

POŁĄCZENIA KOŁNIERZOWE W RUROCIĄGACH

1. Wprowadzenie.

Szczelność przewodu jest podstawowym parametrem jaki musi zapewnić projektant oraz obsługa rurociągu. Szczególnie newralgicznymi elementami konstrukcji rurociągu są połączenia kołnierzowe przez które najczęściej następuje wyciek transportowanego medium.

Na konstrukcję połączenia kołnierzowego składają się: pierścienie zwane kołnierzami, uszczelki oraz śruby scalające połączenie. Każdy z powyższych elementów wymaga przy projektowaniu starannej analizy wytrzymałościowej uwzględniającej również procesy reologiczne, co pozwala planować odpowiednie zabiegi eksploatacyjne.

Poniżej omówiono analizę śrub w połączeniach rurociągowych transportujących płyny oraz rurociągowych energetycznych transportujących przegrzaną parę.

2. Rodzaje i charakterystyki materiałowe śrub.

W przypadku rurociągowych transportujących media płynne takie jak np. ropa naftowa, o niskich wartościach czynników roboczych takich jak ciśnienie wewnętrzne p oraz temperatura medium T , stosuje się w połączeniach kołnierzowych śruby maszynowe z sześciokątnymi łbami i nakrętkami. Przy średnich i wysokich parametrach czynników roboczych śruby maszynowe niszczą się wskutek odrywania się sześciokątnych łbów, dlatego w rurociągach energetycznych stosuje się śruby sworzniowe (rys 1. a, b). Wykonuje się je ze stali o wysokiej wytrzymałości oraz ze stali żaroodpornych np.: nierdzewnych stali chromowanych 1H13, 2H13, chromo-niklowych Cr-Ni, Cr-Ni-Co, żaroodpornych 4H14N-14W2M, stali kotłowej St441K lub austenicznej 1H18N9T [1, 5, 6, 7]. Konieczność stosowania stali o wysokiej wytrzymałości i stali żaroodpornych wynika z wymogu stosowania naciągu wstępnego śrub N_0 o dużej wartości oraz warunków pracy śrub, które w przypadku rurociągowych pary przegrzanej

Jan Rządkowski, Rafał Stęćniak pracują w temperaturze wynoszącej do 520 °C [1,9].

Celem ułatwienia pomiaru wartości naciągu śruby sworzniowej stosuje się centralnie wkręcane pręty pomiarowe (rys 1. b).

Nakrętki śrub sworzniowych są typu wysokiego, tj wysokość nakrętki wynosi co najmniej 0,8 średnicy d śruby. Nakrętki mają dokładnie obrobioną powierzchnię dociskającą do kołnierza, przy czym stosuje się powierzchnie płaskie i sferyczne nakrętek oraz gniazd w kołnierzach (rys 2. a, b).

W przypadku rurociągów transportujących media płynne o niskich parametrach roboczych stosowane są śruby maszynowe i nakrętki wg norm PN-85/M-82101 oraz PN-85/M-82144, o właściwościach mechanicznych podanych w przedmiotowej normie PN-82/M-82054/03. Dążenie do szczelności połączeń kołnierzowych spowodowało, że projektanci coraz częściej stosują śruby wysoko wytrzymałościowe używane w budownictwie stalowym w tzw. połączeniach doczołowych i sprężanych. Poniżej w tabeli 1 zestawiono właściwości mechaniczne dostępnych w kraju śrub wysokowytrzymałościowych zwanych potocznie śrubami sprężającymi [4].

3. Naciąg wstępny śruby.

W kołnierzowych połączeniach szczelnych siłę naciągu N_m dla wszystkich śrub danego połączenia ustala się jako większą z sił N_m^I i N_m^{II} [6]:

$$N_m = \max \left\{ \begin{array}{l} N_m^I = \pi D_u u_{cz} \sigma_s^I \\ N_m^{II} = C_S (P + b_S) \end{array} \right. \quad (1)$$

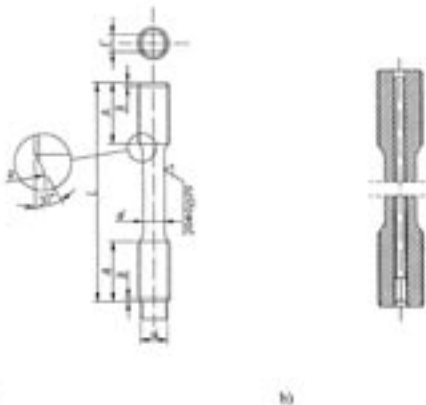
gdzie:

