

Wpływ chropowatości powierzchni na trwałość zmęczeniową elementów maszyn – postęp w dziedzinie badań i symulacji

Influence of surface roughness on fatigue life of machine elements – the development in experimental investigations and simulations

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.5-6.39>

W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące wpływu chropowatości powierzchni na trwałość/wytrzymałość zmęczeniową elementów maszyn wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych i z zastosowaniem różnych metod obróbki. Podano zasady oceny wpływu chropowatości jako zbioru mikroskopijnych karbów na powierzchni rzeczywistej oraz odpowiednie formuły umożliwiające wyznaczenie współczynnika koncentracji naprężeń, który koryguje wartość dopuszczalnej trwałości zmęczeniowej. Wyniki testów zmęczeniowych porównano z wynikami obliczeń i symulacji metodą elementów skończonych (MES). Efekt wpływu chropowatości powierzchni odniesiono do elementów maszyn wykonanych ze stali, stopów aluminium, stopów lotniczych – tytanu i niklu oraz kompozytu wzmocnionego włóknami węglowymi.

SŁOWA KLUCZOWE: elementy maszyn, chropowatość powierzchni, trwałość zmęczeniowa, koncentracja naprężeń, karby powierzchniowe

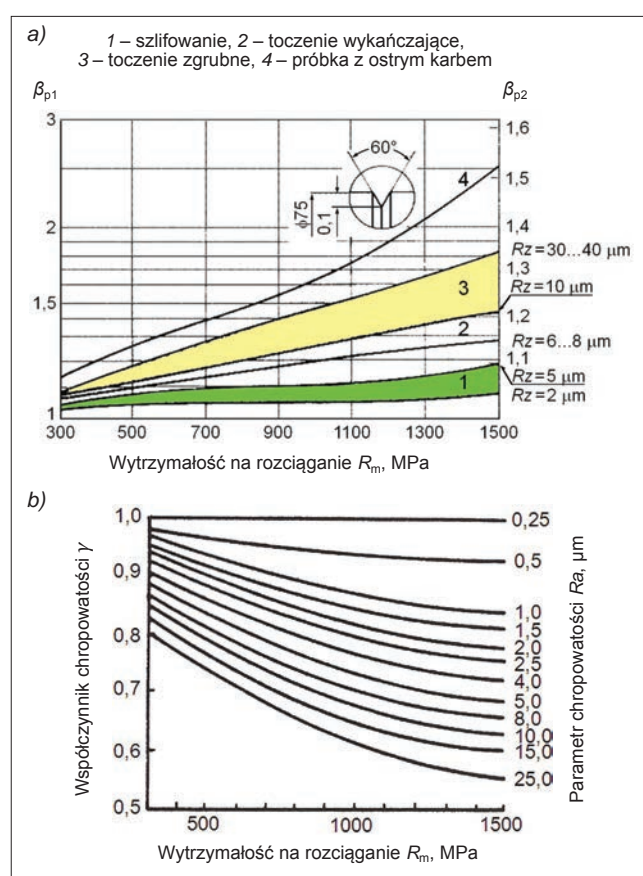
In this paper fundamental information on the influence of surface roughness on fatigue life/limit stresses of machine elements made of different construction materials using different machining/manufacturing processes are presented. The rules for the assessment of surface finish influence represented by the set of microscopic notches on the real machined surfaces, which allow the determination of the stress concentration factor and the correction of a fatigue life limit, are provided. The results of fatigue tests are compared with computed data and predictions using FEM based simulations. The effect of surface discontinuities resulting from surface roughness are related to machine elements made of steels, aluminium alloys, aerospace alloys – titanium and nickel based superalloys and composite reinforced by graphite fibres.

KEYWORDS: machine elements, surface roughness, fatigue life, stress concentration, surface notches

Wprowadzenie

Artykuł jest kontynuacją ogólnego opracowania nt. wpływu topografii powierzchni na jej właściwości funkcjonalne, opublikowanego w wydaniu 8–9/2015 *Mechanika* [1], oraz innych publikacji [2–4]. Zebrano i przeanalizowano w nim istotne dla praktyki inżynierskiej wyniki badań nad wpływem chropowatości/topografii powierzchni na wytrzymałość/trwałość zmęczeniową. W badaniach wytrzymałości zmęczeniowej, które mają długą historię – sięgającą drugiej połowy XIX w., zwraca się uwagę na dużą liczbę czynników wpływających na trwałość elementów poddanych zmiennym obciążeniom, w tym na: ukształtowanie i wymiary elementu, stan jego powierzchni rzeczywistej, temperaturę pracy oraz rodzaj ośrodka roboczego [5–7]. W pierwszym przypadku operuje się współczynnikiem działania karbu, a w drugim – współczynnikiem stanu po-

wierzchni (β_p), który odnosi wytrzymałość zmęczeniową próbki z naniesioną chropowatością procesową do wytrzymałości zmęczeniowej gładkiej próbki po starannym polerowaniu [6]. W literaturze światowej [7] definiuje się współczynnik wpływu chropowatości (*surface roughness reduction factor*) γ o identycznym znaczeniu jak współczynniki na rys. 1a.

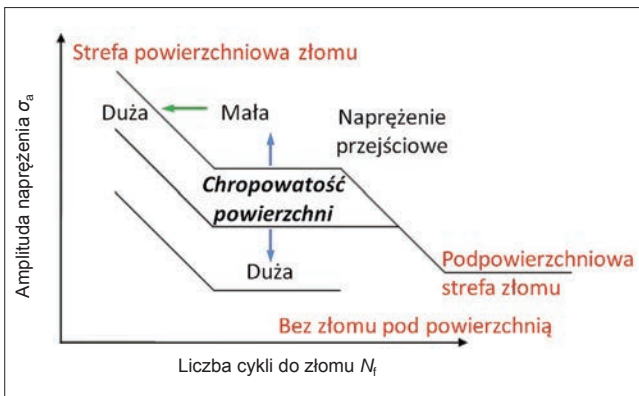


Rys. 1. Wpływ chropowatości powierzchni na współczynnik działania karbu dla zginania β_{p1} i skręcania β_{p2} (a) [6]; poglądowy wpływ chropowatości na wytrzymałość zmęczeniową stali (b) [7]

