

OCENA ZMĘCZENIOWEGO ZASOBU EKSPLOATACYJNEGO KONSTRUKCJI NOŚNYCH W WARUNKACH DŁUGOTRWAŁEJ EKSPLOATACJI MASZYN. CZĘŚĆ 2 – ZASTĘPCZE METODY SZACOWANIA ZASOBU EKSPLOATACYJNEGO W DŁUGIM HORYZONCIE

BEARING STRUCTURES FATIGUE RESOURCE ASSESSMENT DURING LONG-LASTING EXPLOITATION OF MACHINES. PART 2 - SUBSTITUTIVE METHODS OF FATIGUE LIFE ASSESSMENT IN LONG PERIODS OF TIME

Artur Jankowiak, Paweł Grabowski - Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska
Marek Kowalczyk - SKW, Biuro Projektowo-Techniczne, Zgorzelec

W niniejszym opracowaniu zilustrowane zostało zagadnienie oceny zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego wybranych węzłów konstrukcyjnych konkretnego obiektu, wieloczerpakowej koparki kołowej KWK 910 w ramach długotrwałej eksploatacji. W pierwszej części artykułu przedstawiono problemy z dostępnością lub wiarygodnością danych, które mogą wystąpić w trakcie długotrwałej rejestracji przebiegów obciążeń eksploatacyjnych, a które są podstawą do wyznaczania uszkodzeń zmęczeniowych i dalej do prognozowania pozostającej trwałości węzłów. W niniejszej części zaproponowano metody postępowania w obliczeniach zmęczeniowych w okresach, w których wspomniane problemy z rejestracją występują.

Słowa kluczowe: degradacja zmęczeniowa, zasób eksploatacyjny, konstrukcje nośne, maszyny robocze ciężkie

The scope of the paper is to describe problems during calculating fatigue resource assessments of structural components of bucket-wheel excavator KWK-910, which may often appear during long-lasting exploitation. The problems considered in the first part of the paper refer to availability and thrustworthiness of loading data acquired during operating of the machine. Those data are basis for fatigue damage calculations as well as for fatigue resource assessments of the structural joints. In this part of the paper there were proposed some procedures in order to keep damage calculation in periods when loading data reveals as not useful because of above mentioned problems with load data availability.

Keywords: fatigue degradation, fatigue resource, supporting structures, heavy machinery

WPROWADZENIE

W pierwszej części pracy przedstawiono problemy w długotrwałej rejestracji obciążeń eksploatacyjnych czynionej na potrzeby określania zasobu eksploatacyjnego spawanych węzłów konstrukcyjnych metodami wysokocyklowymi. Przedstawiono obiekt będący przedmiotem nadzoru eksploatacyjnego, opisano system akwizycji danych oraz szczegółowo opisano perturbacje w rejestracji. W części 2 przedstawiono wyniki tych analiz w postaci decyzji, w których okresach czasu uszkodzenia zmęczeniowe i pozostający zmęczeniowy zasób eksploatacyjny muszą być wyznaczane metodami zastępczymi.

OCENA ZASOBU EKSPLOATACYJNEGO W DŁUGIM HORYZONCIE – METODY ZASTĘPCZE

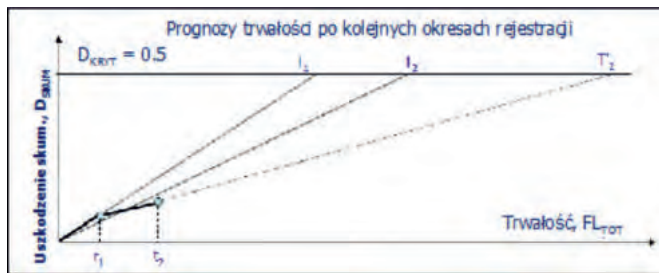
Przewidywanie resztkowej trwałości zmęczeniowej w oparciu o liniowe hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych

wymaga odpowiedniej bazy danych obciążeniowych, zawierającej rezultaty pomiarów obciążeń w trakcie eksploatacji. Macierz naprężeń i widmo naprężeń są dobrą formą zapisu obciążeń eksploatacyjnych, bo istotnie zmniejszają objętość danych, zachowując przy tym dostateczną ilość informacji dla oceny trwałości zmęczeniowej [1]. Nie zmienia to faktu, że trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcyjnych charakteryzuje się rozrzutem, który może być przyczyną znacznej rozbieżności trwałości przewidywanej w stosunku do rzeczywistej. Rozbieżność ta przewyższa niekiedy jeden rząd wielkości [2]. Dodatkowym problemem, i czynnikiem utrudniającym ocenę trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych poddanych rejestracji przebiegów obciążeń eksploatacyjnych mogą być zaburzenia w samej rejestracji. Należy tu jednak wyraźnie podkreślić bardzo duży komfort inżynierski przy prognozowaniu trwałości resztkowej - mimo okresów pozbawionych wiarygodnych danych obciążeniowych, sytuacja i tak jest znacznie lepsza niż prognozowanie na podstawie krótkich okresów reje-

stracji maszyny właściwej lub prototypu. Dla przedmiotowej maszyny problemy z rejestracją opisano w części pierwszej artykułu. W związku z tym, mając na uwadze bardzo długie okresy eksploatacji (i rejestracji) oczywista była konieczność opracowania metod postępowania (wypełnienia powstałych luk danych) w okresach nieprawidłowej lub niepewnej rejestracji przez aparaturę pomiarową.

