości wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś dla ciśnienia 2 MPa w kołnierzu dla materiału Parogambit

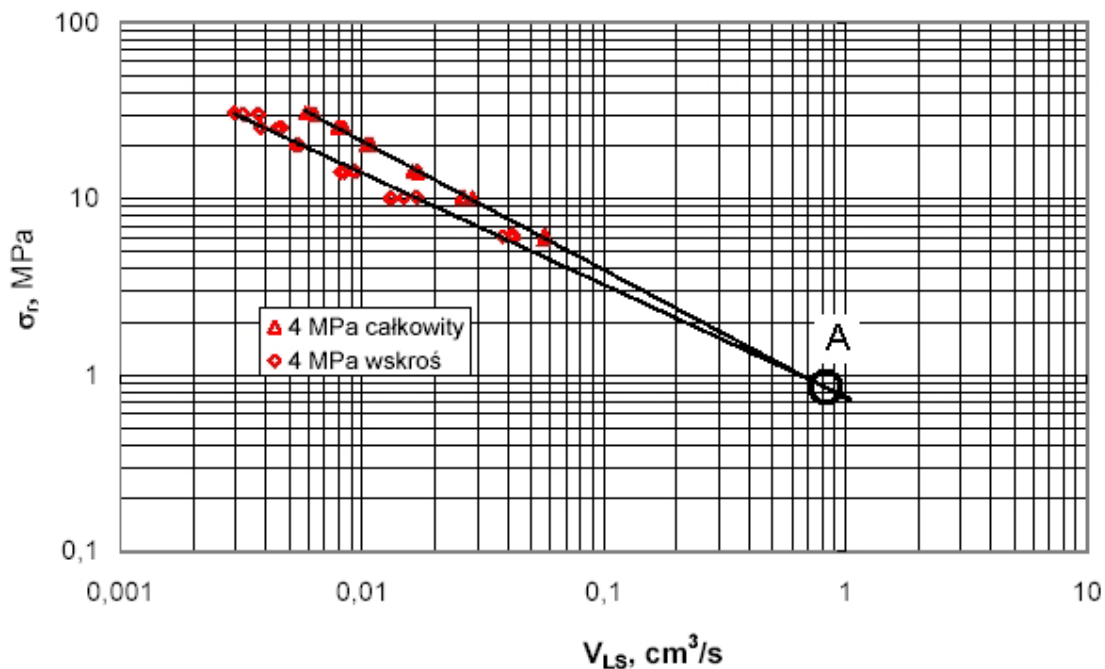


Rys. 30. Porównanie wycieku całkowitego oraz na wskroś dla ciśnienia 4 MPa w kołnierzu dla materiału Parogambit

Podobne zachowanie wykazuje materiał FA – 150 (rys. 31, rys. 32).

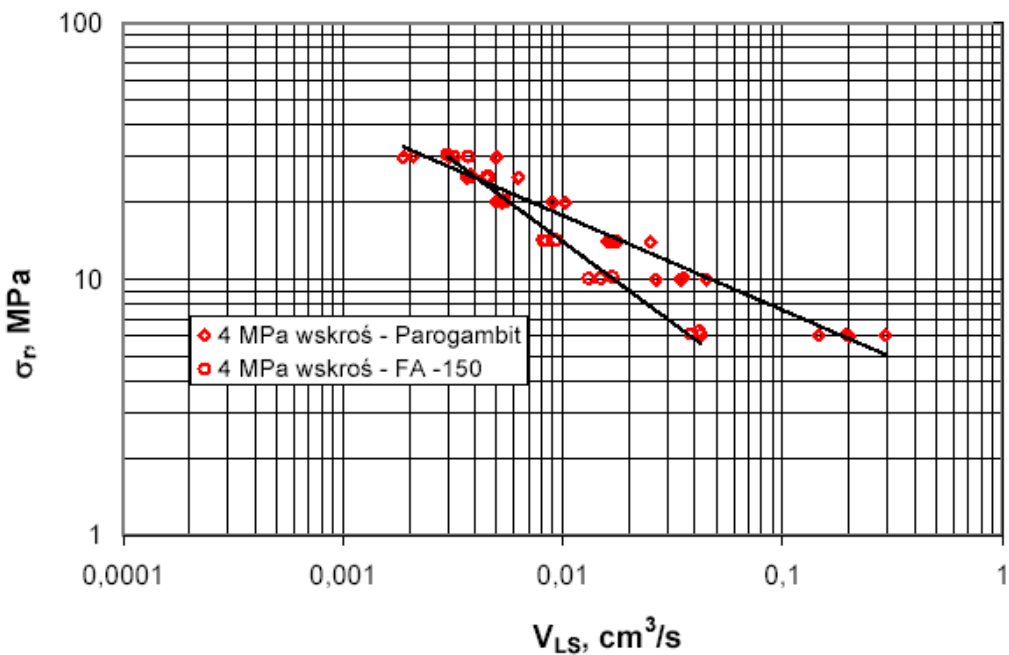


Rys. 31. Porównanie wartości wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś dla nadciśnienia 2 MPa w komorze dla materiału FA – 150



Rys. 32. Porównanie wartości wycieku całkowitego oraz wycieku na wskroś dla nadciśnienia 4 MPa dla materiału FA – 150

Podobnie jak dla materiału Parogambit wyrównanie wartości wycieku na wskroś z wyciekami całkowitym również zachodzi przy nacisku stykowym około 1 MPa lecz przy innej wartości wycieku.

