

TECHNICZNE PODSTAWY ZARZĄDZANIA RYZYKIEM ZAGROŻENIA PĘKANIEM ZMĘCZENIOWYM KONSTRUKCJI NOŚNYCH MASZYN ROBOCZYCH WYTWARZANYCH JEDNOSTKOWO

TECHNICAL BASIS OF MANAGEMENT WITH RISK CAUSED BY FATIGUE CRACKING OF LOAD-BEARING CONSTRUCTIONS OF WORKING MACHINES

Hieronim Jakubczak, Artur Jankowiak, Wojciech Sobczykiewicz – Wydział SiMR, Politechnika Warszawska
Marek Kowalczyk – SKW Biuro Projektowo-Techniczne, Zgorzelec

Dominującym zespołem maszyn roboczych ciężkich: dźwignic, maszyn do robót ziemnych, maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego jest konstrukcja nośna. Ta dominacja wynika nie tylko ze względów gabarytowych-masowych, ale również ekonomicznych i bezpieczeństwa użytkownika. Podstawowym zagrożeniem eksploatacyjnym dla konstrukcji nośnej jest pękanie zmęczeniowe. Stanowi ono główny, obok korozji, symptom degradacji powodowanej bodźcami o charakterze kumulacyjnym.

W artykule przedstawiono Zintegrowaną Procedurę – ZIP postępowania, wyposażoną w narzędzia szacowania zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego oraz ryzyka technicznego użytkownika konstrukcji nośnej ww. rodzaju maszyn. Naczelnym zadaniem procedury jest ułatwienie zarządzania ryzykiem powodowanym degradacją zmęczeniową obiektu. Proponowana procedura ma za zadanie ułatwić również realizację eksploatacji obiektu według strategii stanu technicznego - SST.

The main elements of heavy working machines like: cranes, heavy construction equipment, and opencast mining machines are the load-bearing structures. This situation results not only from their size and weight but also from economical and safety reasons. Fatigue cracking is the main threat for load bearing constructions. Apart from corrosion, it is the main symptom of degradation caused by cumulative character stimuli.

Integrated procedure (ZIP) of proceedings equipped with tools for estimation of fatigue and technological risk of load-bearing construction exploitation of above mentioned machines have been presented in the paper. The main aim of the procedure is to enable management of risk caused by fatigue degradation of an object. Proposed procedure aims to enable exploitation of an object according to technological state strategy (SST).

Wprowadzenie

Współcześnie jesteśmy zobligowani do prowadzenia eksploatacji złożonych wyrobów według Strategii Stanu Technicznego – SST, bowiem jej stosowanie przynosi wiele korzyści sprowadzających się w końcowym ujęciu do wymiernych efektów ekonomicznych. Strategia ta jest generalnie zorientowana na uzyskiwanie wymaganej trwałości i pewności działania po możliwie najniższych kosztach. Realizacja tego warunku musi się odbywać przy jednoczesnym spełnianiu wymagań dotyczących bezpiecznego użytkownika wyrobu. Pierwotnie, dotyczy to bezpieczeństwa technicznego, określanego przez sam wyrób.

Bezpieczeństwo odgrywa coraz istotniejszą rolę w życiu społeczeństw. Ustawicznie narasta liczba powodów takiego stanu rzeczy. Do głównych zaliczyć można: rosnącą liczbę populacji ludzkiej oraz zagęszczenie jej zamieszkiwania, coraz większą złożoność obiektów technicznych, także ich wysilenie (wytrzymałościowe, energetyczne, kinematyczne), eksploatację w coraz trudniejszych warunkach środowiskowych i obciążeniowych. Jednocześnie rosną wymagania społeczne dotyczące bezpieczeństwa, bowiem stało się ono jednym z podstawowych składników jakości życia. Taki stan wywołuje potrzebę posiadania umiejętności zarządzania ryzykiem, stanowiącym miarę bezpieczeństwa technicznego wyrobu.

By zarządzać ryzykiem trzeba umieć je oceniać, najlepiej ilościowo, nadto w odniesieniu do określonej grupy wyrobów

rozpatrywanych w środowisku ich eksploatacji, wywołującym charakterystyczne dla nich – obiektów i warunków eksploatacji – zagrożenia.