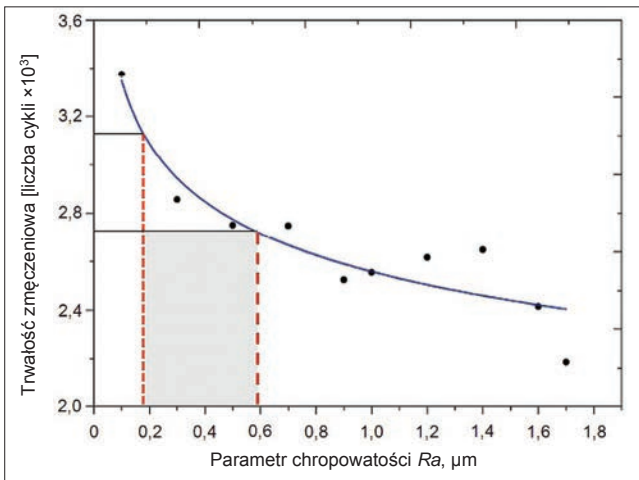
Na rys. 1 przedstawiono wpływ chropowatości powierzchni ocenianej wartością parametru Rz na współczynnik stanu powierzchni próbek ze stali konstrukcyjnej o różnej wytrzymałości doraźnej na rozciąganie, podanych zginaniu (β_{p1}) i skręcaniu (β_{p2}). Można wywnioskować, że powierzchnia o chropowatości Rz poniżej ok. 2 μm nie ma wpływu na wytrzymałość zmęczeniową elementu, natomiast powierzchnie obrabiane zgrubnie ($Rz = 30 \div 40 \mu m$) działają w sposób zbliżony do naciętego, ostrego karbu. Z tego powodu zachodzi potrzeba dokładnej oceny profilu powierzchni w odniesieniu do

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl), <https://orcid.org/0000-0003-2938-9569> – Politechnika Opolska, Opole, Polska

występujących na nim mikrokarbów (rowków wgłębień profilu) oraz uwzględnienia ich w prognozowaniu wytrzymałości/trwałości zmęczeniowej. Karby występujące na chropowatej powierzchni powodują wzrost koncentracji naprężenia i odkształcenia w miejscu najbardziej wrażliwym na zmęczenie, tj. przy powierzchni [5]. Za najistotniejsze parametry chropowatości powierzchni uznaje się parametry amplitudowe (R_a , R_q) oraz wysokościowe (R_p i R_z) i horyzontalne (R_{sm}) [1–3, 8]. Ponieważ rozkład krzywej gęstości amplitudowej (ADF) zazwyczaj nie jest gaussowski ($R_{sk} \neq 0$, $R_{ku} \neq 3$), zaleca się [2, 9] rozważenie łącznego wpływu parametrów R_t i R_{ku} (kurtozy/nachylenia profilu). W takim podejściu koncentracja naprężeń zależy nie tylko od rozkładu mikrorowków profilu, lecz także od rozkładu materiału na wysokości profilu.



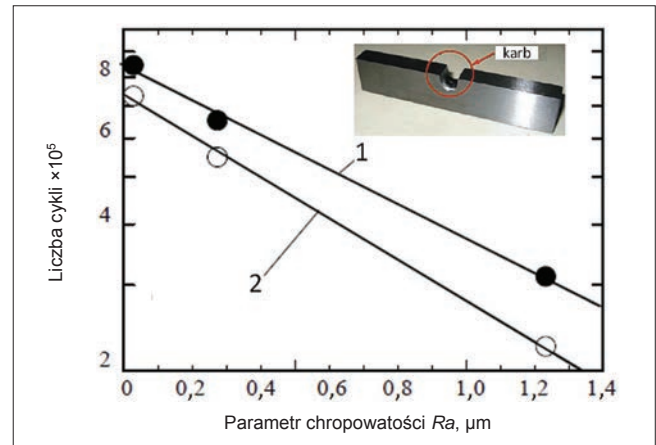
Rys. 2. Poglądowy wpływ chropowatości powierzchni na charakterystyki zmęczeniowe S-N stali o wysokiej wytrzymałości [8]



Rys. 3. Wpływ chropowatości powierzchni na trwałość zmęczeniową stali stopowej ($R_e = 420$ MPa) [10]

Na rys. 2 przedstawiono poglądowo wpływ chropowatości powierzchni na przebieg krzywej Wöhlera (funkcji S-N), a na rys. 3 – wpływ parametru R_a na niskocyklową trwałość zmęczeniową LCF (*low cycle fatigue*), czyli liczbę cykli do zniszczenia. W tym przypadku funkcja opisująca zależność $N_f = f(R_a)$ ma postać $N_f = 2559 \cdot R_a^{-0,1166}$. Można uznać, że optymalna chropowatość powierzchni części poddanych zmiennym obciążeniom mieści się w przedziale $R_a = 0,2 \div 0,6 \mu m$.

W przypadku chropowatych powierzchni należy odzielić klasyczną trwałość zmęczeniową (N_f) od trwałości, tj. czasu do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego, co przedstawiono na rys. 4. Linie na tym wykresie uzyskano na podstawie badań zginania ($\sigma_b = 800$ MPa, maksymalne obciążenie $F_{max} = 6500$ N) stali niestopowej S55C JIS



Rys. 4. Wpływ chropowatości powierzchni na: 1 – trwałość zmęczeniową (*fatigue life*), 2 – czas do inicjacji pęknięcia (*crack initiation life*) [11]

o twardości $180 \div 230$ HB [11]. Przygotowano karby na próbkach o chropowatości $R_a = 0,03$ oraz $0,30$ i $1,27 \mu m$. Moment pęknięcia wykrywano przez pomiar oporności cienkiego filmu ze srebra (Ag), nakładanego na próbkę metodą rozpylania jonowego (*ion-sputtering*).

