ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: TRANSPORT z. 40 Nr kol. 1490

Piotr ADAMIEC
Mirosław WITASZEK
Kazimierz WITASZEK

OCENA TRWAŁOŚCI NAPAWANYCH KÓŁ KOLEJOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy trwałości i niezawodności napawanych części maszyn występujące przy równoczesnym obciążeniu kontaktowym, zużyciu ściernym i zmęczeniowym. Zaproponowano metodykę oceny trwałości warstw napawanych, którą zweryfikowano na przykładzie napoin stosowanych do napawania kół kolejowych. Dokonano również obliczeń trwałości napawanych i nienapawanych kół kolejowych.

ASSESSMENT OF DURABILITY OF SURFACED RAIL WHEELS

Summary. In this article durability and reliability problems of surfaced machine parts during contact loading, wear and fatigue have been presented. Authors suggested methodology of durability assessment for surfaced layers. This methodology has been verified for surfaced rail wheels. Calculations of durability of surfaced and non-surfaced rail wheels have been carried out.

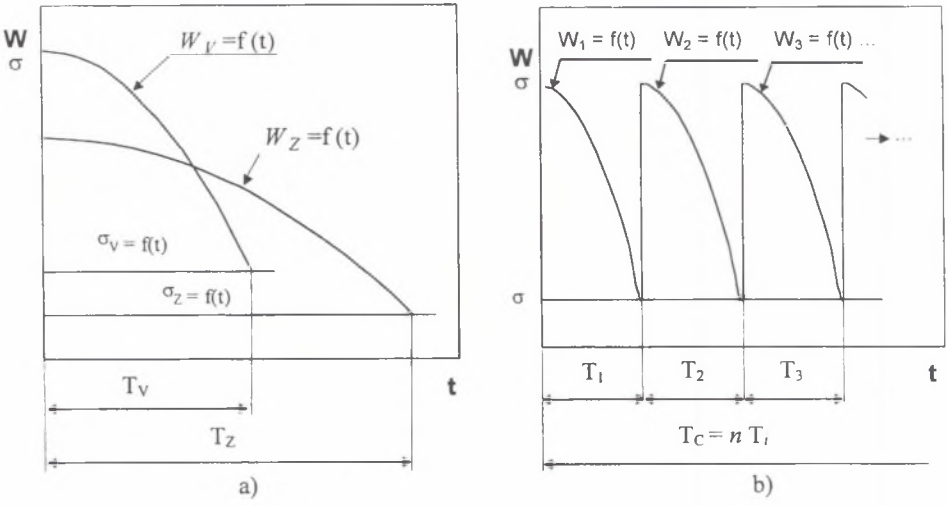
1. WPROWADZENIE

Użytkowanie części maszyn powoduje ich zużywanie się, które jest ogólnie opisywane równaniem wykładniczym [1]:

$$\ln\frac{W_{uż}}{W_0} = K \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{E}\right),$$

gdzie: $W_{uż}$ – własności użytkowe po czasie t,
W_0 – własności użytkowe początkowe,
t – czas eksploatacji,
Q – energia aktywacji charakterystyczna dla procesu zużycia,
E – energia otoczenia.

Zużycie to w przypadku części maszyn występuje przede wszystkim w warstwie wierzchniej, gdzie występują największe momenty: zginający i skręcający oraz największe naprężenia stykowe, stanowiące główne obciążenia eksploatacyjne części. Może ono mieć formę zużycia ściernego abrazyjnego lub adhezyjnego czy powierzchniowego zużycia zmęczeniowego. Bardzo często procesy te występują łącznie. Decydują one o trwałości i niezawodności napawanej części jako elementu systemu trybologicznego (rys. 1).

