

Bogusław Ładecki  
Joanna Augustyn-Nadzieja  
AGH w Krakowie, boglad@agh.edu.pl

# Problemy pęknięcia zmęczeniowego śrub łożyska kołnierzewego łopaty siłowni wiatrowej klasy 10.9

## Fatigue cracking problems of flange bearing bolts of class 10.9 wind turbine blades

### STRESZCZENIE

W referacie omówiono przypadek przedwczesnego występowania pęknięć zmęczeniowych śrub stalowych klasy 10.9 stosowanych w łożyskach kołnierzewych łopat siłowni wiatrowych. Przeprowadzone badania wizualne, metalograficzne i pomiary twardości, wykazały występowanie błędów w obróbce termicznej śrub, związanych ze znacznym odwęglaniem wierzchniej warstwy śrub, wraz z powstaniem licznych wtrąceń niemetalicznych w tej warstwie, co skutkuje znaczącym obniżeniem trwałości zmęczeniowej elementów.

**Słowa kluczowe:** połączenia śrubowe; pęknięcia zmęczeniowe; pęknięcia zmęczeniowe;; zmęczenie materiału; odwęglanie powierzchni.

### 1. Wstęp

Przedmiotem badań były śruby stalowe M24 klasy 10.9 o długości 180 mm, stosowane w połączeniu adaptera łożysk kołnierzewych łopat siłowni wiatrowej. Po niezbyt długim okresie eksploatacji nie przekraczającym ok. 9 lat stwierdzono występowanie wielokrotnych pęknięć śrub, jak również pęknięć nowo wkręconych śrub zastosowanych w miejsce wcześniej pękniętych. Pęknięcia śrub występowały w dwóch obszarach karbu geometrycznego: w pobliżu łba śruby, lub w obszarze karbu na początku gwintu – rys. 1.

Wykonane badania wizualne obu przełomów śrub wykazały,



Rys. 1. Pęknięte śruby M24: nr „I” i „III” w obszarze łba śruby, nr „II” od początku gwintu [1].

Fig. 1. Broken M24 screws: No. “I” and “III” in the screw head area, No. “II” from the beginning of the thread [1].

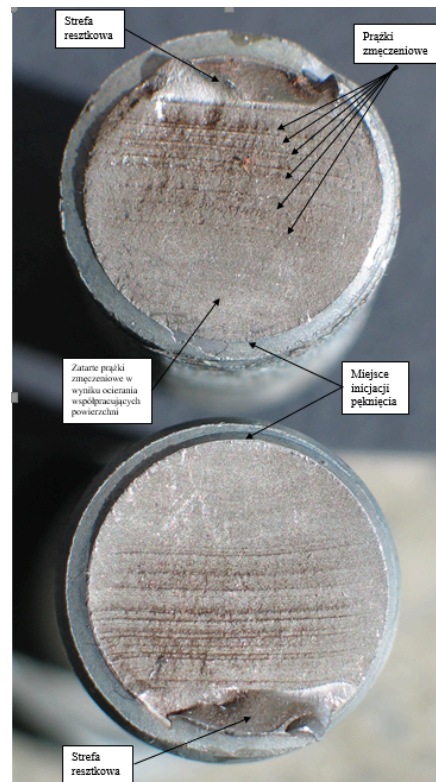
\*Autor korespondencyjny.  
E-mail: boglad@agh.edu.pl

### ABSTRACT

The paper discusses the case of premature occurrence of fatigue cracks in class 10.9 steel screws used in flange bearings of wind turbine blades. The conducted visual and metallographic tests and hardness measurements showed the occurrence of errors in the thermal treatment of screws, related to significant decarburization of the surface layer of the screws, along with the formation of numerous non-metallic inclusions in this layer, which results in a significant reduction in the fatigue life of the elements.

**Keywords:** class 10.9 screws; material fatigue; surface decarburization.

że przełomy te mają charakter zmęczeniowy, z widocznymi miejscami inicjacji pęknięcia na powierzchni przekroju, prążkami zmęczeniowymi i strefą reszkową [2, 3] – rys. 2. Do dalszych analiz wytypowano śrubę nr „I” z rys. 1, z której pobrano próbkę w pobliżu przełomu zmęczeniowego.