Rozkład punktów pomiarowych na rys. 4 jednoznacznie wskazuje, że chropowatość powierzchni ma istotny wpływ na rozwój pęknięć zmęczeniowych (różnica w prognozowanej trwałości zmęczeniowej wyraźnie wzrasta dla największej chropowatości powierzchni) – ten aspekt należy uwzględniać w inżynierskiej ocenie trwałości zmęczeniowej.

Analityczne i numeryczne sposoby oceny wpływu karbów powierzchniowych na trwałość zmęczeniową

Wpływ makroskopowych nieciągłości geometrycznych na wytrzymałość części maszyn jest zwykle wyrażany za pomocą współczynnika koncentracji naprężenia (K_t), określanego zależnością podaną przez Pedersena [12]:

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (1)$$

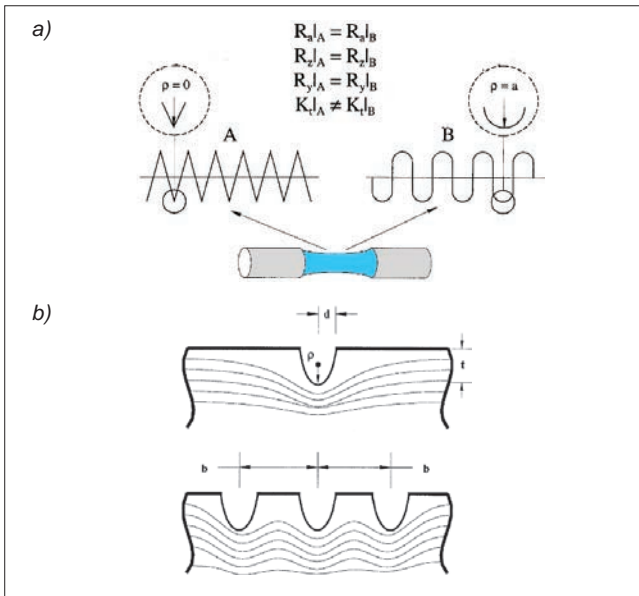
gdzie: t – wysokość karbu, ρ – promień zaokrąglenia dna karbu.

Wzór (1) został wyprowadzony dla pojedynczego karbu powierzchniowego w płycie (rys. 5b) poddanej równomiernemu rozciąganiu, a jako czynniki zmienne przyjęto wysokość karbu t i promień zaokrąglenia dna karbu ρ . Dostosowania wzoru (1) do profilu powierzchni dokonał Neuber [12], przyjmując, że średnią wysokość karbu na chropowatej powierzchni t można zastąpić przez charakterystyczny parametr chropowatości powierzchni R_z :

$$K_t = 1 + n \sqrt{\lambda \frac{R_z}{\rho}} \quad (2)$$

gdzie: n – współczynnik stanu naprężenia, R_z – maksymalna wysokość profilu chropowatości powierzchni na odcinku elementarnym, λ – współczynnik między odległością i wysokością mikronierówności w analizowanym profilu powierzchni (na rys. 5: $\lambda = b/t$), ρ – średni promień zaokrąglenia dna rowka profilu.

Zwykle współczynnik $\lambda = 1$, co tłumaczy się trudnościami w jednoznacznej interpretacji, natomiast współczynnik n przyjmuje się jako 1 dla ścinania oraz 2 dla rozciągania.



Rys. 5. Poglądowe wyjaśnienie istoty współczynnika koncentracji naprężenia dla różnych profili chropowatości (a) oraz rozkładu naprężeń w obrębie pojedynczego i wielokrotnego karbu (b) [12]

Alternatywną zależność do wzoru (2) zaproponował Arola [12, 13]:

$$K_{t,2} = 1 + n \frac{Ra \cdot Rt}{\rho_v \cdot Rz} \quad (3a)$$

gdzie: Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu, Rt – maksymalna wysokość chropowatości na odcinku pomiarowym, Rz – maksymalna wysokość chropowatości na odcinku elementarnym, ρ_v – średni promień zaokrąglenia rowka profilu.

Aby zwiększyć dokładność prognozy, zamiast parametrów chropowatości 2D dla profilu zaleca się [14] wprowadzić analogiczne parametry 3D dla topografii powierzchni:

$$K_{t,3} = 1 + n \frac{Sa \cdot St}{\rho_v \cdot Sz} \quad (3b)$$

lub

$$K_{t,3} = 1 + n \frac{Sa(Sp_{\max} + Sv_{\max})}{\rho_v \cdot Sz}$$

gdzie: Sp_{\max} – wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni, Sv_{\max} – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni.

Dla wyznaczonego doświadczalnie współczynnika koncentracji naprężenia K_t wyznacza się zastępczy współczynnik koncentracji naprężeń zmęczeniowych K_f [12]:

- w formie ogólnej:

$$K_f = \frac{\sigma_{D(\text{gładka})}}{\sigma_{D(\text{chropowata})}} \quad (4a)$$

- w formie odniesionej do zastępczego karbu powierzchniowego:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (4b)$$

gdzie: $\sigma_{D(\text{gładka})}$ – naprężenie dopuszczalne dla próbki gładkiej (bez karbu), $\sigma_{D(\text{chropowata})}$ – naprężenie dopuszczalne dla próbki chropowatej (z karbem), q – współczynnik wrażliwości na karb.

Z kolei współczynnik q definiuje się w zależności od zastępczego promienia wgłębienia $\bar{\rho}$ (zamiast promienia pojedynczego karbu ρ):

$$q = \frac{1}{1 + \gamma/\bar{\rho}} \quad (5)$$

gdzie: γ – stała materiałowa zależna od doraźnej wytrzymałości na rozciąganie R_m .

$$\gamma = 0,025 \left(\frac{2070 \text{ MPa}}{R_m} \right)^{1,8} [\text{mm}], \quad R_m \geq 550 \text{ MPa} \quad (6)$$