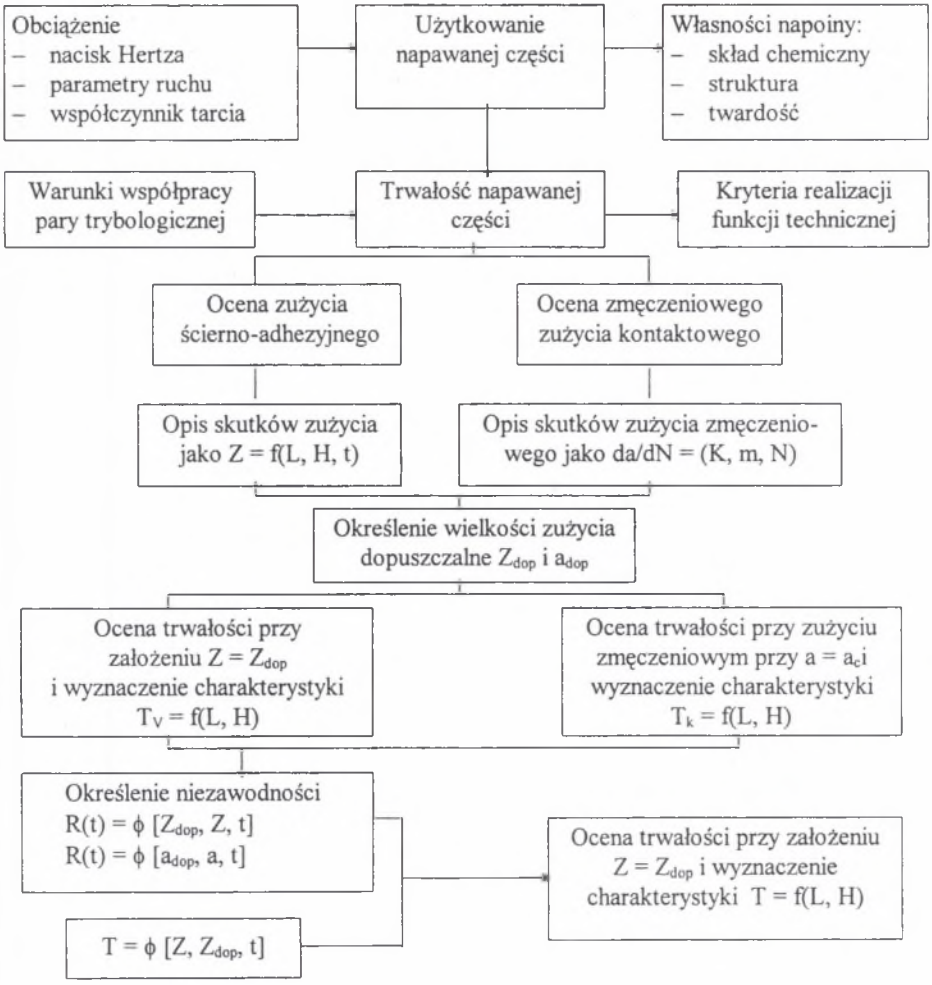


Rys. 1. Schemat szacowania trwałości elementu; a) nieregenerowanego, b) regenerowanego
T_V - trwałość ze względu na ścieranie, T_Z - trwałość ze względu na zmęczenie,
T_C - trwałość całkowita, T_1, T_2, T_3 - trwałości cząstkowe
Fig. 1. Scheme of durability assessment of element; a) non-regenerated, b) regenerated
T_V - wear durability, T_Z - fatigue durability, T_C - general durability,
T_1, T_2, T_3 - partial durabilities

Niezawodność i trwałość są istotnymi parametrami wykorzystywanymi w projektach maszyn i urządzeń. Schemat postępowania przy określaniu trwałości i niezawodności napawanych części napawanych przedstawiono na rys.2.

