

PROBLEMY REALIZACJI PROJEKTU EKSPLOATACYJNEGO – PEX KONSTRUKCJI NOŚNEJ MASZYN GÓRNICTWA ODKRYWKOWEGO W ZAKRESIE TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

PROBLEMS OF PEX EXPLOITATION PROJECT REALIZATION IN THE RANGE OF FATIGUE LIFE OF OPENCAST MINING MACHINES LOAD-BEARING STRUCTURE

Marek Kowalczyk – SKW Biuro Projektowo-Techniczne, - Zgorzelec

Wojciech Sobczykiewicz – Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, – Politechnika Warszawska

W artykule przedstawiono realizację projektu eksploatacyjnego w zakresie trwałości zmęczeniowej konstrukcji nośnej koparki KWK-910. Zgromadzone w trakcie 5 lat stosowania tej koncepcji doświadczenia pozwoliły na sformułowanie pierwszych wniosków odnośnie korzyści z niej wynikających jak i wskazanie ograniczeń i źródeł niepewności w szacowaniu zasobu eksploatacyjnego z wykorzystaniem wdrożonej metody.

Exploitation project realization in the range of fatigue life of load-bearing structure of KWK-910 excavator has been presented in the paper. Experience collected for 5 years enabled formulation of preliminary conclusions concerning advantages resulting from the concept application as well as identification of limitations and sources of uncertainty in exploitation resources assessment.

Wprowadzenie

Realizacja kolejnych etapów projektowania i wykonawstwa warsztatowego konstrukcji nośnej maszyny prowadzi do powstania obiektu o określonej postaci i wymiarach. Są to kolejno, główne wymiary systemowe opisujące postać konstrukcyjną, wymiary globalne podstawowych elementów nośnych (długość, wysokość i szerokość przekroju, grubości) wymiary lokalne węzłów konstrukcyjnych, wreszcie wymiary zwane często mikrolokalnymi opisujące samą spoinę. Te ostatnie (promień przejścia pomiędzy materiałem rodzimym i licem spoiny - ρ , kąt wzniosu lica - θ) są najłatwiejsze do naruszenia na etapie wykonawstwa konstrukcji (często też pomijane w trakcie wymiarowania trwałościowego). Zarazem to one mają najistotniejszy wpływ na uzyskiwany poziom jakości wykonania złącza spawanego w zakresie niezgodności kształtu silnie oddziałując na uzyskiwaną trwałość zmęczeniową.

Z kolei mechanizmy maszyny wyposażone są w coraz precyzyjniejsze i bardziej czułe ograniczniki obciążeń, limitujące wartości obciążeń ekstremalnych konstrukcji, przyjmowanych następnie jako wymiarujące w zakresie trwałości zmęczeniowej w ujęciu naprężeniowym.

Trwałość zmęczeniowa, opisywana miarą gamma procentowego zasobu eksploatacyjnego, jest na etapie projektowania przyjmowana dla zakładanych hipotetycznych warunków eksploatacji, z których wynika widmo obciążeń. Maszyna praktycznie nigdy nie trafi do zakładanych warunków eksploatacji. Ponadto mogą one ulegać w trakcie eksploatacji istotnym zmianom. Realne widmo obciążeń eksploatacyjnych jest możliwe do określenia jedynie w trakcie bieżącego użytkowania, najlepiej poprzez permanentny system akwizycji obciążeń.

Mając świadomość takiego stanu rzeczy rozszerzono proces projektowania na etap eksploatacji wprowadzając blok czynności nazwany projektem eksploatacyjnym PEX. Podstawowe czynności dokonywane w tym bloku to:

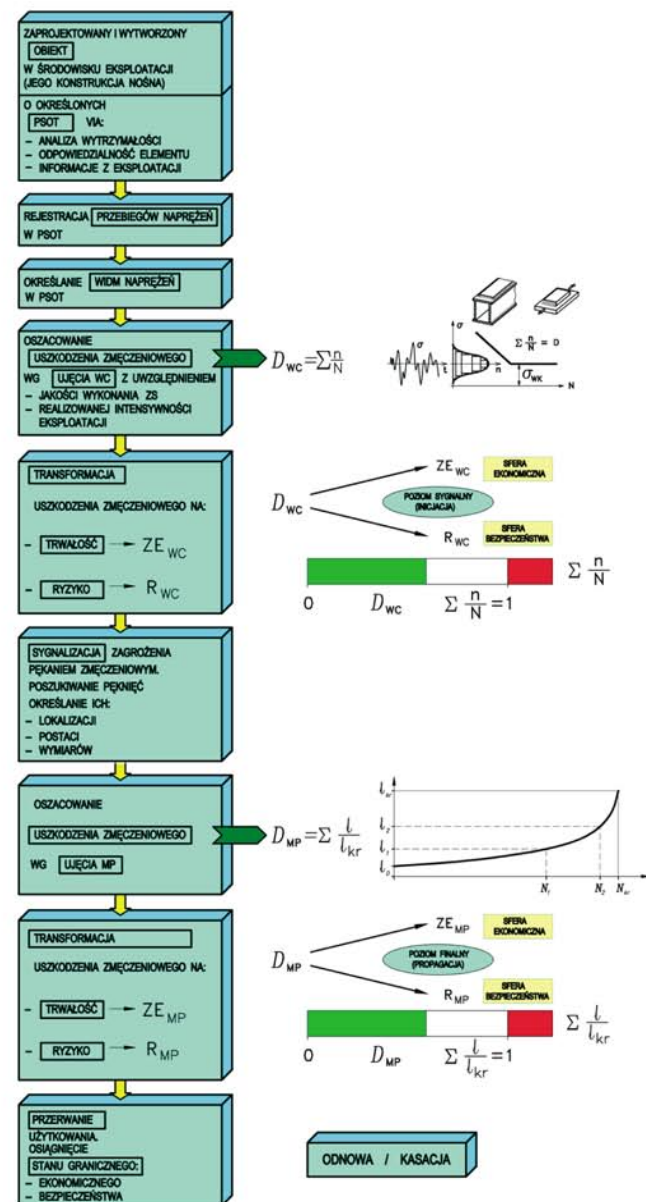
- bieżąca identyfikacja intensywności obciążeń eksploatacyjnych i na tej podstawie dokonywanie korekt narastania uszkodzenia zmęczeniowego (degradacji obiektu), na podstawie którego szacowany jest stopień wykorzystania zasobu eksploatacyjnego oraz technicznego ryzyka użytkowania,
- prowadzona w czasie rzeczywistym kontrola zasobu oraz ryzyka w najistotniejszych węzłach konstrukcji nośnej i na tej podstawie określanie okresów inspekcyjnych stanu konstrukcji (realizacja strategii eksploatacji wg stanu technicznego – SST),
- podejmowanie decyzji o zmianie nastaw ograniczających mechanizm urabiania w celu korygowania narastania stopnia uszkodzenia, zatem również wyczerpywania zasobu – narastania ryzyka technicznego.

