

NADZÓR ZMĘCZENIOWEGO ZASOBU EKSPLOATACYJNEGO KONSTRUKCJI NOŚNYCH MASZYN ROBOCZYCH CIĘŻKICH

THE FATIGUE LIFE SUPERVISION FOR LOAD CARRYING STRUCTURES OF ENGINEERING MACHINERY

Artur Jankowiak - Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska

Marek Kowalczyk - Biuro Projektowe-Techniczne SKW, Zgorzelec

Wojciech Sobczykiewicz - Przemysłowy Instytut Maszyn Budowlanych, Kobyłka

Intensywne obciążone konstrukcje nośne maszyn roboczych ulegają systematycznej degradacji charakterze zmęczeniowym. Objawia się ona wystąpieniem pęknięć, które mogą doprowadzić nawet do totalnego zniszczenia maszyny. W artykule przedstawiona została koncepcja zapobiegania temu zjawisku. Polega na ustawicznej akwizycji naprężeń w wybranych węzłach konstrukcji, ocenie na tej podstawie oraz znajomości charakterystycznych wytrzymałości zmęczeniowej węzła, stopnia jego uszkodzenia. Postępując tak stale, można uprzedzić fakt zniszczenia konstrukcji nośnej.

Słowa kluczowe: konstrukcje nośne, trwałość zmęczeniowa, nadzór eksploatacyjny

The fatigue degradation of the load carrying structures, in this case engineering machines, strongly depends from intensity of loading. The supervision method of the fatigue cracking of the welded notches in real time of exploration, connected the theoretical calculations with acquisition of the intensity of loading, is presented in this article.

Key words: caring structures, fatigue life, supervision in exploitation

Wprowadzenie

Maszyny robocze ciężkie – MRC, a szczególnie te bardzo ciężkie, jest ich z różnych powodów coraz więcej, wyróżniają:

- wielkie wymiary gabarytowe
- olbrzymie masy własne
- jednostkowość wytwarzania
- znaczny udział masowy i wymiarowy konstrukcji nośnej w ramach całej maszyny
- olbrzymie wydajności operacyjne
- bardzo długie okresy eksploatacji dochodzące do kilkudziesięciu lat.

Należą do nich wybrane dźwignice, maszyny do robót ziemnych, maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego itp. Wśród nich są takie, które zarazem cechuje wysoka intensywność obciążeń użytkowych oraz agresywne środowisko eksploatacji powodujące, że dominującym procesem degradacyjnym jest zmęczenie. Są to głównie: koparki kroczące – pracujące włóką (dragliny), koparki wieloczerpakowe, hydrauliczne jednozaczyniowe, portowe żurawie chwytakowe, portowe suwnice bramowe do przeładunku kontenerów w relacji nabrzeże – statek, maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego (rys.1).

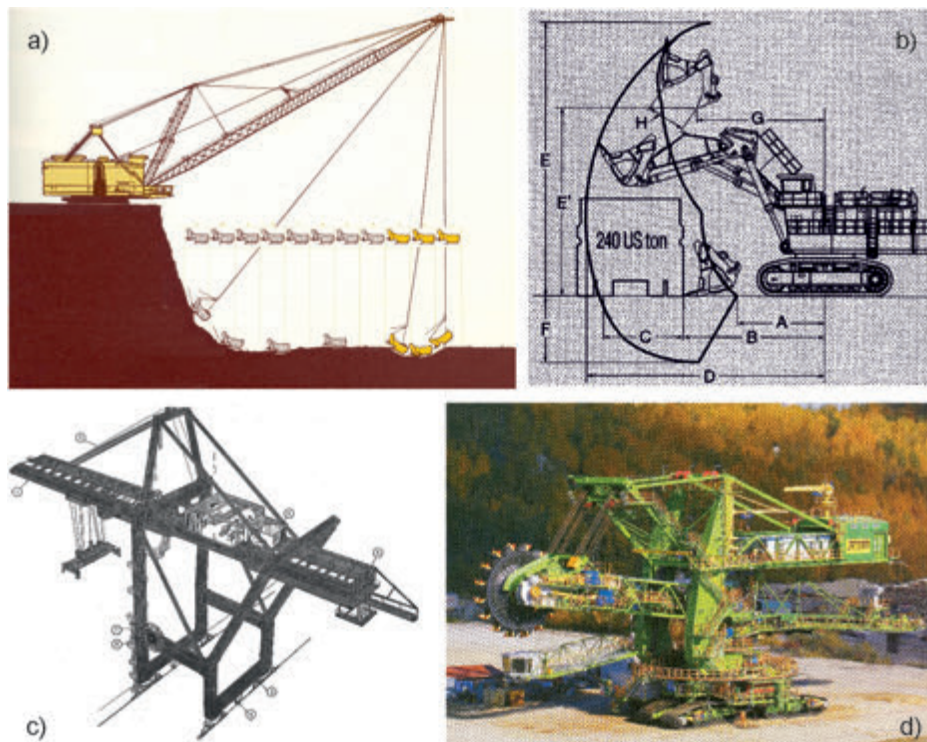
Przytoczone cechy uwypuklają znaczenie zespołu bazowego – konstrukcji nośnej, rozpatrywanych maszyn. Zgodnie z nazwą konstrukcja nośna „przenosi” wszelkie obciążenia wynikające z istnienia maszyny i jej pracy. Stopień zachowania właściwości „przenoszenie” określa zasób eksploatacyjny – ZE. Także bezpieczeństwo użytkowania całej maszyny. Ma to istotny wyraz ekonomiczny jak i etyczny.