2. STRUKTURA I TWARDOŚĆ WARSTW NAPAWANYCH

O własnościach warstwy napawanej decydują w większości przypadków ich struktura i twardość będące wynikiem składu chemicznego napoiny. Można wyróżnić ogólnie przypadki stosowania napawania do odtworzenia zużytej warstwy wierzchniej elementów oraz do uzyskania warstw o lepszych własnościach użytkowych, zwanych zwykle utwardzającymi. Jako stopiwa do napawania wykorzystuje się stopy podane w normie DIN 8555, których właściwości podano w pracy [1]. Stopiwa te występują jako niskostopowe i wysokostopowe, przy czym te pierwsze są stosowane do napawania części maszyn, natomiast drugie przy utwardzaniu narzędzi i elementów pracujących z minerałami oraz elementów żaroodpornych i żarowytrzymałych.

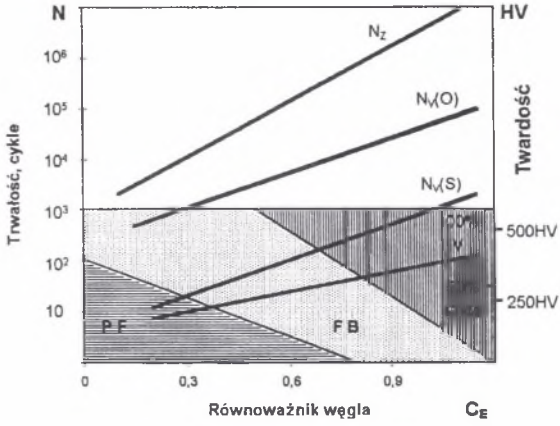


Rys. 2. Schemat wyznaczania trwałości i niezawodności eksploatacyjnej napawanej części; L – droga tarcia, H – twardość warstwy, Z - zużycie ścierne, da/dN - przyrost szczeliny zmęczeniowej, Z_{dop} i a_{dop} - odpowiednio dopuszczalne zużycie i wielkość szczeliny zmęczeniowej, R(t) - niezawodność, T - trwałość, t - czas

Fig. 2. Scheme of durability and reliability determining for surfaced part of machine; L - sliding distance, H - hardness of a layer, Z - wear, da/dN - increment of fatigue crack , Z_{dop} and a_{dop} - allowable wear and fatigue crack size , R(t) - reliability, T - durability, t - time

W uproszczeniu stopiwa niskostopowe najczęściej stosowane do napawania można podzielić na stopy typu: C-Mn, C-Cr i C-Cr-Mo. Do porównania tych stopiw wykorzystano równoważnik węgla $C_E = C + Mn/6 + Cr/5$, gdzie: C, Mn, Cr – zawartości pierwiastków stopowych w %.

Badania zużycia ścierno-adhezyjnego na stanowisku rolka–klocek wykazały duży wpływ nacisku i smarowania na wielkość ubytków, które wzrastały wraz z obciążeniem i współczynnikiem tarcia. Określone trwałości próbek napawanych stopiwem niskostopowym przedstawiono na rys. 3, na którym zaznaczono również charakterystyczne struktury napoiny. Na rysunku tym zaznaczono również trwałość zmęczeniową próbek napawanych wyznaczoną przy obciążeniu momentem wirującym.



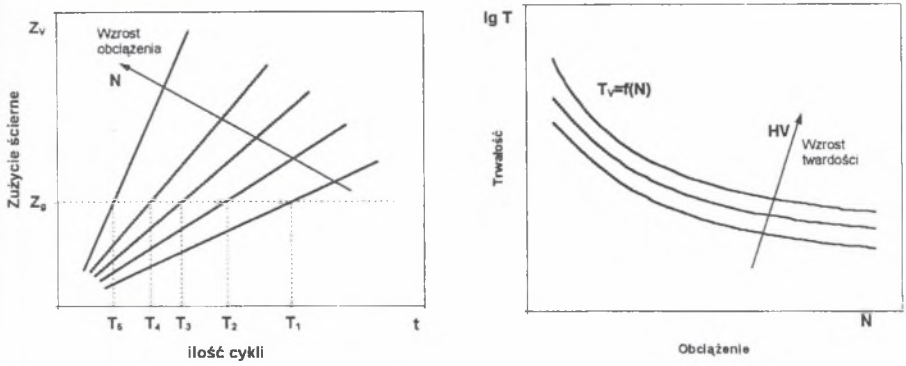
Rys. 3. Wpływ struktury na trwałość próbek napawanych;
N_f – liczba cykli do zniszczenia przy zmęczeniu mechanicznym, $N_v(O)$, $N_v(S)$– liczba cykli do uzyskania zużycia liniowego h = 0,7 mm przy zużyciu ścierno-adhezyjnym badanym w układzie rolka–klocek, odpowiednio przy tarciu w obecności smaru (O) - przy μ=0,1 i na sucho (S) - przy μ=0,5