Rys. 2. Przełom zmęczeniowy śruby nr „II” z rys. 1 [1].  
Fig. 2. Fatigue fracture of screw no. “II” in Fig. 1 [1].

## 2. Analiza składu chemicznego i pomiary twardości

Przeprowadzona analiza wykazała (Tab. I), że skład chemiczny rozważanej stali jest zgodny z wymaganiami normy [4].

Tab. I. Skład chemiczny stali [1]

Tab. I. Chemical composition of steel [1]

| Badania próbka     | Zawartość masowa pierwiastka, % mas. |            |            |        |
|--------------------|--------------------------------------|------------|------------|--------|
|                    | C                                    | P          | S          | B      |
| Dane z [4]         | 0,20-0,55                            | max. 0,025 | max. 0,025 | 0,003  |
| Badania własne [1] | 0,248                                | 0,0068     | 0,01       | 0,0037 |

Pomiary twardości wykonane na przekroju poprzecznym śruby wykazały [1], że twardość ta na przekroju próbki ma stałą wartość  $37 \pm 0,5 \text{HRC}$  i jest zgodna z zakresem określonym w normie [4] wynoszącym 32 – 39HRC.

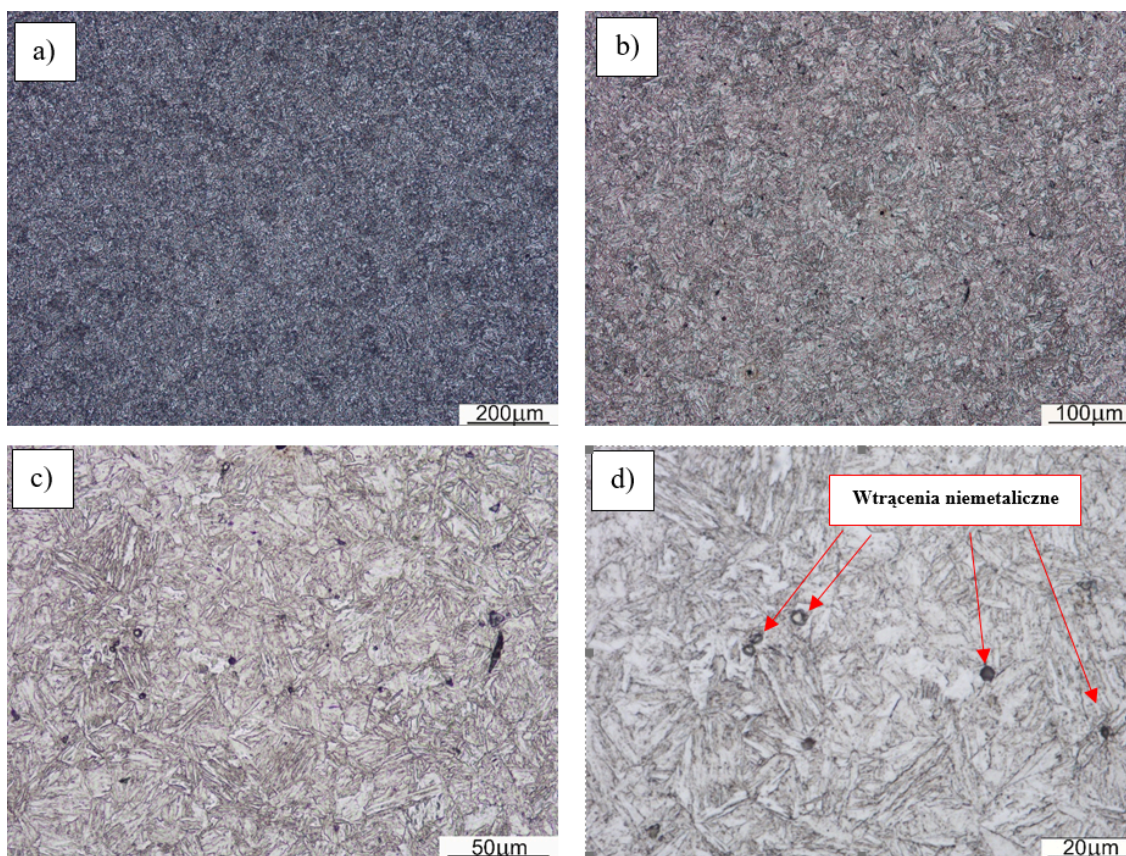
Mikrotwardość pomierzona dla brzegu próbki [1] ma wartość 340 HV 0,3, zaś dla jej środka 365 HV 0,3. Spełnione są zatem wymagania normy [4] w której zapisano, że dla

