

# Analiza trwałości zmęczeniowej połączeń śrubowych z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS

## Fatigue life analysis of bolt joints with use of ANSYS software

MICHAŁ JASZTAŁ  
MARIUSZ RĘGOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.96>

Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia trwałości zmęczeniowej połączeń śrubowych elementów konstrukcji. Dokonano w nim analizy czynników wpływających na trwałość zmęczeniową połączeń śrubowych oraz omówiono wybrane sposoby jej poprawy. Zamieszczono przykłady obliczeń numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS, obrazujące wpływ napięcia wstępnego śruby na trwałość zmęczeniową połączenia. Zaprezentowane wyniki obliczeń trwałości uzyskano dla połączenia śrubowego doczołowego, obciążonego wzdłuż osi śruby, oraz połączenia śrubowego zakładkowego, obciążonego prostopadłe do osi śruby.

**SŁOWA KLUCZOWE:** połączenia śrubowe, wstępne napięcie śruby, trwałość zmęczeniowa, obliczenia numeryczne

*The paper presents selected problems of fatigue life of bolt joints. An analysis of factors influencing fatigue life of bolt joints was performed and selected methods of improving life were described. Authors presents examples of numerical calculations with use of ANSYS software which depict influence of pre-tension in the bolt on fatigue life of the joint. Presented results of life calculation were carried out for bolt joint loaded along bolt axis and for bolt lap joint loaded perpendicular to bolt axis.*

**KEYWORDS:** bolt joints, pre-tension in the bolt, fatigue life, numerical calculation

Uszkodzenia wynikające ze zmęczenia materiału często występują w połączeniach elementów konstrukcji i mogą prowadzić do poważnych awarii lub katastrof. Obliczenia wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń, coraz częściej wykonywane z wykorzystaniem metod numerycznych, stanowią więc ważny element procesu projektowania [1–3].

Śruby poddane cyklicznemu rozciąganiu mają kształt, który jest niekorzystny z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej. Duża koncentracja naprężeń występuje w trzech fragmentach śruby: w miejscu przejścia łba śruby w trzpień, w rowku między trzpieniem i gwintem oraz w samym gwincie.

Łeb śruby jest obciążony w niekorzystny sposób, ponieważ obciążenie występuje blisko karbu (przejścia trzpienia w łeb śruby). Niestety promień zaokrąglenia pomiędzy łbem śruby a trzpieniem nie może być duży ze względu na współpracę z krawędziami otworu. Dolna płaszczyna łba śruby i płaszczyna elementu łączonego powinny być idealnie równoległe – w przeciwnym razie łeb śruby jest obciążony dodatkowo poprzez zginanie, co osłabia wytrzymałość zmęczeniową śruby.

Rowek pomiędzy trzpieniem a gwintem, występujący w niektórych śrubach, nie jest „krytyczny” z punktu widzenia zmęczenia, ponieważ jego promień jest większy

niż promień rowków w gwincie śruby, gdzie dochodzi do znacznej koncentracji naprężeń. Ponadto obciążenie przekazywane ze śruby na nakrętkę nie jest w gwincie rozłożone równomiernie. Większość uszkodzeń powstałych w wyniku zmęczenia występuje właśnie w tym miejscu śruby.

### Sposoby poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń śrubowych

W procesie projektowania stosuje się kilka sposobów poprawy trwałości zmęczeniowej śrub [4–6]. Jeden polega na zwiększeniu promienia przejścia między łbem śruby a trzpieniem, co zmniejsza koncentrację naprężeń w tej lokalizacji. Inny sposób wiąże się z wykonaniem gwintów śrub i nakrętek metodą rolowania, co powoduje powstanie struktury włóknistej, zgodnej z profilem gwintu. Rolowanie poprawia też jakość powierzchni i wprowadza naprężenia ściskające w gwincie śruby. Trwałość i wytrzymałość zmęczeniowa śruby rolowanej są znacznie lepsze niż śruby z gwintem toczonego. Mimo to specjalnie wykonane śruby i nakrętki nie są często wykorzystywane w konstrukcjach narażonych na obciążenia zmęczeniowe. Projektanci wolą polegać na śrubach wykonanych z wysokowytrzymałej stali, które umożliwiają zastosowanie wstępnego napięcia śrub, tzw. sprężenia.