Fig 3. The influence of structure on durability of surfaced specimens
N_f – number of cycles to failure during mechanical fatigue , $N_V(O)$ μ=0,1, $N_V(S)$ μ=0,5 – number of cycles to obtain wear h = 0,7 mm during abrasive-adhesive wear tested in roller-block system, with lubricant (O) - μ=0,1 and without it (S) - μ=0,5 respectively

Badania wykazały, że wzrost zawartości pierwiastków stopowych w napoinie prowadził do wyraźnego zmniejszenia się zawartości ferrytu przedeutektoidalnego i wzrostu struktur bainityczno-martenzytycznych. Towarzyszy temu wzrost trwałości zmęczeniowej oraz odporności na zużycie ścierno-adhezyjne, przy czym przy napoinach o strukturze martenzytycznej o twardości powyżej 400 HV na powierzchni zużycia pojawia się siatka pęknięć pittingowych, co wyraźnie zmniejsza trwałość próbek napawanych. Prawidłowości te są podobne do zależności występujących przy zużyciu abbrazyjnym [2].

3. METODYKA OCENY TRWAŁOŚCI I NIEZAWODNOŚCI WARSTWY NAPAWANEJ

Zużycie ścierno-adhezyjne może być określone laboratoryjnie na stanowisku typu „trzpień-tarcza", „rolka - rolka" lub wyznaczone z prób eksploatacyjnych (rys. 4a). Przy założeniu wielkości granicznej Z_g można z zależności pokazanej schematycznie na rys. 4b wyznaczyć trwałość T w funkcji obciążenia N, którym może być np. nacisk hertzowski.

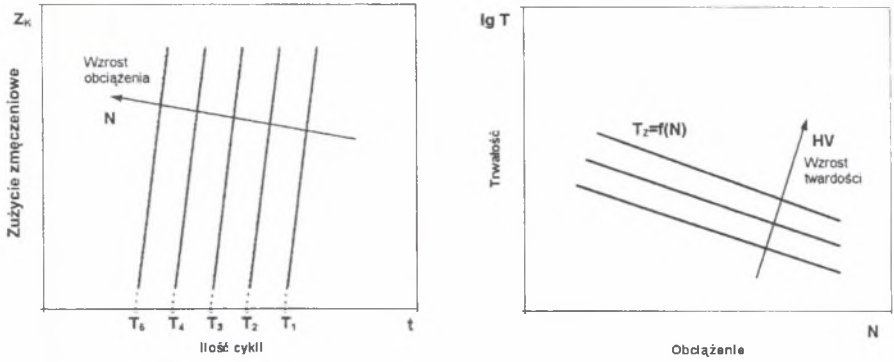


a) b)

Rys. 4. Schemat wyznaczania trwałości przy zużyciu ścierno-adhezyjnym jako funkcji obciążenia; a) funkcja $Z_V = f(t)$, b) funkcja $T_V = f(N)$

Fig. 4. Scheme of durability determining during abrasive-adhesive wear as a function of load; a) function $Z_V = f(t)$, b) function $T_V = f(N)$

Badania na stanowisku Amslera w układzie „rolka - rolka" pozwalają na wyznaczanie zależności ilości powstających pęknięć i wyrw Z_k od czasu współpracy rolek t (rys. 5a). Aproksymacja uzyskanych zależności do prostych przecinających oś poziomą umożliwia uzyskanie dla trwałości zmęczeniowej funkcji typu Wöhlera T = f(H) (rys. 5b).



