

Alicja BALIN, Marek CIEŚLA,  
Adam KWAŚNICKI

## WPLYW TECHNOLOGII OCHRONNYCH WARSTW WIERZCHNICH NA TRWAŁOŚĆ ŚRUB ZŁĄCZNYCH ZE STALI 40HN

Streszczenie: W pracy opisano problemy badań zmęczeniowych, złącz śrubowych w zakresie sprężystym, jak również w zakresie małej liczby cykli z uwzględnieniem wpływu technologii warstwy wierzchniej na trwałość zmęczeniową.

### 1. Wprowadzenie

Większość części złącznych (w szczególności zaś śruby ze stali o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych) w czasie eksploatacji narażonych jest na obciążenia zmienne. Jak wiadomo, obciążenia zmienne, szczególnie o dużej amplitudzie, powodują zmniejszenie trwałości złącza. Zagadnienie zmęczenia w odniesieniu do śrub jest tym ważniejsze, że mamy z reguły do czynienia z działaniem karbu na przejściu części roboczej śruby do główki, na przejściu części gwintowanej w niegwintowaną, na dnie gwintu, w szczególności w pobliżu nakrętki.

Działanie karbu między innymi jest powodem spiętrzenia naprężeń i szybkiego zmęczenia materiału śruby. Należy nadmienić, że bardzo często na trwałość śrub złącznych duży wpływ mają takie niekorzystne czynniki, jak: agresywne i korodujące środowisko, zmienne pole temperatur itp.

Celem zabezpieczenia śrub przed korozją często stosuje się odpowiednie ochronne warstwy wierzchnie. Technologia nanoszenia tych warstw również często ma wpływ na rozkład naprężeń własnych i geometrię warstwy wierzchniej, a tym samym i na trwałość zmęczeniową. Na dodatek przy śrubach ze stali o podwyższonych własnościach wytrzymałościowych, np. wykonanych w klasie 8.8 lub 10.9, granica plastyczności materiału leży nieznacznie poniżej granicy wytrzymałości, zaś całkowite wydłużenia są nieduże. Wszystko to powoduje, że zapas plastyczności materiału nie jest duży. Biorąc pod uwagę wszystkie okoliczności, nie można pominąć zagadnienia zmęczenia śrub, a więc i badań zmęczeniowych, które w odniesieniu do śrub nie są do tej pory objęte polskimi normami. Międzynarodowa norma dotycząca badań zmęczeniowych śrub (SO 3800/I) ukazała się w roku 1977.

Zakład Części Złącznych Centralnego Laboratorium Przemysłu Wytwarzania Metalowych zamierza rozpocząć wszechstronne badania zmęczeniowe śrub oraz zgromadzić materiał doświadczalny, który będzie przydatny przy opracowywaniu odpowiednich norm dotyczących badań zmęczeniowych śrub. Zamieszczone w niniejszej pracy badania mają dostarczyć wstępnego materiału doświadczalnego, w oparciu o który można by opracować szczegółowy plan badań.

## 2. Metodyka i zakres badań

Norma określająca badania zmęczeniowe śrub (SO 3800/I) ujmuje tradycyjne metody badań zmęczeniowych, które - jak wiadomo - są długotrwałe, kosztowne i wymagają dużej liczby próbek, celem statystycznego opracowania wyników badań. Opracowując długoterminowy plan badań należałoby tak ustalić metodykę przeprowadzania badań, aby istniała możliwość uwzględnienia tych czynników, które posiadają decydujący wpływ na trwałość zmęczeniową śrub, a zarazem tak, aby doprowadziły do wypracowania możliwie krótkich i ekonomicznych metod badań zmęczeniowych. Proponuje się przy opracowywaniu planu badań uwzględnić kompleksowo następujące czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową śrub:

- 1) technologię, w szczególności zaś technologię warstwy wierzchniej i obróbki cieplnej,
- 2) materiał,
- 3) wielkość i kształt śruby,
- 4) warunki pracy śruby (obciążenia, parametry środowiska).