Znaczenie konstrukcji nośnej tych maszyn wynika również z faktu, że stanowi ona nierzadko nawet do 70-80% masy całości. Z tej racji poszukiwanie różnorodnych oszczędności masowych, przynoszących korzyści w sferach wytwarzania i użytkowania, ma silną tendencję do dokonywania się głównie na drodze modyfikacji czynionych w obrębie konstrukcji nośnych. Polega głównie na zwiększaniu jej wytrzymałości, poprzez ograniczenia wymiarów przekrojów poprzecznych elementów konstrukcji, jak i stosowaniu do ich wytwarzania stali o coraz wyższej wytrzymałości, zawsze w zakresie określanym przez uwarunkowania o charakterze techniczno-ekonomicznym, także formalnym.

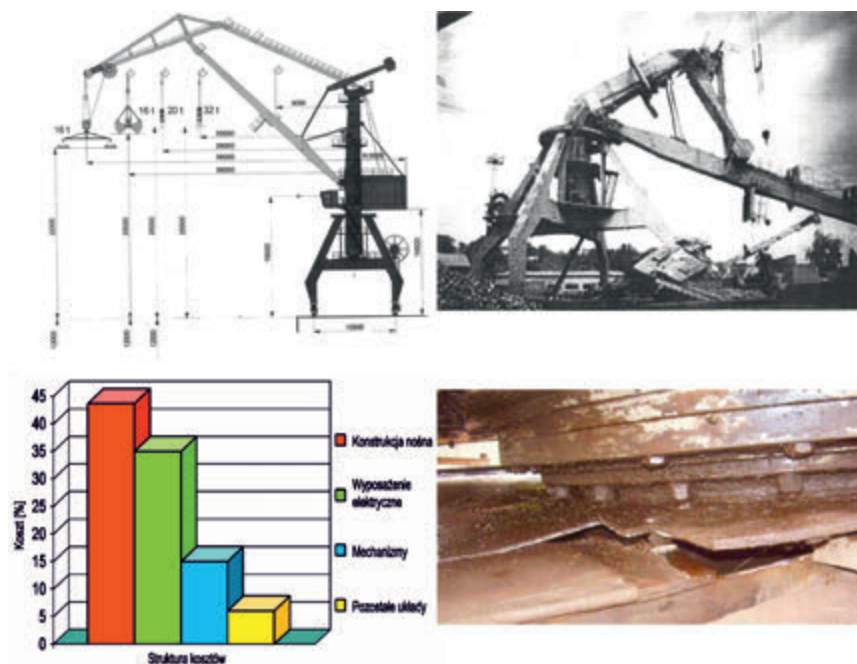
Zarazem, konstrukcje nośne wymienionych uprzednio MRC, poddawane są w trakcie użytkowania procesom obciążeniowym o wysokiej intensywności, to znaczy, w poszczególnych ich węzłach, z reguły zawierających złącza spawane, występują liczne i o wysokich amplitudach cykle zmian naprężeń. W takiej sytuacji dominującym procesem degradacyjnym staje się zmęczenie. Ono „wspomagane” przez procesy korozyjne określa zasób eksploatacyjny (resurs) obiektu.

Konstrukcje nośne są z reguły niewymienne, przynajmniej dotychczas. Ich „czas życia”, mierzony zasobem eksploatacyjnym, wyznacza „czas życia” całego obiektu, którego są podstawowym – bazowym zespołem. Na ten „czas życia”, określany głównie z przesłanek ekonomicznych, są projektowane tj. kształtowane i wymiarowane wytrzymałościowo, również w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej – przekładającej się pośrednio na trwałość.

Dla przeprowadzenia wymiarowania konstrukcji nośnej na



Rys. 1. Maszyny robocze ciężkie – dźwignice i koparki, charakterystyczne wysoką intensywnością obciążeń eksploatacyjnych. a) dragline (włoka), b) jednoznaczyniowa koparka hydrauliczna, c) portowa bramowa suwnica kontenerowa, d) wieloczerpakowa koparka kołowa



Rys. 2. Ilustracja znaczenia konstrukcji nośnej: ekonomicznego, trwałościowego, technicznego bezpieczeństwa użytkowania

zadany czas eksploatacji konieczna jest znajomość:

- charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej jej węzłów (wykonywanych współcześnie za pomocą technik spawalniczych)
- charakterystyk obciążeń zmiennych, odnoszonych także do węzłów konstrukcji – tzw zespołów (widm) obciążeń eksploatacyjnych – ZOE.

Dla obiektów wytwarzanych jednostkowo jest bardzo trudne, a nawet niemożliwe, pozyskanie powyższych danych, w dostatecznie wiarygodnym ujęciu. Bowiem:

- wytrzymałość zmęczeniowa zależy silnie od jakości wykonania złącza spawanego. Jej jednoznaczne określenie, w ujęciu ilościowym wymaganym dla przeprowadzenia analizy trwałości zmęczeniowej, jest

nadal bardzo trudne. Założoną w trakcie projektowania jakość, nie tylko trudno określić, jak tym bardziej zrealizować, a zarazem udokumentować w wielkogabarytowej złożonej konstrukcji nośnej zawierającej olbrzymią liczbę węzłów, wykonywanej jednostkowo. Sytuację zaostrza stosowanie stali o wysokiej wytrzymałości, szczególnie wrażliwych zmęczeniowo na jakość wykonania złącza spawanego.

- zespół obciążeń eksploatacyjnych – ZOE odnoszony do danego węzła konstrukcji, wyrażany w cyklach naprężeń, pozostaje wielkością praktycznie nieznaną. Projektowanie odbywa się zatem na „coś” standardowego, bądź spodziewanego z dużym przybliżeniem. W perspektywie 30 – 50 lat zakładanego okresu eksplo-

atacji mogą zachodzić w tym wypadku bardzo istotne zmiany.