Realizacja projektu eksploatacyjnego PEX prowadzona jest w pełnym zakresie w odniesieniu do koparki KWK-910 w KWB „Turów” już od ok. 5 lat. Pierwsze rezultaty zostały przedstawione w opracowaniu [2]. Pozyskana została pewna doza doświadczeń. Na ich podstawie można już pokusić się o formułowanie pierwszych wstępnych wniosków odnośnie korzyści wynikających z proponowanej metody jak i dotyczących niepewności wynikających z przyjętego postępowania, powodujących ograniczenia w stosowaniu metody.

Oszacowanie zasobu eksploatacyjnego

Idea

Idea oszacowania zasobu eksploatacyjnego ZE (będącego miarą trwałości zmęczeniowej) a także technicznego ryzyka użytkowania R (będącego miarą bezpieczeństwa) została zaprezentowana na rysunku 1. Obydwie miary określane są w przypadku zagrożenia pękaniem zmęczeniowym na podstawie znajomości uszkodzenia zmęczeniowego D. Do jego wyznaczenia konieczne jest pozyskanie charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej



Rys. 1. Idea oszacowania zasobu eksploatacyjnego - ZE, ryzyka - R na podstawie uszkodzenia zmęczeniowego - D

Fig. 1. Idea of exploitation resources assessment - ZE, risk assessment - R on the basis of fatigue damage - D

oraz widma obciążeń. Obydwie charakterystyki powinny odnosić się do tego samego punktu konstrukcji nośnej. Przyjrzyjmy się problemom związanym z pozyskiwaniem tych charakterystyk i przetwarzaniem ich w uszkodzenie, zasób, ryzyko.

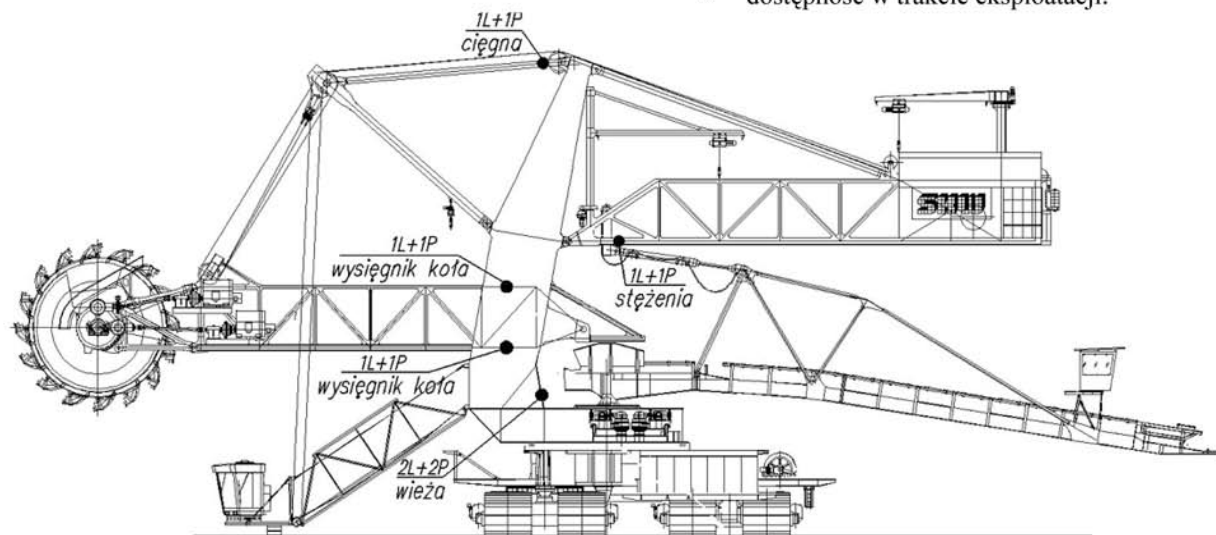
Potencjalne miejsca uszkodzeń zmęczeniowych - PSOT

Ocena zasobu trwałości zmęczeniowej konstrukcji nośnej dokonywana jest w odniesieniu do wybranych miejsc, szczególnie podatnych na uszkodzenie zmęczeniowe. Miejsca narażone na pęknięcia zmęczeniowe (PSOT) typowane są metodami analitycznymi według zasad obowiązujących przy wymiarowaniu konstrukcji na etapie projektu wstępnego. Intensywność obciążeń opisana jest współczynnikiem naprężeń eksploatacyjnych η [1] wyznaczonym doświadczalnie dla podobnej maszyny lub przyjętym z norm. Wytrzymałość zmęczeniowa na tym etapie ujęta jest poprzez kategorię karbu opisaną wielkością charakterystyczną $\Delta\sigma_c$.

Pomiar naprężeń eksploatacyjnych bezpośrednio w miejscach potencjalnego uszkodzenia (PSOT) w rzeczywistej konstrukcji napotyka na szereg trudności wynikających z lokalizacji analizowanego złącza spawanego w obrębie złożonego węzła konstrukcyjnego. Dotyczy to np. większości złączy teowych. Identyfikacja intensywności obciążeń konstrukcji nośnej prowadzona jest w punktach referencyjnych konstrukcji (PRK). Zostały one zlokalizowane w pobliżu węzłów o zasadniczym znaczeniu, w których pęknięcia stanowią zagrożenie dla integralności całej konstrukcji nośnej. W punktach referencyjnych zostały zainstalowane czujniki naprężeń. Ich lokalizację na tle sylwetki koparki przedstawia rysunek 2.

Przy wyborze punktów referencyjnych starano się dochoować następujących warunków:

- możliwie jednoznaczny sposób wyznaczenia naprężeń obliczeniowych w punkcie z wykorzystaniem modelu całości konstrukcji nośnej,
- uniwersalność zarejestrowanego widma naprężeń dla większej grupy miejsc potencjalnych uszkodzeń (PSOT),
- reprezentatywne miejsce konstrukcji dla większej grupy urządzeń danej klasy np. koparek jednozespolowych w układzie C,
- lokalizacja w miejscu nie narażonym na mechaniczne uszkodzenie w trakcie eksploatacji i obsługi maszyny,
- dostępność w trakcie eksploatacji.