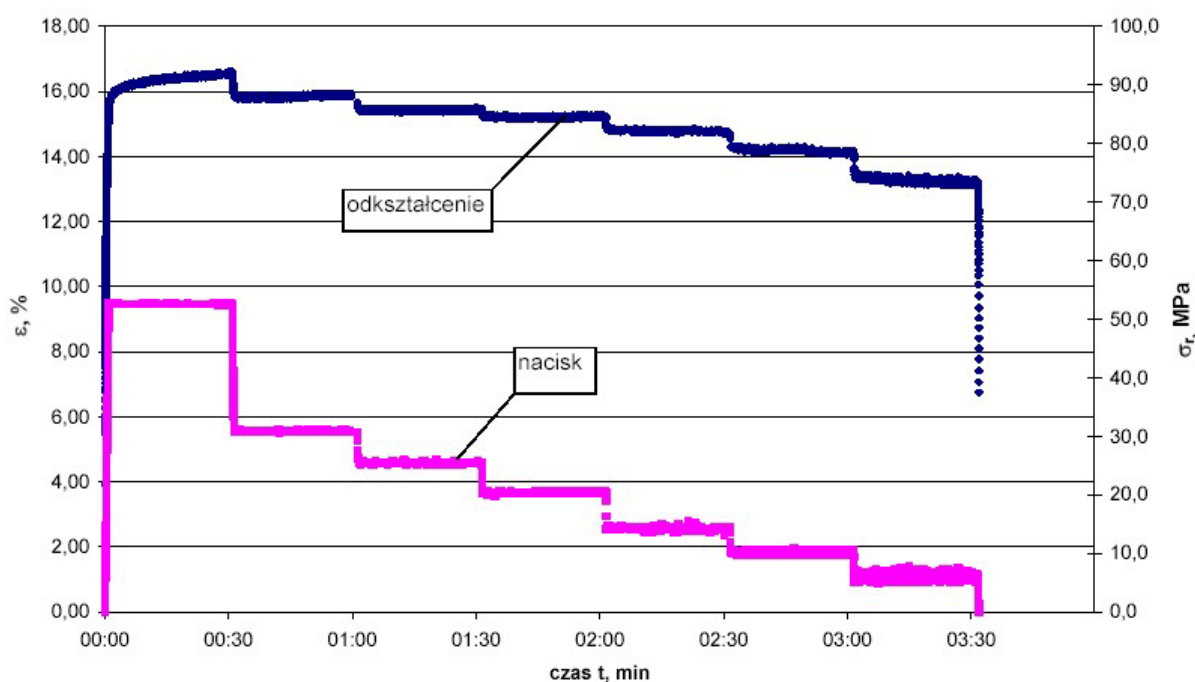


Rys. 33. Porównanie charakterystyk wycieku na wskroś dla badanych materiałów przy nadciśnienia 4 MPa w komorze

Porównanie charakterystyk wycieku na wskroś badanych materiałów przy nadciśnieniu 4 MPa w komorze przedstawiono na rys. 33. Wyrównanie wartości wycieku na wskroś dla obu materiałów zachodzi przy nacisku około $\sigma_r \cong 25$ MPa. Spadkowi nacisku stykowego towarzyszy wzrost wycieku na wskroś, przy czym wraz ze zmniejszaniem nacisku stykowego dochodzi do większego wzrostu wycieku dla materiału Parogambit niż dla materiału FA-150.

8.2. Charakterystyka sprężysta materiału

W celu określenia zmiany wysokości materiału uszczelnienia pod wpływem przyłożonego nacisku, przeprowadzono badania na maszynie wytrzymałościowej opisanej w rozdziale 4. Na rys. 34 przedstawiono przykładowy wykres zmiany względnego odkształcenia materiału Parogambit. Badaniom poddano trzy próbki z każdego materiału, w tabeli 4 przedstawiono wyniki badań dla materiału Parogambit a w tabeli 5 dla FA - 150.



Rys. 34. Charakterystyka sprężysta materiału Parogambit

Tabela 4. Wyniki badań charakterystyk sprężystych materiału o nazwie Parogambit

Nacisk σ_r , MPa	ε_1 , %	ε_2 , %	ε_3 , %	$\bar{\varepsilon}$, %
51,1	15,9	15,8	15,9	15,9
30	15,7	15,4	15,6	15,5
25	15,5	15,2	15,4	15,3
20	15,2	15,0	15,1	15,0
14	14,8	14,6	14,7	14,7
10	14,2	14,2	14,2	14,2
6	13,3	13,6	13,4	13,5

Tabela 5. Wyniki badań charakterystyk sprężystych materiału o nazwie FA – 150

Nacisk σ_r , MPa	ε_1 , %	ε_2 , %	ε_3 , %	$\bar{\varepsilon}$, %
51,1	14,2	14,1	14,3	14,2
30	14,1	14,0	14,1	14,1
25	13,6	13,5	13,6	13,6
20	13,3	13,3	13,4	13,3
14	13,0	12,9	13,0	13,0
10	12,5	12,4	12,5	12,5
6	11,8	11,7	11,9	11,8

Z porównania danych zawartych w powyższych tabelach wynika, że odkształcenie materiału Parogambit jest większe niż dla materiału FA – 150. Porównując te dane z wynikami badań wycieku na wskroś materiału (rys. 27, rys. 28, rys. 33) można zauważyć, że wyciek na wskroś ma większe wartości dla materiału Parogambit niż dla materiału FA–150, pomimo, że odkształcenie względne materiału Parogambit jest większe od odkształcenia materiału FA – 150. Oznacza to, że porowatość FA – 150 jest mniejsza przy braku obciążenia aniżeli w Parogambicie.

8.3. Określenie współczynnika przepuszczalności oraz średniego wymiaru porów

Znając wartości wycieku na wskroś materiału oraz względnego odkształcenia dla określonego nacisku można, korzystając z wzoru (7.2.19), obliczyć współczynniki przepuszczalności. Tok obliczeń przedstawiono dla drugiego kroku ($\sigma_r = 6$ MPa) podczas badania uszczelnienia o nazwie Parogambit oznaczonego 1w2. Wyciek odniesiony do warunków panujących w biurze pomiarowej (p_3, T_a) wynosi $V_l = 0,05984, \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Gęstość azotu dla średniego ciśnienia panującego w biurze pomiarowej obliczono z równania stanu gazu doskonałego $\rho_{N_2} = 1,10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Wyciek masowy na wskroś materiału obliczyć można ze wzoru:

$$q_w = V_l \cdot \rho_{N_2} = 0,05984 \cdot 1,10 \cdot 10^{-6} = 6,58 \cdot 10^{-8}, \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Wysokość uszczelnienia (grubość warstwy porowatej) obliczono znając odkształcenie względne z charakterystyki sprężystej. Dla nacisku $\sigma_r = 6$ MPa odkształcenie względne $\varepsilon = 13,5 \%$, co po przeliczeniu na grubość daje $h = 1,786$ mm. Ciśnienie bezwzględne w komorze badawczej dla ciśnienia atmosferycznego $p_a = 98300, \text{ Pa}$ wynosi:

$$p_0 = p_a + p_{N_2} = 98300 + 2000000 = 2098300, \text{ Pa}$$

Średnie ciśnienie bezwzględne w biurze pomiarowej wynosi:

$$p_{1sr} = p_a - \left(\frac{(h_2 + h_3) \cdot \rho_{H_2O} \cdot g}{2} \right) = 98300 - \left(\frac{(495 + 104) \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 9,81}{2} \right) = 95362, \text{ Pa}$$

Średnia średnica wewnętrzna badanego uszczelnienia wynosi $D_w = 113,15$ mm, zaś średnia średnica zewnętrzna $D_z = 153,08$ mm. Współczynnik lepkości dynamicznej obliczono ze wzoru (8.3.1) [43]:

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (8.3.1)$$

gdzie:

η_0 – współczynnik lepkości dynamicznej dla $T = 273$ K,

dla azotu $\eta_0 = 1,68 \cdot 10^{-5}$, Pa·s,

C – stała Sutherlanda, dla azotu $C = 118$,

T – temperatura azotu, dla próbki 1w2 $T = T_a = 292,4$, K.