D_u - jest średnią średnicą uszczelki w połączeniu,

$$D_u = 0,5(D_1 + D_2) \quad (2)$$

u_{cz} - czynna szerokość uszczelki wg [6],

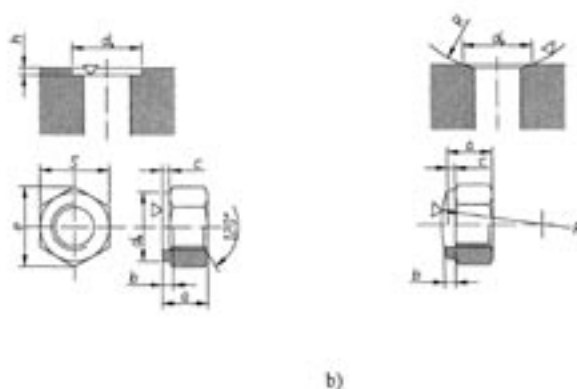
$$P = 0,25\pi D_u^2 P_0 \quad (3)$$



Rys 1. Śruby sworzniowe

a) zwykłe

b) z prętym pomiarowym, (przekrój podłużny)



Rys 2. Rodzaje nakrętek i gniazd w kołnierzach:

a) płaskie,

b) sferyczne.

Tabela 1. Własności mechaniczne stali śrub wysokowytrzymałościowych.

Klasa śruby	Gatunek stali do wyrobu śrub			Właściwości mechaniczne					
	obróbka plastyczną		skrawaniem	fd [Mpa]	Rm [Mpa]	A5 [%]	Twardość		
	na gorąco	na zimno					HB	HRB	HRC
8.8-II (8G)	45	-	45	640	800	12	228	98	22
	.	45Y	-						
	35SG	-	-						
10.9-II (10K)	40H 40HM 30HGS	40H 40HM	-	900	1000	9	287	-	32
12.9-II (12K)	40H2MF 35HGS	40H2MF	-	1080	1200	8	345	-	37
14.9-II	Stale stopowe konstrukcyjne do ulepszania cieplnego np. gatunku 45HNMF	-	-	1260	1400	7	390		40

P - siła parcia czynnika w przewodzie rurowym pod ciśnieniem obliczeniowym p_0 ,

$$S_1 = \pi D_u u_{cz} \sigma_s'' \quad (4)$$

S_1 - siła zapewniająca szczelność połączenia,
 σ', σ'' - minimalne wartości naprężeń dociskowych zapewniających szczelność połączenia wg [6],
 C_s - współczynnik skali połączenia zabezpieczający dostatecznie wartość naciągu, wynoszący [6]:

$C_s = 1,2$ - dla połączeń o średnicy $D_u \leq 500$ mm,

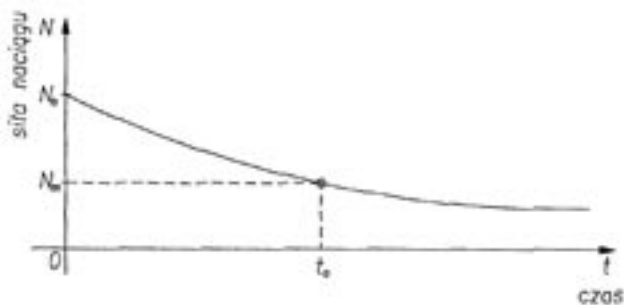
$C_s = 1,4$ - dla połączeń o średnicy $D_u > 500$ mm,

b - współczynnik zabezpieczający przed spadkiem wartości siły S_1 wskutek pełzania materiału uszczelki.

Siła naciągu N_m jest minimalną siłą, jaką powinna działać w chwili t_0 , aby nie nastąpiło rozszczelnienie połączenia. Siła początkowa N_0 powinna być odpowiednio większa, aby wskutek przyrostu odkształceń spowodowanych pełzaniem spadek naciągu wstępnie nie spowodował w chwili t_0 sytuacji w której $N_m > N_0$ (rys 3.).

Dla wyznaczonego naciągu wstępnego dobiera się przekrój czynny rdzenia śruby, klasy śruby oraz liczbę m śrub, która powinna być podzielna przez 4. Należy przy tym dążyć do jak największej liczby śrub o mniejszej średnicy [1, 9]. Siła początkowa musi spełniać warunek nośności [9]:

$$\psi m A_s f_{dT} \geq N_0 \quad (5)$$



Rys 3. Spadek siły naciągu N_0 śrub wskutek pełzania.

gdzie:

A_s - pole przekroju czynnego rdzenia pojedynczej śruby,
 ψ - współczynnik redukcyjny ze względu na klasę dokładności wykonania śruby równy $y = 0,5; 0,75$ i $1,0$ odpowiednio dla klas A, B i C,

f_{dT} - obliczeniowa wytrzymałość dla stali śruby w temperaturze t podana w sposób analityczny lub tabelaryczny [7].