Praca niniejsza dotyczy badań trwałości śrub ze stali 40HN w zależności od technologii pokrycia ochronnego ich powierzchni i stanowić będzie część zaplanowanego ujęcia omawianego problemu.

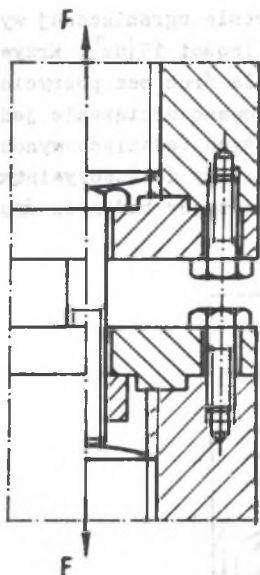
## 3. Przygotowanie próbek

Do badań przygotowano śruby M8 o całkowitej długości 50 mm wykonane ze stali 40HN zgodnie z normą PN-70/M-82054 w klasie 8.8 ( $R_m = 800$  MPa,  $R_e = 0,8 R_m$ ).

Badaniami objęto cztery rodzaje tych śrub. Śruby te różniły się technologią naniesienia warstwy wierzchniej. Oznaczenia rodzajów śrub zestawiono w tablicy 1.

Celem przeprowadzenia badań śrub M8 skonstruowano i wykonano odpowiednie uchwyty, które zapewniły przeprowadzenie próby statycznego rozciągania oraz badań zmęczeniowych przy tych samych warunkach zamocowania próbek w uchwytach. Mocowanie śrub w uchwytach pokazano na rys. 1.

Tablica 1



Oznaczenie śrub	Rodzaj pokrycia śrub
1	bez pokrycia
2	cynkowane i odwodorowane po pasywacji
3	cynkowane i odwodorowane przed pasywacją
4	cynkowane bez odwodorowania

#### 4. Przebieg badań i ich wyniki

Rys. 1. Mocowanie śruby w uchwytach

Zarówno statyczną próbę rozciągania, jak i badania zmęczeniowe przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej MTS. Pozwala ona na przeprowadzenie statycznej próby rozciągania zarówno przy zachowaniu stałej szybkości narastania siły, jak również stałej szybkości wydłużenia. Prowadząc badania przy zmiennych obciążeniach (badania zmęczeniowe), można w szerokim zakresie zmieniać częstotliwość zmian obciążeń, jak również amplitudę oraz korzystać z automatycznej regulacji stałości naprężenia maksymalnego lub całkowitego odkształcenia.

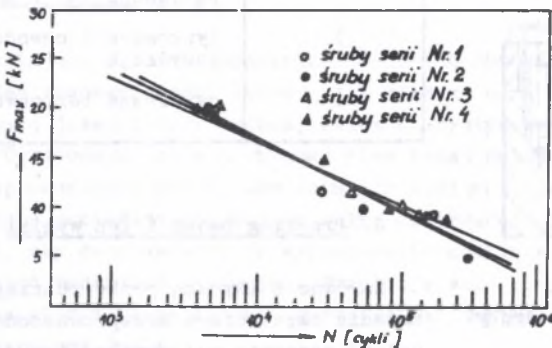
Wyniki szczegółowe próby rozciągania w zależności od rodzaju technologii pokrycia warstwą wierzchnią przedstawia tablica 2.

Tablica 2

Oznaczenie śrub (rodzaj pokrycia)	1	2	3,1	3,2	4
$R_m$ [MPa]	995	1018	1023	763	1081

Przy zrywaniu śrub z jedną nakrętką następuje zniszczenie (ścięcie) gwintu w nakrętce. Siła ścinająca jest wtedy o około 25 % mniejsza od siły zrywającej śrubę w rdzeniu gwintu (pozycja 3.2 w tablicy 2).