Tło problemu

W takiej, niepewnej sytuacji, aby pozostawać wystarczająco wiarygodnym i użytkować wyrób przy akceptowalnie niskim poziomie ryzyka przy uzasadnionym ekonomicznie okresie czasu, należałoby oszacowany na etapie projektowania zasób eksploatacyjny – ZE stale nadzorować w trakcie eksploatacji. Można dokonywać tego na drodze bieżącej oceny wyczerpywania ZE, dokonującego się w następstwie procesu degradacyjnego, dominującego w przypadku konstrukcji nośnych omawianych maszyn.

Znaczenie konstrukcji nośnej przedstawia poglądowo rysunek 2, w odniesieniu do portowego żurawia wypadowego. Widać wyraźnie:

- zdecydowanie niekorzystne proporcje kosztów wytwarzania, w odniesieniu do pozostałych zespołów i wyposażenia obiektu
- skalę zagrożenia, powodowanego pękaniem zmęczeniowym, i wynikające z tego następstwa kosztowe obejmujące odnowę obiektu, stanowiska pracy oraz przestojów. Także konsekwencje etyczne związane z ofiarami ludzkimi, w czym znów tkwi czynnik ekonomiczny – koszty leczenia i zadośćuczynienia bywają znaczne. Następuje również nadwyższenie reputacji.

Z przedstawionego obrazu wylania się konieczność nie tylko szacowania, ale i nadzorowania, w czasie rzeczywistym, degradacji zmęczeniowej konstrukcji nośnej, prowadzonej przy możliwie pełnym uwzględnieniu specyfiki: obiektu, jego wytwarzania, eksploatacji, płynących z tego powodów zagrożeń.

Połączenie wysokiej intensywności użytkowania, (zarówno w zakresie obciążeń, czasu pracy jak i oddziaływania środowiska) stosowanie stali o podwyższonej z czasem także wysokiej wytrzymałości – niestety tylko statycznej nie zmęczeniowej, dominujący udział technologii spawania w wytwarzaniu, także rosnących wymagań dotyczących trwałości eksploatacyjnej (podbudowywanych silnie czynnikiem ekonomicznym), wraz z potrzebą zapewnienia wysokiej niezawodności oraz bezpieczeństwa użytkowania obiektów (wymaganych chociażby z potrzeb zapewnienia ciągłości dostaw energii, przepływu materiałów, także strat finansowych bądź ludzkich) itd., itp. stworzyło sytuację, w której dochodzi do konieczności wprowadzenia zmian w filozofii realizacji cyklu życia omawianych obiektów. Efektem tych zmian powinno być sprostanie aktualnym i przyszłym wymaganiom, odnoszonym do poszczególnych faz życia obiektu, ale traktowanych możliwie integralnie. Tu wymogi te dotyczą zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego i wynikającego z niego technicznego bezpieczeństwa użytkowania.

Strategia stanu technicznego

W takiej sytuacji, w dążeniu do jednoczesnego zmniejszania ryzyka powodowanego zagrożeniem – pękaniem zmęczeniowe, oraz stałej tendencji do wydłużania, z pobudek ekonomicznych, zasobu eksploatacyjnego, wymagań zasadniczo przeciwstawnych, należałoby zmierzać do możliwie ścisłego powiązania w tym zakresie, procesie wymiarowania trwałościowego konstrukcji nośnej, wszystkich trzech etapów „życia” wyrobu,

etapów projektowania, wytwarzania i eksploatacji.

Wydaje się, że współcześnie najwłaściwsze byłoby sięgnąć po doświadczenia, jakie uzyskano prowadząc eksploatację według strategii stanu technicznego – SST. Ścisłe powiązanie jej z etapami projektowania i wytwarzania, realizowane w obydwie strony, mogłoby, po stworzeniu odpowiedniego układu wzajemnych powiązań, przynieść wymierne korzyści w zakresie zarówno zmniejszenia ryzyka powodowanego zagrożeniem pękaniem zmęczeniowego jak i wydłużenia zasobu eksploatacyjnego. W takim postępowaniu integrują się bardzo silnie aspekty zarówno bezpieczeństwa jak i ekonomii.

Wprowadzenie strategii – SST może przyczynić się do poprawy efektów ekonomicznych poprzez spowalnianie i jednoczesne kontrolowanie przebiegu procesów degradacyjnych – efektem będzie zmniejszona liczba uszkodzeń, zanik awarii, znaczne wydłużenie zasobu eksploatacyjnego, w tym też ograniczanie przestojów. To także poprawa stanu bezpieczeństwa, co również ma w sobie wyraz ekonomiczny, a nie tylko etyczny. Maleją, mające stałe tendencje zwyżkowe, koszty odszkodowań, leczenia, ubezpieczeń, nie dochodzi do spadku reputacji firmy.

Strategię stanu technicznego można ogólnie określić jako ciągły, bądź okresowy, pomiar i interpretacje danych – symptomów, określających bezpośrednio bądź pośrednio stopień degradacji obiektu, a posiadając tę wiedzę, prowadzić adekwatnie do wyznaczonej wartości ryzyka, działania zapobiegawcze, uprzedzające występowanie niezdatności, powiększające zasób eksploatacyjny, w tym przypadku konstrukcji nośnej, specyficznej grupy maszyn.

W przypadku degradacji zmęczeniowej, bardzo złożonego i odpowiedzialnego obiektu wytwarzanego jednostkowo lub prawie jednostkowo, jest to zadanie szczególnie trudne. Także z racji mocno niedostatecznej jeszcze wiedzy o samym procesie zmęczenia.