4. Pełzanie stali jako funkcja temperatury.

Krzywa opisująca zmianę odkształcenia s w czasie t (tzw. pełzanie) stali śrub jest funkcją niemonotoniczną, zależną od temperatury T oraz naprężenia σ . [10] Dla przeprowadzonej poniżej analizy założono jak w [9], że pełzanie śrub opisuje funkcja $s(t)$ charakterystyczna dla tzw. pełzania ustalonego (pełzanie drugorzędne) [10] (rys.4).

Podstawowe równanie stanu przy pełzaniu ustalonym ma postać [9, 10]:

$$\frac{d\sigma}{dt} + E_T k (10\sigma)^n = 0 \quad (6)$$

gdzie:

k, n - stałe zależne od gatunku stali, naprężenia i temperatury,
 E_T - moduł Younga stali w temperaturze T podany w sposób analityczny lub tabelaryczny,

zaś rozwiązaniem równania (6) jest zależność:

$$\frac{\sigma^{n-1}}{n-1} = 10^n E_T k t + C \quad (7)$$

dla której stałą całkowania C wyznacza się z warunku początkowego przyjmując, że w chwili t_0 , dla wartości początkowej naciągu N_0 naprężenia rozciągające w śrubach wynoszą σ_0 , zatem:

$$C = \frac{\sigma_0^{1-n}}{n-1} \quad (8)$$

5. Pełzanie śrub wskutek niskocyklowych obciążeń dynamicznych.

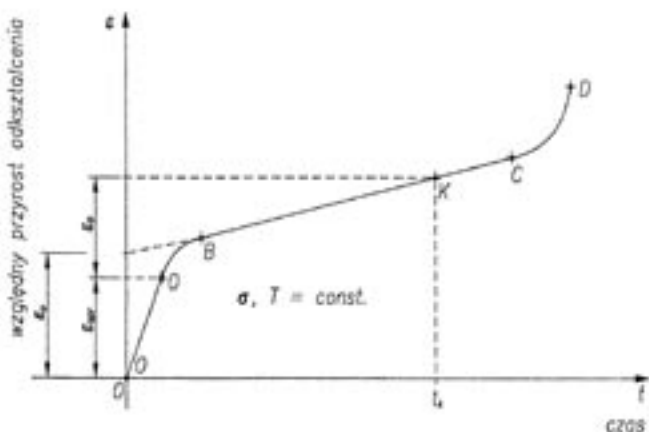
W rurociągach dalekosiężnych transportujących media płynne występują tzw. uderzenia hydrauliczne spowodo-

wane warunkami technologicznymi lub awariami. Wartość dynamicznego wzrostu ciśnienia w rurociągu można wyznaczyć wg [5, 8], zaś przebieg zmian ciśnienia przy uderzeniu hydraulicznym ilustruje rys 5.

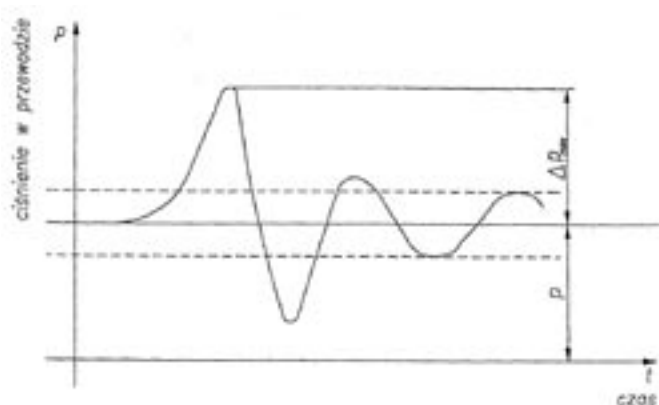
Uderzenia hydrauliczne prowadzą do pełzania materiału śrub, a w konsekwencji do spadku naciągu wstępnego N_0 , a zatem mogą powodować rozszczelnienie połączenia kołnierzewego. Zależność pomiędzy liczbą N_f cykli obciążeń uderzeniami hydraulicznymi, a czasem t_0 po którym konieczna jest regulacja naciągu śrub, wyznaczono poniżej. Pętlę histerezy dla obciążenia zmiennego powstającego przy uderzeniu hydraulicznym (rys 5.) przedstawiono na rys 6. [3].