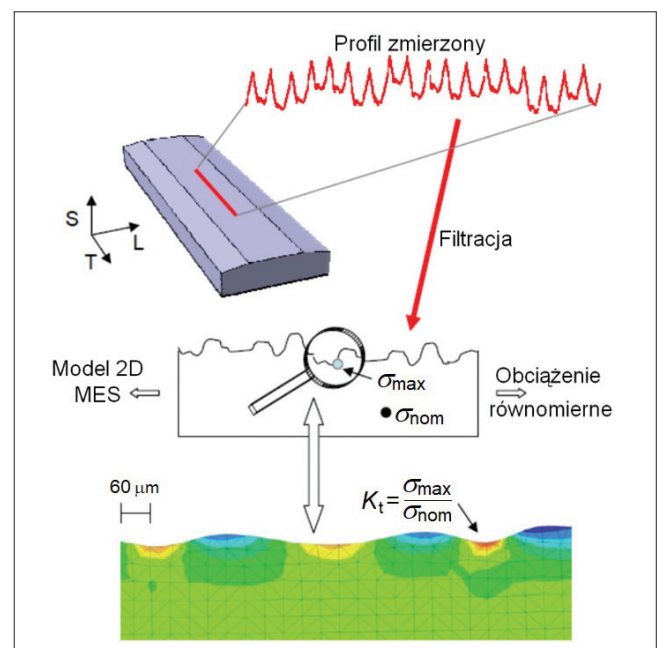
Wartość współczynnika koncentracji naprężeń można wyznaczyć analitycznie przy założeniu powtarzających się na powierzchni mikrokarbów kołowych lub eliptycznych albo metodą elementów skończonych (MES) w odniesieniu do filtrowanego profilu powierzchni – jak na rys. 6.

Fragment wgłębienia profilu chropowatości otrzymanego z pomiarów 3D powierzchni z naniesioną siatką elementów skończonych przedstawiono na rys. 7a. Najmniejsze oczko siatki miało wymiar ok. 0,1 μm . Zarys rowka uzyskano przez interpolację krzywą Béziera, a elementy siatki miały kształt trójkątnych elementów osiowoosymetrycznych. Punkty na zarysie rowka reprezentują wyniki pomiarów przeprowadzonych na interferometrze na światło białe WLI (*white light interferometer*). Dla wszystkich rowków, na których zaobserwowano inicjację pęknięcia, wyznaczano amplitudę odkształcenia ε_a z korektą podaną przez Neubera, według wzoru (1), i Hoffmanna–Seegera (H-S), według wzoru:

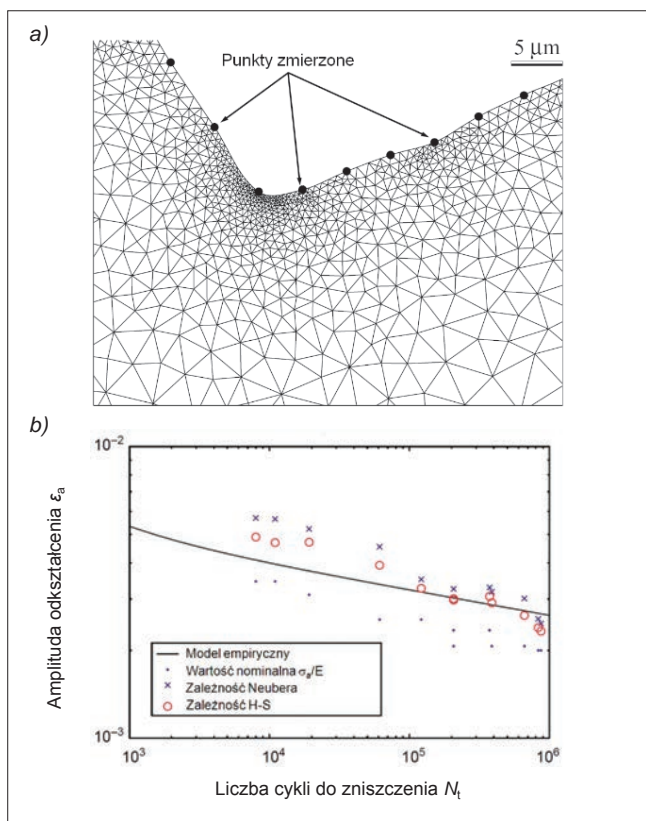
$$K_f = \frac{K_t}{1 + \sqrt{c\chi}} \quad (7)$$

gdzie: c – stała materiałowa, χ – gradient naprężenia.

Wyniki symulacji, przedstawione na rys. 7b, wskazują, że chropowatość może nawet 10-krotnie obniżyć trwałość zmęczeniową [14]. Potwierdza się, że wzór Neubera (1) lepiej prognozuje trwałość w zakresie wysokocyklowym (HCF).



Rys. 6. Zasada numerycznych obliczeń współczynnika koncentracji naprężeń [13]



Rys. 7. Siatka MES w obrębie karbu (a) oraz porównanie wyznaczonej trwałości zmęczeniowej (b) [14]

Określenie wpływu mikrokarbów powierzchniowych na trwałość zmęczeniową

Metodologię określania wpływu chropowatości powierzchni na wytrzymałość/trwałość zmęczeniową, opartą na empirycznej metodzie oceny wpływu mikrokarbów, zweryfikowano dla stali stopowej AISI 4130 CR [10, 12], dwufazowego stopu tytanu Ti-6Al-4V [15], stopu aluminium 7010-T7451 [18], stopu aluminium A357 wytwarzanego metodą (SLM) [17], superstopu na osnowie z niklu Alloy 720Li [16] oraz laminatu wzmocnionego włóknami grafitowymi [13].

Na rys. 8 przedstawiono płaską próbkę ze stopu tytanu Ti-6Al-4V po frezowaniu ($v_c = 20 \div 110$ m/min, $f_z = 0,02 \div 0,05$ mm/ostrze, $a_e = 0,5 \div 2,0$ mm) i reprezentatywny profil chropowatości, zarejestrowany na powierzchni szyjki (SF) (rys. 8a), z naniesionym promieniem wgłębienia (karbu) mikronierówności (rys. 8b).