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} = 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{273 + 118}{292,4 + 118} \right) \cdot \left(\frac{292,4}{273} \right)^{3/2} = 1,77 \cdot 10^{-5}, \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Po przekształceniu równania (7.2.19) obliczono współczynnik przepuszczalności ze wzoru:

$$K = \frac{q_{mw} \cdot \mu \cdot RT \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right)}{\pi \cdot h \cdot (p_0^2 - p_1^2)} = \frac{6,58 \cdot 10^{-8} \cdot 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot 297 \cdot 292,4 \cdot \ln\left(\frac{153,08}{113,15}\right)}{3,14 \cdot 1,786 \cdot 10^{-3} \cdot (2098300^2 - 95362^2)} =$$

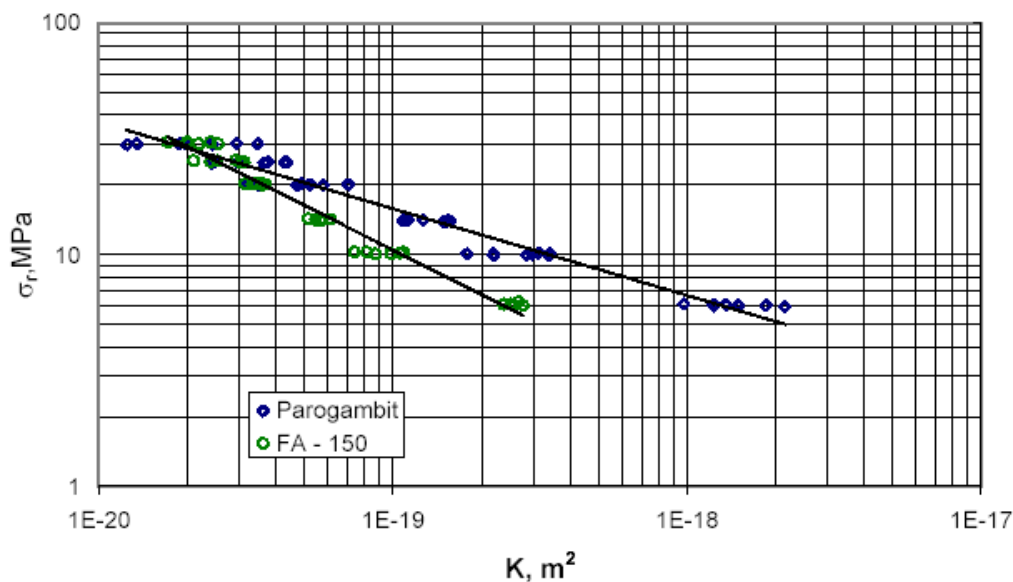
$$= 1,24 \cdot 10^{-18}, \text{ m}^2$$

Współczynnik przepuszczalności jest parametrem określającym zdolność do przepływu płynu w materiale porowatym pod wpływem gradientu ciśnienia. Określa on również pośrednio wymiary porów. W badanym materiale wymiar porów zależy od nacisku wywieranego na uszczelnienie nie zależy natomiast od utrzymywanej różnicy ciśnień. Wynika stąd, że dla stałego nacisku współczynnik przepuszczalności będzie miał podobną wartość niezależnie od ciśnienia utrzymywanego w komorze badawczej. Z tego względu, na jednym wykresie, przedstawiono punkty obliczonego współczynnika przepuszczalności w zależności od wywartego nacisku dla ciśnienia 2 oraz 4 MPa w kołnierzu.

Na rys. 35 przedstawiono zależność współczynnika przepuszczalności od wywieranego nacisku dla materiału Parogambit oraz dla materiału FA – 150. Analiza wykresu (rys. 35) pozwala zauważyć, że wartość współczynnika przepuszczalności jest jednakowa dla materiału Parogambit i FA – 150 ($K \cong 2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$), przy nacisku stykowym równym około $\sigma_r \cong 30$ MPa. Obniżając wartość nacisku, wartość współczynnika K rośnie, przy czym dla materiału Parogambit następuje szybszy przyrost wartości aniżeli dla materiału FA – 150.

Znajomość współczynnika przepuszczalności w zależności od wywieranego nacisku dla materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe pozwala na prognozowanie

wycieku na wskroś z uszczelnienia. Może być on traktowany jako parametr do porównywania materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe, im mniejsza jego wartość tym mniejszy wyciek na wskroś materiału uszczelnienia.



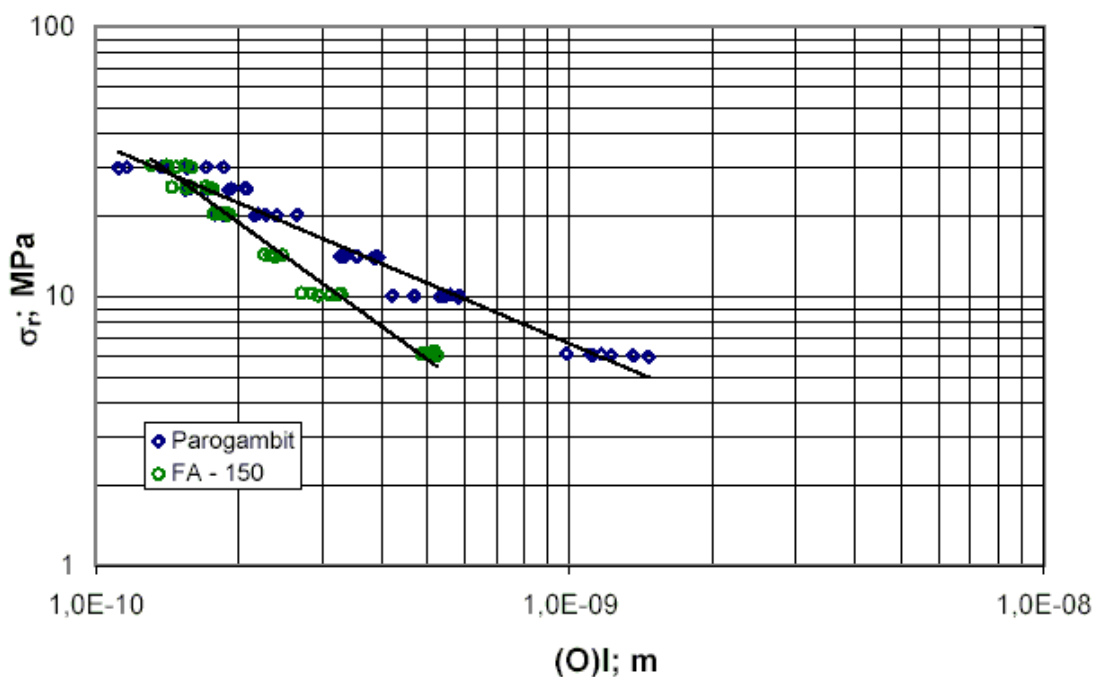
Rys. 35. Zależność współczynnika przepuszczalności od wywieranego nacisku stykowego dla materiału Parogambit oraz FA - 150

Znając współczynnik przepuszczalności możliwe jest wyznaczenie rzędu średniej średnicy porów otwartych korzystając z zależności (7.1.60) wyprowadzonej w procesie homogenizacji dla struktury porowatej. Poniżej przedstawiono obliczenie rzędu średniej średnicy porów bazując na wcześniej obliczonym współczynniku przepuszczalności K dla drugiego kroku w uszczelnieniu oznaczonym jako 1w2 materiału Parogambit.

$$K \approx O(l^2)$$

$$O(l) \approx \sqrt{K} = \sqrt{1,24 \cdot 10^{-18}} = 1,1 \cdot 10^{-9}, \text{ m}$$

Dla każdego nacisku, bazując na pomiarach wycieku na wskroś, obliczono odpowiadający mu współczynnik przepuszczalności K a następnie ze wzoru (7.1.60) oszacowano rząd wartości średniej średnicy porów. Graficzne przedstawienie zależności rzędu wielkości średniej średnicy porów od przyłożonego nacisku dla materiału Parogambit oraz FA - 150 pokazano na rys. 36. Rząd średniej średnica porów w materiale Parogambit zmienia się w zakresie jednego rzędu wielkości od 1 do 0,1 nm, a w materiale FA - 150 (0,5 - 0,1) nm.