W procedurze obliczania trwałości opartej o liniowe hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych (np. Palmgrena – Minera) kojarzy się obciążenia eksploatacyjne z charakterystyką zmęczeniową dla rozpatrywanego punktu konstrukcji (np. węzła), w którym przewidywane jest powstanie pęknięcia zmęczeniowego. W obliczeniach prowadzonych dla opisywanej maszyny przyjęto, że z widma nie usuwa się tak zwanych małych zakresów (cykli o niewielkich zakresach), które teoretycznie nie powinny mieć wpływu na uszkodzenie zmęczeniowe. W przyjętej procedurze obliczeniowej w opisanych wyżej charakterystykach, część wykresu (tę o nachyleniu $m=5$) przedłużono do zera, tym samym wpływają one na obliczane uszkodzenie. Ma to wyraz konserwatywny, ale nie pozwala łatwo pozbyć się szumów, które prawdopodobnie są odpowiedzialne za istotną część zliczonych cykli na najniższych zakresach naprężeń.

W wyniku obliczeń uzyskiwana jest dla danego bloku obciążeń (tu wynikającego z danego okresu rejestracji) wartość



Rys. 1. Ogólna idea prognozowania trwałości na bazie danych z kolejnych okresów eksploatacji

Fig. 1. Fatigue life predictions after following acquisition periods - general idea

uszkodzenia zmęczeniowego przez nie spowodowanego.

Uszkodzenie zmęczeniowe skumulowane wynoszące $D_{SKUM} = 1$ oznacza zgodnie z hipotezą Palmgrena – Minera, zniszczenie elementu. W zastosowaniach inżynierskich, dla konstrukcji nośnych zaleca się prognozowanie trwałości zmęczeniowej węzłów konstrukcyjnych z uwzględnieniem

uszkodzenia krytycznego na poziomie $D_{KRYT} = 0,5$. Ma to uzasadnienie w pozostawieniu odpowiedniego zasobu bezpieczeństwa takich obliczeń, szczególnie, że liniowe hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych dają bardzo szacunkowe wyniki. Przy tak przyjętych założeniach trwałość całkowita i pozostająca węzła oblicza się w oparciu o wartość aktualnego uszkodzenia skumulowanego i czasu, w trakcie którego zostało ono wygenerowane. W oszacowaniach tych używa się zatem średniego tempa przyrostu uszkodzenia przy założeniu, że w dalszej eksploatacji będzie ono podobne do dotychczasowego. Założenie to ma tę zaletę, że z każdym kolejnym przepracowanym okresem eksploatacji prognoza ta jest coraz bardziej dokładna. Doskonale widać to po podstawieniu konkretnych danych. Na rysunku 2 przedstawiono prognozy trwałości dla jednego z węzłów maszyny (PSOT 9).

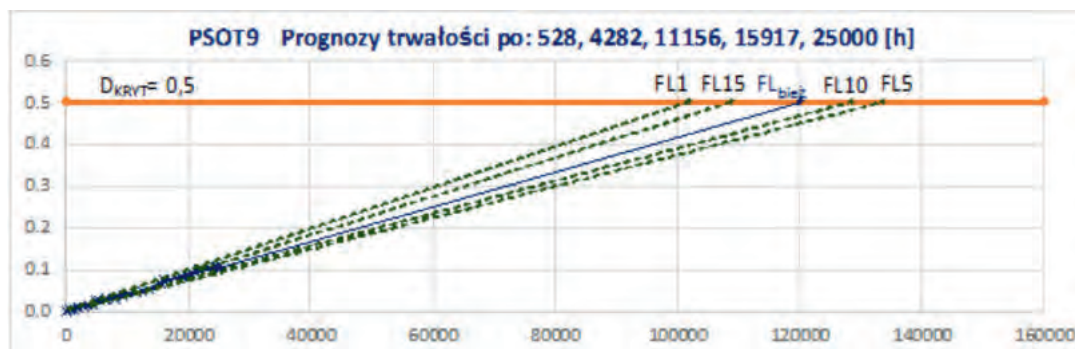
Wykonano je po kolejnych okresach eksploatacji (rejestracji obciążeń) – odpowiednio po pierwszym (528 [h]), piątym (4 282 [h]), dziesiątym (11 156 [h]), piętnastym (15 917 [h]) i ostatnim (ok. 25 000 [h]).

Widoczne jest coraz wyraźniejsze zawężanie się błędu dla przewidywanego momentu zaistnienia pęknięcia zmęczeniowego, w miarę informacji napływających z systemu akwizycji obciążeń. Wskazuje to też na istnienie i umacnianie się – mimo pewnych różnic w intensywności eksploatacji w różnych okresach – wyraźnego, charakterystycznego dla każdego węzła, trendu (podobne zachowanie można zaobserwować także dla pozostałych węzłów maszyny).

Prawidłowość ta może być istotnym przyczynkiem do wypracowania zasad postępowania w okresach eksploatacji (i rejestracji danych), w których niepewne dane obciążeniowe lub ich brak nie pozwalają na wyznaczenie rzeczywistego uszkodzenia zmęczeniowego. Oczywistym wydaje się zapełnienie takiej luki w obliczeniach uszkodzenia poprzez wyznaczenie ich metodami zastępczymi – w oparciu o określone, arbitralnie przyjęte godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia.