Rys. 2. Lokalizacja punktów referencyjnych na tle konstrukcji nośnej koparki KWK-910

Fig. 2. Reference points localization on load-bearing construction of KWK-910 excavator

Tab. 1. Lokalizacja punktów referencyjnych i ważniejsze kryteria ich wyboru
 Tab. 1. Reference points localization and more important criterions of their selection

Lokalizacja	Liczba punktów	Kryteria wyboru
Połączenie wieży z platformą obrotową	4	1. ocena skojarzonego działania wszystkich obciążeń zmiennych nadwozia w tym drgań całego nadwozia 2. węzeł newralgiczny dla całej konstrukcji nadwozia, ulegający częstym awariom w innych koparkach w układzie C
Pas dolny wysięgnika koła czerpakowego	2	1. ocena skojarzonego działania sił obciążających układ urabiania we wszystkich kierunkach 2. element o zasadniczym znaczeniu dla całej konstrukcji wysięgnika
Zastrzały stężeń górnych wysięgnika koła czerpakowego	2	1. ocena obciążeń skręcających konstrukcję wysięgnika pod wpływem zmiennego położenia siły bocznej kopania, nierównomiernego obciążenia lin zawieszenia i drgań skrętnych
Zastrzały stężeń dolnych wysięgnika przeciwwagi	2	1. ocena skojarzonego wpływu siły poziomej podwieszenia wysięgnika załadunkowego oraz pochylenia i drgań poziomych i skrętnych 2. elementy o istotnym znaczeniu, bardzo silnie obciążone
Cięgna przednie	2	1. ocena skumulowanego działania obciążeń od sił kopania, drgań wysięgnika koła czerpakowego oraz nierównomierności sił w linach 2. element o zasadniczym znaczeniu dla konstrukcji

Koncepcja pomiaru naprężeń eksploatacyjnych w punktach referencyjnych konstrukcji zakłada wykorzystanie modelu obliczeniowego w celu powiązania naprężeń w punkcie referencyjnym z naprężeniami w miejscu potencjalnego uszkodzenia zmęczeniowego PSOT. Czujniki zostały umieszczone na konstrukcji nośnej po dokonaniu szczegółowej analizy MES i ocenie naprężeń w przewidzianych do analizy potencjalnych miejscach uszkodzeń i PRK.

Akwizycja widm naprężeń

Mając na uwadze konieczność zapewnienia wieloletniej niezawodności systemu akwizycji danych pomiarowych wybrano zastosowanie elementów systemu w wykonaniu przemysłowym, dostosowanym do zabudowy na urządzeniach eksploatowanych w trudnych warunkach. W 12 punktach na konstrukcji nośnej zostały zainstalowane czujniki naprężeń typu SLB700A firmy Hottinger.

W bezpośredniej bliskości czujników zabudowano wzmacniacze CLIP AE301 firmy Hottinger (rys. 6).

W rozdzielni elektrycznej nadwozia wydzielono w szafie elektrycznej jeden moduł do zabudowy rejestratora MAS-MICRO-II RECORDER firmy Swift służącego do gromadzenia i obróbki sygnałów ze wzmacniaczy (rys. 7). Rejestrator posiada możliwość rejestracji danych z 12 niezależnych kanałów analogowych. Dane rejestrowane w urządzeniu mogą być kopiowane poprzez złącze RS232 na komputer przenośny, a następnie edytowane w żądanej formie z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania dedykowanego. Rejestrator posiada możliwość współpracy z modulem umożliwiającym bezprzewodowe przesyłanie danych ale w przypadku koparki KWK-910 zrezygnowano z tej opcji m.in. z uwagi na łatwość i wygodę kopiowania danych w warunkach pomieszczenia stacji elektrycznej.

Połączenie wzmacniaczy z rejestratorem wykonano za pomocą przewodów zalecanych przez firmę Hottinger. Przewody sygnałowe zostały zabudowane w osłonach metalowych chroniących przed uszkodzeniami mechanicznymi i poprowadzone do rozdzielni w kanałach kablowych instalacji elektrycznej koparki co zapewnia odpowiednią ochronę przed uszkodzeniami.

Sygnał w każdym z kanałów próbkowany jest z częstotliwością 2000 Hz w celu wyodrębnienia maksimów i minimów przebiegu. Zakres pomiarowy podzielony jest na 64 klasy,

jedna klasa obejmuje więc 1,563% całkowitego zakresu pomiarowego. Algorytm metody Rainflow rozpoznaje zamknięte pętle histerezy a wyniki tej analizy zapamiętywane są w formie macierzy przejścia o wymiarach 64x64. W buforze



Rys. 3. Czujnik zainstalowany na środku zastrzały stężeń górnych wysięgnika koła czerpakowego

Fig. 3. Sensor installed in the middle of angle strut of bucket wheel outrigger

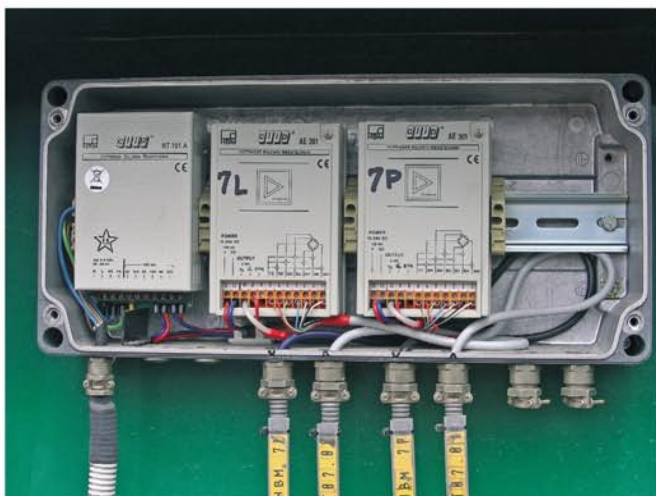


Rys. 4. Czujnik zainstalowany na konstrukcji skrzynkowej pasa dolnego wysięgnika koła czerpakowego

Fig. 4. Sensor installed on the box construction of lower part of bucket wheel outrigger



Rys. 5. Czujniki zainstalowane w narożach słupa wieży
Fig. 5. Sensors installed in the corners of tower pillar



Rys. 6. Wzmacniacze CLIP AE301 z modulem zasilającym zabudowane w hermetycznej obudowie na konstrukcji

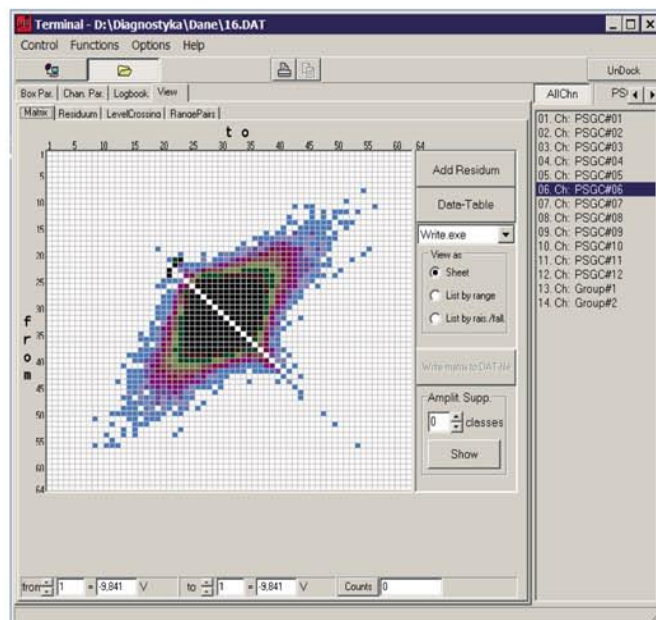
Fig. 6. CLIP AE 301 strengthening with power supply module located in air-tight housing on the construction



Rys. 7. Urządzenie MAS-MICRO-II RECORDER firmy Swift służące do gromadzenia i wstępnej obróbki sygnałów ze wzmacniaczy

Fig. 7. Constructed by Swift Company MAS-MICRO- II RECORDER device for collection and preliminary processing of signals from amplifiers

wejściowym zapamiętywane są najpierw półcykle w postaci górnej i dolnej wartości i w momencie zidentyfikowania komplementarnego półcyklu następuje zamknięcie pętli histerezy. Przejście pomiędzy klasami σ_i , σ_j i z powrotem identyfikowane jest jako cykl zmęczeniowy i zapisywane w macierzy. Utworzona macierz jest podstawową formą zapamiętania i przechowywania wyników. Zachowane są więc wartości min i max cyklu oraz liczność danej klasy przejścia. Formę zapisu pierwotnego widma obciążeń przedstawiono na rysunku 8. Zawartość tej macierzy dla każdego kanału pomiarowego jest w odstępach ok. 500-1000h czytywana z rejestratora i przechowywana na niezależnym komputerze stacjonarnym.



