

Jan CIECIELAĞ*

ANALIZA TEORETYCZNO-EKSPERYMENTALNA ZMIENNOŚCI SIŁY OSIOWEJ W POŁĄCZENIACH ŚRUBOWYCH

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VARIATION OF AXIAL FORCE IN THE SCREW CONNECTIONS

Słowa kluczowe:

tarcie, współczynnik tarcia, połączenia śrubowe, siła osiowa w śrubie, zacisk wstępny, moment dokręcania

Key words:

friction, coefficient of friction, screw connections, the axial force in the bolt, clamp pre-torque

Streszczenie

Przedstawiono dwie analizy rozrzutu wartości zacisku wstępnego w śrubie podczas montażu połączeń śrubowych. Analiza teoretyczna oparta jest na zmienności współczynnika tarcia, nawet dla tego samego rodzaju materiału śrub. W praktyce stosowane są różne materiały konstrukcyjne,

* Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, ul. J. Krasickiego 54, 26-600 Radom.

co dodatkowo zwiększa jego zakres zmienności. Powoduje to duży rozrzut wartości siły osiowej w śrubie w funkcji momentu dokręcania. Analiza doświadczalna polega na badaniu zmienności współczynnika tarcia w zależności od rodzaju pokrycia śrub. Przeprowadzone badania dwóch rodzajów śrub wskazują na stabilizację siły osiowej w funkcji momentu dokręcania, a także na wzrost jej wartości w odniesieniu do śrub niepokrytych. Zastosowanie pokryć (smarowanie) może spowodować zniszczenie połączenia śrubowego podczas montażu.

WPROWADZENIE

W praktyce inżynierskiej połączenia śrubowe odgrywają istotną rolę w konstrukcjach, maszynach i urządzeniach [L. 5, 8, 9]. Podczas montażu duży rozrzut wartości siły docisku wstępnego połączeń śrubowych, przy stałej wartości momentu dokręcania zmusza konstruktorów i badaczy do rozwiązania problemu stabilizacji i dokładnego określania tej wartości. Zbyt małe napięcie wstępne w śrubie nie zapewnia warunków połączenia, natomiast zbyt duże oprócz zgniecenia elementów łączonych może doprowadzić nawet do zerwania śruby lub uszkodzenia nakrętki. Dodatkowo przeanalizowano zależność oporów dokręcania jako funkcji kąta wzniosu linii śrubowej.

W pracy przedstawiono teoretyczną analizę zmienności siły osiowej na etapie projektowania z uwzględnieniem wpływu wartości współczynników tarcia na jej wartość. Uwzględniono zmienne wartości współczynnika tarcia na gwincie i na powierzchni oporowej nakrętki. W celu weryfikacji doświadczalnej przeprowadzono badania na wybranych rodzajach połączeń śrubowych. W praktyce najczęściej nie stosuje się smarowania śrub w czasie dokręcania. W szczególnych przypadkach zastosowanie smarowania ułatwia montaż połączenia, ale ma to wpływ na wartość siły osiowej w śrubie (może dojść do zniszczenia połączenia w czasie montażu).

TEORETYCZNA ANALIZA ZMIENNOŚCI SIŁY OSIOWEJ W POŁĄCZENIU GWINTOWYM

Moment dokręcania złącza śrubowego wywołuje siłę osiową rozciągającą śrubę oraz pokonuje moment tarcia na zwojach śruby i na powierzchni oporowej nakrętki [L. 1, 7, 10].

$$M = 0,5 \cdot Q \cdot d \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho) + 0,5 \cdot Q \cdot D \cdot \mu \quad (1)$$

gdzie:

- Q – siła osiowa w śrubie,
- d – średnia średnica (robocza) gwintu,
- D – średnia średnica (oporowa) nakrętki,
- μ – współczynnik tarcia,
- γ – kąt wznosu linii śrubowej gwintu,
- ρ – kąt pozornego współczynnika tarcia.

Po przekształceniu otrzymujemy:

$$\frac{2M}{d \cdot Q} = \operatorname{tg}(\gamma + \rho) + \frac{D}{d} \cdot \mu \quad (2)$$

Wprowadzając:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{h}{\pi \cdot d} \quad (3)$$

gdzie: h – skok gwintu

oraz

$$\operatorname{tg}\rho = \frac{\mu}{\cos 0,5\alpha} \quad (4)$$

gdzie: α – zarys roboczy gwintu – dla gwintów metrycznych $\alpha = 60^\circ$.