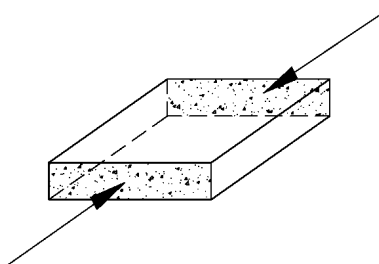


Rys. 36. Zależność wartości rzędu średniej średnicy porów od wywołanego nacisku dla materiału Parogambit oraz FA - 150

Badania nad wyciekaniem z uszczelnień wykazały, że wyciek na wskroś stanowi znaczną część wycieku całkowitego niezależnie od struktury materiału. Dla materiału Parogambit udział wycieku na wskroś w wycieku całkowitym, podczas zmniejszania nacisku stykowego od wartości 30 do 6 MPa, zmienia się w przedziale (17 - 37)% (tabela 2), podczas gdy dla podobnych wartości nacisku dla materiału FA - 150 udział ten zmienia się w przedziale (48 - 65)% (tabela 3). Przy nacisku stykowym równym około $\sigma_r \cong 28$ MPa współczynnik przepuszczalności K ma taką samą wartość dla obu materiałów, co oznacza, że średnia wielkość porów też jest podobna co pokazano na rys. 36, a jej rząd wielkości wynosi $O(l) \cong 0,1$ nm. Zmniejszając nacisk na powierzchnię uszczelnienia od wartości $\sigma_r \cong 28$ MPa znacznie szybciej następuje wzrost średniej średnicy porów w materiale Parogambit. Odkształcenie względne pod wpływem przyłożonego nacisku dla materiału Parogambit zmienia się w zakresie (15,5 - 13,5)% a dla materiału FA - 150 w zakresie (14,1 - 11,8)%, natomiast wyciek jest znacznie większy w tym pierwszym materiale. Wynika to ze struktury materiału i oznacza, że tylko pewna część odkształcenia jest odpowiedzialna za zmniejszanie wielkości porów.

8.4. Weryfikacja danych

W celu sprawdzenia poprawności oszacowania średniego promienia porów na podstawie przeprowadzonego procesu homogenizacji, w Instytucie Nafty i Węgla Politechniki Wrocławskiej, wyznaczono rozkład wielkości porów za pomocą porozymetru rtęciowego. Miarą zmiany wielkości porów jest odkształcenie względne materiału uszczelnienia. Próbkę z materiału Parogambit przekazaną do badań na porozymetrze poddano naciskowi stykowemu $\sigma = 180$ MPa. Wywołanie tak dużego nacisku pozwoliło na osiągnięcie odkształcenia trwałego $\varepsilon \cong 13,5$ %. Wartość taka odpowiada odkształceniu uzyskanemu podczas badań charakterystyk sprężystych materiału przy nacisku roboczym $\sigma_r = 6$ MPa. Średnia wartość średnicy porów zmierzona za pomocą porozymetru dla materiału Parogambit wyniosła około 10 nm. Rząd wielkości średniej średnicy porów dla materiału Parogambit otrzymanych z badań wycieku na wskroś oraz zastosowaniu teorii homogenizacji, dla nacisku 6 MPa wyniósł około 1 nm. Jest to bardzo dobry rezultat jeżeli wziąć pod uwagę, że o wartości współczynnika przepuszczalności decydują możliwe najmniejsze średnice danego kanalika. Ponadto, rzeczywisty materiał jest niejednorodny, jedne fragmenty materiału mają większą przepuszczalność niż inne fragmenty. Szczególnie występuje to w uszczelnieniach wykonanych na kalandrach, w których dochodziło do ugięcia walców. Ważne jest również, aby w próbkach przygotowanych do porozymetrii osłonić materiał tak, by rtęć penetrowała wyłącznie w kierunku przepływu gazu w rzeczywistym uszczelnieniu. Oznacza to (rys. 37), że 4 z 6 powierzchni próbki powinny być zabezpieczone przed wnikaniem do nich rtęci.



Rys. 37. Kierunek wnikania rtęci w próbce porozymetrycznej

Przeprowadzono doświadczenie polegające na ocenie porowatości próbek z tego samego materiału: w jednych 6 powierzchni było odsłoniętych, w drugich tylko 4 odsłonięte. Średnia porowatość próbek o 4 powierzchniach odsłoniętych była mniejsza aniżeli w próbkach z 6 odsłoniętymi powierzchniami.

Kolejnym sposobem sprawdzenia średniej średnicy porów jest równoczesne rozwiązanie równań Darcy'ego i Hagen'a – Poissell'a [44]:

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot v \cdot l \cdot m}{K} \quad (8.4.1)$$

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \eta \cdot v \cdot l}{d_p^2} \quad (8.4.2)$$

Z porównania wzorów (8.4.1) i (8.4.2) obliczyć można średnią średnicę porów otwartych.

$$d_p = \sqrt{\frac{32 \cdot K}{m}} \quad (8.4.3)$$

gdzie:

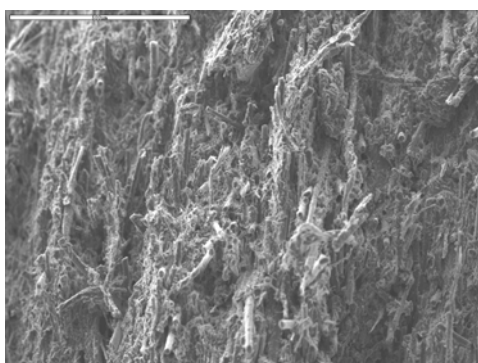
m - porowatość złoza (wyznaczono podczas badań porozymetrycznych) $m = 0,131$

$$d_p = \sqrt{\frac{32 \cdot K}{m}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 1,24 \cdot 10^{-18}}{0,131}} = 1,7 \cdot 10^{-8}, \text{ m}$$

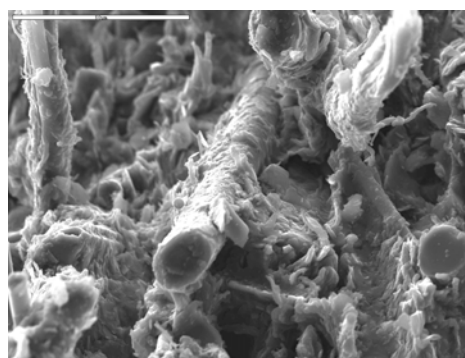
Z tego obliczenia wynika, że średni wymiar pora wynosi 17 nm.