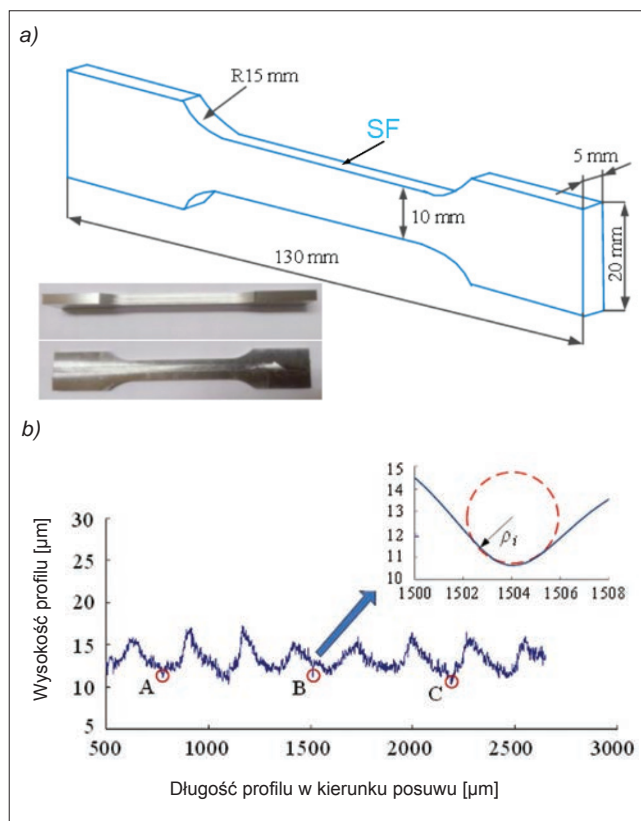
Próby zmęczenia przeprowadzono dla współczynnika naprężenia $R = 0,1$ i maksymalnej wartości naprężenia $\sigma_{max} = 1000$ MPa, która jest nieco większa od granicy plastyczności ($894 \div 903$ MPa) stopu tytanu. Zmierzone wartości promienia wgłębienia mikronierówności dla różnych warunków frezowania $\rho = 1,50 \div 7,10$ μm wykorzystano do obliczenia współczynników $K_{t,2}$ i $K_{t,3}$ (odpowiednio dla profilu i topografii powierzchni) według wzorów (3a) i (3b). Wyznaczono trzy modele matematyczne określające wpływ współczynnika K_t i parametrów frezowania na trwałość zmęczeniową N_f :

$$N_{f,2} = 6695,7 \cdot K_{t,2}^{-0,531} \quad (8a)$$

$$N_{f,3} = 11071,7 \cdot K_{t,3}^{-1,056} \quad (8b)$$

$$N_f = 624,02 \cdot v_c^{-0,0469} f_z^{-0,681} \cdot a_e^{0,0152} \quad (8c)$$

Ustalono, że liczba cykli do zniszczenia nie przekraczała 10^3 [15].



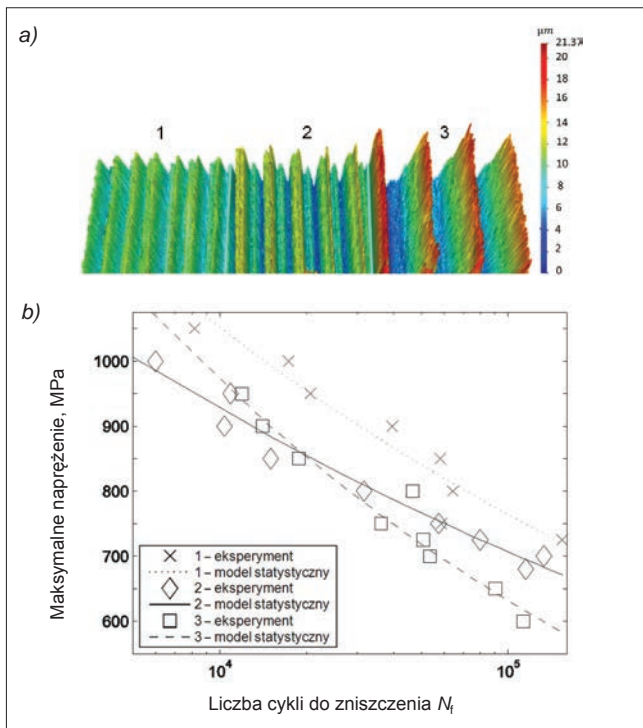
Rys. 8. Widok próbki do badań zmęczeniowych (a) i charakterystyczny profil chropowatości na powierzchni szyjki (SF) (b) [15]

Na rys. 9 przedstawiono widok topografii powierzchni toczzonej ze stopu niklu Alloy 720Li, który jest stosowany na elementy wirników turbin lotniczych, pracujących w warunkach silnych obciążeń zmęczeniowych poniżej 10^5 cykli [15]. Badania przeprowadzono dla próbek z powierzchnią o chropowatości $S_a = 1,6$ μm i 3,2 μm, poddanych obciążeniom trapezoidalnym (LCF) i sinusoidalnym (HCF). Próbkę wycinano z tarcz w kierunku promieniowym, metodą EDM.