Dla najczęściej stosowanych śrub można przyjąć średnio [L. 7, 9, 10]:

$$\frac{h}{d} - 0,1 \div 0,2; \mu - 0,1 \div 0,3; \text{ i } \frac{D}{d} - 1,3.$$

Możemy obliczyć krańcowe wartości:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{h}{\pi \cdot d} = \frac{0,1}{\pi} \approx 0,03 \text{ i } \operatorname{tg}\gamma = \frac{h}{\pi \cdot d} = \frac{0,2}{\pi} = 0,06 \quad (5)$$

oraz

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\mu}{\cos 0,5\alpha} = \frac{0,1}{\cos 30} \approx 0,11 \quad (6)$$

i

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\mu}{\cos 0,5\alpha} = \frac{0,3}{\cos 30} \approx 0,33 \quad (6a)$$

a także

$$\frac{D}{d} \cdot \mu = 1,3 \cdot 0,1 = 0,13 \quad (7)$$

i

$$\frac{D}{d} \cdot \mu = 1,3 \cdot 0,3 = 0,39 \quad (7a)$$

Dla wybranego rodzaju śruby ($d = 27$) możliwe krańcowe wartości wynoszą odpowiednio:

$$\frac{2M}{d \cdot Q} = \operatorname{tg}(2 + 6) + 0,13 = 0,27 \quad (8)$$

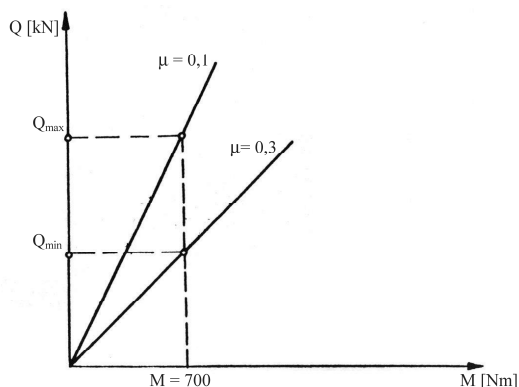
$$\frac{2M}{d \cdot Q} = \operatorname{tg}(4 + 17) + 0,39 = 0,77 \quad (8a)$$

Po przekształceniu wzorów otrzymamy wartości siły osiowej

$$Q_{\min} = 70 \text{ [kN]},$$

$$Q_{\max} = 233 \text{ [kN]}.$$

Na rysunku poniżej przedstawiono zależność siły osiowej w śrubie od momentu dokręcania dla różnych współczynników tarcia.



Rys. 1. Wpływ zmiany współczynnika tarcia na wielkość siły osiowej w śrubie
 Fig. 1. Effect of changes in the size of the coefficient of friction in the bolt axial force

METODYKA I WYNIKI BADAŃ WPŁYWU WYBRANYCH POKRYĆ ŚRUB NA WARTOŚĆ SIŁY OSIOWEJ W ŚRUBIE

Badania przeprowadzono na urządzeniu typu Skidmore-Wilhelm [L. 2], które umożliwia odczytywanie wielkości siły osiowej dla dowolnie zadanej wartości momentu dokręcania uzyskanego za pomocą klucza dynamometrycznego. Poprzez naklejenie na kluczu dynamometrycznym tensometrów i podłączenie ich do miernika cyfrowego usprawniono odczyt wartości momentów dokręcania i odpowiadającym im sił osiowych w śrubie [L. 4, 6].

Do badania wpływu wybranych pokryć śrub na wartość momentu dokręcania użyto śruby i nakrętki M27x1,5. Śruba wykonana była ze stali 15B37H, a nakrętka ze stali 40HM. Wszystkie śruby i nakrętki wyprodukowane były w 8 klasie dokładności wykonania.

Ponieważ śruba i nakrętka stanowią jedną całość, będziemy używać nazwy śruba, rozumiejąc ją jako całość z nakrętką. W niniejszych badaniach wybrano następujące przypadki: 1 – śruby bez pokrycia i niesmarowane, 5 – śruby fosforanowane i pokryte tektylem. Założono skokowe zmiany wartości momentu dokręcania dla wyżej wymienionych przypadków o wartość 150 Nm i użyto po 6 sztuk śrub każdego rodzaju. Dodatkowo dla kilku śrub zwiększono moment dokręcania do takiej wartości, przy której, złącze uległo zniszczeniu. Zaobserwowano zrywanie rdzenia śruby albo niszczenie gwintu na śrubie lub na śrubie i nakrętce [L. 3].

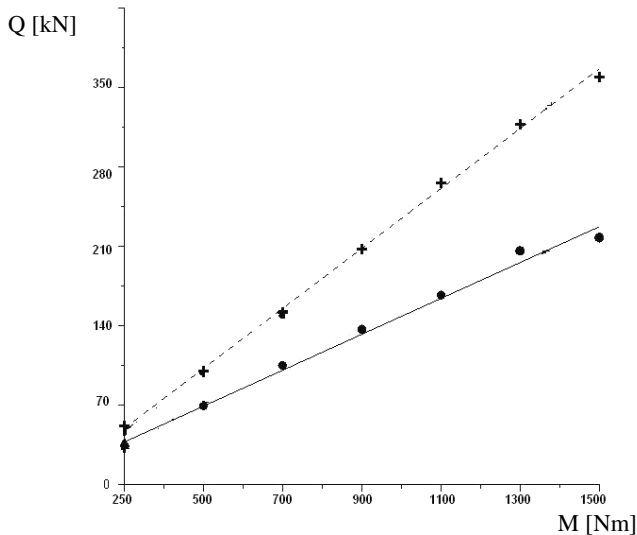
Dla wybranych pokryć śrub M27x1,5 uzyskane wartości siły osiowej (obliczone jako średnia arytmetyczna z 6 pomiarów) jako funkcji zada-

wanego momentu dokręcania przedstawiono w **Tabeli 1** oraz w sposób graficzny na **Rys. 2**. Wynika z nich, że zastosowane pokrycie spowodowało znaczny wzrost wartości siły osiowej przy stałej wartości momentu dokręcania.