Rys. 8. Wygląd interfejsu programu do rejestracji i edycji danych systemu MAS MICRO II. Widoczna ilustracja graficzna macierzy danych. Kolorami oznaczono licznosc cykli w poszczególnych klasach zakresów naprężeń

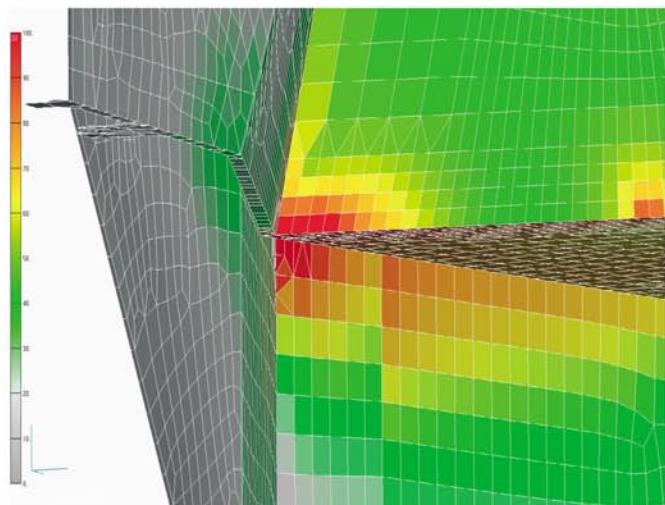
Fig. 8. Interface of program for MAS MICRO II system data registration and edition. View of graphic illustration of data matrix. Colors define number of cycles in particular ranges of stresses.

Z punktu widzenia oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji spawanych istotna jest znajomość jedynie rozkładu zakresów zmian naprężeń $\Delta\sigma$, z pominięciem wartości średnich cyklu. Wbudowany moduł programowy umożliwia bezpośrednią edycję danych w formie pliku w postaci par $(\Delta\sigma, n_f)$. Jest to forma, która umożliwia bezpośrednie działania analityczne, sporządzenie histogramu i została bezpośrednio wykorzystana do oceny trwałości.

Ocena zasobu eksploatacyjnego

W celu przeprowadzenia oceny trwałości zmęczeniowej w odniesieniu do danego węzła spawanego - w poniższym przykładzie w rejonie spoiny łączącej słup wieży z górną płytą platformy - niezbędne jest wyznaczenie naprężeń strefowych. Naprężenia strefowe odzwierciedlają zjawiska prowadzące do wzrostu naprężeń w analizowanym obszarze konstrukcji bez uwzględnienia koncentracji naprężeń wynikającej z kształtu lica i grani spoiny. Naprężenie strefowe uzależnione jest od kształtu geometrycznego i zmiany sztywności w sąsiedztwie analizowanego punktu, w którym występuje zaburzenie ciągłości geometrycznej oraz rodzaju obciążenia elementu. Określa

się je na powierzchni w analizowanym punkcie konstrukcji. W tym przykładzie wykorzystano model powłokowy z odpowiednio dobraną siatką elementów skończonych. Wartości naprężeń obliczeniowych w elementach ściany słupa wieży oraz sposób określenia i wartość naprężeń strefowych w miejscu przejścia



Rys. 9. Wartość zakresu naprężeń w analizowanym obszarze przylegającym do złącza spawanego w rejonie połączenia wieży z platformą

Fig. 9. Value of stresses range in analyzed area adjacent to welded joint in the place of tower and platform connection

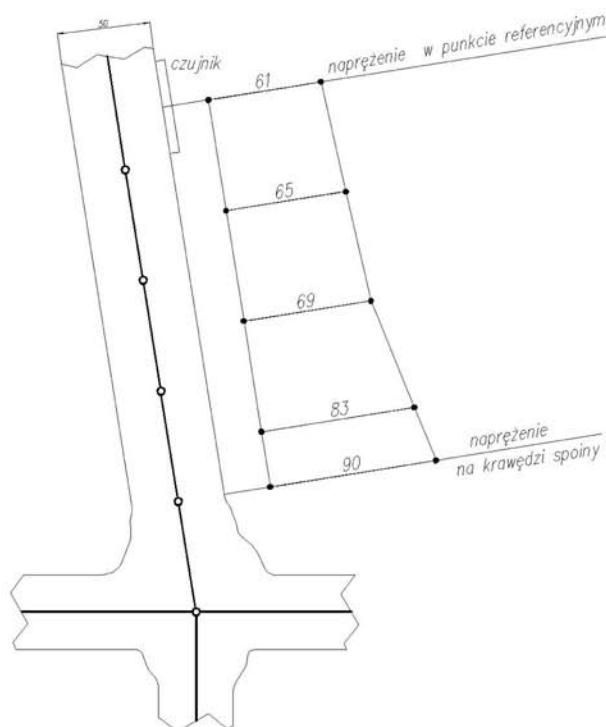
spoiny w materiał rodzimy przedstawiono na rysunku 9.

Na podstawie formuły obowiązującej dla powłokowych elementów skończonych o wielkości równej w przybliżeniu grubości blachy t wyznaczono naprężenie $\Delta\sigma_s$ odpowiadające

$$\Delta\sigma_s = 1,50 \cdot \sigma_{0,5t} - 0,50 \cdot \sigma_{1,5t} = 1,50 \cdot 83 - 0,50 \cdot 69 = 90 \text{ [MPa]}$$

w miejscu przejścia materiału rodzimego w lico spoiny:

Dysponując rzeczywistym opisem kształtu spoiny w postaci wymiarów ρ, θ w obszarze potencjalnego pęknięcia



Rys. 10. Sposób wyznaczenia naprężeń $\Delta\sigma_s$ dla obszaru przejścia materiału rodzimego w lico spoiny