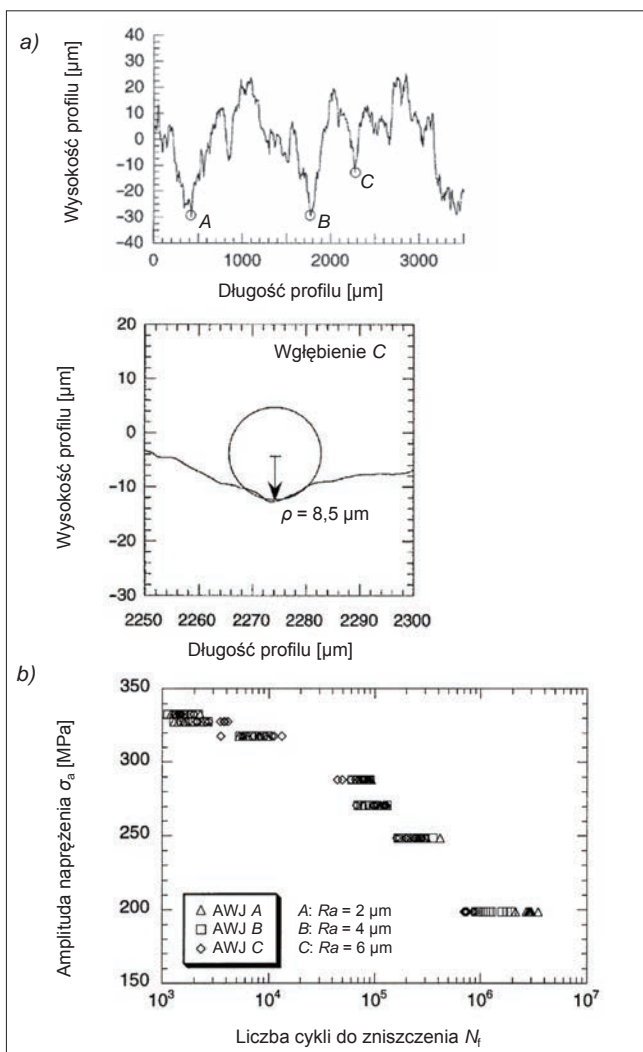
Wykresy S-N uzyskane dla trwałości niskocyklowej (rys. 9b) wskazują na niewielkie różnice spowodowane pogorszeniem chropowatości powierzchni dla dużych wartości naprężenia maksymalnego, wynikające raczej z rozrzutu wyników. Są one większe, gdy liczba cykli wzrasta do 10^5 (trwałość zmęczeniowa jest o ok. 10% mniejsza dla próbki o większej chropowatości powierzchni). Zauważalna granica między odmiennym wpływem chropowatości powierzchni (przebiegi 2 i 3 na rys. 9b) występuje dla naprężenia ok. 750 MPa. Z kolei dla trwałości wysokocyklowej – powyżej 10^6 cykli – wpływ chropowatości powierzchni wyraźnie zanika.

W podstawie badań fraktograficznych przelomów ustalono, że wielokrotne pęknięcia zmęczeniowe pojawiają się w obrębie wgłębienia mikronierówności i z tego względu oceniany wpływ chropowatości powierzchni ma charakter topologiczny ($K_t > 1,0$) [16]. Sugeruje się uwzględnienie innych parametrów przestrzennych, w tym S_v , i parametrów hybrydowych – S_dq , S_{sc} i S_{dr} . Ich definicje podano w książce Adamczaka [19].

Na rys. 10a przedstawiono przykładowy profil powierzchni, uzyskanej dla próbki ze stali AISI 4130 CR ($R_m = 752$ MPa, $R_e = 655$ MPa) po obróbce strugą wodno-ścierną AWJ (abrasive water jet), o chropowatości $R_a = 2$ μm (symbol A na rys. 10a). Dodatkowo badano wpływ wzrostu chropowatości powierzchni do $R_a = 4$ μm (symbol B na rys. 10a) i $R_a = 6$ μm (symbol C). Średnie



Rys. 9. Topografie powierzchni toczonej próbki do badań zmęczeniowych (a) oraz wykres S-N dla niskocyklowego zmęczenia (b) [16] (1: $S_a = 0,8 \mu\text{m}$; 2: $S_a = 1,6 \mu\text{m}$; 3: $S_a = 3,2 \mu\text{m}$)



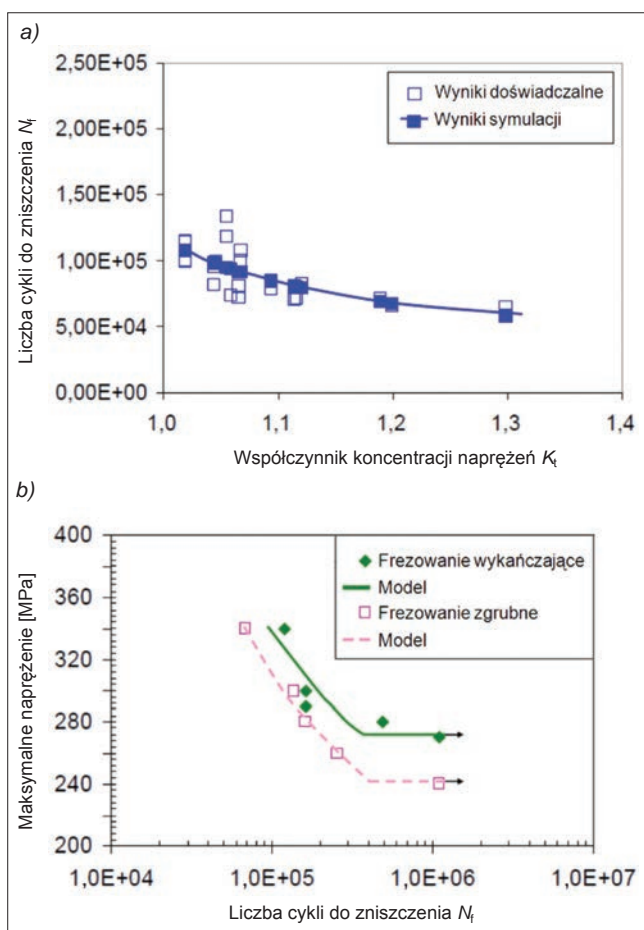
Rys. 10. Profil powierzchni i wyznaczony promień mikrokarbu ($R_a = 6 \mu\text{m}$) (a) oraz wykres S-N dla niskocyklowego zmęczenia stali AISI 4130 CR (b) [12]

zmierzone wartości promienia dna wgłębienia wynosiły odpowiednio $10,8 \mu\text{m}$, $9,2 \mu\text{m}$ i $9,0 \mu\text{m}$. Otrzymany wykres S-N przedstawiono na rys. 10b. Należy zauważyć, że granica między LCF i HCF występuje w przybliżeniu dla amplitudy naprężenia $\sigma_a = 315 \text{ MPa}$ ($N_f = 10^4$ cykli). Ustalono, że próbka C z powierzchnią o największej chropowatości ($R_a = 6 \mu\text{m}$) wykazywała największą wytrzymałość w zakresie niskocyklowym – dla $N \leq 10^4$ cykli. Z kolei zmniejszenie chropowatości do $R_a = 2 \mu\text{m}$ skutkuje większą trwałością w zakresie wysokocyklowym (ponad 10^6 cykli). Na uwagę zasługuje fakt, że zmiana chropowatości powierzchni nie wpływa znacząco na wartość współczynnika wrażliwości karbu ($q = 0,057 \div 0,067$). Na podstawie badań fraktograficznych wykazano, że w zakresie niskocyklowym pęknięcie zmęczeniowe jest spowodowane nieciągłościami geometrycznymi w obrębie wgłębienia profilu, a w zakresie wysokocyklowym dominuje złom plastyczny (nieciągłości geometryczne profilu mają tu charakter drugorzędny).