Tło problemu

Istnieje w obrębie maszyn roboczych, tzn: dźwignic, maszyn do robót ziemnych, maszyn górnictwa odkrywkowego, maszyn drogowych itp. grupa maszyn zwanych zwyczajowo ciężkimi. Za tym upraszczającym określeniem kryje się także dość złożona specyfika ich budowy oraz istnienia, realizacji cyklu życia. Dotyczy ona praktycznie wszystkich etapów tego cyklu: projektowania, wytwarzania, eksploatacji. Przedstawiciele tej grupy maszyn należy szukać wśród: kołowych żurawi samojezdnych, żurawi wieżowych; koparek: kroczących, wieloczerpakowych, jednonaczyniowych; żurawi: portowych, gąsienicowych; suwnic bramowych i żurawi pływających bądź stacjonarnych itp. Przykładowo ukazane zostały na rysunkach 1 i 2.

Znakomita ich większość cechuje:

- wielkie wymiary gabarytowe
- olbrzymie masy własne
- jednostkowość wytwarzania
- znaczny udział masowy i wymiarowy konstrukcji nośnej
- dążenie do uzyskiwania bardzo długich okresów eksploatacji, rzędu kilkudziesięciu lat, także
- olbrzymie wydajności operacyjne bądź udźwigi.

Generalnie obiekty te można podzielić na dwie grupy:

- intensywnie użytkowane, podlegające degradacji głównie w następstwie oddziaływania procesu zmęczenia (rys. 1)
- użytkowane sporadycznie, ulegające degradacji przy niskim udziale procesu zmęczeniowego (rys. 2).

Obiektem dalszych rozważań staną się te pierwsze, z rysunku 1, ich konstrukcje nośne podlegają bowiem zagrożeniu pękaniem zmęczeniowym, mającym w tym przypadku znaczenie zagrożenia podstawowego. Ponadto proces zmęczenia, określając trwałość konstrukcji, wnosi silny wyraz ekonomiczny.

Przedstawione cechy charakterystyczne wymienionej, specyficznej grupy maszyn, wyraźnie uwypuklają znaczenie ich konstrukcji nośnych. Stanowi ona zawsze przeważającą część obiektu, zarówno od strony masowej jak i gabarytowej, masowo stanowi nawet do 70÷80% całości. Z tej racji poszukiwanie różnorodnych oszczędności, przynoszące następnie korzyści w sferach wytwarzania i użytkowania, ma tendencje do dokonywania się głównie na drodze modyfikacji czynionych w obrębie konstrukcji nośnych. Polega głównie na zwiększaniu jej wysilania, poprzez ograniczanie wymiarów przekrojów poszczególnych elementów oraz stosowanie stali o podwyższonej, także wysokiej wytrzymałości.

Zarazem konstrukcja nośna tych maszyn poddawana jest w trakcie eksploatacji procesom obciążeniowym o wysokiej intensywności, to znaczy, że w poszczególnych jej węzłach, z reguły w złączach spawanych, występują liczne i o wysokich amplitudach cykle zmian naprężeń. Pożądaną w tej sytuacji poprawę charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej przynieść może jedynie stosowanie kosztownych obróbek pospawalniczych złączy spawanych np. szlifowanie bądź przetapianie powtórne prowadzone wzdłuż linii wtopu spoiny, czy wyżarzanie odpężające całych podzespołów konstrukcji nośnych, jeszcze droższe.

Zwiększanie wytrzymałości poprzez redukcję przekrojów elementów maszyn czyni konstrukcję mniej sztywną, ulegającą łat-

twiej większym odkształceniom statycznym i drganiom. To kolejny czynnik, powstający niejako samoistnie, prowadzący do dalszego zwiększania intensywności obciążeń zmiennych.