Nadto obiekty te przeznaczone są zwykle do bardzo długiego okresu eksploatacji, przy jednoczesnej możliwości istotnej zmiany warunków eksploatacji, także prowadzonych modyfikacjach i modernizacjach. Czynniki te utrudniają przeprowadzanie procesu wymiarowania obiektu w zakresie trwałości zmęczeniowej, również jej bieżącego szacowania.

Oprócz strategii SST istnieją jeszcze trzy inne, zaliczane także do grona podstawowych. Są to: strategia zasobu – SZ, strategia niezawodności – SNZ, strategia efektów ekonomicznych – SEE.

Eksploatacja wg SZ, znana również pod nazwą planowo zapobiegawczych remontów – PZR, polega na przeprowadzeniu odnow po ściśle określonym, podawanym zwykle w dokumentacji techniczno-ruchowej – DTR wyrobu, okresie użytkowania. Naczelną zasadą stosowaną w tej strategii jest dokonywanie odnow obiektu, przed osiągnięciem, z dostatecznym zapasem (marginesem bezpieczeństwa), stanu granicznego powodowanego procesem zużywania, tu głównie zmęczeniowego, okresu wyznaczonego raczej obligatoryjnie na podstawie wymiarowania wytrzymałościowego czynionego w procesie wymiarowania i doświadczeń płynących z procesu eksploatacyjnego, również pobudek ekonomicznych.

Eksploatacja wg SNZ polega na użytkowaniu wyrobu aż do bezpośredniego osiągnięcia stanu granicznego – objawiającego się uszkodzeniem. Strategia ta ma zastosowanie tylko wówczas, gdy następstwa uszkodzenia nie naruszają wymaganego poziomu bezpieczeństwa, i nie zwiększają nadmiernie kosztów

eksploatacji, a wręcz powodują zmniejszenie jej kosztów.

Eksploatacja wg SEE polega na podejmowaniu decyzji głównie na podstawie osiąganych rezultatów finansowych. Wyrób może być wycofany z użytkowania, gdy się „zestarzał moralnie” tzn. gdy inne wyroby o tym samym przeznaczeniu przynoszą lepsze efekty ekonomiczne, tak w wytwarzaniu jak i eksploatacji.

Eksploatacja wg SST polega na podejmowaniu decyzji o przeprowadzeniu odnowy bądź ostatecznym wycofaniu wyrobu z eksploatacji na podstawie rezultatów bieżącej oceny jego stanu technicznego w odniesieniu do określonego uprzednio w procesie projektowania, trwałościowego stanu granicznego. Obiekt powinien posiadać dostateczny poziom podatności diagnostycznej.

Szczególnie preferowane do eksploatacji wg SST są następujące obiekty:

- w których procesy degradacyjne przebiegają stosunkowo wolno
- które są projektowane na mało rozpoznaną intensywność obciążeń (określaną w przeważającym stopniu

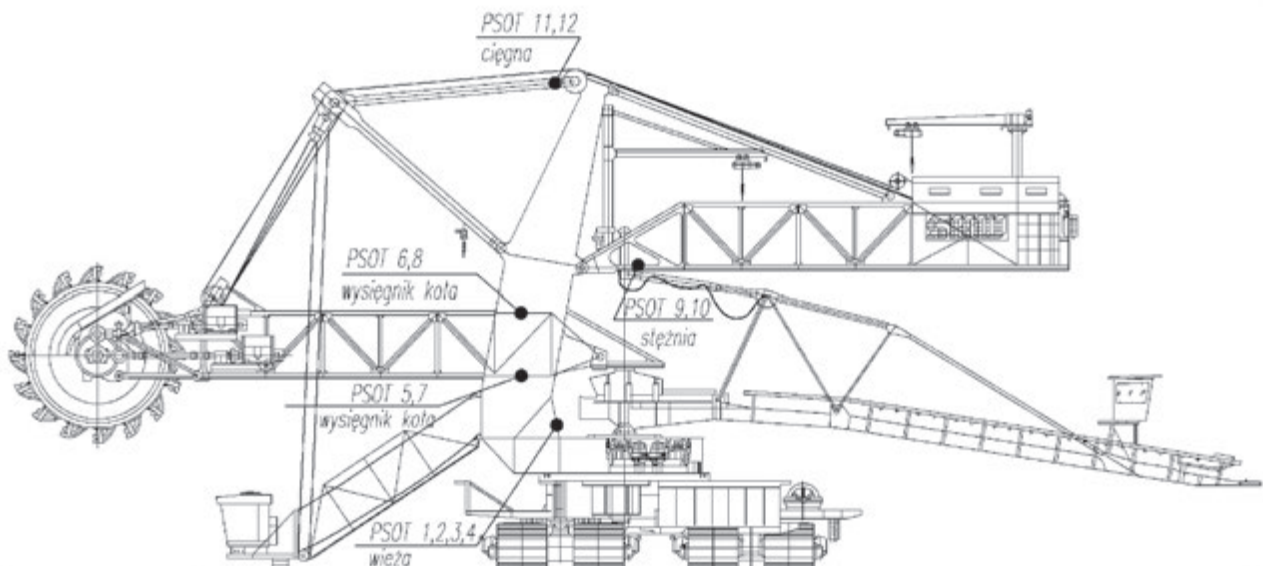
warunkami eksploatacji), a zarazem przy ograniczonym zakresie prac prowadzonych w ramach procesu B+R (badanie + rozwój)

- których uszkodzenia, awarie itp. powodują wysokie straty finansowe wynikające tak ze zniszczenia obiektu, jego otoczenia, a głównie przestoju.