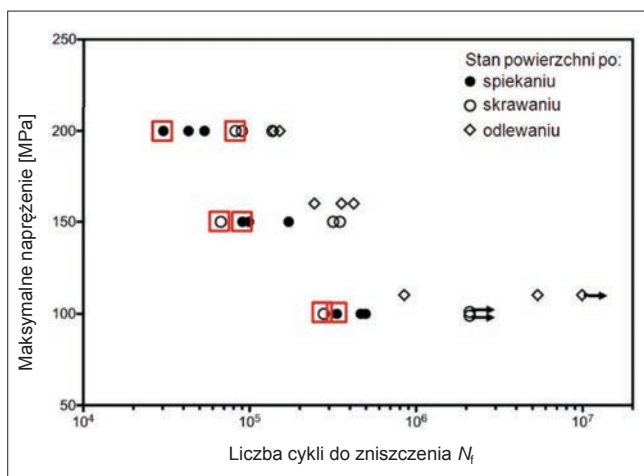
W przypadku identycznej obróbki laminatu Gr/Bmi (graphite/bismaleimide resin) wzmocnionego włóknami węglowymi IM-7 uzyskano wyraźnie większe promienie wgłębień mikronierówności (np. $\rho = 18 \mu\text{m}$ dla chropowatości $R_a = 2 \mu\text{m}$ i $\rho = 65 \mu\text{m}$ dla chropowatości $R_a = 10 \mu\text{m}$), co powoduje, że odpowiednie wartości współczynnika K_t dla dwustronnego zginania są równe $0,75$ i $0,90$ [13]. Tym samym wzrost chropowatości powierzchni wpływa na zmniejszenie sztywności laminatu w warunkach obciążeń zmiennych.

Na rys. 11b porównano wyniki symulacji MES (według metodyki przedstawionej na rys. 6) z danymi eksperymentalnymi dla próbek ze stopu aluminium 7010-T7451 (Al-Cu-Mg) po frezowaniu wykańczającym (frezem walcowo-czołowym) i zgrubnym (frezem kulistym). Chropowatość powierzchni R_a zmieniała się w zakresie od $0,25 \mu\text{m}$ do $11 \mu\text{m}$, co przekłada się na odpowiednie wartości współczynnika koncentracji naprężenia wyznaczonego ze wzoru (3a): $K_t = 1,022$ i $K_t = 1,154$ (rys. 11b). Na rys. 11a pokazano wynik symulacji trwałości zmęczeniowej w funkcji współczynnika K_t dla maksymalnego naprężenia von Misesa, równego 320 MPa . W celu walidacji wyników symulacji próby zmęczenia przeprowadzono dla współczynnika obciążenia $R = 0,1$ i częstotliwości 10 Hz [18]. Na rys. 11b widać wyraźną granicę między obszarami przynależnymi do LCF i HCF, odpowiadającą liczbie cykli ok. $3 \cdot 10^5$. Z zaprezentowanych krzywych S-N wynika, że wpływ chropowatości powierzchni jest bardziej widoczny dla $N_f > 3 \cdot 10^5$ cykli.

Na rys. 12 przedstawiono porównanie wytrzymałości zmęczeniowej próbek ze stopu aluminium A357 wytworzonego metodą selektywnego spiekania laserowego (SLM) w stanie wyjściowym ($R_a \approx 7 \mu\text{m}$, $R_z \approx 60 \mu\text{m}$) i po dodatkowej obróbce skrawaniem ($R_a \approx 0,2 \mu\text{m}$) oraz próbek w postaci odlewu ciśnieniowego. Z rys. 12 wynika, że dokładna obróbka skrawaniem zwiększa trwałość zmęczeniową zwłaszcza w przypadku mniejszych wartości naprężenia, co tłumaczy się występowaniem w materiałach spiekanych propagacji pęknięć zmęczeniowych przy większych naprężeniach. Uzyskuje się trwałość zmęczeniową porównywalną z trwałością próbek odlewanych. Należy jednak podkreślić duży rozrzut wyników będący efektem defektów powierzchniowych i podpowierzchniowych oraz dużych naprężeń własnych wprowadzanych po skrawaniu. Ważną obserwacją z badań wytrzymałości zmęczeniowej stopu tytanu Ti-6Al-4V spiekane metodą STM, poddane następnie wykańczającemu toczeniu i frezowaniu oraz polerowaniu, był brak korelacji



Rys. 11. Zależność trwałości zmęczeniowej od współczynnika K_t (a) oraz porównanie wyników symulacji MES z danymi eksperymentalnymi (b) [18]



Rys. 12. Wpływ obróbki skrawaniem na wytrzymałość zmęczeniową stopu aluminium A357 wytwarzanego metodą SLM [17]

z parametrem chropowatości Sa [20]. Z kolei wytrzymałość zmęczeniowa była wrażliwa na zmiany skośności S_{sk} – powierzchnie o dużej skośności $S_{sk} > 0$ lepiej pracują przy obciążeniach zmiennych. Próbkę wykonaną metodą przyrostową miały w przybliżeniu o połowę mniejszą wytrzymałość zmęczeniową niż próbki odlewane.