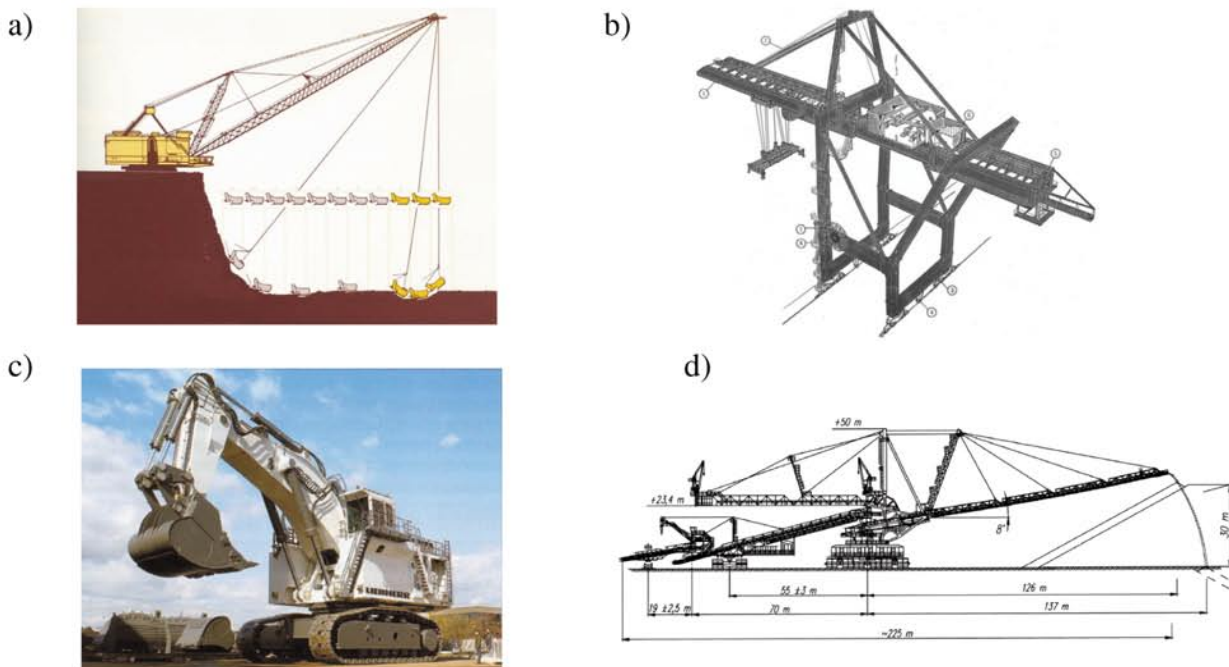
Wszystkie te czynniki intensyfikują problem zagrożenia pękaniem zmęczeniowym. Nakłada się na to aspekt ekonomiczny. Znaczenie konstrukcji nośnej przedstawione zostało poglądowo na rysunku 3, w odniesieniu do portowego żurawia wypadowego. Widać wyraźnie:

- proporcje kosztów wytwarzania (w tym także projektowania), zdecydowanie niekorzystne dla konstrukcji nośnej,
- skalę zagrożenia powodowanego pękaniem zmęczeniowym i wynikające z tego powodu następstwa kosztowe dotyczące odnowy obiektu i stanowiska pracy, a także wynikające z przestoju. Są one tym wyższe im większa maszyna i jej wydajność techniczna.

Z przedstawionego obrazu wynika wyraźna konieczność prowadzenia szacowania ryzyka zarówno w trakcie projektowania jak i użytkowania omawianej klasy obiektu, prowadzona przy możliwie pełnym uwzględnieniu:

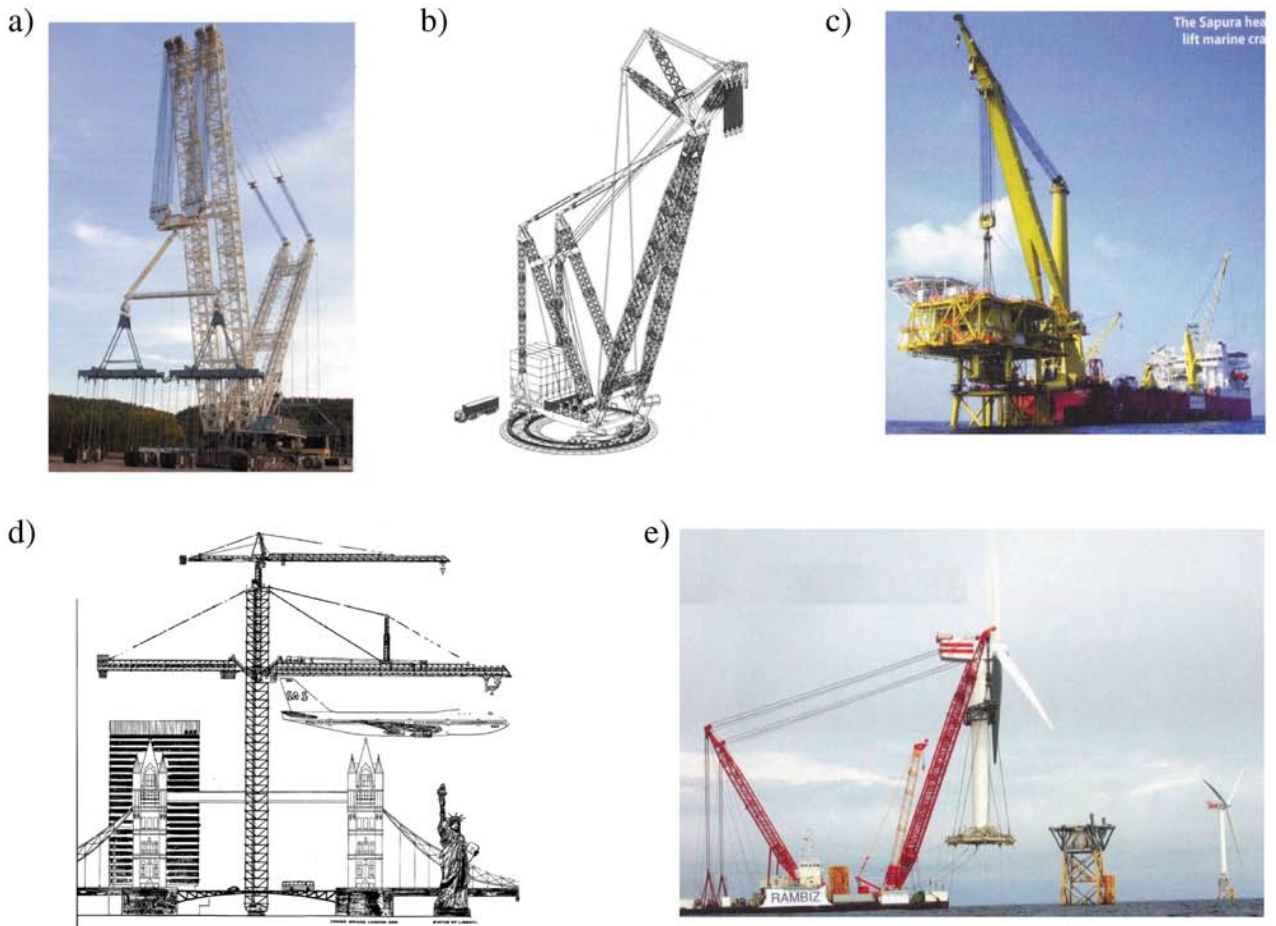
- specyfiki zagrożenia,
- specyfiki obiektu,
- specyfiki jego eksploatacji.

Połączenie wysokiej intensywności eksploatacji (zarówno w zakresie obciążeń, czasu pracy jak i oddziaływania środowiska), stosowania stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości (jednocześnie coraz wrażliwszych zmęczeniowo), dominującego udziału technologii spawania w wytwarzaniu konstrukcji nośnej, także rosnących wymagań dotyczących trwałości zmęczeniowej (podbudowanych silnie czynnikami ekonomicznymi), wraz z potrzebą zapewniania wysokiej niezawodności oraz bezpieczeństwa użytkowania obiektów (wynikających chociażby z potrzeb zapewniania ciągłości dostaw energii, towarów, realizacji usług transportowych itp.) stwarza sytuację, w której dochodzi do konieczności wprowadzenia zmian w filozofii przebiegu cyklu życia omawianych