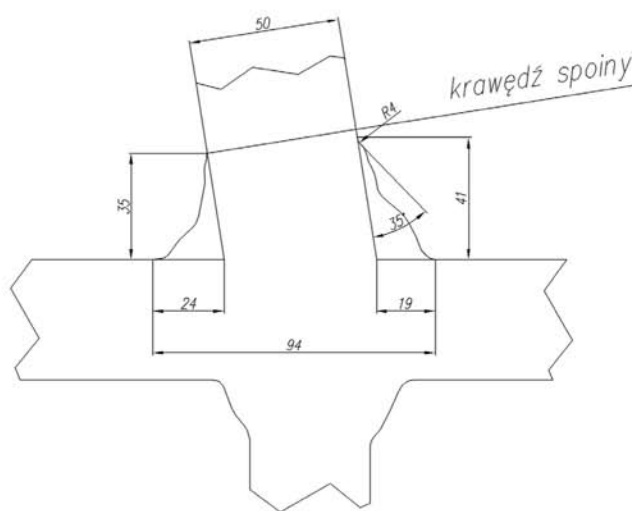
Fig. 10. Method of stresses determination $\Delta\sigma_s$ for the area of material change into the face of weld

przeprowadzono ocenę uszkodzenia w ujęciu lokalnym. Na rysunku 11 wskazano obszar potencjalnego pęknięcia, dla którego dokonano pomiarów parametrów lokalnych spoiny. Na rysunku 12 przedstawiono zarys kształtu spoiny opracowany na podstawie repliki wykonanej w rejonie zakończenia spoiny. Wyznaczono najbardziej niekorzystne wymiary opisujące wartości promienia przejścia lica spoiny w materiał rodzimy wynoszące: $\rho = 2 \text{ mm}$ i kąt nachylenia lica $\theta = 45^\circ$. W innych



Rys. 11. Miejsce potencjalnego pęknięcia wytypowane do analizy lokalnej

Fig. 11. Area of potential cracking chosen for local analysis



Rys. 12. Wymiary rzeczywiste przekroju złącza dla potrzeb analizy lokalnej

Fig. 12. Real dimensions of joint intersection for the needs of local analysis

w miejscach parametry te były łagodniejsze.

Wartość współczynnika koncentracji naprężeń α_k dla wartości wymiarów ρ, θ w różnych punktach złącza, wyznaczono

$$\alpha_k = 1 + 0,35 \cdot (\tan \theta)^{0,25} \cdot \left(\frac{t}{\rho} \right)^{0,5}$$

metodą Lawrence'a ze wzoru:

Wartość zakresu naprężeń w dnie karbu spawalniczego $\Delta\sigma_L$ zlokalizowanego w miejscu występowania naprężeń strefowych

$$\Delta\sigma_L = \alpha_k \cdot \Delta\sigma_s$$

$\Delta\sigma_s$ wyraża się zależnością:

Dla analizy trwałości złącza w ujęciu lokalnym przyjęto krzywą wytrzymałości zmęczeniowej dla ujęcia lokalnego uwzględniającą jedynie efekt oddziaływania zmian spawalni-

czych w materiale oraz istnienia naprężeń pospawalniczych, natomiast wszystkie parametry kształtu opisane są poprzez współczynnik α_k .

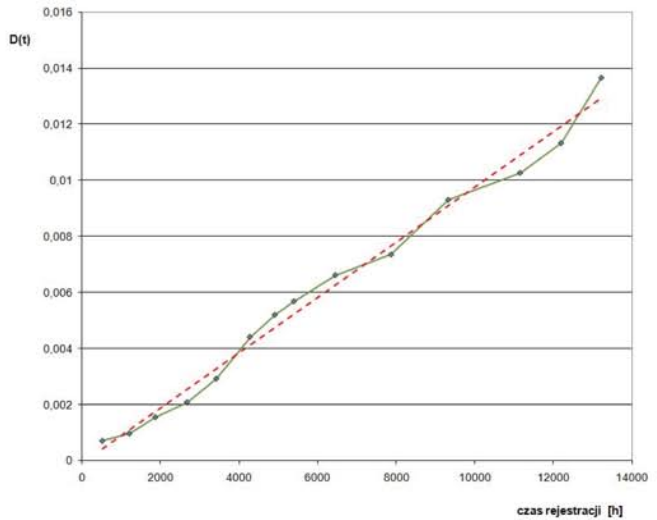
- Ocena przebiega w następujących krokach:
1. Wyznaczenie uszkodzenia $D(T_r)$ na podstawie widma zarejestrowanego w czasie T_r ;
 2. Wyznaczenie trwałości eksploatacyjnej złącza T_E poprzez ekstrapolację uszkodzenia $D(T_r)$ po czasie T_r do poziomu

$$T_E = \frac{D_d}{D(T_r)} \cdot T_r$$

uszkodzenia granicznego D_d :

$$T_E \geq T_d$$

i porównaniu uzyskanego wyniku z wartością wymaganą: Przedstawiony sposób oceny zasobu trwałości zmęczeniowej zakłada ekstrapolację zarejestrowanych dotychczas wyników na cały pozostający okres eksploatacji maszyny przy wykorzystaniu hipotezy liniowej kumulacji uszkodzeń.



Rys. 13. Przyrost uszkodzenia $D(t)$ dla połączenia wieży z platformą w funkcji czasu pracy koparki obliczony na podstawie danych odczytanych w kolejnych odcinkach czasowych. Linia przerywana to linia trendu

Fig. 13. Increase of damages $D(t)$ for tower and platform connection in the function of excavator operation time calculated on the basis of data from the following time slices. Broken line is the line of a trend.

Przyrost uszkodzenia $D(t)$ w czasie ilustruje wykres przedstawiony na rysunku 13. Z wykresu wynika, że maszyna pracowała przy zróżnicowanej intensywności obciążenia, co pociąga za sobą zróżnicowane przyrosty uszkodzenia, w poszczególnych krótkich odcinkach czasowych ale z niemal stałą intensywnością w długim horyzoncie czasowym. Różnorodne koncepcje ekstrapolacji rejestrowanych uszkodzeń na cały okres istnienia maszyny przedstawiono w opisie metody MOZER [2].

Źródła niepewności w ocenie zasobu

Najważniejsze z nich można przedstawić następująco:

1. Oszacowanie uszkodzenia D , przyjętego jako miara wyczerpywania zasobu eksploatacyjnego odbywa się w sposób pośredni poprzez liniową hipotezę kumulacji Palmgręna –Minera. Polega ono na skojarzeniu modelowego opisu intensywności

naprężeń w postaci widma z modelowym opisem wytrzymałości zmęczeniowej spawanego węzła konstrukcyjnego ujętej w formie krzywej S-N. Wybór modelu węzła dokonywany jest szacunkowo i oparty głównie na doświadczeniu i biegłości projektanta. Jest to kontynuacja metod projektowych. Różnica zasadnicza to:

- stosowanie widm obciążeń zarejestrowanych w danym węźle rozpatrywanego obiektu zamiast przyjmowania uogólnionych, bardzo uproszczonych form opisu widm obciążeń według zaleceń norm oraz pomocniczych materiałów firmowych,
- możliwość uwzględniania w charakterystykach wytrzymałości zmęczeniowej adekwatnych do uzyskiwanych w trakcie wytwarzania złącza spawanego - czynnik ten odgrywa bardzo istotną rolę w „budowaniu” zasobu eksploatacyjnego.