Podczas montażu ważne jest stosowanie odpowiedniego momentu dokręcenia śruby. Powoduje to zwiększenie naprężeń średnich, jednak zmniejsza się amplituda naprężeń. Biorąc pod uwagę przeważające znaczenie wartości amplitudy naprężeń, można w ten sposób uzyskać znaczny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej.

Mechanizm wpływu wstępnego napięcia w śrubach na wytrzymałość zmęczeniową wyjaśniono na rys. 1. Elementy A i B są ściskane przez napięcie wstępne śruby, które powoduje powstanie siły ściskającej w obszarze kontaktu pomiędzy tymi elementami ( $P_{\text{contact}}$ ). W nieobciążonych połączeniach  $P_{\text{contact}} = -P_0$ , gdzie  $P_0$  jest napięciem wstępnym w śrubach. Jeśli połączenie jest obciążone siłą  $P$ , to obciążenie śruby ( $P_{\text{bolt}}$ ) zwiększa się, natomiast siła w obszarze kontaktu  $P_{\text{contact}}$  jest mniejsza. To oznacza, że transmisja obciążenia w połączeniu występuje częściowo poprzez śrubę, a częściowo poprzez obszar kontaktu. Przyrost obciążenia w śrubie będzie mniejszy niż przyrost obciążenia całego połączenia. Równanie przyrostu obciążenia jest następujące:

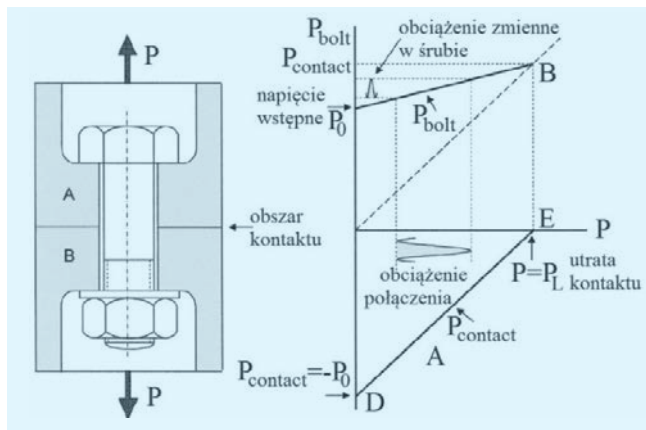
$$P = \Delta P_{\text{bolt}} + \Delta P_{\text{contact}} \Rightarrow \Delta P_{\text{bolt}} = P - \Delta P_{\text{contact}} \quad (1)$$

W przypadku rosnącego obciążenia  $P$  siła w obszarze kontaktu będzie mniejsza, co oznacza, że  $P_{\text{contact}}$  staje się „mniej ujemne”, natomiast  $\Delta P_{\text{contact}}$  jest dodatnie. W związku z tym:

$$\Delta P_{\text{bolt}} < P \quad (2)$$

\* Dr inż. Michał Jaształ (michal.jaształ@wat.edu.pl), inż. Mariusz Ręgowski (mariusz.regowski@student.wat.edu.pl) – Wojskowa Akademia Techniczna

Jeżeli obciążenie  $P$  wzrasta od zera do wartości  $P_L$ , siła kontaktu zmniejsza się od wartości  $P_{\text{contact}} = -P_0$  do osiągnięcia wartości  $P_{\text{contact}} = 0$  w punkcie E (rys. 1). Podczas tego samego wzrostu obciążenia od  $P = 0$  do  $P = P_L$  obciążenie w śrubie wzrasta od obciążenia wstępnego  $P_0$  do  $P = P_L$ . Okazuje się więc, że zmienność obciążenia w śrubie jest znacznie mniejsza niż zmienność obciążenia całego połączenia, ponieważ napięcie wstępne w śrubie zwiększa wartość naprężenia średniego  $S_m$  w cyklu obciążenia i jednocześnie redukuje amplitudę  $S_a$  tego cyklu. Należy jednak pamiętać że, jeśli  $P > P_L$ , wtedy kontakt pomiędzy powierzchniami elementów połączenia jest tracony i obciążenie śruby  $P_{\text{bolt}}$  jest równe przyłożonemu obciążeniu  $P$ .