śruby klasy 10.9 twardość na powierzchni nie może przekraczać wartości 390 HV 0,3, a różnica w twardości zmierzonej na powierzchni i dla materiału podstawowego nie może przekraczać wartości 30 punktów twardości HV 0,3.

## 3. Badania metalograficzne

Przeprowadzone badania metalograficzne ujawniły występowanie na całym przekroju śruby mikrostruktury martenzytycznej - rys. 3. Struktura wyjściowa takiego materiału składa się z ziaren ferrytu i perlitu (mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna). Zaobserwowana mikrostruktura martenzytyczna świadczy o wykonaniu obróbki cieplnej z zakresu austenitacji (hartowanie), a następnie odpuszczania niskiego celem zniwelowania naprężeń strukturalnych w materiale, jakie pojawiły się podczas obróbki termicznej jak i samych naprężeń cieplnych [5-7].

Wykonane badania wykazały występowanie licznych wtrąceń niemetalicznych dla różnych obszarów usytuowanych blisko powierzchni zewnętrznej śruby – rys. 3. Na obrazach mikroskopowych, dla niektórych wydzieleni można dostrzec się charakterystycznego koloru pomarańczowo-złotego, co świadczy o obecności w materiale azotków aluminium (AlN). Ilość tego rodzaju wtrąceń niemetalicznych oraz ich postać (kanciaste wydzielenia o ostrych nieregularnych ściankach), może powodować kruchość materiału.



Rys. 3. Mikrostruktura martenzytyczna na brzegu próbki z ujawnionymi licznymi wtrąceniami niemetalicznymi. Obrazy (a-d) dla powiększeń odpowiednio: 100x, 200x, 500x i 1000x [1]

Fig. 3. Martensitic microstructure on the edge of the sample with numerous non-metallic inclusions revealed. Images (a-d) for magnifications: 100x, 200x, 500x and 1000x respectively [1].



Jest to miejsce potencjalnego zainicjowania mikropęknięcia w obszarach koncentracji naprężeń związanych z karbem geometrycznym, co może doprowadzić do rozwoju pęknięcia zmęczeniowego.

W ramach obserwacji mikroskopowych wykonano dodatkowe obserwacje blisko powierzchni przekroju poprzecznego próbki przy powiększeniu 50x w celu ujawnienia głębokości odwęglenia przy powierzchni próbki.

Zaobserwowano dwie charakterystyczne strefy odwęglone tuż przy powierzchni badanej próbki [5-7] – strefa A (rys. 4 – linia przerywana czerwona) i strefa B (rys. 4 – linia przerywana żółta). Strefa A sięga na głębokość ok. 180-200  $\mu\text{m}$  tj. 0,18-0,20 mm, zaś zasięg strefy B wynosi ok. 1,0-1,4 mm. Powstałe strefy są w różnym stopniu zubożałe w węgiel (odwęglone). W wykonanych badaniach metalograficznych nie określano zawartości węgla w strefach A i B. Wzmiankowana w pracy norma nie określa stopnia zubożenia warstwy wierzchniej w węgiel (stopnia odwęglenia), precyzuje jedynie maksymalną dopuszczalną wartość głębokości warstwy odwęglonej, która ma istotny wpływ na trwałość zmęczeniową materiału. Taki efekt mikrostrukturalny może spowodować, że materiał śruby będzie miał obniżoną wartość wytrzymałości na zmęczenie. Na rys. 4 zaobserwowano również cienką powłokę cynku (oznaczoną strzałką) o grubości ok. 39-42  $\mu\text{m}$  tj. 0,039-0,042 mm. Całkowita głębokość warstwy odwęglonej przy powierzchni próbki wynosi zatem ok. 1,18 – 1,60 mm i znacznie przekracza całkowitą głębokość odwęglenia w gwincie dopuszczalną przez normę [4] wynoszącą maksymalnie  $G_{\text{max}} = 0,015$  mm.