Badania zmęczeniowe przeprowadzono jedynie w zakresie ograniczonej wytrzymałości przy obciążeniu sinusoidalnym o częstotliwości 15 [Hz]. Krzywą Wöhlera dla cyklu symetrycznego wyznaczono jedynie dla śrub bez pokrycia. Natomiast dla wszystkich czterech rodzajów śrub stosowano obciążenie jednostronne rozciągające. Najmniejsze obciążenia przy tych badaniach wynosiły 0,5 [kN]. Ten rodzaj obciążenia jest bardziej zbliżony do rzeczywistych warunków pracy śrub. Krzywe Wöhlera dla wszystkich rodzajów badanych śrub w układzie półlogarytmicznym pokazano na rys. 2.

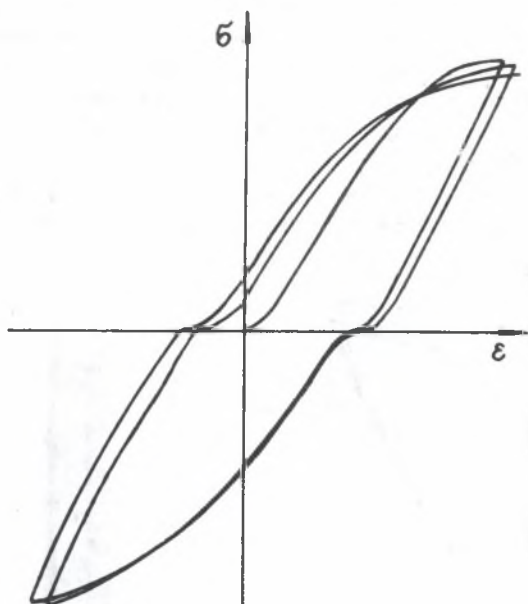


Rys. 2. Krzywa Wöhlera w układzie półlogarytmicznym przy jednostronnym rozciąganiu (śruby serii nr 1-4)

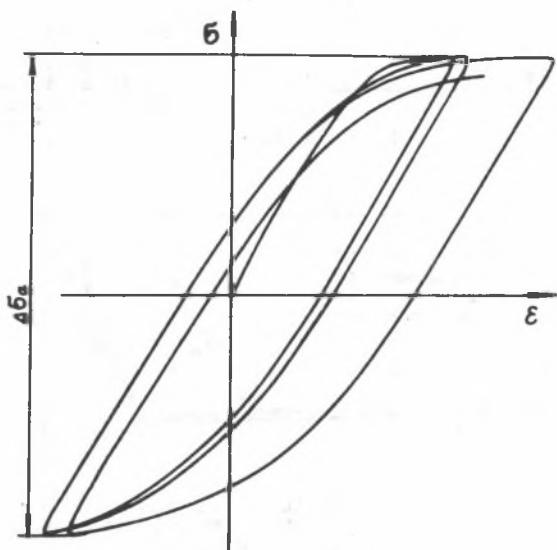
Badania zmęczeniowe przy małej liczbie cykli prowadzono również przy obciążeniu sinusoidalnym i cyklu symetrycznym, jednakże o bardzo małej częstotliwości wynoszącej 0,1 [Hz]. Należy podkreślić, że połączenia śrubowe z reguły pracują przy cyklu niesymetrycznym, np. rozciągającym. W praktyce bardzo często spotyka się takie przypadki pracy złącza, w których amplituda obciążeń zmiennych jest stała. Są również przypadki, w których całkowite odkształcenie zachowuje wartość stałą, np. przy połączeniu sztywnego elementu w stałej temperaturze. Dlatego badania prowadzono w dwóch różnych wariantach. W pierwszym przypadku stosowano stałe naprężenia, w drugim zaś stałe odkształcenia.

Badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli przy stałym naprężeniu przeprowadzono dla amplitudy siły  $F_a = \pm 27,5$  [kN], co w przeliczeniu na przekrój rdzenia śruby odpowiada naprężeniu 855,4 [MPa]. Naprężenie to jest wyższe od granicy plastyczności.

Na rys. 3a pokazano przykładowo wadliwy wykres spowodowany nieprawidłowym mocowaniem śrub w uchwytach (luzy przy zmianie kierunku obciążenia) i prawidłowy wykres (rys. 3b) jako rezultat badań zmęczeniowych przy stałej amplitudzie naprężeń. Są to pętle histerezy przesuwane kolejno w kierunku rosnących wydłużeń trwałych próbki.