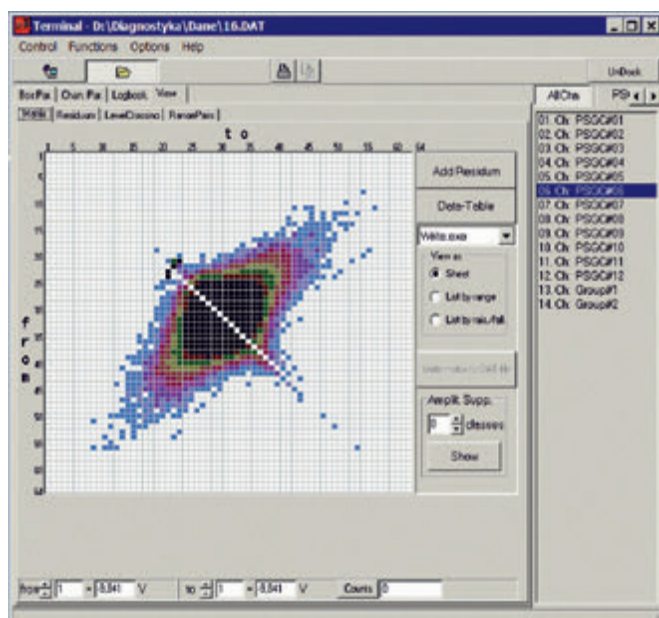
Należy do nich z całą pewnością omawiana tu grupa maszyn roboczych ciężkich.

Realizacja eksploatacji tych obiektów wg SST wymaga posiadania odpowiedniego systemu diagnostycznego, tu zorientowanego na proces zmęczenia konstrukcji nośnej, dostarczającego informacji pozwalających oceniać zdatność wyrobu, aż do pojawienia się symptomów sygnalizujących radykalne zmniejszanie bezpieczeństwa jego użytkowania. Stawia to szczególne wymagania przed systemem diagnostycznym, głównie dotyczących specyfiki procesu degradacji i specyfiki procesu eksploatacji wyrobu.

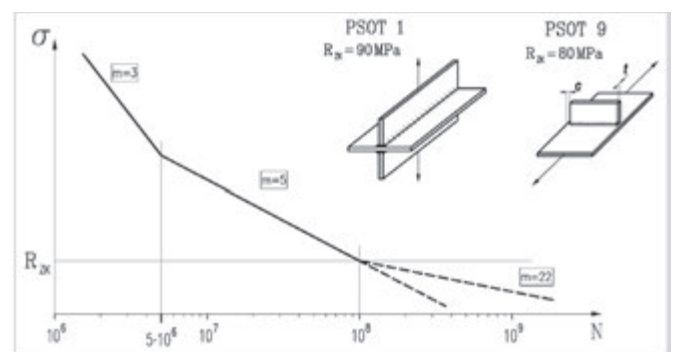
Specyfika diagnozowania



Rys. 3. Koparka KWK 910. Rozmieszczenie PSOT1 – PSOT12



Rys. 4. Obraz macierzy danych. Kolorami oznaczono licznosc cykli w klasach zakresow naprężeń



Rys. 5. Wzajemne polozienie krzywych Wöhlera. KW 35 – obiekt standardowy, KW 3522 – obiekt przewidywany dla bardzo dlugich okresow eksploatacji

Ocena stanu technicznego, degradowanej przez proces zmęceniowy, konstrukcji nośnej wymaga specyficznego ujęcia diagnostycznego. Tę specyfikę narzuca właśnie proces zmęczenia – ściślej przebieg kumulacji uszkodzenia powodowanego zmęczeniem.

Proces uszkadzania zmęczeniowego przebiega w dwóch zasadniczo odmiennych etapach, zwanych etapem inicjacji pęknięcia oraz etapem rozwoju (wzrostu, propagacji) tegoż

PSOT	$(D_{biez}/D_{kryt}) \cdot 100\%$		D_{biez}	D_{kryt}	$T_{roz}(g)$	$T_{calk}(g)$
1	0.75%	15.31%	0.00377	0.5	710 985	716 388
2	1.51%	30.69%	0.00758	0.5	351 934	357 337
3	0.05%	0.95%	0.00023	0.5	11 578 577	11 583 980
4	0.22%	4.53%	0.00112	0.5	2 412 653	2 418 056
5	0.40%	8.1%	0.00200	0.5	1 348 617	1 354 020
6	0.07%	1.43%	0.00035	0.5	7 650 608	7 656 011
7	0.63%	12.87%	0.00317	0.5	846 751	852 154
8	0.15%	2.98%	0.00073	0.5	3 679 834	3 685 237
9	4.67%	94.74%	0.02334	0.5	110 343	115 746
10	4.93%	100%	0.02464	0.5	104 251	109 654
11	0.07%	1.43%	0.00035	0.5	7 683 074	7 688 477
12	0.8%	16.22%	0.00400	0.5	670 739	676 142

■ - D_{biez}/D_{kryt} po 5403 h eksploatacji

■ - D_{biez}/D_{kryt} w momencie prognozowanego osiągnięcia D_{kryt} przez PSOT10

PSOT	$(D_{biez}/D_{kryt}) \cdot 100\%$		D_{biez}	D_{kryt}	$T_{roz}(g)$	$T_{calk}(g)$
1	1.35%	15.29%	0.00876	0.5	813 699	824 855
2	2.44%	27.55%	0.01220	0.5	446 091	457 247
3	0.08%	0.9%	0.00040	0.5	14 078 616	14 089 772
4	0.53%	5.94%	0.00263	0.5	2 110 709	2 121 865
5	0.89%	10.01%	0.00443	0.5	1 248 307	1 259 463
6	0.18%	1.99%	0.00088	0.5	6 326 256	6 337 412
7	1.39%	15.74%	0.00896	0.5	789 889	801 045
8	0.35%	4.0%	0.00177	0.5	3 140 684	3 151 840
9	7.65%	86.48%	0.03825	0.5	134 682	145 838
10	8.85%	100%	0.04423	0.5	114 964	126 120
11	0.15%	1.64%	0.00073	0.5	7 677 321	7 688 477
12	1.65%	18.65%	0.00825	0.5	664 986	676 142