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji wyników oceny średniej średnicy porów można stwierdzić, że dokładność jej wyznaczenia w drodze porozymetrii rtęciowej jest zadawalająca. Znajomość średniej średnicy porów pozwala wyznaczyć współczynnik przepuszczalności K a następnie z wzoru (7.2.20) oszacować wartość wycieku na wskroś z uszczelnienia dla przepływu płynu ściśliwego.

a)



b)



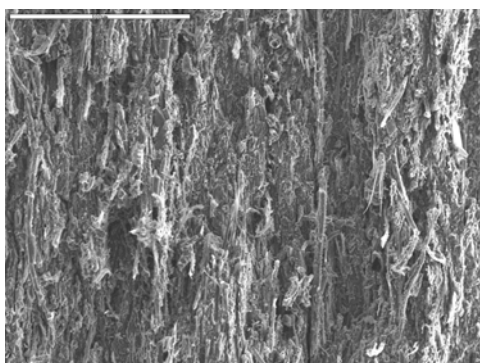
Rys. 38. Zdjęcie skaningowe materiału Parogambit, a) powiększenie 100 razy, b) powiększenie 1000 razy

Badania nad określeniem wycieku na wskroś materiału uszczelnienia są długotrwałe tak więc zastosowanie metody porozymetrii rtęciowej umożliwi skrócenie czasu badań.

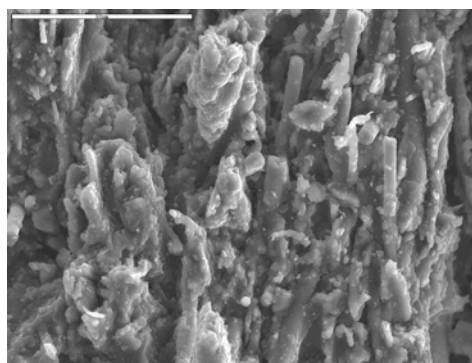
Wyznaczenie współczynnika przepuszczalności jak również wycieku na wskroś materiału można traktować jako metodę porównywania jakości materiałów stosowanych na uszczelnienia spoczynkowe.

Na rys. 38 przedstawiono zdjęcie skaningowe materiału Parogambit, a na rys. 39 materiału FA – 150. Analizując zdjęcia można zauważyć, że w materiale Parogambit zastosowano włókna o większej średnicy tworzące szkielet niż w materiale FA – 150.

a)



b)



Rys. 39. Zdjęcie skaningowe materiału FA – 150, a) powiększenie 100 razy, b) powiększenie 1000 razy

Zastosowanie włókien o większej średnicy prowadzi do bardziej porowatej struktury materiału przez co należy oczekiwać zwiększonego wycieku na wskroś. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych badań.

8.5. Porównanie wartości wycieku na wskroś materiału przy różnych nadciśnieniach

W poprzednich podrozdziałach wykazano, że współczynnik przepuszczalności K nie zależy od utrzymywanej różnicy ciśnień, zależy natomiast od wywartego nacisku stykowego. Porównując masowe natężenie przepływu dla nadciśnienia 4 MPa w kołnierzu do natężenia przepływu przy nadciśnieniu 2 MPa w kołnierzu oraz przyjmując założenia że:

- $p_1 = p_a$,
- p_a jest małe w porównaniu do p_0 i można je pominąć,
- grubość uszczelnienia dla określonego nacisku jest podobna,
- badane uszczelnienia mają zawsze takie same wymiary (D_z, D_w),
- temperatura badań jest stała

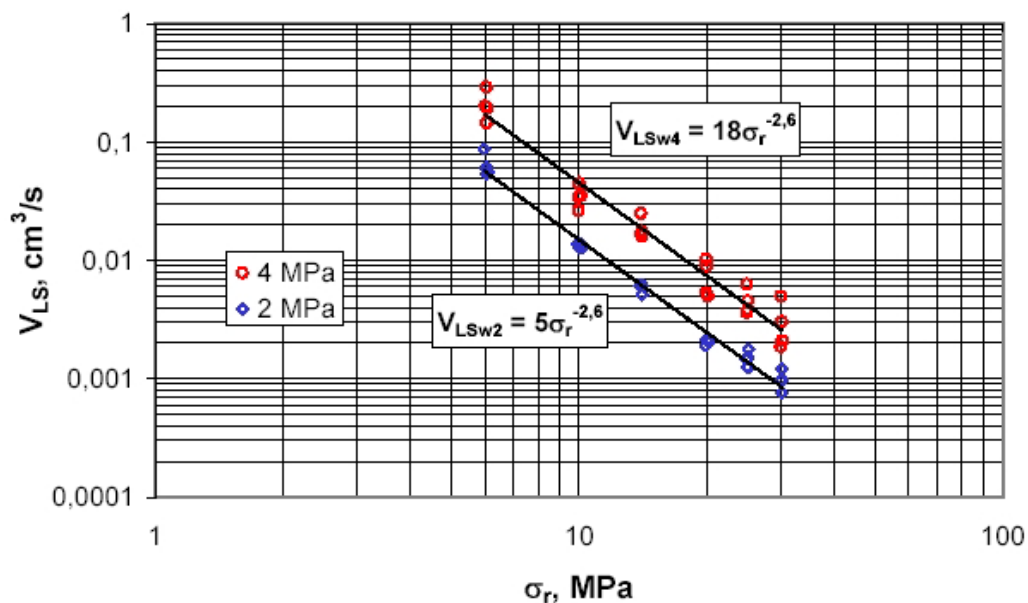
można wyznaczyć wartość następującego ilorazu:

$$\frac{q_{w4}}{q_{w2}} = \frac{p_{04}^2}{p_{02}^2} = \frac{4^2}{2^2} = 4 \quad (8.5.1)$$