Wykonane badania fraktograficzne SEM, również wykazały występowanie licznych wtrąceń niemetalicznych, głównie w obszarze inicjacji pęknięcia zmęczeniowego – rys. 5.

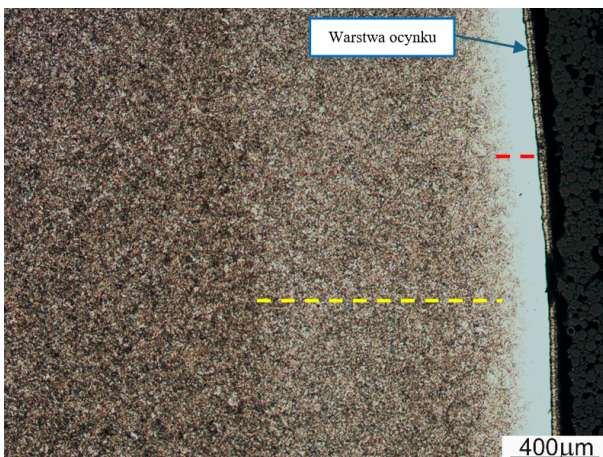
#### 4. Podsumowanie

Konstrukcyjne śruby stalowe klasy 10.9 poddane obróbce termicznej (hartowanie i niskie odpuszczanie) uzyskują mikrostrukturę martenzytyczną i charakteryzują się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi. Dla struktury takiej uzyskano stałą twardość na przekroju poprzecznym wynoszącą  $37 \pm 0,5$  HRC, oraz mikrotwardość na brzegu próbki o wartości 340 HV 0,3 zgodne z wymaganiami normy [4].

Wykonane badania mikrostrukturalne ujawniły obecność wtrąceń niemetalicznych, w tym azotów aluminium (AlN). Obecność tego rodzaju wydzieleni może powodować kruchość materiału, ponieważ są to miejsca potencjalnej inicjacji pęknięcia. Kształt tego typu wydzieleni (kanciaste wydzielenia o ostrych nieregularnych ściankach), może doprowadzić do powstania lokalnych koncentracji naprężeń, a w konsekwencji wystąpienia pęknięć zmęczeniowych materiału.

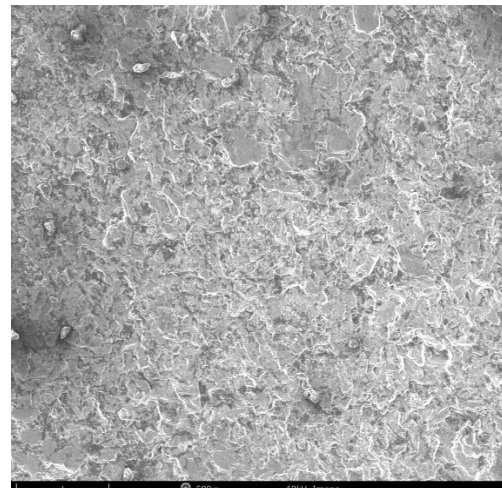
Określona całkowita głębokość warstwy odwęglonej przy powierzchni części walcowej śruby wynosi ok. 1,18 – 1,60 mm i znacznie przekracza dopuszczalną głębokość odwęglenia w gwincie, wynoszącą  $G_{\text{max}} = 0,015$  mm, zgodnie z wymaganiami normy [4].