■ - D_{biez}/D_{kryt} po 11156 h eksploatacji

■ - D_{biez}/D_{kryt} w momencie prognozowanego osiągnięcia D_{kryt} przez PSOT10

PSOT	$(D_{biez}/D_{kryt}) \cdot 100\%$		D_{biez}	D_{kryt}	$T_{roz}(g)$	$T_{calk}(g)$
1	2.08%	17.53%	0.01042	0.5	722 176	737 543
2	4.71%	39.62%	0.02354	0.5	311 033	326 400
3	0.6%	5.02%	0.00298	0.5	2 559 438	2 574 805
4	4.45%	37.43%	0.02224	0.5	330 077	345 444
5	1.49%	12.54%	0.00745	0.5	1 015 675	1 031 042
6	0.33%	2.77%	0.00164	0.5	4 661 225	4 676 592
7	2.0%	16.81%	0.00999	0.5	753 829	769 196
8	0.65%	5.44%	0.00323	0.5	2 360 586	2 375 953
9	11.86%	100%	0.05942	0.5	113 943	129 310
10*	10.7%	90.02%	0.05349	0.5	110 380	123 603
11	0.2%	1.65%	0.00098	0.5	7 842 392	7 857 759
12	2.08%	17.47%	0.01038	0.5	724 978	740 345

■ - D_{biez}/D_{kryt} po 15367 h eksploatacji

■ - D_{biez}/D_{kryt} w momencie prognozowanego osiągnięcia D_{kryt} przez PSOT9

PSOT	$(D_{biez}/D_{kryt}) \cdot 100\%$		D_{biez}	D_{kryt}	$T_{roz}(g)$	$T_{calk}(g)$
1	0.75%	15.31%	0.00377	0.5	710 985	716 388
2	1.51%	30.69%	0.00758	0.5	351 934	357 337
3	0.05%	0.95%	0.00023	0.5	11 578 577	11 583 980
4	0.22%	4.53%	0.00112	0.5	2 412 653	2 418 056
5	0.40%	8.1%	0.00200	0.5	1 348 617	1 354 020
6	0.07%	1.43%	0.00035	0.5	7 650 608	7 656 011
7	0.63%	12.87%	0.00317	0.5	846 751	852 154
8	0.15%	2.98%	0.00073	0.5	3 679 834	3 685 237
9	4.67%	94.74%	0.02334	0.5	110 343	115 746
10	4.93%	100%	0.02464	0.5	104 251	109 654
11	0.07%	1.43%	0.00035	0.5	7 683 074	7 688 477
12	0.8%	16.22%	0.00400	0.5	670 739	676 142

PSOT	$(D_{biez}/D_{kryt}) \cdot 100\%$		D_{biez}	D_{kryt}	$T_{roz}(g)$	$T_{calk}(g)$
1	1.35%	15.29%	0.00876	0.5	813 699	824 855
2	2.44%	27.55%	0.01220	0.5	446 091	457 247
3	0.08%	0.9%	0.00040	0.5	14 078 616	14 089 772
4	0.53%	5.94%	0.00263	0.5	2 110 709	2 121 865
5	0.89%	10.01%	0.00443	0.5	1 248 307	1 259 463
6	0.18%	1.99%	0.00088	0.5	6 326 256	6 337 412
7	1.39%	15.74%	0.00896	0.5	789 889	801 045
8	0.35%	4.0%	0.00177	0.5	3 140 684	3 151 840
9	7.65%	86.48%	0.03825	0.5	134 682	145 838
10	8.85%	100%	0.04423	0.5	114 964	126 120
11	0.15%	1.64%	0.00073	0.5	7 677 321	7 688 477
12	1.65%	18.65%	0.00825	0.5	664 986	676 142

PSOT	$(D_{biez}/D_{kryt}) \cdot 100\%$		D_{biez}	D_{kryt}	$T_{roz}(g)$	$T_{calk}(g)$
1	2.08%	17.53%	0.01042	0.5	722 176	737 543
2	4.71%	39.62%	0.02354	0.5	311 033	326 400
3	0.6%	5.02%	0.00298	0.5	2 559 438	2 574 805
4	4.45%	37.43%	0.02224	0.5	330 077	345 444
5	1.49%	12.54%	0.00745	0.5	1 015 675	1 031 042
6	0.33%	2.77%	0.00164	0.5	4 661 225	4 676 592
7	2.0%	16.81%	0.00999	0.5	753 829	769 196
8	0.65%	5.44%	0.00323	0.5	2 360 586	2 375 953
9	11.86%	100%	0.05942	0.5	113 943	129 310
10*	10.7%	90.02%	0.05349	0.5	110 380	123 603
11	0.2%	1.65%	0.00098	0.5	7 842 392	7 857 759
12	2.08%	17.47%	0.01038	0.5	724 978	740 345

Rys. 6. Obraz zmian degradacji zmęczeniowej, opisywanej stopniem uszkodzenia D oraz trwałością po 5403, 11156, i 15367 godzinach użytkowania koparki, odnoszony do potencjalnych słabych ogniw trwałościowych PSOT1 – PSOT12. Kolumna lewa dot. krzywych Wöhlera z wykładnikami $m=3$ i $m=5$, kolumna prawa dot. wykładników $m=3$, $m=5$, $m=22$

pęknięcia. Na etapie inicjacji dochodzi do wstępnego uformowania pęknięcia, na etapie rozwoju do jego wzrostu, aż do osiągnięcia wymiarów krytycznych powodujących nagłe pęknięcie kruche elementu.