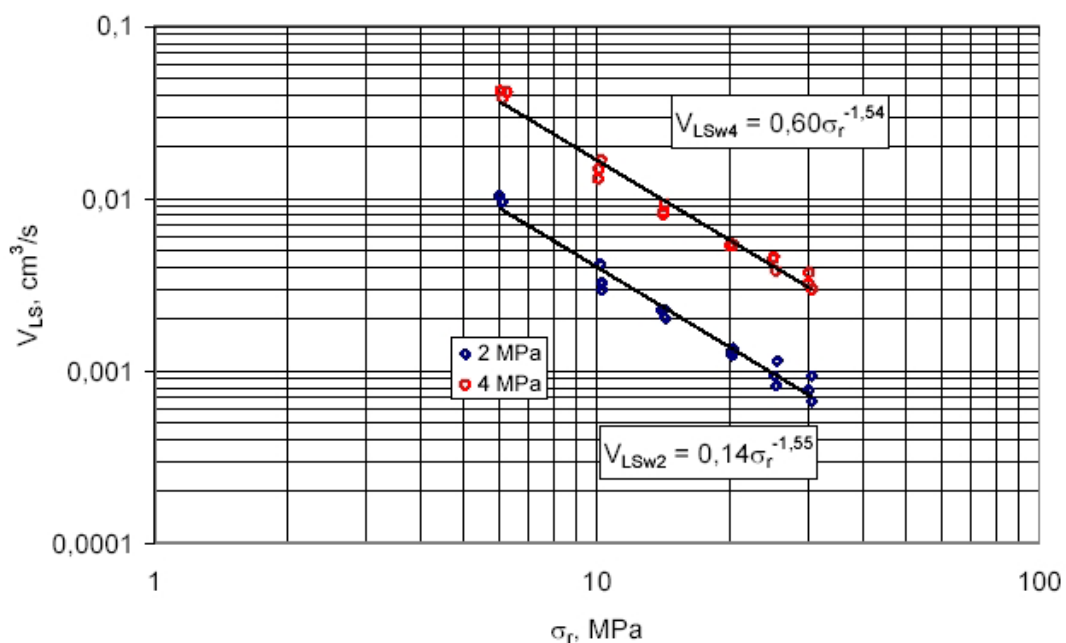
Oznacza to, że wartości wycieku, dla określonego nacisku stykowego przy nadciśnieniu 4 MPa w komorze badawczej powinny być 4 razy większe od wartości wycieku przy nadciśnieniu 2 MPa w kołnierzu.

Na rys. 40 pokazano zależność wycieku na wskroś od przyłożonego nacisku roboczego dla materiału Parogambit. Inaczej niż poprzednio, na osi odciętych odłożono nacisk, zaś na osi rzędnych wyciek. Tak przedstawione krzywe pozwoliły na porównanie doświadczalnych wartości wycieku na wskroś, a mianowicie dla nadciśnienia 2 MPa w kołnierzu równanie aproksymacyjne ma postać: $V_{LSw2} = 5 \cdot \sigma_r^{-2,6}$, zaś dla nadciśnienia 4 MPa w kołnierzu $V_{LSw4} = 18 \cdot \sigma_r^{-2,6}$. Porównując te dwa równania otrzymano:

$$\frac{q_{w4}}{q_{w2}} = \frac{V_{LSw4}}{V_{LSw2}} = \frac{18 \cdot \sigma_r^{-2,6}}{5 \cdot \sigma_r^{-2,6}} = \frac{18}{5} = 3,6$$



Rys. 40. Zależność wycieku na wskroś materiału Parogambit od nacisku roboczego



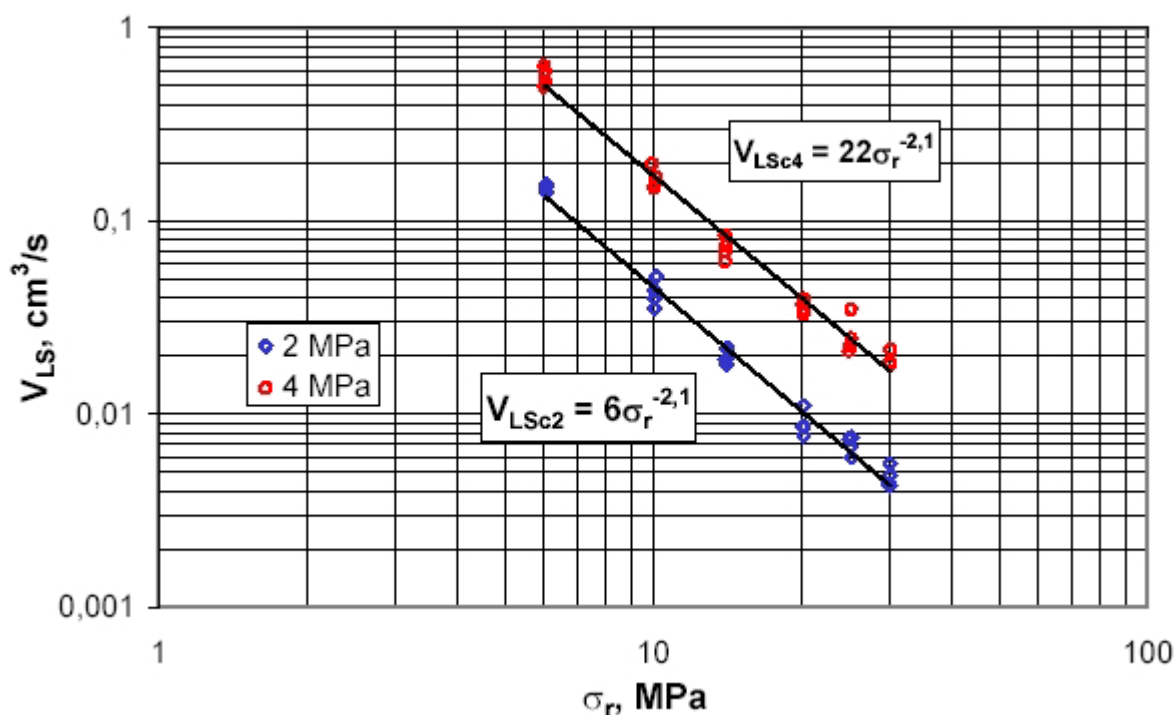
Rys. 41. Zależność wycieku na wskroś od nacisku roboczego dla materiału FA – 150

Na rys. 41 przedstawiono zależność wycieku na wskroś dla materiału FA – 150. Postępując podobnie jak dla materiału Parogambit, dla materiału FA - 150 otrzymano:

$$\frac{q_{w4}}{q_{w2}} = \frac{V_{LSw4}}{V_{LSw2}} = \frac{0,60 \cdot \sigma_r^{-1,54}}{0,14 \cdot \sigma_r^{-1,55}} \approx \frac{0,60}{0,14} = 4,3$$

Wyciek całkowity można traktować jako sumę wycieku przez 3 równolegle położone warstwy porowate, a więc wycieku na wskroś oraz dwóch składowych wycieku przez obszar styku kołnierzy z uszczelnieniem. Postępując w sposób powyżej opisany można określić również stosunek wartości wycieku całkowitego dla nadciśnienia azotu 4 oraz 2 MPa w kołnierzu.