Do analizy wyłoniono następujące godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia:

- D_{hmax} (maksymalne) – godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia charakterystyczne dla okresu o największej z dotychczasowych intensywności eksploatacji,
- D_{hmin} (minimalne) – godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia charakterystyczne dla okresu o najmniejszej intensywności eksploatacji z dotychczasowych,



Rys. 2. PSOT 9. Prognozowane trwałości na bazie danych z kolejnych okresów eksploatacji

Fig. 2. PSOT 9. Fatigue life predictions after following acquisition periods

- c) D_{host} (ostatnie) – godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia charakterystyczne dla ostatniego (z prawidłowymi danymi) okresu rejestracji,
- d) $D_{\text{hśr}}$ (średnie) – średnie godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia obliczane, jako iloraz skumulowanego uszkodzenia i łącznej liczby zarejestrowanych godzin pracy w dotychczasowych okresach,
- e) D_{htr} (trendu) – godzinowe tempo przyrostu uszkodzenia opisywane równaniem linii trendu (wyznaczonego metodą n-kwadrat).

Analizy związane z wyłonieniem rodzaju tempa przyrostu uszkodzenia, które najlepiej odwzorowywałyoby zużycie zasobu eksploatacyjnego w okresach bez danych lub niepewnych danych obciążeniowych przeprowadzono w następujący sposób: wyłoniono okresy braku danych w określonych węzłach, a następnie sprawdzono zachowanie się innych węzłów z prawidłowymi danymi w tych okresach. Porównywano w nich rzeczywisty przyrost uszkodzenia w badanym okresie do uszkodzenia obliczanego metodami zastępczymi (w oparciu o różne godzinowe tempa wzrostu) na tym samym odcinku czasu. W miarę możliwości, węzły porównawcze wybierano z tej samej grupy (podobnie pracujących obciążeniowo – np. siostrzany, symetryczny węzeł na tym samym elemencie konstrukcyjnym maszyny). Dodatkowo porównywano w tle węzły z innej grupy. Jak wskazują wyniki oceny poprawności danych przedstawione w pierwszej części artykułu, węzły, którymi można się posłużyć, jako porównawczymi w całej dotychczasowej eksploatacji są PSOT-y 5-8 oraz 9. W przypadku metod zastępczych D_{hmax} , D_{hmin} , D_{host} , $D_{\text{hśr}}$ postępowanie polegało na przedłużeniu (pokryciu) luki w obliczeniach z uwzględnieniem odpowiedniego tempa przyrostu uszkodzenia począwszy od ostatniego punktu (końca okresu) wykresu opartego na obliczeniach rzeczywistych. Metoda zastępcza D_{htr} polegała na

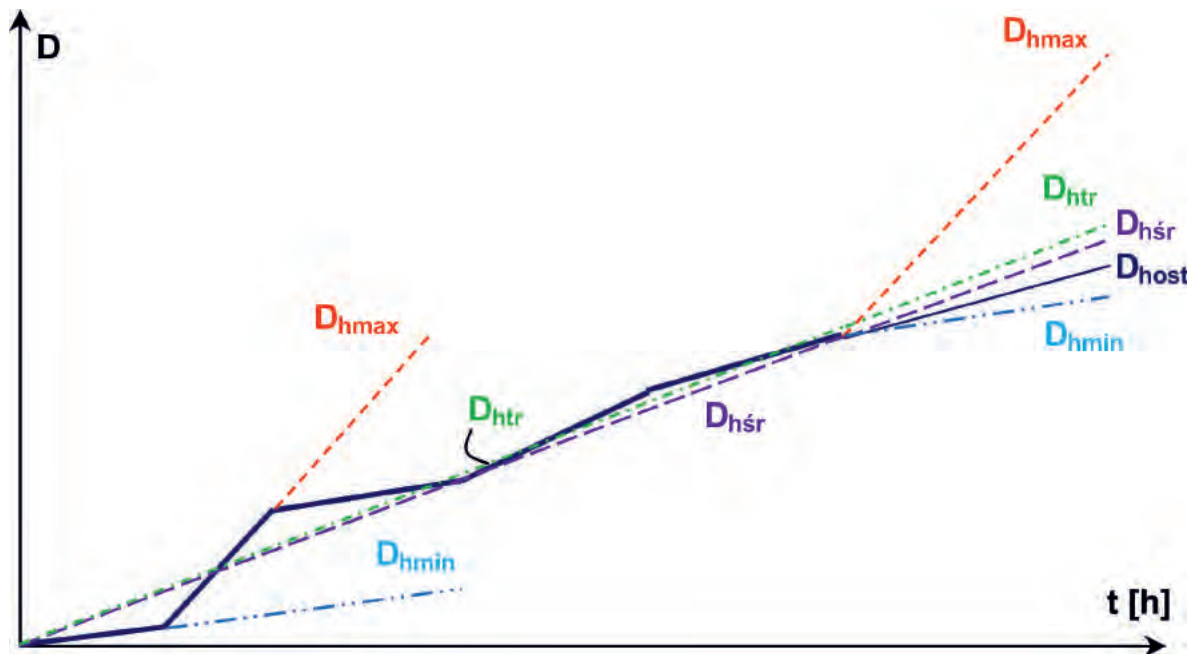
wyznaczeniu linii trendu (funkcja liniowa) na bazie dotychczasowego czasu poprawnej rejestracji a potem przedłużenie jej na okresy, które stanowią lukę w obliczeniach. Oznacza to, że przy metodzie wykorzystującej linię trendu punkt początkowy zastępczej części wykresu uszkodzenia skumulowanego nie pokrywa się z ostatnim punktem wykresu wyznaczonego na bazie poprawnej rejestracji.