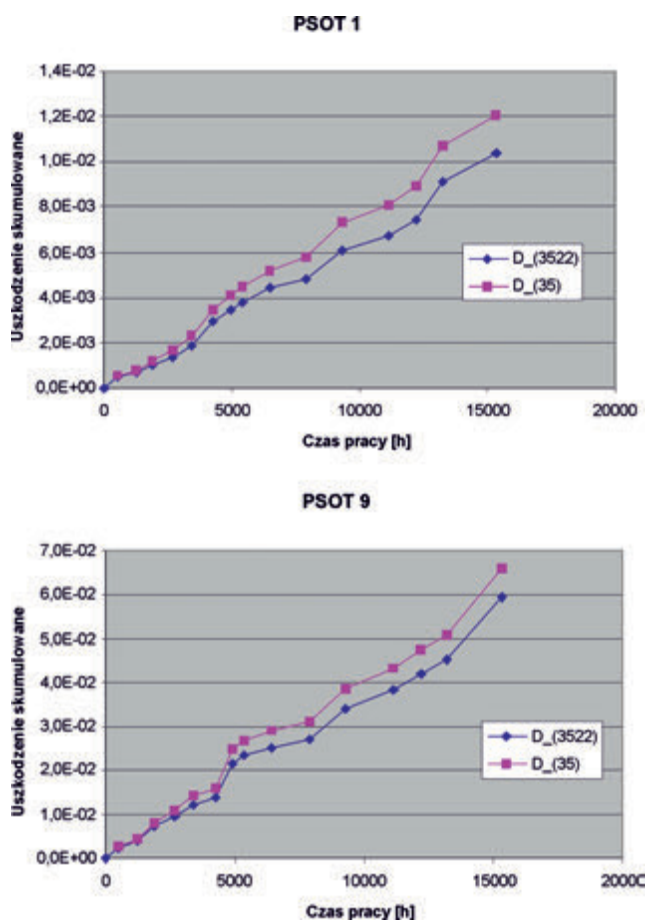
Na etapie inicjacji kumulacja uszkodzenia przebiega w sposób ukryty, przynajmniej dla połowej aparatury diagnostycznej. Ujawnia się dopiero, w formie pęknięcia, po jego zainicjowaniu – jest wtedy znacznie łatwiej dostępne diagnostycznie. Z racji tej odmienności do opisu uszkodzenia stosowane są na obydwu etapach różne podstawy teoretyczne. Na etapie inicjacji są to zasady wytrzymałości zmęczeniowej, na etapie rozwoju pęknięcia zasady mechaniki pęknięcia. Charakterystyką wytrzymałościową w pierwszym przypadku jest krzywa Wöhlera ($\sigma - N$), w drugim przypadku krzywa Parisa $da/dn = f(\Delta K)$.

Zatem i postępowanie diagnostyczne wymaga dostosowania do tej odmienności. Na etapie inicjacyjnym ocenę stopnia

uszkodzenia można prowadzić jedynie w sposób pośredni, poprzez rejestrację i zliczanie liczby cykli obciążeń i określeniu go na tej podstawie, w skojarzeniu z charakterystyką wytrzymałości zmęczeniowej rozpatrywanego złącza spawanego, czynionym za pomocą hipotezy kumulacji uszkodzenia zmęczeniowego Palmgren-Minera. Na etapie propagacji ocena stopnia uszkodzenia dokonywana jest poprzez pomiar wymiarów rozbudowywującego się pęknięcia, i określania na tej podstawie, przy znajomości wyężenia lokalnego, współczynnika intensywności naprężeń K , a następnie odnoszenia go do wartości krytycznej tegoż współczynnika, osiągnięcie której powoduje dalszy raptowny przyrost długości pęknięcia. Czynione jest to w oparciu o zasady mechaniki pęknięcia.

Wielkościami podlegającymi diagnozowaniu w trakcie eksploatacji stają się:

- na etapie inicjacji pęknięcia – zespół (widmo) naprężeń



Rys. 7. Przebieg uszkodzenia zmęczeniowego w węzłach PSOT1 i PSOT9 według krzywych Wöhlera 35 i 3522

(w silnie narażonych węzłach konstrukcji)

- na etapie rozwoju – wymiary zaistniałego już i rozbudowującego się pęknięcia.

Obydwe wielkości dotyczą określonego węzła konstrukcji nośnej.

Na ich podstawie można określić stopień degradacji zmęczeniowej – stopień wyczerpywania jej zasobu eksploatacyjnego, a zatem i aktualny stopień bezpieczeństwa powodowany zagrożeniem pękaniem zmęczeniowym. Wielkości współcześnie coraz bardziej istotnych z racji ekonomicznych i bezpieczeństwa eksploatacji.

Stałym zadaniem systemu nadzoru będzie kontrola stanu zużycia – inaczej degradacji konstrukcji nośnej, czyniona w ujęciu ciągłym, poprzez pomiar i rejestrację wybranych wielkości fizycznych, tu naprężeń i wymiarów pęknięć w określonych węzłach konstrukcji, a następnie przetwarzania ich na miary trwałości – zasób eksploatacyjny i bezpieczeństwa – ryzyko.

Naczelnym zadaniem systemu nadzoru jest wspomaganie ekspertów w szacowaniu wyczerpywania się zasobu eksploatacyjnego oraz narastającego zagrożenia powodowanego procesem zmęczenia, zachodzącego w następstwie użytkowania obiektu. Na podstawie tych działań budowany jest również system inspekcji konstrukcji nośnej w sposób adekwatny do stopnia jej degradacji, co stanowi o bezpiecznej a zarazem ekonomicznej realizacji procesu eksploatacji.