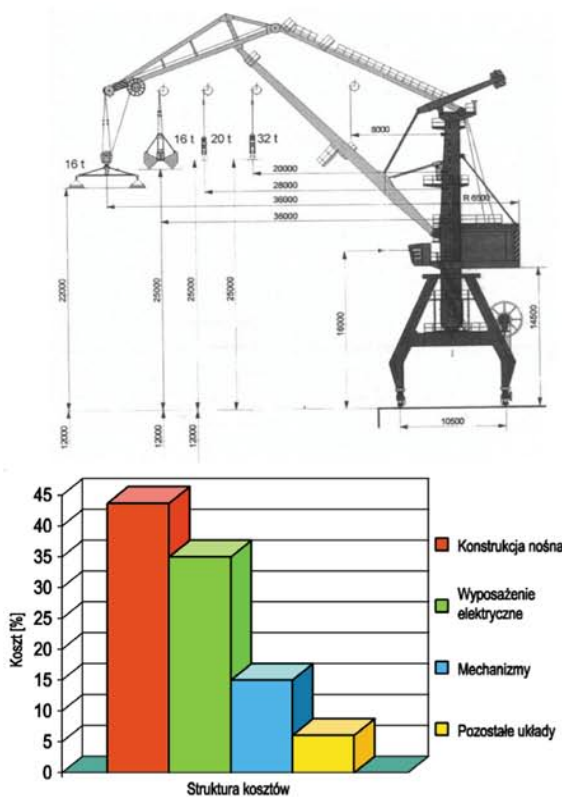
Rys.1. Obiekty produkcji jednostkowej, podlegające intensywnej degradacji powodowanej procesem zmęczenia. a) koparka krocząca wyposażona we włóke, b) nadbrzeżna kontenerowa suwnica bramowa, c) jednoaczyniowa koparka hydrauliczna, d) zwalówarka kopalni odkrywkowej

Fig. 1. Piece production objects subjected to intensive degradation caused by fatigue process. a) walking dragline; b) waterside container gantry crane; c) single-bucket hydraulic excavator d) dumping machine



Rys.2. Obiekty produkcji jednostkowej o znikomym udziale zmęczenia w procesie degradacyjnym. a) żuraw gąsienicowy, b) żuraw stacjonarny, c) żuraw pływający, d) żuraw wieżowy, e) żuraw pływający

Fig. 2. Piece production objects with a slight contribution of fatigue contribution to the degradation process a) mobile crane, b) fixed crane, c) floating crane, d) tower crane, e) floating crane



Rys.3. Portowy żuraw wypadowy. Struktura kosztów wytwarzania. Skutki awarii spowodowanej pęknięciem zmęczeniowym

Fig. 3. Level luffing jib crane. Production costs structure. Effects of failure caused by fatigue cracking

obiektów. Efektem tych zmian powinno być sprostanie aktualnym wymogom, odnoszonym do poszczególnych faz życia obiektu, ale traktowanych możliwie integralnie. Tu wymogi dotyczą zasobu eksploatacyjnego i technicznego bezpieczeństwa użytkownika.

W tej sytuacji, w dążeniu do jednoczesnego zmniejszenia zagrożenia pękaniem zmęczeniowym oraz wydłużania zasobu eksploatacyjnego – wymaganiach zdecydowanie przeciwnych, należałoby zmierzać do ściślejszego powiązania wszystkich trzech faz „życia” wyrobu, szczególnie fazy projektowania z fazą eksploatacji.

Wydaje się, że najwłaściwsze byłoby sięgnąć po doświadczenia, jakie niesie w sobie eksploatacja wyrobu prowadzona według strategii stanu technicznego – SST. Ścisłe sprzężenie jej z fazą projektowania, realizowane w obydwie strony, mogłoby, po stworzeniu odpowiedniego układu powiązań wzajemnych, przynieść wymierne korzyści w zakresie zmniejszenia zagrożenia pękaniem zmęczeniowym i wydłużenia zasobu eksploatacyjnego. Tkwią w nich bardzo silnie aspekty - zarówno bezpieczeństwa jak i ekonomii.

Wprowadzenie strategii – SST może przyczynić się zarówno do poprawy efektów ekonomicznych poprzez spawalnicze i jednocześnie kontrolowanie przebiegu procesów degradacyjnych (efektem zmniejszona liczba uszkodzeń, zanik awarii, wydłużanie zasobu eksploatacyjnego, w tym także ograniczanie przestojów, itp.), jak i do poprawy stanu bezpieczeństwa, co również ma swój silny wyraz ekonomiczny, a nie tylko etyczny. Ponadto maleją koszty leczenia, ubezpieczeń personelu, nie dochodzi do spadku reputacji firmy.