Sprawdzenie węzła nr 1

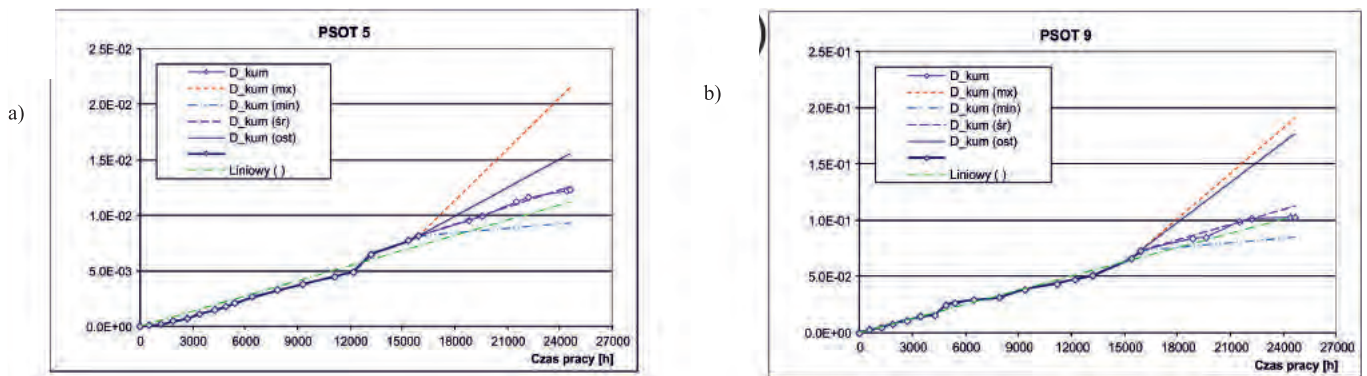
PSOT 1 posiada obszerną lukę czasową w wiarygodnych danych od początku 17. okresu do końca 22. okresu rejestracji. Godzinowo od (po) 15,917 [h] do 24,645 [h]. Niestety nie da się na tak dużym odcinku czasu dokonać analizy porównawczej z innym węzłem tej samej grupy (węzły 1-4). Porównanie zostanie dokonane na bazie węzłów 5 i 9. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 4.

Z przeprowadzonej analizy wyraźnie widać, że metody największego i najmniejszego tempa przyrostu uszkodzenia dają wyniki w najmniejszym stopniu zgadzające się z rzeczywistym obliczeniowym uszkodzeniem. Nieco lepszą, choć także niesatysfakcjonującą dokładność oszacowania daje zastępcza metoda obliczania uszkodzenia oparta o tempo przyrostu uszkodzenia charakterystyczne dla ostatniego (prawidłowo zarejestrowanego) okresu eksploatacji. Najmniejsze błędy oszacowania dały metody $D_{\text{hśr}}$ i D_{htr} . Przy czym dla obu PSOT-ów bardziej konserwatywne oszacowanie dawała metoda średniego dotychczasowego tempa wzrostu.

Odpowiednie dane przedstawia tabela 1. W porównaniu tym przedstawiono również oszacowanie błędu odniesionego do przyjętego uszkodzenia krytycznego (czyli $D=0,5$). Należy to rozumieć, jako błąd oszacowania metodami zastępczymi uszkodzenia zmęczeniowego w okresach niewiarygodnych lub braku danych, bez względu na to co będzie się działo później z rejestracją na tym węzle (intensywność eksploatacji, prawidłowość rejestracji danych, itd.). Wyraźnie widać, że o ile „lokalnie” w bieżących okresach rejestracji błąd ten jest widoczny i wy-



Rys. 3. Metody zastępcze – przykłady różnych prędkości przyrostu uszkodzenia
Fig. 3. Substitutive methods – examples of different damage growth rates



Rys. 4. Wyznaczanie uszkodzenia zmęczeniowego metodami zastępczymi w porównaniu z rzeczywistym uszkodzeniem. Okresy 17-22: a) PSOT 5, b) PSOT 9
Fig. 4. Assessment of cumulative damage using substitutive methods versus real calculations. Periods 17-22: a) PSOT 5, b) PSOT 9

Tab. 1. Zestawienie wyników uszkodzenia wyznaczanego metodami zastępczymi. PSOT 5 i 9
Tab. 1. Results of cumulative damage obtained by substitutive methods. PSOT 5 and 9

PSOT 5	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hr}	D_{hr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.02146	0.00933	0.01561	0.01264	0.01117	0.01228
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych i na 24.645h	1.748	0.760	1.271	1.029	0.910	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego $D = 0,5$	1.018	0.994	1.007	1.001	0.998	---
PSOT 9	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hr}	D_{hr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.19112	0.08472	0.17687	0.11235	0.10328	0.10291
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych i na 24.645h	1.857	0.823	1.719	1.092	1.004	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego $D = 0,5$	1.171	0.964	1.148	1.019	1.001	---

nosi dla metody D_{hr} 2,9% dla porównywania na bazie PSOT 5 i 9,2% dla porównywania na bazie PSOT 9, to w odniesieniu do końcowego momentu przebiegu przyrostu uszkodzenia jest on właściwie pomijalnie mały. Odpowiednio wynosi 0,1% dla PSOT 5 i 1,9% dla PSOT 9. Ten względny błąd jest większy dla PSOT 9 z uwagi na dużo większy bieżący poziom zużycia zasobu eksploatacyjnego – czyli będący przedmiotem analizy okres niewiarygodnych danych stanowi dla PSOT 9 po prostu relatywnie dużą część całego przewidywanego czasu eksploatacji do osiągnięcia uszkodzenia krytycznego.