a) b)

Rys. 5. Schemat wyznaczenia trwałości zmęczeniowej jako funkcji obciążenia: a) funkcja $Z_k = f(N)$, b) funkcja $T_k = f(N)$

Fig. 5. Scheme of durability determining as a function of load: a) function $Z_k = f(t)$, b) function $T_k = f(N)$

Opisaną metodykę wykorzystano do wyznaczania charakterystyki trwałościowej napoin przeznaczonych do napawania kół kolejowych stosowanych w warunkach eksploatacji PKP. Do określania zależności zużycia koła od nacisku wykorzystano opis matematyczny wyników

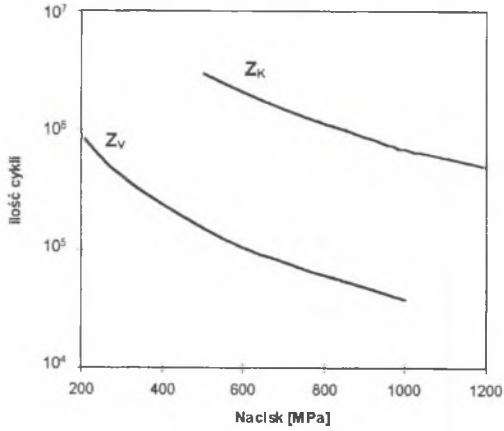
badań na stanowisku Amslera dla różnych napoin podany w pracy [3], co pozwoliło określić funkcję $Z_V = f(N)$. Jako zużycie graniczne Z_g przyjęto wielkości $Z_g = 0,2$ mm, co przy twardości napawanej próbki $HB_1 = 250$ i przeciwpróbki ze stali szynowej $HB_2 = 300$ pozwoliło określić funkcję $Z_V = f(N)$.

W przypadku zmęczenia kontaktowego wykorzystano do badań również stanowisko Amslera, przy czym przeciwpróbka była wykonana ze stali łożyskowej o twardości 62HRC. Uzyskane wyniki opisano funkcją wykładniczą i przedstawiono je w postaci zależności $Z_k = f(N)$. Stanowi ona o krytycznej wartości naprężenia, przy której nie występują jeszcze wyrwy pittingowe.

Nałożenie zależności $T_V = f(H)$ i $T_Z = f(N)$ pozwala na określenie charakterystyki trwałościowej warstwy napawanej, stanowiącej stany dopuszczalne dla wielkości obciążenia eksploatacyjnego (rys. 6).

4. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Zużycie napawanych części maszyn obciążonych zwykle momentem zginającym i skręcającym następuje w warstwie wierzchniej w efekcie równoczesnego zużycia ścierno-adhezyjnego i kontaktowo-zmęczeniowego. Intensywność tych procesów jest zwykle zróżnicowana i wyższa dla zużycia ścierno-adhezyjnego. Niższa szybkość narastania efektów zmęczenia kontaktowego wynika między innymi z faktu, że efekty inicjowania mikropęknięć i wyrw na powierzchni części są usuwane poprzez zużycie ścierno-adhezyjne. Efekty tych procesów są widoczne na rys. 6, z którego wynika, że w zakresie obciążeń 200÷1200 MPa trwałość warstwy napawanej jest określona procesami zużycia ścierno-adhezyjnego. Jest to typowe dla większości przypadków eksploatacji części maszyn, przy czym różnica trwałości ścierno-adhezyjnej i zmęczeniowej maleje wraz ze wzrostem twardości warstwy i zmniejszaniem się obciążenia. Warunki takie mogą powodować zniszczenie części napawanej w efekcie zmęczenia kontaktowego.