Strategie stanu technicznego można określić jako ciągły, bądź okresowy pomiar i interpretację danych – symptomów, określających bezpośrednio lub pośrednio stopień degradacji obiektu, a posiadając tę wiedzę prowadzić, adekwatnie do stopnia zagrożenia, działania zapobiegawcze, uprzedzające występowanie uszkodzeń, awarii, katastrof, przyczyniające się do wydłużenia zasobu eksploatacyjnego, w tym przypadku konstrukcji nośnej omawianej, 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 wiedzy o samym zjawisku zmęczenia.

Nadto obiekty te przeznaczone są zwykle do bardzo długiego okresu eksploatacji, przy jednoczesnej możliwości zmiany warunków eksploatacji. Obydwa czynniki utrudniają przeprowadzanie procesu zwymiarowania w zakresie trwałości zmęczeniowej.

Procedura zintegrowana – ZIP Projekt eksploatacyjny - PEX

W tej sytuacji zaproponowana zostaje zintegrowana procedura projektowania, wytwarzania i eksploatacji, nazwana – ZIP. Jej naczelną rolą polega na budowaniu możliwie ścisłych powiązań, w trakcie realizacji faz projektowania, wytwarzania i eksploatacji, czynności związanych z szacowaniem wymaganego poziomu bezpieczeństwa oraz trwałości zmęczeniowej(rys. 4).

Bazuje ona na wprowadzeniu zestawu zintegrowanych czynności określonych wspólnym mianem Projekt Eksploatacyjny – PEX. W ramach PEX dokonywane są korekty zasobu

eksploatacyjnego i technicznego ryzyka użytkownika (dwóch podstawowych miar opisujących trwałość i bezpieczeństwo), tu powodowanego procesem degradacji zmęczeniowej w obrębie konstrukcji nośnej. Korekty te czynione są w zależności od uzyskanej jakości wykonania złączy spawanych, intensywności obciążeń oraz stopnia uszkodzenia (zdegradowania konstrukcji nośnej), określanych na podstawie doświadczeń płynących z pierwszych lat eksploatacji. W ramach PEX dokonywana jest również weryfikacja założeń, przyjmowanych w zakresie trwałości i bezpieczeństwa w trakcie realizacji Projektu Pierwotnego – PP, głównie poprzez blok Sprzężeń Zwrotnych – SPZ.

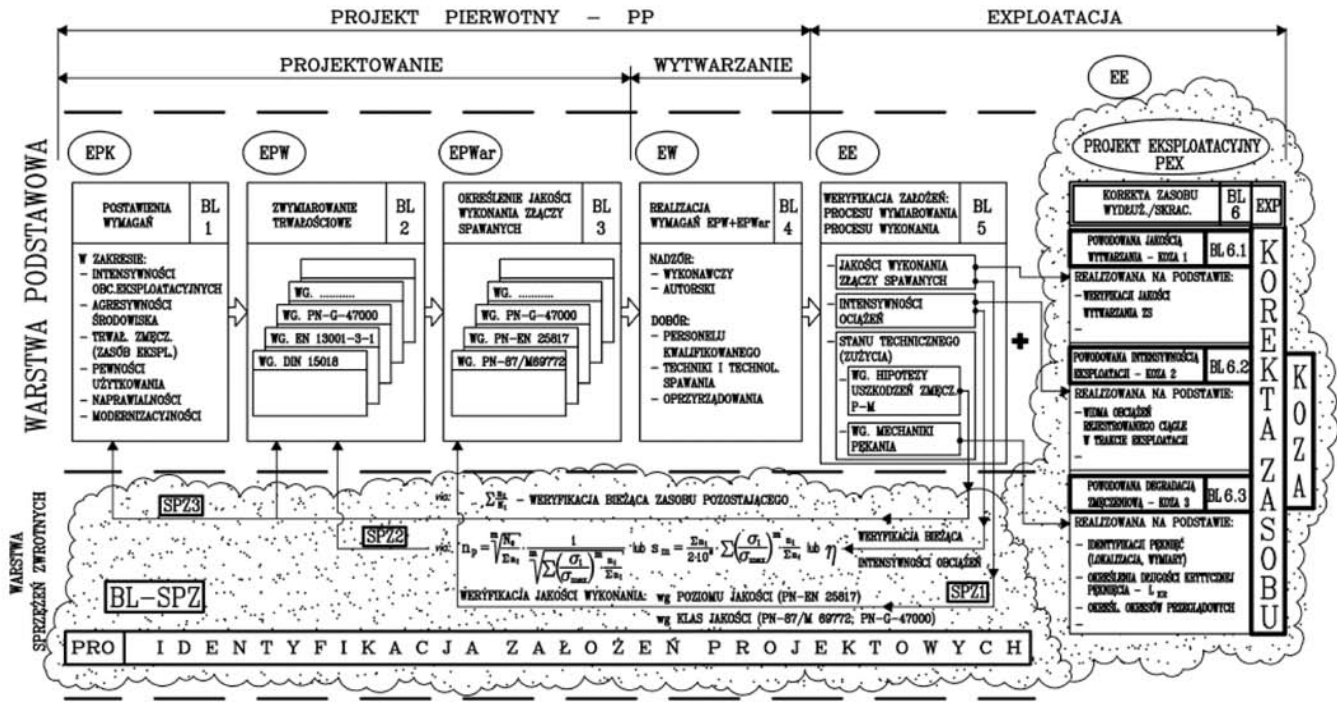
Znaczenie projektu eksploatacyjnego polega na podkreśleniu, że dla rozpatrywanego rodzaju obiektów projektowanie nie ustaje wraz z przekazaniem wyrobu do eksploatacji, lecz powinno być realizowane nadal, w oparciu o bieżące informacje napływające z eksploatacji, także pozyskane w trakcie wykonawstwa. Jest to tu szczególnie ważne zważywszy, że tego rodzaju obiekty są:

- z reguły projektowane przy niepełnych i słabo potwierdzonych danych wyjściowych,
- zakres ewentualnych badań prowadzonych w trakcie procesu BRW jest bardzo ograniczony,
- przewidywany okres eksploatacji sięga 50 lat i więcej, co stwarza konieczność permanentnego reagowania na zmiany zachodzące w obiekcie (degradacyjne, modernizacyjne) i jego środowisku eksploatacji. Reagowania, czynionego najlepiej pod kierunkiem projektanta,
- nadto, biorąc pod uwagę, że proces zmęczenia jest szczególnie złożony, wieloczynnikowy, z wzajemnymi powiązaniem pomiędzy czynnikami, przebiega z reguły w długim okresie czasu, zatem może prowadzić do zmian w istotności poszczególnych czynników w trakcie użytkowania obiektu - naruszając przyjęte założenia pierwotne. To z tych powodów pożądane się stają działania korekcyjne.

Podstawowym zadaniem, realizowanym poprzez projekt eksploatacyjny PEX, dotyczącym zagrożenia pękaniem zmęczeniowym, jest prowadzenie korekt Zasobu Eksploatacyjnego – ZE, adekwatnie do uzyskanego poziomu jakości wykonania złączy spawanych oraz realizowanej intensywności obciążeń eksploatacyjnych. Obydwa czynniki odgrywają współcześnie naczelną rolę w osiągnięciu zasobu eksploatacyjnego. Szacowania dotyczące tych czynników zawarte zostały w blokach 6.1 i 6.2 PEX oznaczonych jako KOZA1 i KOZA2 i realizowane są według zasad wysokocyklowego ujęcia procesu zmęczenia. W bloku 6.3 – KOZA3 realizowane jest powtórzenie tych oszacowań w sytuacji, gdy nastąpiła degradacja konstrukcji do postaci zainicjowanego pęknięcia zmęczeniowego. Wymaga to zmiany ujęcia z wysokocyklowego – WC, na ujęcie mechaniki pękania – MP.

Zadania realizowane w ramach projektu eksploatacyjnego odnoszą się do dwóch głównych odbiorców: projektanta i eksploatatora. Trzeci „uczestnik” procesu „życia” wyrobu, wytwórca, pełni raczej rolę usługową – ma zrealizować wymagania projektanta: w „dobro” eksploatatora. To powoduje rozbieżność projektu eksploatacyjnego PEX na dwa obszary – PEXPRO dotyczący projektowania oraz – PEXEX dotyczący eksploatacji.