Sprawdzenie węzła nr 3

PSOT 3 posiada tylko jeden okres rejestracji, dla którego dane zostały uznane za niewiarygodne - okres 15 (zrzut danych po 15,367h). W tym przypadku jest możliwe porównanie z intensywnością obciążeń i przyrostami uszkodzenia w innych węzłach z tej grupy węzłów. PSOT-y 1 i 2, choć na późniejszych etapach eksploatacji notowały perturbacje, w przypadku okresu 15. mogą stanowić wiarygodną bazę porównawczą, w interesującym nas okresie dane obciążeniowe są wiarygodne. Dodatkowo okres ten został zweryfikowany w oparciu o PSOT-y 5 i 6.

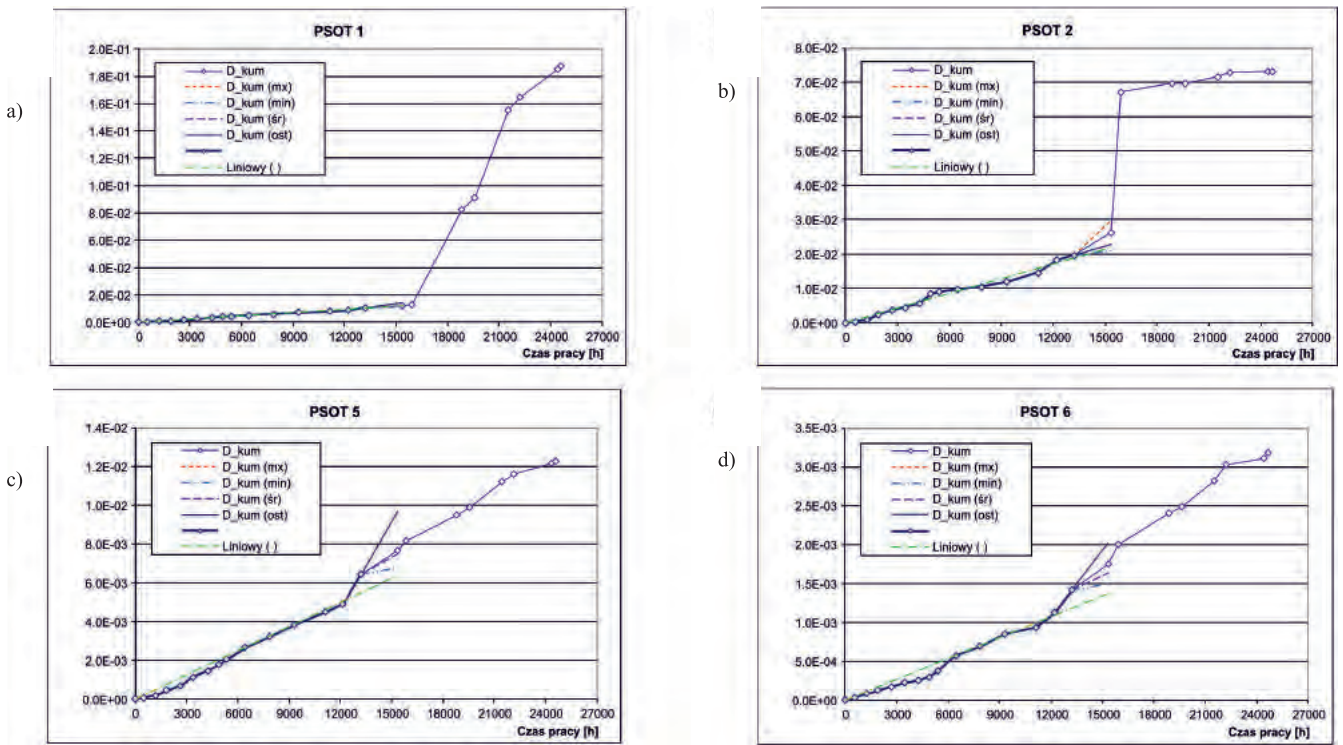
Odpowiednie przebiegi uszkodzenia rzeczywistego i obliczanego metodami zastępczymi przedstawiono na rysunku 5. Podobnie, jak w poprzedniej analizie, także i tutaj wśród najbardziej zgodnych z rzeczywistością metod zastępczych znajduje się metoda D_{hr} . Poza PSOT 2, w którym zanotowano w tym okresie wyraźnie odbiegające od przeciętnego tempo przyrostu uszkodzenia, we wszystkich pozostałych porównaniach zanotowano minimalne różnice w stosunku do rzeczywistych wyników.