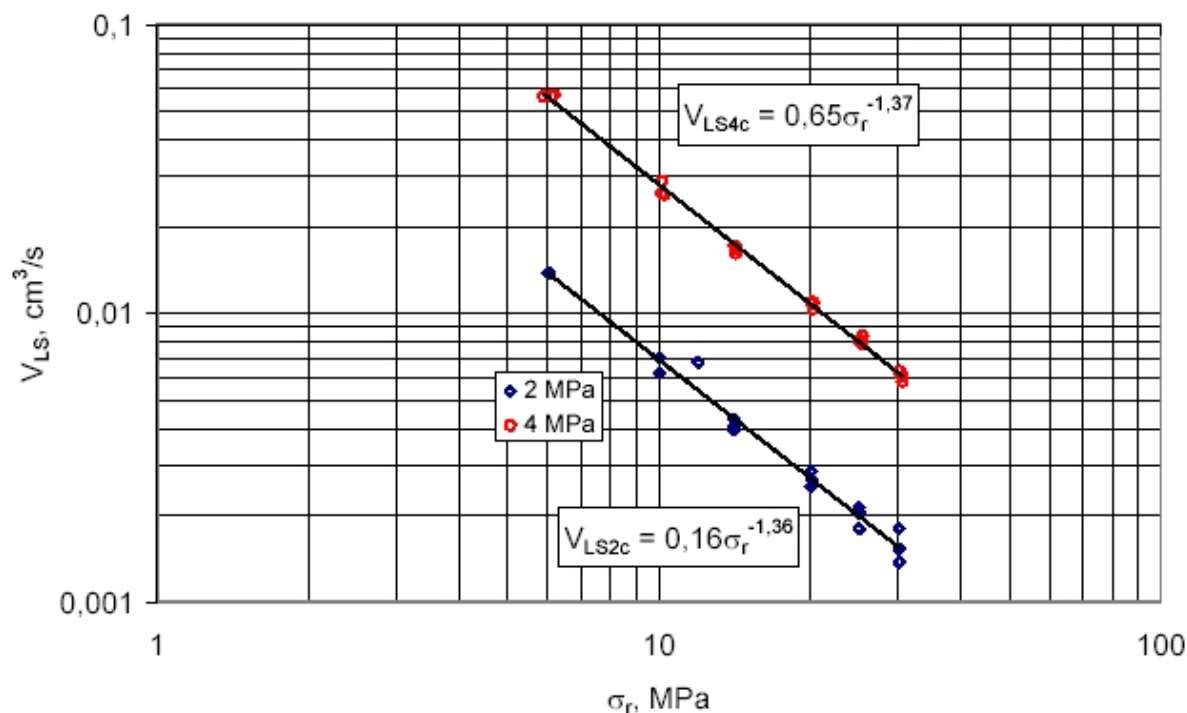
Na rys. 42 przedstawiono zależność wycieku całkowitego od wywartego nacisku dla materiału Parogambit, zaś na rys. 43 dla materiału FA – 150.



Rys. 42. Zależność wycieku całkowitego od nacisku roboczego dla materiału Parogambit

Stosunek wartości wycieku całkowitego dla materiału Parogambit wynosi:

$$\frac{q_{c4}}{q_{c2}} = \frac{V_{LSc4}}{V_{LSc2}} = \frac{22 \cdot \sigma_r^{-2,1}}{6 \cdot \sigma_r^{-2,1}} = \frac{22}{6} = 3,7$$



Rys. 43. Zależność wycieku całkowitego od wywartego nacisku dla materiału FA – 150

Stosunek wartości wycieku całkowitego dla materiału FA - 150 wynosi:

$$\frac{q_{c4}}{q_{c2}} = \frac{V_{LS4c}}{V_{LS2c}} = \frac{0,65 \cdot \sigma_r^{-1,37}}{0,16 \cdot \sigma_r^{-1,36}} \approx \frac{0,65}{0,16} \approx 4,1$$

Zarówno dla materiału Parogambit jak i materiału FA – 150 wartości stosunków wycieku na wskroś uszczelniania bliskie są wartości teoretycznej (8.5.1) równej 4, wyprowadzonej z modelu matematycznego, dla nadciśnienia 2 oraz 4 MPa azotu w kołnierzu. Podobne wnioski można wyciągnąć z porównania charakterystyk wycieku całkowitego dla materiału Parogambit jak i FA - 150.

9. Wnioski

Pracę można podsumować za pomocą następujących wniosków o charakterze ogólnym i szczegółowym:

1. Dowiedziono słuszności przyjętych tez wykazując, że:
 - istnieje wyciek na wskroś materiału uszczelnienia stanowiący w przypadku materiału Parogambit co najmniej 17 % a w przypadku materiału FA – 150 co najmniej 48% całkowitego wycieku,
 - możliwe jest oszacowanie współczynnika przepuszczalności K na podstawie doświadczalnie wyznaczonej średnicy porów,
 - wybór materiałów na uszczelnienia spoczynkowe powinien być dokonywany przy uwzględnieniu współczynnika przepuszczalności,
2. Opracowano metody badania składowej wycieku na wskroś materiału oraz przygotowania próbek z materiałów na uszczelnienia do oceny porowatości przy z góry założonym odkształceniu tego materiału,
3. Wykorzystano teorię homogenizacji do wykazania, iż możliwe jest traktowanie materiału uszczelnienia jako struktury jednorodnej w skali makroskopowej. Dzięki homogenizacji ustalono ponadto, że rząd wielkości współczynnika przepuszczalności K jest proporcjonalny do kwadratu średniej średnicy porów,
4. Wyjaśniono, że dany poziom szczelności podczas odciążania uszczelnienia można osiągnąć przy niższym nacisku stykowym aniżeli podczas obciążania. Wynika to z nieliniowych właściwości materiału oraz zdecydowanie mniejszej zmiany zbliżenia powierzchni kołnierza i uszczelnienia w porównaniu ze zmianą objętości wypełnienia profilu powierzchni kołnierza przez materiał uszczelnienia,
5. Struktura materiału uszczelnienia ma zasadniczy wpływ na wartości wycieku na wskroś materiału,
6. Stwierdzono, że zwiększeniu nacisku stykowego towarzyszy znacznie szybsze zmniejszanie się wielkości porów w materiale uszczelnienia niż w powierzchniowej warstwie porowatej utworzonej w rezultacie styku nierówności powierzchni kołnierza i materiału uszczelnienia
7. Znajomość wycieku dla określonego nadciśnienia wewnątrz kołnierza umożliwia prognozowanie wartości wycieku przy innych wartościach nadciśnienia w komorze,

8. Ustalenie związku pomiędzy współczynnikiem przepuszczalności K a średnią średnicą porów daje możliwość kontroli jakości produkcji materiałów na uszczelnienia spoczynkowe na drodze okresowego sprawdzania wielkości porów. Dodatkowo możliwe jest znaczne ograniczenie objętości badań nad wyciekami.
9. W przyszłości należy opracować metodę pomiaru wycieku na wskroś z uszczelnień kołnierзовych w temperaturach podwyższonych, symulującą rzeczywiste warunki pracy uszczelnienia spoczynkowego.