Rys. 1. Ilustracja efektu zastosowania napięcia wstępnego śruby [4]

Efekt stosowania napięcia wstępnego może być wzmocniony przez zmniejszenie sztywności śruby:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{bolt}} &= C_{\text{bolt}} \Delta l \\ \Delta P_{\text{contact}} &= C_c \Delta l \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:  $C_{\text{bolt}}$  – współczynnik sztywności śruby,  $C_c$  – współczynnik sztywności ściskanego materiału połączenia,  $\Delta l$  – wydłużenie śruby.

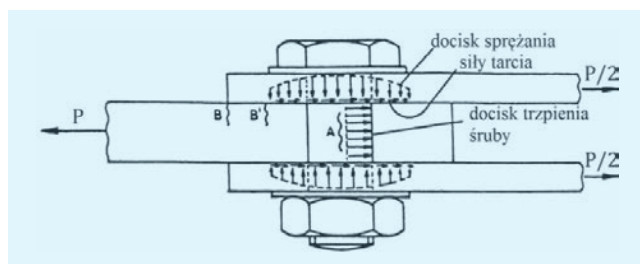
Po podstawieniu do równania (1):

$$\frac{\Delta P_{\text{bolt}}}{P} = \frac{1}{1 + C_c / C_{\text{bolt}}} \quad (4)$$

Zgodnie z równaniem (4) niższy współczynnik sztywności śruby  $C_{\text{bolt}}$  redukuje wartość siły w śrubie  $P_{\text{bolt}}$  i wzmacnia się korzystny wpływ naprężenia wstępnego. Niższy współczynnik sztywności śruby  $C_{\text{bolt}}$  można uzyskać dzięki zastosowaniu przewężenia trzpienia śruby bądź użyciu śruby wykonanej ze stopu tytanu o mniejszym (w porównaniu ze stalą) module Younga.

Naprężenie wstępne przynosi korzystne efekty, dopóki separacja pomiędzy powierzchniami styku nie występuje. Z tego powodu wysokowytrzymałe śruby stalowe są wstępnie napinane do 70% wartości granicy plastyczności  $S_{0.2}$ . Przyczynia się to również do bardziej jednorodnego przenoszenia obciążenia wzdłuż gwintu śruby.

Wprowadzanie napięcia wstępnego śrub ma wpływ nie tylko na trwałość zmęczeniową samej śruby, lecz także na trwałość zmęczeniową całego połączenia. Przeniesienie obciążenia między elementami połączenia zakładkowego, obciążonego w sposób pokazany na rys. 2, zapewnia się częściowo przez siły tarcia. Jeżeli nie zastosuje się wstępnego napięcia śruby, pęknięcia powstałe w wyniku zmęczenia rozpoczynają się na krawędzi otworu na powierzchni A (rys. 2).

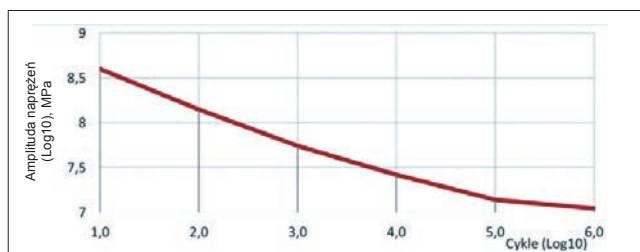


Rys. 2. Zmiana punktu inicjacji pęknięć po zastosowaniu wstępnego napięcia śruby [4]

Po wprowadzeniu napięcia wstępnego śruby przemieszczenia cierne ulegają zmniejszeniu i następuje bardziej korzystna dystrybucja naprężeń. W efekcie inicjacja pęknięcia zmęczeniowego przesuwają się do punktu B lub B'. Poprawę wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej uzyskuje się dzięki zwiększaniu wartości wstępnego napięcia śruby, ale tylko do momentu przesunięcia inicjacji pęknięcia do punktu B lub B'. Dalsze zwiększanie wartości wstępnego napięcia śruby nie przyniesie już poprawy własności zmęczeniowych połączenia.

### Obliczenia numeryczne trwałości zmęczeniowej połączeń ze śrubą wstępnie napiętą

Numeryczne obliczenia trwałości zmęczeniowej wybranych połączeń śrubowych przeprowadzono w oprogramowaniu ANSYS. Pierwszym badanym obiektem była śruba rozciągana w kierunku jej osi (jak na rys. 1). Przyjęto, że badane elementy zostały wykonane ze stali konstrukcyjnej o module Younga  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Pa, współczynniku Poissona  $\nu = 0,3$  oraz wytrzymałości zmęczeniowej opisanej wykresem Wöhlera (rys. 3). Ponadto korekta wytrzymałości zmęczeniowej ze względu na wartość naprężenia średniego była realizowana według teorii Goodmana.