Metoda oparta o linię trendu niestety nie oddała dobrze (poza przypadkiem PSOT 1, gdzie wszystkie metody wykazały dobrą zgodność) przebiegów rzeczywistego przyrostu uszkodzenia. Jest to prawdopodobnie spowodowane faktem, że w tym przypadku uzupełniany jest tylko jeden okres eksploatacji. Wszędzie, poza PSOT 1 okres ten następował po wcześniejszym wyraźnie bardziej intensywnym okresie, lub sam doznawał wyraźnego odbicia w górę (w kierunku zwiększonej konsumpcji zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego). Tym samym, z samej natury, przy pojedynczym i nietypowym kolejnym punkcie wykresu metoda linii trendu nie zareaguje odpowiednio. Odpowiednie dane wyników uszkodzenia i błędów w stosunku do uszkodzenia rzeczywistego przedstawiono w tabeli 2. Odnosząc uzyskane błędy do całkowitego czasu potrzebnego do uzyskania uszkodzenia krytycznego widać, że przekrojowo rzecz biorąc, najlepszą zgodność wykazywała metoda D_{hr} . Poza nietypowym okresem 15. w PSOT 2, gdzie zanotowano błąd tej metody rzędu 0,7%, w pozostałych PSOT-ach porównawczych błąd nie przekraczał tu 0,1%.

Sprawdzenie węzła nr 10

PSOT 10 posiada obszerną lukę czasową w wiarygodnych danych od początku 15 okresu do końca 20. okresu rejestracji. Godzinowo od (po) 13,223 [h] do 22,209 [h]. Analizy porównawczej można dokonać z innym węzłem tej samej grupy (węzeł 9) oraz z jednym z węzłów grupy 5-8. Wybrano węzeł 6.

Przebieg wykresu przebiegu uszkodzenia zmęczeniowego wskazuje, że węzeł ten w badanym okresie (odpowiadającym okresowi niepewności danych w PSOT 10) nieco odszedł od typowej dla siebie intensywności eksploatacji (zwiększył



Rys. 5. Wyznaczanie uszkodzenia zmęczeniowego metodami zastępczymi w porównaniu z rzeczywistym uszkodzeniem. Okres 15: a) PSOT 1, b) PSOT 2, c) PSOT 5, d) PSOT 6

Fig. 5. Assessment of cumulative damage using substitutive methods versus real calculations. Period 15: a) PSOT 1, b) PSOT 2, c) PSOT 5, d) PSOT 6

Tab. 2. Wyniki uszkodzenia zmęczeniowego wyznaczonego metodami zastępczymi. PSOT-y 1, 2, 5 i 6
Fig. 2. Results of cumulative damage obtained by substitutive methods. PSOTs 1, 2, 5 and 6

PSOT 1	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hst}	D_{htr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.01454	0.01137	0.01454	0.01247	0.01178	0.01206
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.206	0.942	1.206	1.034	0.976	---
Błąd na 24.645h	1.013	0.996	1.013	1.002	0.998	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego D = 0,5	1.005	0.999	1.005	1.001	0.999	---
PSOT 2	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hst}	D_{htr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.02966	0.02079	0.02269	0.02288	0.0220	0.02639
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.124	0.788	0.860	0.867	0.832	---
Błąd na 24.645h	1.045	0.923	0.949	0.952	0.939	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego D = 0,5	1.007	0.989	0.993	0.993	0.991	---
PSOT 5	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hst}	D_{htr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.00974	0.00676	0.00974	0.00752	0.00642	0.00769
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.266	0.878	1.266	0.978	0.835	---
Błąd na 24.645h	1.167	0.924	1.167	0.986	0.896	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego D = 0,5	1.004	0.998	1.004	1.000	0.997	---
PSOT 6	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hst}	D_{htr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.00202	0.00150	0.00202	0.00164	0.00138	0.00175
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.156	0.855	1.156	0.937	0.787	---
Błąd na 24.645h	1.086	0.920	1.086	0.965	0.883	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego D = 0,5	1.001	0.999	1.001	1.000	0.999	---

ją), co w efekcie spowodowało niską zgodność właściwie każdej metody zastępczej. Widać to wyraźnie na rysunku 6a. Stosunkowo najlepszą zgodność uzyskała znowu metoda D_{hr} , gdzie błąd na koniec okresu objętego analizą wyniósł 21,6%. Metoda linii trendu tutaj zawiodła całkowicie, uzyskując w tym okresie błąd rzędu 54,4%. (tab. 3).

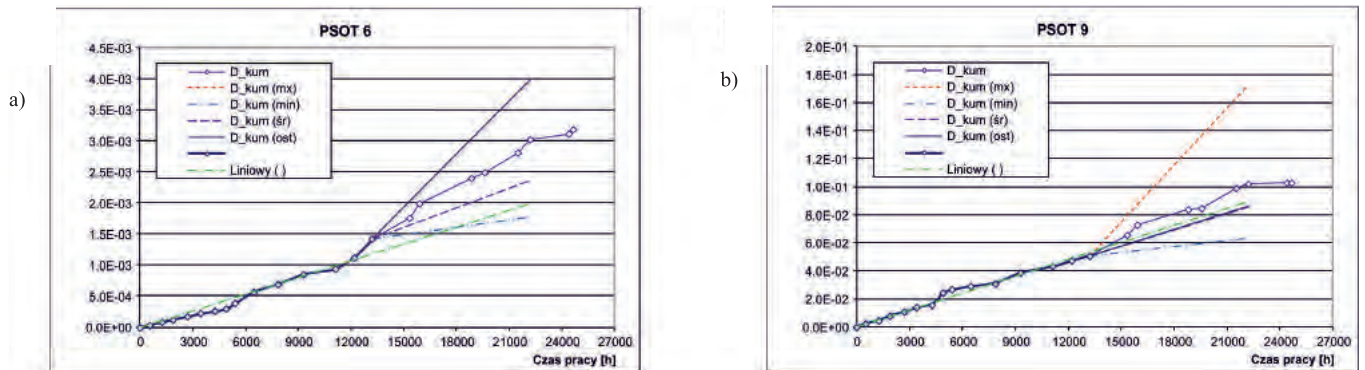
Obie metody, jak też i pozostałe w odniesieniu do całkowitego okresu koniecznego do osiągnięcia uszkodzenia krytycznego zanotowały natomiast niewielki błąd, nie większy niż 0,3%.