Bezpośrednia identyfikacja uszkodzenia zmęczeniowego zachodzącego w węzłach konstrukcyjnych wymagałaby stosowania badań praktycznie niemożliwych do przeprowadzenia w warunkach polowych. Ponadto, ich wyniki byłyby bardzo trudne do interpretacji w kategoriach zasobu eksploatacyjnego, którym posługują się projektant i eksploatacja. Oczywiście dotyczy to fazy inicjacji, dominującej w „życiu” wyrobu.

2. Przebieg naprężeń eksploatacyjnych zarejestrowanych w punkcie referencyjnym jest przetwarzany na histogram (widmo) naprężeń w miejscu spodziewanej inicjacji pęknięcia zmęczeniowego, w którym szacowane jest następnie uszkodzenie D . Jest to źródło kolejnych rozbieżności wynikających z założeń przyjętych w modelu. Można je ograniczyć poprzez prowadzenie krótkotrwałych pomiarów tensometrycznych weryfikujących relację pomiędzy naprężeniami zarejestrowanymi w punkcie referencyjnym i PSOT, ale i tu natrafimy na pewne ograniczenia.

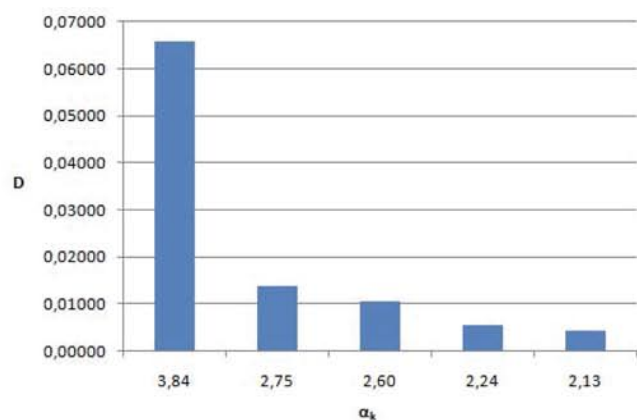
3. Projektowa jakość złączy spawanych podana w dokumentacji konstrukcyjnej nie określa rzeczywistych parametrów kształtu spoiny a jedynie wartości dopuszczalne wybranych wymiarów mikrolokalnych ten kształt opisujących. Konieczny jest pracochłonny indywidualny pomiar rzeczywistych wymiarów spoiny - kąta wzniosu- θ , promienia przejścia materiału rodzimego w lico spoiny - ρ . W rzeczywistości w obszarze potencjalnego uszkodzenia zauważalne jest zróżnicowanie tych parametrów co prowadzi do istotnych różnic w wartościach współczynnika koncentracji naprężeń, a co za tym idzie wartości obliczeniowej uszkodzenia D . Skale tego zagadnienia ilustruje poniższe zestawienie.

Tab. 2. Wartości współczynników koncentracji naprężeń α_k dla wymiarów r, q zmierzonych w różnych punktach złącza. Wyróżniono wartość średnią dla analizowanego obszaru oraz wartości skrajne

Tab. 2. Values of stresses concentration coefficient α_k for r, q dimensions calculated in different points of joint. Average values and extreme values for analyzed area have been distinguished.

		kąt nachylenia lica θ		
		dopuszczalny	max	min
promień ρ [mm]		60°	45°	35°
poziom jakości - wysoki	1	3,84	-	-
minimalny z pomiarów	2	-	2,75	2,60
maksymalny z pomiarów	4	-	2,24	2,13

4. Szacowana analitycznie wielkość uszkodzenia D jest silnie zależna od przyjmowanej postaci krzywej S-N. W tabeli 3 przedstawione zostały wartości szacowanego obliczeniowo uszkodzenia D dla wybranych PSOT wyznaczone na podsta-



Rys. 14. Uszkodzenie obliczeniowe D po 13223 h eksploatacji w zależności od parametrów geometrycznych spoiny (ρ , θ) zmierzonych w rejonie potencjalnego pęknięcia i wykorzystanych w analizie lokalnej

Fig. 14. Damages calculated after 13223 h of exploitation depending on geometrical parameters of the joint (ρ , θ) measured in the area of potential cracking and utilized in local analysis

Tab. 3. Wartości obliczeniowe uszkodzenia dla krzywej S-N z jednym punktem załamania (D_H) i dwoma punktami załamania (D_{EC})

Fig. 3 Values of calculated damages for S-N curve with one point fold (D_H) and two points fold (D_{EC})

Lokalizacja PSOT	D_H	D_{EC}	D_H/D_{EC}
Połączenie wieży z platformą	0,01365	0,00625	2,18
Pas dolny wysięgnika koła czepakowego	0,00896	0,00658	1,36

wie zarejestrowanych widm obciążeń w ciągu 13223 godzin pracy dla różnych postaci krzywej S-N, wynikającej z różnych założeń przyjmowanych w poszczególnych normach specjalistycznych.

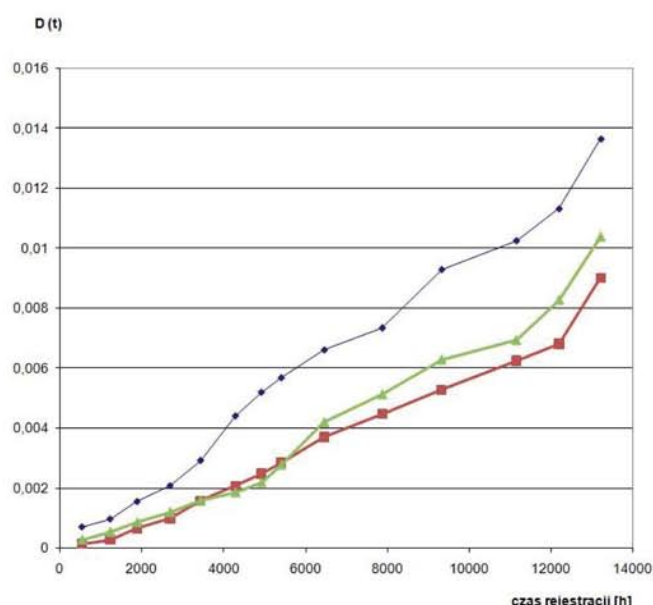
5. Interpretacja wyznaczonej wartości uszkodzenia D wymaga porównania z wartością przyjętą za graniczną. W tym zakresie spotyka się w literaturze szeroki zakres wartości od $D=0,2$ do $D=1,0$ co daje już znaczne (pięciokrotne) zróżnicowanie trwałości obliczeniowej.

6. Wyznaczenie trwałości w analizowanym PSOT odbywa się na drodze ekstrapolacji krzywej narastania uszkodzenia do poziomu uszkodzenia przyjmowanego jako krytyczny. Zakłada się więc, że w przyszłości maszyna będzie obciążona z taką samą intensywnością jak dotychczas. Może to być źródłem błędu przy wyznaczaniu przyrostu uszkodzenia w oparciu o zbyt krótki odcinek czasowy rejestracji widma. Prowadząc jednak akwizycję widm naprężeń w sposób ciągły aktualizujemy prognozę trwałości mając przy tym pełną możliwość identyfikacji zmian intensywności obciążeń w czasie. Ilustruje to rysunek 15.