Rys. 3a. Wadliwy wykres  $\sigma(\epsilon)$  przy  $\Delta\sigma_a = \text{const}$ . spowodowany nieprawidłowym mocowaniem śrub (luzy)

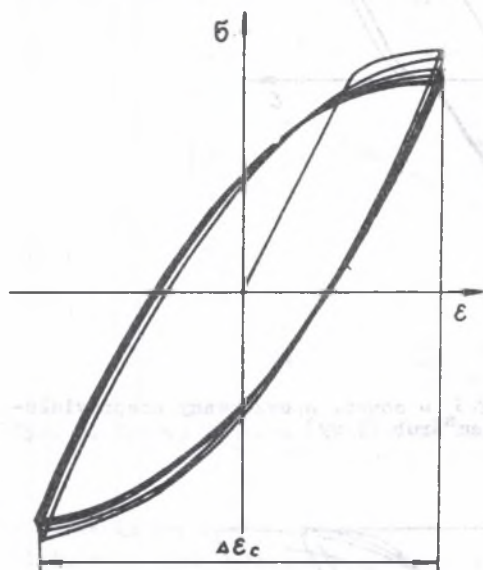


Rys. 3b. Prawidłowy wykres  $\sigma(\epsilon)$  przy  $\Delta\sigma_a = \text{const}$

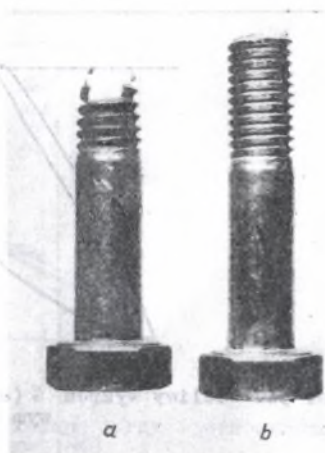
Badania w zakresie małej liczby cykli przy stałym odkształceniu prowadzono również przy obciążeniu sinusoidalnym o cyklu symetrycznym o częstotliwości 0,1 [Hz]. Podczas obciążenia próbki utrzymywano na stałym poziomie jej maksymalne wydłużenie wynoszące  $\Delta l = \pm 0,52$  [mm].

Wykresy pętli histerezy uzyskiwane przy tego rodzaju badaniach przykładowo przedstawiono na rys. 4.

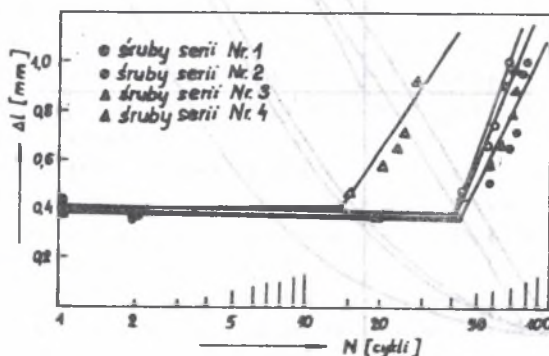
Wygląd śrub po zniszczeniu zmęczeniowym w zakresie sprężystym i plastycznym (badania niskocykliczne) przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Wykres  $\sigma(\varepsilon)$  przy  $\Delta\varepsilon_c = \text{const.}$



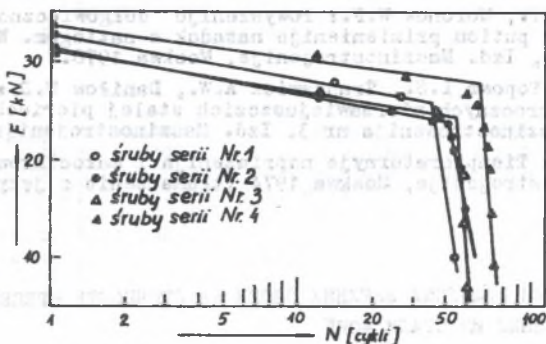
Rys. 5. Widok złomów śrub:  
a) po zmęczeniu w zakresie małej liczby cykli,  
b) po zmęczeniu w zakresie sprężystym