Rys. 3. Wykres Wöhlera dla przyjętego materiału [7]

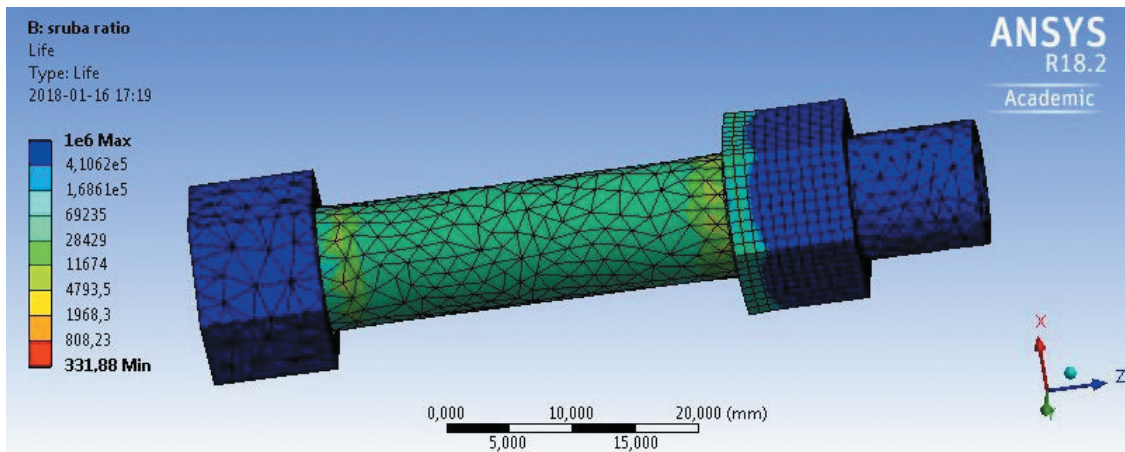
Numeryczną analizę trwałości zmęczeniowej śruby w połączeniu przeprowadzono dla dwóch wariantów obciążenia:

- bez napięcia wstępnego i przy obciążeniu siłą rozciągającą zmieniającą się w zakresie 0÷5000 N,
- ze stałym napięciem wstępnym śruby wynoszącym 2500 N oraz przy obciążeniu siłą rozciągającą zmieniającą się w zakresie 0÷2500 N, co sumarycznie daje maksymalne obciążenie 5000 N.

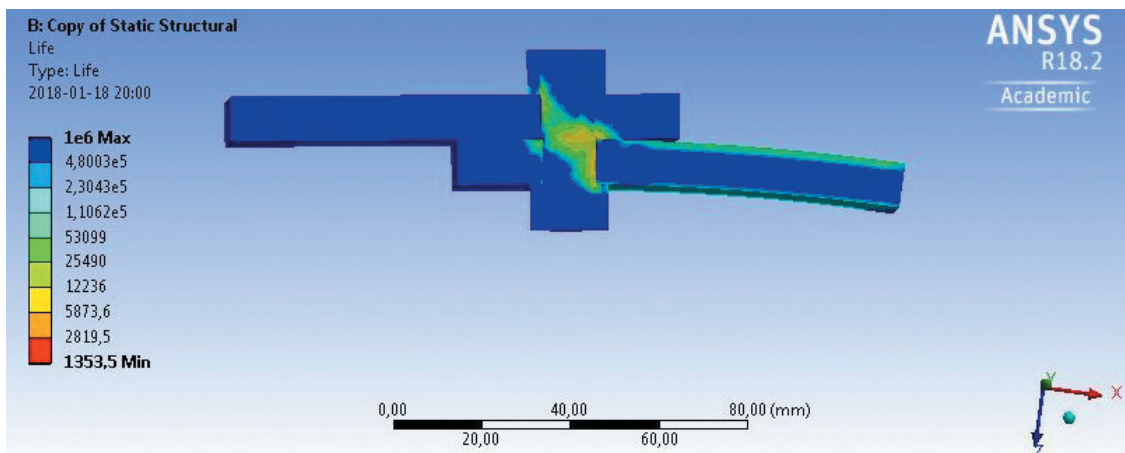
Należy zaznaczyć, że zmienność obciążenia dotyczy jedynie rozciągania, natomiast stałe, wstępne napięcie śruby zwiększa wartość naprężeń średnich.