Rys. 6. Porównanie trwałości warstwy napawanej (0,15% C, 0,96% Mn, 1,21% Cr, 0,51% Mo) przy zużyciu ścierno-adhezyjnym (Z_V) i zmęczeniowym kontaktowym (Z_k)

Fig. 6. Comparison of surfaced layer durability (0,15% C, 0,96% Mn, 1,21% Cr, 0,51% Mo) during abrasive-adhesive wear (Z_V) and contact fatigue (Z_k)

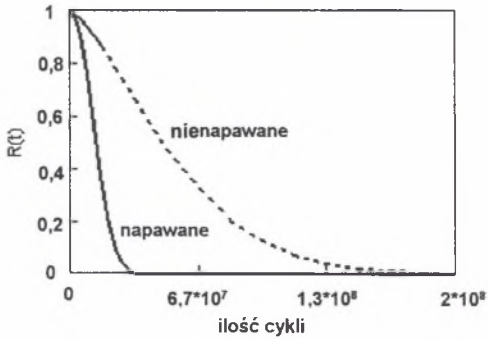
Trwałość napoin w dużym stopniu zależy od wyników metalurgicznych i technologicznych, tzn. od składu chemicznego, struktury i twardości oraz od poprawności wykonania napawania.

Niezawodność jako prawdopodobieństwo trwałości napawanej części co najmniej większej od założonej jest określana zwykle za pomocą rozkładu Weibulla

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{T}\right)^b\right],$$

gdzie: $R(t)$ – niezawodność jako prawdopodobieństwo, że $t \geq T$,
t – czas,
T – parametr trwałości,
b – parametr kształtu.

Policzona [3] wartość trwałości i niezawodności dla próbek nienapawanych o podobnej twardości ok. 250 HB wykazała jednak, że trwałość próbek napawanych jest wyższa od próbek nienapawanych, co widoczne jest przy porównaniu funkcji dla obu przypadków (rys. 7). O takim wyniku mogła zadecydować jakość napawanych metodą TIG napoin, w których mogły występować wady w postaci drobnych por, dopuszczone przez kontrolę.



Rys. 7. Porównanie funkcji niezawodności dla próbek napawanych i nienapawanych
Fig. 7. Comparison of reliability functions for surfaced i non-surfaced specimens

Uzyskane wyniki pozwalają na następujące stwierdzenia:

1. Trwałość warstw napawanych zależy między innymi od własności użytkowych napoiny, a w szczególności od twardości. Wzrost twardości zapewnia wzrost trwałości warstw napawanych, szczególnie przy dużych obciążeniach, kiedy dominuje zużycie ścierno-adhezyjne.
2. O trwałości warstw napawanych decyduje trwałość określana za pomocą prób zużycia ścierno-adhezyjnego, która z reguły jest wyraźnie niższa od trwałości wyznaczonej w próbach zużycia kontaktowo-zmęczeniowego.

3. Trwałość i niezawodność części napawanych i nienapawanych o podobnych własnościach warstwy wierzchniej, określane na podstawie wyników zużycia próbek, były wyższe w przypadku części nienapawanych.

Literatura

1. Adamiec P., Dziubiński J.: Problemy przy napawaniu i eksploatacji regenerowanych elementów maszyn transportowych. PAN, Wyd. Szumacher, Kielce 1997
2. Kotecki D., Ogborn J.,S.: Abrasion resistance of ironbased hardfacing alloys. Welding Journal nr 8 1995
3. Witaszek M.: Ocena trwałości i niezawodności kół kolejowych. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Instytut Transportu, Katowice 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Edmund Tasak

Abstract

This article describes methodology of durability and reliability assessment of surfaced machine parts which have been used for rail wheels. Durability and reliability of surfaced rail wheels have been calculated. Fatigue durability used to be greater then wear durability. So durability of surfaced layer depends mainly on its wear. Service properties, mainly hardness influences the wear. Increase of hardness reduces wear intensity and increases the durability. Comparison of the durability of non-surfaced and surfaced rail wheels showed that durability of non surfaced wheels is greater then surfaced ones with similar hardness.