Realizacja projektu eksploatacyjnego dla maszyn używanych

Przedstawiony tok postępowania dotyczy obiektów nowych, wdrażanych do użytkowania bezpośrednio po zaprojektowaniu i wytworzeniu z zastosowaniem następnie zintegrowanej procedury - ZIP. W trakcie eksploatacji może jednak dochodzić do przynajmniej dwóch odmiennych sytuacji:

- wprowadzania do eksploatacji obiektu już uprzednio użytkowanego w innej odkrywce, przez innego właściciela (bez stosowania procedury ZIP),
- rozpoczynanie eksploatacji według przedstawionej zintegro-



Rys. 15. Przyrost uszkodzenia $D(t)$ w trzech wybranych punktach konstrukcji. Widoczna zmiana trendu poczynając od momentu ok. 11000 godzin związana z bardziej intensywną eksploatacją

Fig. 15. Increase of damages $D(t)$ in three selected construction points. Visible change of trend after 11000 h of operation connected with more intensive exploitation

wanej procedury ZIP, obiektu do tej pory użytkowanego w systemie tradycyjnym, w obrębie tej samej kopalni.

Jak zatem postępować z obiektem używanym, w pewnym, nieznanym stopniu już zdegradowanym? W tej sytuacji rośnie znaczenie projektu eksploatacyjnego – PEX. Na jego tle można by zaproponować następujący tok postępowania:

1. Przeprowadzenie analizy wyęźnienia strefowego konstrukcji nośnej za pomocą wybranych technik obliczeniowych.
2. Nałożenie na obraz wyęźnienia strefowego, poprzez analizę czynioną za pomocą MES, wyęźnienia lokalnego węzła konstrukcyjnego wynikającego z:
 - formy złącza spawanego znajdującego się w węźle konstrukcyjnym,
 - uprzednio zidentyfikowanej jakości wykonania tego złącza spawanego.
3. Analizując sposób użytkowania koparki określenie odpowiedzialności poszczególnych węzłów, inaczej ciężkości awarii, wywołanej uszkodzeniem danego węzła. Nałożenie rezultatów analizy odpowiedzialności węzłów na obraz wyęźnienia konstrukcji nośnej wskazuje miejsca zwane potencjalnymi słabymi ogniwami trwałościowymi – PSOT. W nich powinny być instalowane czujniki systemu akwizycji ciągłej zmienności wyęźnienia. Informacje te są następnie przetwarzane w widma zakresów naprężeń stanowiące podstawę „obciążeniową” dla szacowania pierwotnego uszkodzenia zmęczeniowego, a następnie pozostającego zasobu eksploatacyjnego oraz technicznego ryzyka użytkowania, zmieniających się w toku degradacji konstrukcji, posługując się narzędziami metody MOZER.
4. Prowadzenie akwizycji naprężeń intensywności ob-

ciężenia przez dalszy okres eksploatacji. Rejestrowane widmo obciążeń oddaje podstawowe elementy związane z obciążeniem: opór skrawania gruntu, charakterystykę częstotliwościową układu nośnego, poziomy zadziałania ograniczników obciążenia.

Problem oceny zasobu trwałości ma dwa aspekty: określenie obciążeń w czasie nadchodzącym oraz określenie obciążeń w czasie minionym – poprzedzającym akwizycję. Pierwszy aspekt nie stanowi problemu bowiem widmo będzie rejestrowane na bieżąco, za pomocą zainstalowanej aparatury akwizycyjnej. Trudniejszym zadaniem staje się określanie obciążeń okresu minionego. Wydaje się, że w tym zakresie istnieją przynajmniej trzy możliwości, każda z określonymi niedostatkami:

1. Rejestracja widma przez dłuższy okres czasu, podobnie jak to zostało zalecone w metodzie MOZER, wyznaczenie uszkodzenia minimalnego, średniego, maksymalnego: D_{min} , D_{sr} , D_{max} i za ich pomocą cofnięcie się na okres przebyty.
2. Rozwiązanie matematyczne tego problemu i znalezienie powiązania pomiędzy notacjami aktualnymi i wstecznymi. Dla weryfikacji takiego postępowania należałoby jednak posiadać bogaty materiał akwizycyjny. Niewątpliwie jest to rozważanie kuszące, ale dopiero przyszłościowe, wymagające stworzenia odpowiedniego algorytmu matematycznego i jego weryfikacji na podstawie danych pochodzących z eksploatacji.
3. Rozwiązanie radykalne, ale jednocześnie o ograniczonym zasięgu. Dotyczy ono głównie problemu bezpieczeństwa, pozostawiające nurt trwałości na uboczu. Polegałoby ono na intensywnym nadzorze diagnostycznym konstrukcji nośnej, prowadzonym w określonych na podstawie zaleceń przedstawionych wyżej, węzłach konstrukcji nazwanych PSOT. Od chwili zainicjowania w nich pęknięć zmęczenia i określania ich położenia, wymiarów i lokalnego obciążenia można fizycznie śledzić ich rozwój i prognozować, za pomocą metody ZASE MP, osiągnięcie stanu granicznego poprzedzającego kruche pęknięcie. Daje to asumpt do ilościowego szacowania stopnia degradacji zmęczeniowej określonego węzła w fazie rozwoju pęknięcia, i na tej podstawie szacowania pozostającego zasobu eksploatacyjnego oraz ryzyka, które staje się tu zdarzeniem kluczowym.

Posiadając określone, w jeden z powyższych sposobów, „całościowe” widmo obciążeń eksploatacyjnych, można za pomocą programów ZASE WC określać inicjacyjny (wysokocyklowy) zasób eksploatacyjny i traktować go jako zapowiedź wystąpienia (zainicjowania) pęknięcia zmęczeniowego. Zbliżanie się do jego zrealizowania należy potraktować jako potrzebę wzmoczonego poszukiwania pęknięcia i dalej prowadzić obiekt według zasad MP, stosując narzędzia ZASE MP. Tu w przypadku „maszyny używanej” należy czynność poszukiwania pęknięcia zmęczeniowego dokonywać ze zdwojoną starannością.

Możliwe jest też rozwiązanie radykalne - czekać, z należytą uwagą, na pojawienie się pęknięcia zmęczeniowego. W jego odnalezieniu powinny istotnie pomóc wcześniejsze operacje dotyczące określania PSOT oraz identyfikacje jakości wytwarzania złączy spawanych. Pojawienie się pęknięcia jest sygnałem do działania za pomocą ZASE MP. Jest to działanie w zakresie propagacyjnym z pełnym pominięciem zakresu inicjacyjnego.

Poprawa zasobu trwałości w trakcie eksploatacji

Istotnym wydarzeniem zachodzącym w trakcie istnienia maszyny może być jej modernizacja powodowana najczęściej potrzebą dostosowania maszyny do trudniejszych warunków eksploatacyjnych np. zwiększonych oporów urabiania, bądź konieczności wzrostu wydajności. Prawdopodobieństwo przeprowadzenia modernizacji jest tym większe im dłuższy okres eksploatacji maszyny został przyjęty. Taka modernizacja to także wzrost intensywności obciążeń eksploatacyjnych. Zachodzi zatem wyraźna potrzeba powiększenia zasobu eksploatacyjnego konstrukcji nośnej. Jak są możliwości realizacji tego postulatu, gdy maszyna istnieje, a nadto częściowo wyczerpała projektowy zasób eksploatacyjny. Jak zwykle są przynajmniej dwie drogi postępowania. Pierwsza prowadzi poprzez ingerencję w obszar obciążeń użytkowych, druga polega na bezpośredniej ingerencji w konstrukcję nośną.