10. Literatura

- [1] - *Sealing Technology – BAT guidance notes*, ESA Publication No: 014/05, June 2005,
- [2] – Depret P., Allard J. L., *Fugitive emissions from VCM – PVC units – results of the ECVI survey*, in Proceedings of the 16th International Conference on Fluid Sealing, The Cromwell Press, Trowbridge, Wiltshire, 2000
- [3] – Kanschik K., Schmidt – Traub H., *Determination of emissions of flange joints in a chemical plant* in Proceedings of the 2 – nd European Fugitive Emissions Conference, Düsseldorf, 1998,
- [4] – Forsyth I., *Fugitive Emissions and the IPPC Directive for Mineral Oil and Gas Refineries and Within the Large Volume Organic Chemical Industry*, w materiałach IX Międzynarodowej Konferencji Uszczelnienia i Technika Uszczelniania Maszyn i Urządzeń, pod red. M. Gawlińskiego, Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław – Polanica Zdrój, 2001,
- [5] – Hlebowicz J., *Badanie szczelności. Poradnik*, Biuro Gamma, Warszawa, 1996
- [6] – *Glossary of Sealing Terms, Part 1 Flanges and Gaskets*, ESA Publication No. 008/97, November, 1997,
- [7] – Voetter P., “*TA – Luft*” for PTFE Gaskets, materiały szkoleniowe firmy Garlock,
- [8] – Brink R. V., Czernik D. E., Horve L. A., *Handbook of fluid sealing*, McGraw – Hill, Inc., New York, 1993
- [9] - Szewczyk K., *Połączenia gwintowe*, PWN, Warszawa, 1991,
- [10] – Dietrych J., Kocańda S., Korewa W., *Podstawy Konstrukcji Maszyn t. 2*, WNT, Warszawa, 1964
- [11] – Bickford J., H., *An introduction to the design and behavior of bolted joints*, Mercel Dekker, Inc., New York, 1997,
- [12] – Bickford J., H., *Gaskets and gasketed joints*, Mercel Dekker, Inc., New York, 1998,
- [13] – Niezgodziński M. E., Niezgodziński T., *Wzory wykresy i tablice wytrzymałościowe*, WNT, Warszawa, 1996,
- [14] - Tücmantel H. J., *The optimization of static gaskets*, Kempchen & Co. GmbH, Oberhausen, 1991,
- [15] – Gawliński M., *Uszczelnienia spoczynkowe*, w *Pompy, Pompownie*, Nr 4, sierpień 2001,
- [16] – Finnie I., Heller W. R., *Pelzanie materiałów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa, 1962,

-
- [17] – Nagy A., *Lepkosprężysty model uszczelnienia płaskiego spoczynkowego* w materiałach VIII Międzynarodowej Konferencji Uszczelnienia i technika uszczelniania maszyn i urządzeń, pod red. M. Gawlińskiego, Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław – Polanica Zdrój, 1998,
- [18] – Skrzyszowski Z., *Połączenie kołnierzone z uszczelką reologiczną*, w materiałach IX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, zeszyt 35/69 t.2, Gliwice, 1979,
- [19] – Demus Z., *Badanie zmienności naprężeń w spoczynkowej uszczelce płaskiej z płyty azbestowo – kauczukowej w zależności od jej grubości w temperaturze 300⁰ C*, w materiałach III Konferencji nt. Uszczelnień i Techniki Uszczelniania, Wrocław, 1981
- [20] – Wilczyński A. P., *Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej*, WNT, Warszawa, 1984,
- [21] – Малмейстер А., К., Тамуж В., П., Тетерс Г., А., *Сопротивление полимерных и композитных материалов*, Зинатне, Рига, 1980,
- [22] – Verheijen P., M., H., *Zastosowanie włókien mineralnych w uszczelnieniach spoczynkowych* w materiałach VIII Międzynarodowej Konferencji uszczelnienia i technika uszczelniania w maszynach i urządzeniach, pod red. M. Gawlińskiego, Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław – Polanica Zdrój, 1998,
- [23] – Aksielrud G. A., Altszuler M. A., *Ruch masy w ciałach porowatych*, WNT, Warszawa 1987,
- [24] – Jena A., Gupta K., *Characterization of pore structure of filtration media*, www.pmiapp.com z dnia 02.03.2005,
- [25] - DIN 28090 – 1, *Statische Dichtungen für Flanschverbindungen – Teil 1: Dichtungskennwerte und Prüfverfahren*,
- [26] – Payne J. R., Bazergui A., Leon G. F., *Getting new gasket design constants from gasket tightness data*, Conf. On Experimental Mechanics, Houston, TX, June 14 – 19, 1997,
- [27] – Kobayashi T., *Creep – relaxation characteristics of gaskets and their effects on sealing behavior*, 17 International Conference on Fluid Sealing, BHR Group Limited, The Fluid Engineering Center, United Kingdom, 2003,
- [28] - <http://www.ramjointings.co.uk/design.htm>, z dnia 14.04.2005,
- [29] – Голубев А, И., Кондаков Л, А., *Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник*, Машиностроение, Москва, 1986,

-
- [30] – ASME F586 – E01 – *Test Method for Leak Rates Versus m Stresses and m Factors for Gaskets*,
- [31] – PN – ISO 7005 – 1, *Kołnierze metalowe – kołnierze stalowe*,
- [32] - PN – EN ISO 898 – 1:2001, *Własności mechaniczne części złącznych wykonanych ze stali węglowej oraz stopowej. Śruby i śruby dwustronne*,
- [33] – Gawliński M., Blachura J., Rogula J., *Procedura określania współczynników obliczeniowych m oraz γ stosowanych w obliczaniu połączeń kołnierzowych*, Procedura zatwierdzona przez Centralne Laboratorium Urzędu Dozoru Technicznego, Wrocław, 2002,
- [34] - Bensoussan A., Lionis J., Papanicolaou G., *Asymptotic analysis for periodic structures*, North – Holland Publishing Company, Amsterdam, 1978,
- [35] - Strzelecki T., i inni, *Mechanika ośrodków niejednorodnych. Teoria homogenizacji*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 1996,
- [36] - Kröner E., *Effective Elastic Moduli of periodic and Random Media: a unification*, Mechanics Research Communications, 1980,
- [37] - Auriault J., Royer P., *Double Conductivity Media: a comparison between phenomenological and homogenization Approaches*, Int. J. Heat and Mass Transfer, 36, 10, 1993
- [38] - Royer P., *Contribution de l'homogénéisation à l'étude de la filtration d'un gaz an milieu déformable à double porosité, Application à l'étude du système gaz – charbon*, Praca doktorska, Institut Mécanique de Grenoble, L'Université Joseph Fourier, Grenoble, 1994.
- [39] – Sanchez – Palencia E., *Non – Homogeneous Media and Vibration Theory*, Lecture Notes in Physics, 127, Springer – Verlag, Berlin, 1980.
- [40] - Malczewski J., Piekarski M., *Modele procesów transportu masy, pędu i energii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1992,
- [41] - Trokoleński A., T., *Hydromechanika*, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1969,
- [42] - Kombalov W. S., „O kompleksnoj otsenke sherokhovatosti s velichinoy R_z ” w książce „Kontaktnoje vzaimodeystije tverdykh tel i raschet sil treniya i iznosa” M, Nauka, 1971.
- [43] – Hobler T., *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa, 1971,
- [44] – Белов С., В., *Пористые металлы в машиностроении*, Машиностроение, Москва, 1976,