Takie, coraz bardziej złożone postępowanie wymaga połączenia wiedzy teoretycznej, płynącej z obszaru mechaniki pęknięcia oraz zmęczenia, z doświadczeniami płynącymi bezpośrednio z obszaru eksploatacji. Zatem ze strony projektanta, ideowego twórcy obiektu, powinna zaistnieć w ujęciu stałym,

tw. „wsparcie techniczne”, dla działań prowadzonych w sferze eksploatacji przez bezpośredniego użytkownika obiektu. W omawianym zakresie powinno ono polegać na:

- prowadzeniu poczynań diagnostycznych
- szacowaniu na ich podstawie zasobu eksploatacyjnego oraz ryzyka
- interpretacji uzyskanych oszacowań.

Postępowanie diagnostyczne. Etap inicjacji

Obiektem poddanym postępowaniu diagnostycznemu stała się konstrukcja nośna koparki KWK 901. Rozmieszczenie węzłów konstrukcji uznanych za potencjalne słabe ogniwa trwałościowe – PSOT ukazano na rysunku 3. Jest ich 12 PSOT1 – PSOT12. W węzłach tych naklejone zostały czujniki tensometryczne połączone poprzez system wzmacniaczy z rejestratorem. Rejestrator posiada możliwość zapisu danych z 12 niezależnych kanałów analogowych. Zarejestrowane dane mogą być kopiowane na przenośny komputer i następnie edytowane w żądanej formie wykorzystując przygotowane oprogramowanie. Rejestrator posiada możliwość współpracy z modulem umożliwiającym bezprzewodowe przesyłanie danych do wybranego odbiorcy.

Sygnal w każdym z kanałów próbkowany jest z częstotliwością 2000 Hz w celu wyodrębnienia maksimów i minimów przebiegu. Zakres pomiarowy podzielony został na 64 klasy. Za pomocą metody rainflow rozpoznane zostają zamknięte pętle histerezy – cykle obciążenia zmęczeniowego. Utworzona tak macierz jest podstawową formą zapamiętywania – przechowywania rezultatów pomiaru. Forma zapisu pierwotnego widma obciążeń (naprężeń) ukazana została na rysunku 4.

Na rysunku 5 przedstawione zostały, przykładowo dla PSOT1 i PSOT9, charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej - krzywe Wöhlera. Zostały one podane w dwóch wersjach. Pierwsza jest ujęciem standardowym, druga jest coraz częściej stosowana w przypadku obiektów przewidywanych dla bardzo długich okresów eksploatacji.

Znając, dla każdego z węzłów PSOT1 – PSOT12 widma obciążeń oraz charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej znajdujących się w nich złączy spawanych (z uwzględnieniem jakości ich wykonania) można posługując się hipotezą Palmgren-Minera oszacować narastanie uszkodzenia zmęczeniowego. Przebieg tak określanej degradacji przedstawiony został na rysunku 6. Dotyczy trzech okresów użytkowania: po 5403, po 11156 i po 15367 godzinach. W tabelach w kolejnych kolumnach podane zostały: numery PSOT, stosunek uszkodzenia bieżącego do krytycznego $D_{bież}/D_{kryt}$, wartość uszkodzenia bieżącego i krytycznego $D_{bież}$, D_{kryt} , trwałości: pozostającą T_{poz} i całkowitą $T_{całk}$ – wyrażone w godzinach użytkowania.

Widać wyraźnie nierównomierne postępowanie degradacji. Wynika ono zarówno z odmiennych charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej poszczególnych węzłów jak i różnych intensywności obciążenia panujących w tych węzłach. Najsilniej degradowane węzły to PSOT9 i PSOT10, są to pasy dolne wysięgnika przeciwwagi.

Widać również istotne uzależnienie uszkodzenia zmęczeniowego od przyjmowanych charakterystyk wytrzymałości. Wymagają one starannego doboru.

Podsumowanie

Posiadanie informacji zawartych w tablicach na rysunku 6, to znajomość stopnia uszkodzenia węzłów konstrukcji, gdy nie objawia się ono jeszcze w formie wizualnej, również w zrozumieniu technik badań nieniszczących. Na podstawie takich informacji można:

- określać, i otaczać wzmożonym nadzorem, węzły w których może dojść do zainicjowania pęknięcia zmęczeniowego
- oceniać stopień wyczerpania zasobu eksploatacyjnego
- szacować aktualny stopień ryzyka użytkowania, podstawowej miary z zakresu bezpieczeństwa (tu dotyczącej degradacji powodowanej kumulacyjnym procesem zmęczeniowym).

Są to podstawowe elementy nadzoru.

Wszystko to jest prowadzone w układzie pośrednim, na podstawie znajomości widma obciążeń eksploatacyjnych oraz charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej. Obydwie dotyczą tego samego węzła (ściślej złącza spawanego w nim istniejącego), obydwie podawane są we współrzędnych $\sigma - N$ (naprężenia, liczba cykli zmian naprężenia).

Pojawienie się pęknięcia, w tym przypadku dzięki powyższym poczynaniom sygnalizowanego *a priori*, to sygnał do zmiany:

- aparatu ocenowego, z zasad wytrzymałości zmęczeniowej na zasady mechaniki pękania
- zmiany formy oceny uszkodzenia zmęczeniowego tym razem przez porównywanie aktualnej długości rozbudowującego się pęknięcia z długością krytyczną, od której zaczyna się jego nagły przyrost.

Z cyklu: Sentymtalne wędrówki po meandrach polskiej myśli techniki górniczej



Reprint Renata S-K

Zwałowarka A₂RsB 12500/1 zwałuje podziemowo