Tabela 1. Wyniki badań wpływu wybranych pokryć śruby M 27x1,5 na rzeczywistą wielkość siły osiowej w śrubie

Table 1. The results of the impact of the cover metric thread M 27x1.5 on the actual size of the bolt axial force

Moment dokręcania [Nm]	Siła osiowa w śrubie (wartość średnia z 6 prób) [kN]	
	Śruba bez pokrycia i niesmarowana	Śruba fosforanowana i pokryta tektylem
250	39,40	51,13
500	83,27	114,83
700	120,45	165,40
900	155,50	218,87
1100	172,90	265,30
1300	207,77	315,73
1500	233,00	364,28



Rys. 2. Zależność siły osiowej w śrubie od wartości momentu dokręcania dla wybranych pokryć śruby i nakrętki M27x1,5

Fig. 2. Dependence of axial force in bolt torque value for the selected cover bolts and nuts M27x1,5

Rozrzut (różnica między wartością siły maksymalnej i minimalnej uzyskana w badaniach odniesiona do wartości minimalnej) wartości sił osiowych w śrubie przy zadanym momencie wyniósł w przypadku śrub bez pokrycia i niesmarowanych 13%. Rozrzut wartości sił osiowych dla śrub fosforanowanych pokrytych tektylem – 12%.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonej analizy teoretyczno-eksperymentalnej można stwierdzić, że:

- kąt wzniosu linii śrubowej nie wpływa istotnie na zmianę wartości siły osiowej w śrubie,
- zmiana współczynnika tarcia w połączeniu śrubowym może spowodować kilkakrotną zmianę siły osiowej,
- przy stałym momencie dokręcania mogą wystąpić duże rozrzuty wartości siły osiowej,
- zastosowane pokrycie śrub stabilizuje współczynnik tarcia w całym zakresie dokręcania,
- zastosowane pokrycie powoduje zwiększenie siły osiowej w śrubie,
- przeprowadzone badania potwierdzają zmniejszenie rozrzutu wartości siły osiowej w śrubie w funkcji momentu dokręcania,
- przy każdorazowej zmianie pokrycia należy dla serii próbnej śrub przeprowadzić badania wartości siły osiowej w funkcji momentu dokręcania
- w praktyce podczas montażu połączeń śrubowych należy szczególną uwagę zwrócić na stabilność współczynnika tarcia.

LITERATURA

1. Ciecieląg J., Pawłowski B.: Zbiór zadań do ćwiczeń z podstaw konstrukcji maszyn, WSI, Radom 1980.
2. Ciecieląg J.: Badania wpływu wybranych pokryć śrub na wartość momentu dokręcania, XVII Sympozjon PKM, Lublin – Nałęczów 1995.
3. Ciecieląg J.: Analiza wpływu wybranych powłok na śrubach na wartość napięcia wstępnego w śrubie. Polska Tribologia 2000, Teoria i Praktyka, Prace Naukowe nr 1(17), Politechnika Radomska, Radom 2000, s. 24–30.
4. Kałuziński S.: Badania procesu dokręcania śrub kluczem dynamometrycznym, „Silniki Spalinowe” nr 1, 1978.

5. Kurmaz L.W., Kurmaz O.L.: Projektowanie węzłów i części maszyn, Kielce 2004.
6. Łoboda M., Cegielski B.: Uwarunkowania wartości napięcia wstępnego w śrubach głowicowych, „Technika Motoryzacyjna” nr 5 i 6, 1981.
7. Mazanek E.: Podstawy konstrukcji maszyn, Politechnika Częstochowska 1996.
8. Praca zbiorowa: Mały poradnik mechanika, WNT, Warszawa 1994.
9. Dietrich M.: Podstawy konstrukcji maszyn, PWN, Warszawa 1986.
10. Korewa W.: Części maszyn, PWN, Warszawa 1969.
11. Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wytrzymałość materiałów, PWN, Warszawa 1984.

Recenzent:
Czesław KUNDERA

Summary

Two studies show a scatter in the values of initial-clamp-bolt force data during the assembly of screw connections. Theoretical analysis is based on the friction coefficient of variation even for the same type of material screws. In practice, using different materials of construction further enhances its range of variability. This causes a large scatter of values in the bolt-axial force as a function of torque. Analysis of the experimental study involves the variability of the coefficient of friction depending on the type of cover screws. The study suggests two types of screws to stabilise the axial force as a function of torque, as well as increase its value in relation to uncoated screws. The use of a cover can damage the screw joint during assembly.