Rys. 6. Zależność  $\Delta l = f(N)$  w układzie półlogarytmicznym dla śrub serii nr 1-4

## 5. Analiza wyników badań

W rezultacie przeprowadzonych badań w zakresie małej liczby cykli, to znaczy prowadzonych przy maksymalnych naprężeniach wyższych od granicy plastyczności i małej częstości, sporządzono wykresy w układzie półlogarytmicznym zależności wydłużeń całkowitych odpowiadających kolejnym obciążeniom od liczby cykli  $\Delta l = f_1(N)$  przy  $F_{\max} = \text{const}$  (rys. 6) oraz zależności siły maksymalnej od liczby cykli  $F_{\max} = f_2(N)$  przy  $\Delta l = \text{const}$  (rys. 7).



Rys. 7. Zależność  $F_{\max} = f(N)$  w układzie półlogarytmicznym dla śrub serii nr 1-4

Spadek amplitudy naprężeń wraz ze wzrostem liczby cykli przy  $\Delta l = \text{const}$  zarejestrowano bezpośrednio na maszynie MTS.

Złomy śrub po zmęczeniu w zakresie małej liczby cykli różnią się od złomów zmęczeniowych prowadzonych w zakresie sprężystym (rys. 5) tym, że są nieregularne i nieprostopadłe do osi śruby.

## 6. Wnioski

1. Największą wytrzymałość na rozciąganie wykazują śruby cynkowane oznaczone numerem 4 (tablica 1).
2. Wyniki badań zmęczeniowych prowadzonych w zakresie sprężystym nie wykazują zasadniczych różnic dla śrub z poszczególnych serii.
3. Wyniki badań zmęczeniowych prowadzonych w zakresie małej liczby cykli wyraźnie wskazują, iż śruby z serii 3, to znaczy cynkowane i odwodorowane przed pasywacją, posiadają najniższą trwałość zmęczeniową. Trwałość tych śrub jest prawie trzykrotnie niższa. Potwierdzają to badania prowadzone przy stałym naprężeniu.

4. Badania w zakresie małej liczby cykli potwierdzają wyniki statycznej próby rozciągania. Śruby z serii 4 posiadają najwyższą wytrzymałość statyczną i najwyższą trwałość zmęczeniową.
5. Badania zmęczeniowe prowadzone w zakresie małej liczby cykli są mniej czasochłonne, tańsze i bardziej czułe, lecz do ich przeprowadzenia konieczne jest odpowiednie zautomatyzowane urządzenie.

#### LITERATURA

- [1] Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1978.
- [2] Grigoriew W.P., Woronow W.F.: Powszechnienie dołgowieczności boltowych sojedinenij putiom primienienija nasadok s natiogom. Wiestnik maszynostrojenija, Izd. Maszynostrojenije, Moskwa 1978.
- [3] Potak A.M., Popowa L.S., Tranczewicz A.W., Daniłow U.S.: Bolty iz nowych wysokoprocnych nierżawiejuszczich stalej pieriechodnogo klasa. Wiestnik maszynostrojenija nr-3. Izd. Maszynostrojenije. Moskwa 1978.
- [4] Manson S.S.: Tiempieraturnyje napriazhenija i małocikłowaja ustałost. Izd. Maszynostrojenije, Moskwa 1974 (tłumaczenie z języka angielskiego).

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТНЫХ ВЕРХНИХ СЛОЕВ НА ПРОЧНОСТЬ КРЕПЕЖНЫХ БОЛТОВ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 40НН

#### Резюме

В работе описаны проблемы усталостных исследований крепежных болтов в диапазоне упругости, а также в диапазоне малого количества циклов, учитывая влияние технологии верхнего олю на усталостную прочность.

THE INFLUENCE OF THE PROTECTIVE COATS ON THE FATIGUE LIVES OF CONNECTION SCREWS MADE OF PHE 40HN STEEL

#### Summary

In the paper problems of fatigue experimental investigations of screw connections in the elastic range were described. The same was done for the low-cyclic range and the influence of protective coats on fatigue lives was taken into account.