Analiza porównawcza z siostrzanym węzłem 9 (PSOT 9 i 10 stanowią grupę) dała dla wszystkich metod zastępczych

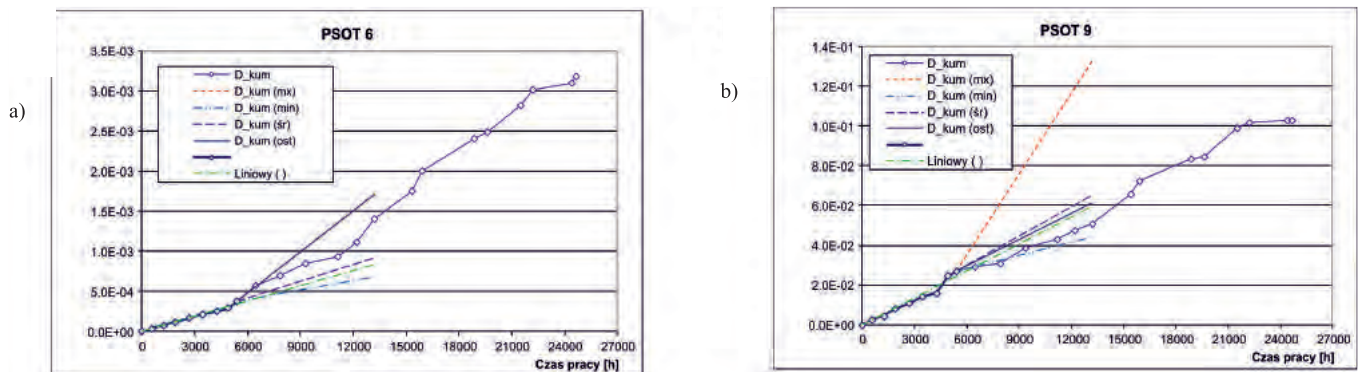
niedobrze zgodne wyniki niż poprzednio. Tutaj najlepszą zgodność uzyskała metoda D_{hr} z błędem dla okresu objętego analizą wynoszącym 12,1%. Podobnie najlepszą zgodność ta metoda uzyskała w odniesieniu do całego okresu eksploatacji – błąd rzędu 2,5%, będąc nieco lepszą od D_{hr} (błąd 3,3%)

Sprawdzenie węzłów nr 11 i 12

PSOT-y 11 i 12 stanowią siostrzane węzły konstrukcyjne, które doznały uszkodzenia rejestracji obciążeń eksploatacyjnych w tym samym czasie, dlatego mogą być analizowane razem. Posiadają obszerną lukę czasową w wiarygodnych danych od początku 9. okresu do końca 14. okresu rejestracji



Rys. 6. Wyznaczenie uszkodzenia zmęczeniowego metodami zastępczymi w porównaniu z rzeczywistym uszkodzeniem. Okresy 15-20: a) PSOT 6, b) PSOT 9
Fig. 6. Assessment of cumulative damage using substitutive methods versus real calculations. Periods 15-20: a) PSOT 6, b) PSOT 9



Rys. 7. Wyznaczenie uszkodzenia zmęczeniowego metodami zastępczymi w porównaniu z rzeczywistym uszkodzeniem. Okresy 9-14: a) PSOT 6, b) PSOT 9
Fig. 7. Assessment of cumulative damage using substitutive methods versus real calculations. Periods 9-14: a) PSOT 6, b) PSOT 9

Tab. 3. Zestawienie wyników uszkodzenia wyznaczanego metodami zastępczymi. PSOT 6 i 9

Tab. 3. Results of cumulative damage obtained by substitutive methods. PSOT 6 and 9

PSOT 6	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hr}	D_{hr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.00398	0.00177	0.00398	0.00237	0.00138	0.00302
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.317	0.586	1.317	0.784	0.456	---
Błąd na 24.645h	1.302	0.606	1.302	0.795	0.482	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego $D = 0,5$	1.002	0.998	1.002	0.999	0.997	---
PSOT 9	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hr}	D_{hr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.17293	0.06339	0.08584	0.08544	0.08950	0.10183
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.698	0.622	0.843	0.839	0.879	---
Błąd na 24.645h	1.691	0.626	0.845	0.841	0.880	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego $D = 0,5$	1.142	0.923	0.968	0.967	0.975	---

Tab. 4. Zestawienie wyników uszkodzenia wyznaczanego metodami zastępczymi PSOT 6 i 9
 Tab. 4. Results of cumulative damage obtained by substitutive methods PSOT 6 and 9