Jako podstawową przyczynę występowania pęknięć śrub wskazać można błąd w procesie technologicznym obróbki cieplnej (hartowanie i odpuszczanie), polegające na powstaniu odwęglenia zewnętrznej warstwy śruby, którego głębokość znacznie przekracza wymagania zawarte w normie [4], wraz z powstaniem licznych wtrąceń niemetalicznych. Tak ukształtowana warstwa wierzchnia, występująca w obszarze karbu geometrycznego w miejscu przejścia części walcowej w łeb śruby, skutkuje znacznym obniżeniem wytrzymałości zmęczeniowej materiału śruby. Wskutek powyższego, podczas eksploatacji śruby nastąpiła inicjacja pęknięcia na powierzchni w obszarze karbu.



**Rys. 4.** Mikrostruktura przy powierzchni śruby z widocznymi strefami odwęglenia przy powierzchni próbki: A (linia przerywana czerwona) i B (linia przerywana żółta), oraz powłoka cynku [1].

**Fig. 4.** Microstructure on the surface of screw with visible decarburization zones on the sample surface: A (red dashed line) and B (yellow dashed line), and a zinc coating [1].



**Rys. 5.** Obraz SEM przełomu blisko miejsca inicjacji pęknięcia zmęczeniowego z widocznymi wtrąceniami niemetalicznymi (pow. 500x) [1].

**Fig. 5.** SEM image of a fracture close to the point of initiation of fatigue crack with visible non-metallic inclusions (500x lens) [1].

Pęknięcie to rozwinęło się dalej jako pęknięcie zmęczeniowe, propagujące na wskroś przekroju śruby.

Na tempo rozwoju pęknięć zmęczeniowych śrub wpływ może mieć dodatkowo sposób przeprowadzania regulacji napięcia w śrubach połączenia łożyska kołnierzonego łopaty.

*Artykuł powstał w ramach realizacji umowy statutowej nr 16.16.130.942 w Katedrze Projektowania i Eksploatacji Maszyn, WIMiR, AGH w Krakowie*

## 5. Literatura

- [1] B. Ładecki, J. Augustyn-Nadzieja: Badania śrub łożyska kołnierzonego łopaty. AGH, KPiEM, praca nie publikowana, Kraków czerwiec 2024.
- [2] N. E. Dowling: Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Printice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1999.
- [3] J. Schijve: Fatigue of Structures and Materials. Springer Science + Business Media B.V., Amsterdam 2009.
- [4] Norma PN-EN ISO 898-1:2013-06 - Własności mechaniczne części złącznych wykonanych ze stali węglowej oraz stopowej -- Część 1: Śruby i śruby dwustronne o określonych klasach własności -- Gwint zwykły i drobnozwojny.
- [5] K. Przybyłowicz: Metaloznawstwo. WNT, Warszawa 1999.
- [6] M. Blicharski: Wstęp do inżynierii materiałowej. WNT, Warszawa 2001.
- [7] M. Blicharski: Inżynieria Materiałowa Stal. WNT, Warszawa 2004.



Dr inż. Bogusław Ładecki, jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademii Górniczo Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Od wielu lat pełni funkcję Sekretarza Zarządu w Polskim Towarzystwie Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP, jak również funkcję członka Zarządu Krakowskiego Oddziału SIMP. Jako autor lub współautor ponad stu publikacji naukowo-badawczych, zajmuje się problemami wytrzymałości, zmęczenia, oraz badań nieniszczących materiałów i konstrukcji.



Dr inż. Joanna Augustyn-Nadzieja, adiunkt Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, pracownik Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej. Autorka ponad 100 publikacji naukowych, promotor naukowy ponad 90 prac i projektów dyplomowych. Z ogromną satysfakcją i przyjemnością pełni rolę Tutora akademickiego. Konsultant i ekspert prac dla przemysłu z zakresu materiałoznawstwa. Od strony naukowej interesuje się materiałami Co-Cr otrzymanymi techniką druku 3D, stosowanymi w protetyce dentystycznej. Od 2020 roku pełni funkcję Pełnomocnika Rektora ds. Kół Naukowych; pod swoją opieką ma ponad 60 kół naukowych działających na Akademii Górniczo-Hutniczej.