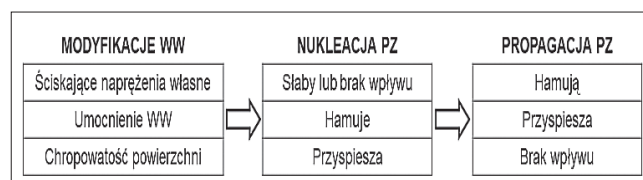
Podsumowanie

Z dokonanego przeglądu literatury wynika jednoznacznie, że chropowatość powierzchni jest istotnym czynnikiem wpływającym na nukleację (zarodkowanie) pęknięć zmęczeniowych. Z tego względu zmniejszenie wytrzymałości/

/trwałości zmęczeniowej proporcjonalnie do współczynnika γ jest rozwiązaniem przybliżonym, ponieważ chropowatość powierzchni może się różnić dla tych samych warunków obróbki, a sam pomiar chropowatości powierzchni może być obarczony dużym błędem. Pojawia się ważne pytanie, czy taka sama wartość współczynnika γ jest zapewniona dla powierzchni karbu, ponieważ efekt chropowatości nakłada się na wpływ karbu. W ujęciu praktycznym wrażliwość wytrzymałości zmęczeniowej na chropowatość powierzchni rośnie, gdy wzrasta wytrzymałość materiału, np. dla utwardzonych stali i utwardzanych wydzieleniowo stopów aluminium [7, 8]. Z tego względu zaleca się wzmocnienie wpływu karbu strukturalnego (indeks: karb) przez oddziaływanie mikrokarbu powierzchniowego (indeks: chp), tj. przeprowadzenie korekty według zależności:

$$K_t = (K_t)_{\text{karb}} \cdot (K_t)_{\text{chp}} \quad (9)$$

W opracowaniu nie uwzględniono specjalnych procesów umacniania powierzchniowego (odkształceniowego, przemianami fazowymi i stopowaniem), mimo że są one często stosowane w praktyce [21]. Informacje na temat umacniania elementów maszyn zgniotem powierzchniowym przez nagniatanie oraz jego wpływu na wytrzymałość zmęczeniową zaprezentowano w książce Przybylskiego [22].



Rys. 13. Wpływ modyfikacji warstwy wierzchniej (WW) na powstawanie pęknięć zmęczeniowych (PZ) [8]

Na rys. 13 przedstawiono kierunki wpływu zmian technologicznej warstwy wierzchniej, uwzględniając chropowatość powierzchni, umocnienie materiału i obecność ścisnąjących naprężeń własnych – tj. czynniki, które decydują o zarodkowaniu i propagacji pęknięć zmęczeniowych. Należy jednak zauważyć, że ich wpływ jest zdecydowanie różny, jeśli uwzględni się nukleację i propagację pęknięć zmęczeniowych.

LITERATURA

- [1] Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): 587–593.
- [2] Grzesik W. “Influence of surface textures produced by finishing operations on their functional properties”. *Journal of Machine Engineering*. 16, 1 (2016): 15–23.
- [3] Grzesik W. “Prediction of the functional performance of machined components based on surface topography: state of the art”. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 25, 10 (2016): 4460–4468.
- [4] Hashimoto F., Chaudhari R.G., Melkote S.N. “Characteristics and performance of surfaces created by various finishing methods”. *Procedia CIRP*. 45 (2016): 1–6.
- [5] Kocańda S., Kocańda A. „Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metal”. Warszawa: PWN, 1989.
- [6] Jakubowicz A., Orłoś Z. „Wytrzymałość materiałów”. Warszawa: WNT, 1984.
- [7] Schijve J. “Fatigue of structures and materials”. Springer, Milton Keynes, 2009.
- [8] Gao S., Zhang Q. “Influence of machined surface integrity on fatigue performance”. *Applied Mechanics and Materials*. 373–375 (2013): 1999–2003.
- [9] Novovic D., Dewes R.C., Aspinwall D.K., Voice W., Bowen P. “The effect of machined topography and integrity on fatigue life”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44, 2–3 (2004): 125–134.

- [10] Xiao W.L., Chen H.B., Yin Y. "Effects of surface roughness on the fatigue life of alloy steel". *Applied Mechanics and Materials*. 373–375 (2013): 417–420.
- [11] Deng G., Nagamoto K., Nakano Y., Nakanishi T. "Evaluation of the effect of surface roughness on crack initiation life". *Proceedings of 12th International Conference on Fracture, (ICF12)*, Ottawa, Canada, 2 (2009): 1505–1512.
- [12] Arola D., Williams C.L. "Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces". *International Journal of Fatigue*. 24 (2002): 923–930.
- [13] Arola D., Williams C.L. "Surface texture, fatigue, and reduction in stiffness of fiber reinforced plastics". *Transactions of the ASME. Journal of Engineering Materials and Technology*. 124 (2002): 160–166.
- [14] Ås S.K., Skallerud B., Tveiten B.W., Holme B. "Fatigue life prediction of machined components using finite element analysis of surface topography". *International Journal of Fatigue*. 27 (2005): 1590–1596.
- [15] Yang D., Liu Z., Xiao X., Xie F. "The effects of machining-induced surface topography on fatigue performance of titanium alloy Ti-6Al-4V". *Procedia CIRP*. 71 (2018): 27–30.
- [16] Ardi D.T., Li Y.G., Chan K.H., Blunt L., Bache M.R. "The effects of machined topography on fatigue life of a nickel based superalloy". *Procedia CIRP*. 13 (2014): 19–24.
- [17] Rao J.H., Zhang K., Rometsch P., Huang A., Wu X. "The influence of surface roughness on the fatigue performance of selective laser melted aluminium alloy A357". *Proceedings of the 16th International Aluminium Alloys Conference (ICAA16)*, 2018, Canada.
- [18] Suraratchai M., Limido J., Mabru C., Chieragatti R. "Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy". *International Journal of Fatigue*. 30 (2008): 2119–2126.
- [19] Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni”. Warszawa: WNT, 2008.
- [20] Dumas M., Cabanettes F., Kaminski R., Valiorgue F., Picot E., Lefebvre F., Grosjean C., Rech J. "Influence of the finish cutting operations on the fatigue performance of Ti-6Al-4V parts produced by Selective Laser Melting". *Procedia CIRP*. 71 (2018): 429–434.
- [21] Burakowski T. „Areologia. Podstawy teoretyczne”. Radom: Wyd. Naukowe ITE, 2013.
- [22] Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: WNT, 1987. ■