W wyniku obliczeń numerycznych uzyskano wartość trwałości zmęczeniowej dla pierwszego wariantu obciążenia śruby wynoszącą 90 cykli, natomiast dla drugiego wariantu (z napięciem wstępnym) trwałość zmęczeniowa wyniosła 331 cykli (rys. 4).

Otrzymane wyniki obliczeń potwierdzają sformułowany wcześniej wniosek, że dzięki zastosowaniu wstępnego



Rys. 4. Wynik obliczeń trwałości zmęczeniowej śruby ze wstępnym napięciem [7]



Rys. 5. Wynik obliczeń trwałości zmęczeniowej połączenia z napięciem wstępnym śruby [7]

napięcia śruby uzyskuje się przeważający pozytywny efekt zmniejszenia amplitudy naprężeń pomimo zwiększenia naprężenia średniego w śrubie (niekorzystnego z punktu widzenia zmęczenia). W konsekwencji osiąga się poprawę trwałości zmęczeniowej połączenia.

Drugim analizowanym rodzajem połączenia śrubowego było połączenie zakładkowe poddane obciążeniu w dwóch wariantach – ze śrubą wstępnie napiętą i bez wstępnego napięcia. To pozwoliło znaleźć odpowiedź na pytanie, jak wstępne napięcie śruby wpływa na trwałość zmęczeniową tego typu połączenia. Model połączenia zakładkowego został utwierdzony na zewnętrznym końcu jednej zakładki, a obciążenie w postaci ciągnięcia o wartości 5 MPa przyłożono do zewnętrznego końca drugiej zakładki. Dodatkowo w drugim wariantcie obliczeń śruba została napięta siłą 2000 N. Pomiędzy zakładkami założono istnienie tarcia ze współczynnikiem  $\mu = 0,3$ .

W pierwszej kolejności wykonano obliczenia trwałości zmęczeniowej połączenia zakładkowego bez napięcia wstępnego śruby – jego trwałość wyniosła 1210 cykli. Natomiast dla połączenia z naprężeniem wstępnym śruby trwałość zmęczeniowa (rys. 5) była większa i wyniosła 1353 cykle.

Zgodnie z przeprowadzonym na wstępie rozważaniem zastosowanie naprężenia wstępnego śruby w połączeniu zakładkowym korzystnie wpływa na jego trwałość zmęczeniową – w badanym przypadku zwiększyła się ona o ok. 150 cykli obciążenia.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane sposoby poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń śrubowych. Szczegół-

ną uwagę poświęcono zastosowaniu wstępnego napięcia śrub. Opisany za pomocą zależności matematycznych oraz zobrazowany graficznie mechanizm wpływu wstępnego napięcia w śrubach na wytrzymałość zmęczeniową pozwolił określić warunki graniczne występowania oraz możliwości wzmocnienia pozytywnego efektu napięcia wstępnego śruby – zarówno w przypadku połączeń doczołowych, jak i zakładkowych.

Zamieszczone przykłady obliczeń numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS obrazują wpływ napięcia wstępnego śruby na trwałość zmęczeniową połączenia. Zaprezentowane wyniki obliczeń trwałości, uzyskane dla śruby obciążonej wzdłuż jej osi oraz dla połączenia śrubowego zakładkowego obciążonego prostopadle do osi śruby, potwierdzają wnioski sformułowane na podstawie rozważań przeprowadzonych w pierwszej części artykułu.

## LITERATURA

1. Kocańda S., Szala J. „Podstawy obliczeń zmęczeniowych”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1985.
2. Nieoczym A. „Wybrane zagadnienia wytrzymałościowe połączeń gwintowych”. Lublin: LTN, 2003.
3. Szewczyk K. „Połączenia gwintowe”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1991.
4. Schijve J. „Fatigue of structures and materials”. National Aerospace Lab NLR, Springer, 2009.
5. Shinichi Nishida. „Failure Analysis in Engineering Applications”. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
6. Hertel H. „Fatigue Strength of Structures”. Berlin: Springer-Verlag, 1969.
7. Rękowski M. „Analiza trwałości zmęczeniowej wybranych połączeń elementów konstrukcyjnych”. Warszawa: WAT, praca dyplomowa pod kierownictwem Michała Jaształa, 2018.