PSOT 6	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hhr}	D_{hr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.00171	0.00069	0.00171	0.00092	0.00084	0.00141
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	1.216	0.490	1.216	0.654	0.597	---
Błąd na 24.645h	1.096	0.773	1.096	0.846	0.821	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego $D = 0,5$	1.001	0.999	1.001	0.999	0.999	---
PSOT 9	D_{hmax}	D_{hmin}	D_{host}	D_{hhr}	D_{hr}	Rzeczywiste
Uszkodzenie	0.13298	0.04446	0.06127	0.06550	0.05974	0.05087
Błąd na koniec okresu metody zastępczej w danych	2.614	0.874	1.204	1.288	1.174	---
Błąd na 24.645h	1.794	0.939	1.101	1.142	1.086	---
Błąd odniesiony do uszkodzenia krytycznego $D = 0,5$	1.164	0.987	1.021	1.029	1.018	---

(po 5,403 do 13,223h). Analiza oparta o porównanie z PSOT 6 wskazuje na wyjątkowo nietrafione prognozy właściwie dla wszystkich metod. Metoda średniego tempa przyrostu uszkodzenia zanotowała dla właściwego analizie okresu błąd rzędu 34,6%, metoda linii trendu jeszcze więcej, bo 40,3% (tab. 4).

Stosunkowo najlepszą zgodność uzyskiwały tu metody D_{host} i D_{hmax} (będące *de facto* w tym przypadku tożsame – ostatni okres przed uszkodzeniem był jednocześnie najbardziej intensywny eksploatacyjnie z dotychczasowych) notując błąd rzędu 21,6%. Co ciekawe, analizując udział tego niepewnego okresu w całkowitym czasie niezbędnym do osiągnięcia uszkodzenia krytycznego można zauważyć, że jest on mało istotny. Błąd odniesiony do całości okresu przyrostu uszkodzenia dla każdej z metod zastępczych jest nieznaczący i wynosi około 0,1%.

Druga analiza, oparta tym razem o porównanie z PSOT 9 wskazuje na nieco bardziej trafne prognozy. Tym razem, nieoczekiwanie najbardziej zgodne z rzeczywistością wyniki uzyskała metoda D_{hmin} , gdzie błąd wyniósł 12,6%. Nieco mniejszą dokładność zanotowała metoda linii trendu z błędem 17,4%. W odniesieniu do całego przewidywanego okresu przyrostu uszkodzenia, podobnie jak w poprzednich przypadkach okazało się, że wpływ analizowanego okresu na cały czas wzrostu nie jest duży i powoduje błąd rzędu 2-3% dla metod średniego tempa wzrostu i linii trendu.

PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonych analiz porównawczych było sprawdzenie, która z metod zastępczych szacowania uszkodzenia zmęczeniowego najlepiej (również w aspekcie wszechstronności) uzupełnia luki wynikające z braku wiarygodnych danych obciążeniowych. Przeprowadzone badania wskazują, że: - choć lokalnie, w odniesieniu do okresu zastępowanego obliczeniami zastępczymi, metody

te mogą dawać stosunkowo duży błąd, to w odniesieniu do całego przewidywanego czasu rejestracji (i konsumpcji zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego) ma on śladowe znaczenie dla globalnej poprawności wyznaczania momentu osiągnięcia przez dany węzeł uszkodzenia krytycznego,

- wspomniany błąd odniesiony do całego okresu eksploatacji jest tym mniejszy im niższy jest aktualny poziom uszkodzenia zmęczeniowego (dłuższy przewidywany czas do osiągnięcia uszkodzenia krytycznego) oraz krótszy okres braku danych,

- ze zbadanych metod najbardziej wszechstronna i zazwyczaj najtrafniejsza wydaje się metoda D_{hhr} . Jest ona też dogodna w zastosowaniach inżynierskich, bo wymaga stosowania jedynie podstawowych operacji matematycznych. Ona zatem jest rekomendowana do wykorzystania w sytuacji, gdy konieczne jest zastosowanie metody zastępczej obliczania uszkodzenia zmęczeniowego w okresach bez wiarygodnych danych obciążeniowych,

- przeprowadzone analizy wskazują, że w sensie eksploatacyjnym niedopuszczalne do zbyt długich okresów bez wiarygodnych danych jest bardziej istotne niż dokładność obliczeń zastępczych,

- należy pamiętać o tym, że w niniejszym projekcie eksploatacyjnym z widm obciążeń eksploatacyjnych nie usuwa się na potrzeby obliczeń zmęczeniowych tak zwanych małych zakresów (cykli o niewielkich zakresach) niemających zazwyczaj wpływu na obliczenia zmęczeniowe. Tu z uwagi na przedłużenie krzywej ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej (na wykresie Wohlera) $m=5$ do zera wpływają one na uszkodzenie. Ma to wyraz konserwatywny, w kontekście niedokładności wynikających ze stosowania metod zastępczych w obliczaniu uszkodzenia zmęczeniowego w niektórych okresach, można uznać więc, że nawet pewne niedoszacowanie uszkodzenia w takim przypadku i tak „ukryje” się w tym ogólnym konserwatywnym obliczeniu.

Autorzy dziękują Kopalni Węgla Brunatnego Turów za umożliwienie wykorzystania w niniejszej publikacji danych pochodzących z systemu diagnostyki koparki KWK - 910/K - 17.

Literatura

- [1] Jakubczak, H., *Akwizycja obciążeń eksploatacyjnych dla potrzeb analizy trwałości*, XVIII Sympozjum Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz-Pieczyska, maj 2000, ss. 171-178
- [2] Jakubczak, H., *Przewidywanie trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z uwzględnieniem rozrzutu danych*, *Engineering Machines Problems*, Instytut Technologii Eksploatacji, Zeszyt 4, Radom, 1999, ss. 17-36