W obliczeniach szczelności połączenia kołnierzewego konieczne jest uwzględnienie amplitudy odkształcenia śrub ϵ_{ac} o składowych amplitudowych będących odkształceniem sprężystym ϵ_{as} oraz odkształceniem plastycznym ϵ_{apl} . Spośród wielu wzorów opisujących odkształcenie całkowite materiału sprężysto - plastycznego jest wzór J. D. Morrowa (1970) [3], który dla zapisu zakresowego odkształcenia (rys 6.) ma postać:

$$\Delta\epsilon_{ac} = \Delta\epsilon_{as} + \Delta\epsilon_{apl} \quad (9)$$



Rys 4. Przyjęta krzywa pełzania ustalonego stali śrub w połączeniu.



Rys 5. Przebieg zmian ciśnienia przy uderzeniu hydraulicznym w przewodach długich.

Odształcenie sprężyste we wzorze Morrowa wyraża się wzorem:

$$\Delta\epsilon_{as} = 2 \left[\frac{\sigma_f^I}{E} (2N_f)^b \right] \quad (10)$$

gdzie:

σ_f^I - współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej,
 E - moduł Younga,
 $2N_f$ - liczba nawrotów obciążenia (półcykli),
 b - wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej, o wartości 0,05÷0,15 malejącej zwykle z wytrzymałością materiału [2, 3].

Współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej σ_f^I wyznacza się z ekstrapolacji krzywej zmęczeniowej do pierwszego półcyklu ($2N_f = 1$). Praktycznie przyjmuje się σ_f^I

równe naprężeniu zerwania σ_f przy statycznym rozciąganiu próbki [2, 3], zatem:

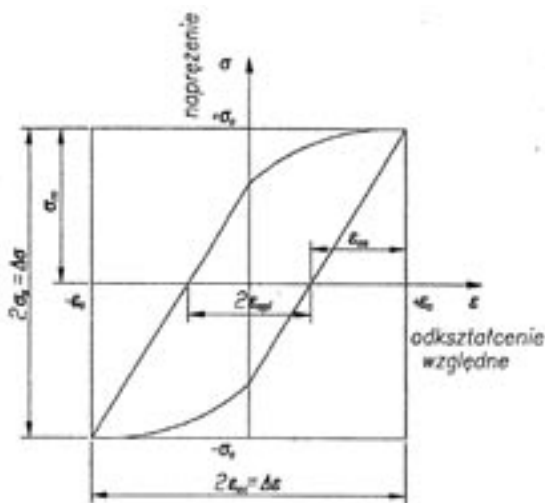
$$\sigma_f^I \cong \sigma_f = R_r \frac{F_0}{F_k} \quad (11)$$

gdzie:

R_r - granica wytrzymałości,
 F_0 - pole początkowe przekroju próbki,
 F_k - pole końcowe przekroju próbki w statycznym rozciąganiu.

Drugim członem sumy we wzorze Morrowa jest powszechnie używany wzór S. S. Mansona i L. F. Coffma (1954) [2, 3]:

$$\Delta\epsilon_{apl} = \frac{C}{(N_f)^k} = 0,5\epsilon_f^I (2N_f)^k \quad (12)$$



Rys 6. Pętla histerezy w ujęciu schematycznym.

gdzie:
k, C - stałe materiałowe.

Wykładnik k zależy od rodzaju materiału i warunków obciążenia, zaś zakres jego wartości wynosi 0,4÷0,8. W obliczeniach praktycznych najczęściej przyjmuje się k = 0,5. Stałą C wyznacza się w statycznej próbie rozciągania ze wzoru:

$$C = 0,5e_{rz} = 0,5 \ln \left(\frac{F_0}{F_k} \right) \quad (13)$$

gdzie wielkość $\ln \left(\frac{F_0}{F_k} \right)$ określa rzeczywiste wydłużenie e_{rz} po zerwaniu próbki. Zapis wzoru (12) wynika z założenia, że pękanie statyczne zachodzi dla $N_f = 0,25$, a wówczas $\Delta \varepsilon_{apl} = e_{rz}$ [3].

We wzorze (12) wielkości ε_f^I oraz C są określane jako współczynnik oraz jako wykładnik plastyczności przy obciążeniu zmiennym, lub jako współczynnik i wykładnik zmęczenia odkształcenia plastycznego. Ponieważ dla dużej liczby gatunków stali konstrukcyjnych węglowych i stopowych stwierdzono stałość wykładników $b=0,12$ i $c=0,60$, S. S. Manson (1965) zaproponował wzór na amplitudę odkształcenia plastycznego w postaci:

$$\Delta \varepsilon_{ac} = \Delta \varepsilon_{as} + \Delta \varepsilon_{apl} = 3,5 \left(\frac{f_d}{E} \right) N_f^{-0,12} + \varepsilon_{rz}^{0,6} N_f^{-0,6}$$

gdzie:
 f_d - wytrzymałość materiału na rozciąganie,

6. Uwagi końcowe.

Przedstawione powyższe wzory pozwalają zaprojektować śruby w połączeniach kołnierzowych dla rurociągów transportujących media o wysokiej temperaturze, jak również dla rurociągów w których występują uderzenia hydrauliczne. Ponadto umożliwiają wyznaczenie okresów po których należy przeprowadzić regulacje naciągów, jak również okresu po których należy wymienić śruby. Celem ułatwienia korzystania z podanych wzorów poniżej przedstawiono przykłady liczbowe.