Ingerencja w obszar obciążeń użytkowych dokonywana jest poprzez:

- nastawy ograniczników poszczególnych mechanizmów,
- korektę algorytmów sterowania maszyną,
- zmiany częstotliwości wymuszeń periodycznych,
- korektę charakterystyk rozruchu i hamowania głównych mechanizmów,
- korektę geometrii narzędzi skrawających,
- wprowadzenie układów wykorzystujących pomiary naprężeń w konstrukcji do regulacji w systemie sterowania maszyną.

Ingerencja w konstrukcję nośną maszyny dokonywana jest poprzez:

- zmianę sztywności wybranych zespołów konstrukcyjnych
- wymianę całych zespołów konstrukcji nośnej,
- wymianę najbardziej wysiłonych węzłów konstrukcyjnych na lepiej ukształtowane (o bardziej bezpośrednim przekazywaniu obciążeń, z mniejszą liczbą złączy spawanych, zredukowanym poziomem koncentracji naprężeń),
- poprawę kształtu, często za pomocą obróbek pospawalniczych, starych spoin, także ewentualną korektę poziomu naprężeń własnych pospawalniczych.

Obydwie drogi postępowania są szczególnie przydatne dla omawianej grupy tak specyficznych obiektów. Dla wyrobów jednostkowych, o olbrzymich wymiarach, intensywniej eksploatacji, z dominującym udziałem konstrukcji nośnej, projektowanych na bardzo długie okresy eksploatacji to bezpieczny a zarazem ekonomiczny sposób postępowania, ułatwiający osiąganie wysokich zasobów eksploatacyjnych w zakresie zmęczenia.

Podsumowanie

Proces uszkodzania zmęczeniowego jest procesem złożonym, wieloczynnikowym o wzajemnym powiązaniu oddziaływań poszczególnych czynników. Z tego też powodu podlega rozległemu modelowaniu w ramach tworzenia procedur szacowania uszkodzenia, a następnie trwałości zmęczeniowej. W modelach tych tkwi niestety szereg założeń upraszczających dotyczących zarówno opisu poszczególnych czynników jak i powiązań między nimi.

Należy zdawać sobie sprawę, że im proces modelowania staje się rozleglejszy, a założenia upraszczające liczniejsze, tym

osiągnięta przejrzystość procedury i łatwość posługiwania się nią staje się coraz większa ale jednocześnie następuje coraz silniejsze oddalanie się od modelowanej „rzeczywistości”.

Wzrost znaczenia modelowania i bazujących na nim procedur powodować będzie postępującą utratę świadomości tego co dzieje się w rzeczywistym obiekcie. Zostaje on zastąpiony wyimaginowanym „obiektem modelowym”, który niestety nie „słucha się” procedury i zachowuje się jak rzeczywisty obiekt, nie jego model. Taka sytuacja grozi uśpieniem czujności nadzoru eksploatacyjnego, również ogranicza elastyczność reakcji na ewentualne zagrożenia.

Dlatego rezultaty otrzymywane według przedstawionej metody MOZER należy zawsze traktować z pewnym dystansem, jedynie jako informacje sygnałne co do rozwoju degradacji nie zaś jednoznacznie rozstrzygające. W sytuacjach wątpliwych, niejednoznacznych należy sięgać po inne narzędzia.

Takie postępowanie wymaga także wyższej jakości personelu nadzorującego użytkowanie, personelu potrafiącego interpretować na szerszym tle rezultaty otrzymywane za pomocą metody MOZER i adekwatnie reagować na zaistniałe sytuacje. Nadto personel ten musi być wyposażony w odpowiednie do postawionych zintensyfikowanych zadań techniki diagnostyczne.

Podstawową zaletą płynącą ze stosowania koncepcji projektu eksploatacyjnego PEX jest możliwość przeprowadzenia korekt, głównie w zakresie zasobu eksploatacyjnego, w zależności od napotykaných warunków eksploatacji i postępującej degradacji obiektu.

Posługujący się zaproponowaną koncepcją projektu eksploatacyjnego operuje niezbędnymi metodami i narzędziami

w celu uzyskania informacji odnośnie wyczerpywania się zasobu trwałości zmęczeniowej. Daje to podstawy do eksploatacji konstrukcji nośnej według stanu technicznego, pozwala na wcześniejszą identyfikację zagrożeń i podjęcie działań wyprzedzających – wzmożonej kontroli zagrożonych węzłów, szczegółowych badań w celu wykrycia pęknięć, a w razie konieczności obserwacji wzrostu pęknięć, które już się ujawniły (filozofia kontrolowanego uszkodzenia).

Nadto, niezaprzeczalną korzyścią związaną z realizacją projektu eksploatacyjnego jest ciągły zapis historii obciążenia konstrukcji nośnej umożliwiający weryfikację założeń projektowych, zwłaszcza w zakresie intensywności obciążeń, a w przyszłości - w miarę rozwijania nowych narzędzi analitycznych - prognozowanie trwałości nowymi metodami.

Przedstawiona koncepcja projektu eksploatacyjnego realizowana w odniesieniu do koparki KWK-910 od początku jej eksploatacji może być z powodzeniem wykorzystana w odniesieniu do maszyn już istniejących, nawet o długim stażu eksploatacyjnym. Zwiększona niepewność co do oceny zasobu trwałości tych maszyn sprowadza się do konieczności dokonania ekstrapolacji wstecz wyników otrzymanych w oparciu o dane rejestrowane poczynając od danej chwili czasowej. W przypadku dostatecznie długiego okresu rejestracji szacunek uszkodzenia D za okres miniony obarczony jest zbliżonym błędem jak ekstrapolacja uzyskanych wyników na okres przyszły.

Artykuł powstał w ramach Projektu Rozwojowego Nr 03 003906

Literatura

- [1] Jakubczak H., Jankowiak A., Kowalczyk M., Sobczykiewicz W., Techniczne podstawy zarządzania ryzykiem zagrożenia pękaniem zmęczeniowym konstrukcji nośnych maszyn roboczych wytwarzanych jednostkowo, *Górnictwo Odkrywkowe* nr 4-5, 2011
- [2] Jakubczak H., Jankowiak A., Kowalczyk M., Sobczykiewicz W., Metoda oceny zasobu eksploatacyjnego i ryzyka - MOZER, *Górnictwo Odkrywkowe* nr 4-5, 2011

*Artykuł recenzowali dr hab. inż. Mieczysław Szata, prof. PWr
doc. dr inż. Andrzej Figiel*

*Rękopis otrzymano 11.08.2011 r. *2229*



Cykl: prolog do konstrukcji...