Przykłady liczbowe.

Przykład nr 1 wg [9],

Obliczyć okres t_m regulacji naciągu śrub w połączeniu kołnierzowym rurociągu, w którym zastosowano $m = 8$ szt. śrub o łącznym przekroju czynnym $A_s = 3 \text{ cm}^2$. Minimalna siła naciągu zapewniająca szczelność połączenia N_m wg [9] wynosi 144 kN, temperatura pary $T=425 \text{ }^\circ\text{C}$, moduł Younga w temperaturze $E_t=155 \text{ GPa}$, stała $k = 0,17 \cdot 10^{-23}$, a stała $n = 6,0$. Założono naciąg wstępny $N_0 = 240 \text{ kN}$.

Rozwiązanie:

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{A_s m} = \frac{240 \cdot 1000}{3 \cdot 100 \cdot 8} = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{N_m}{A_s m} = \frac{144 \cdot 1000}{3 \cdot 100 \cdot 8} = 60 \text{ MPa}$$

Podstawiając do wzoru (7) wg [9], otrzymujemy:

$$t_m \frac{\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_m} \right)^{n-1} - 1}{(n-1) E_T k 10^{n-1} \sigma_0^{n-1}} = \frac{\left(\frac{100}{60} \right)^{6,0-1} - 1}{(6,0-1) \cdot 155 \cdot 10^3 \cdot 0,17 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{6,0-1} \cdot 100^{6,0-1}} = 9002 \text{ godziny} = 375 \text{ dni}$$

Tak więc regulacja naciągu śrub powinna być wykonywana w tym przypadku regularnie raz do roku. Przykład nr 2.

Obliczyć ilość cykli roboczych, po których wymagana jest regulacja naciągu śrub w połączeniu kołnierzowym rurociągu, w którym zastosowano: śruby M10, klasy 8.8 o wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 800 \text{ MPa}$ i łącznym przekroju czynnym $A_s = 58 \text{ mm}^2$ w ilości $m_s = 8$ szt. Przyjęto uszczelkę z żelaza typu „Armco” o następujących danych geometrycznych: szerokość uszczelki $u = 12 \text{ mm}$, średnica wewnętrzna i zewnętrzna uszczelki $D_1 = 48,5 \text{ mm}$, $D_2 = 72,5 \text{ mm}$. Ciśnienie obliczeniowe p_0 przyjęto na poziomie 3,0 MPa. Stosunek (F_0/F_k) przyjęto z badań laboratoryjnych na poziomie 1,031. Rurociąg jest wykonany z rury o średnicy $\phi 44,5 \text{ mm}$.

Rozwiązanie algebraiczne:

Ze wzoru (2) otrzymuje się średnią średnicę uszczelki D_u :
 $D_u = 0,5(D_1 + D_2) = 0,5(48,5 + 72,5) = 60,50 \text{ mm}$,
przyjęto czynną szerokość uszczelki u_{cz} wg [6]:

$u_{cz} = u = 12 \text{ mm}$, jeżeli $u < 12 \text{ mm}$,

ze wzoru (3) otrzymuje się siłę parcia P czynnika w przewodzie rurowym pod ciśnieniem obliczeniowym p_0 :

$$P = 0,25 \pi D_u^2 p_0 = 0,25 \cdot 3,142 \cdot (0,0605)^2 \cdot 3000 = 8,624 \text{ kN}$$

przyjęto minimalne wartości naprężeń dociskowych

$\sigma_s^I, \sigma_s^{II}$ zapewniających szczelność połączenia wg [6]:

$$\sigma_s^I = 183 \text{ MPa},$$

$$\sigma_s^{II} = 39 \text{ MPa}$$

Ze wzoru (4) otrzymuje się siłę zapewniającą szczelność połączenia S_j

Dr inż. Jan Rządkowski jest pracownikiem naukowym Politechniki Wrocławskiej.

Mgr inż. Rafał Stęczyński jest pracownikiem PP RB STALKON Wrocław