PEXPRO nie jest powtarzaniem projektu pierwotnego – PP w zakresie spełniania warunku trwałości, jest to korekta dotycząca zmęczeniowego zasobu eksploatacyjnego prowadzona po uzyskaniu „pierwszych” (w przewidywanym okresie 50 lat



Rys.4. Zmodyfikowana wersja struktury procedury zintegrowanej – ZIP
Fig. 4. Modified version of integrated procedure (ZIP) structure

eksploatacji może to być np.: pierwsze 5 lat) informacji dotyczących głównie występujących intensywności obciążeń, także uzyskanej wcześniej jakości wytworzenia złączy spawanych. Dla zrealizowania tego celu projektant działa według treści zawartych w blokach 6.1 i 6.2 (KOZA1, KOZA2), obydwa należą do ujęcia WC. Działanie według bloku 6.3 (KOZA3) nie jest domeną projektanta, bowiem odnosi się do konkretnej konstrukcji nośnej o zainicjowanym w trakcie eksploatacji pęknięciu. Teraz problem szacowania trwałości musi być rozpatrywany w ujęciu MP, nadal nie stosowanym w standardach wymiarowania trwałościowego czynionego w fazie projektowania: dźwignic, maszyn do robót ziemnych, maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego.

Stosowanie przez projektanta narzędzi stanowiących zawartość bloków KOZA1 i KOZA2, stwarza możliwość bezpośredniego ujmowania trwałości, poprzez liczbę cykli zmian naprężeń, a nie w ujęciu pośrednim, poprzez naprężenia ekwiwalentne odpowiadające przyjętemu widmu naprężeń, jak czynione jest powszechnie i usankcjonowane normami, w trakcie realizacji projektowania pierwotnego, stojącego u podstaw każdego procesu BR (Badania + Rozwój).

To postępowanie korekcyjne, dokonywane w ramach projektu eksploatacyjnego – PEXPRO pozwala zorientować się projektantowi co do sytuacji, w jakiej znalazł się wyrób. Projektant uzyskuje odpowiedź na pytanie, jak się ma zmęczenie zasób eksploatacyjny, na który konstrukcja nośna została zwymiarowana, przy przyjętych: materiałach, formie konstrukcyjnej (ogólnej i lokalnej), rodzajach złączy spawanych, intensywności obciążeń, jakości wykonania itp. – składających się łącznie na jakość konstrukcji (inaczej jakość typu), także założonej jakości wykonania, do zasobu eksploatacyjnego spodziewanego do uzyskania na obiekcie, w realizowanych warunkach eksploatacji i zrealizowanej jakości wytworzenia, szczególnie złączy spawanych.

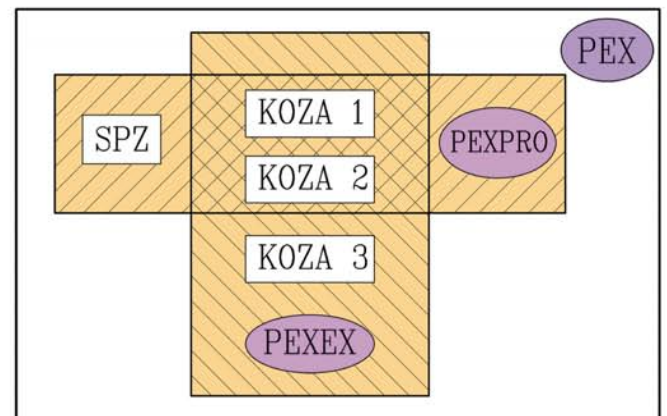
W ten sposób, wytworzone zostaje tło poczynań w obszarze projektowania obejmujące: przeszłość – poczynania w ramach projektu pierwotnego, terażniejszość – gromadzenie informacji

dotyczących uzyskanej jakości wykonania złączy spawanych oraz realizowanej intensywności obciążeń, przyszłość – wprowadzanie korekt w zakresie prognoz dotyczących zasobu eksploatacyjnego oraz ryzyka użytkowania dokonywanych na tle zastanej oraz przewidywanej sytuacji.

Takie postępowanie stwarza szansę na integrację poczynań trzech podstawowych twórców zasobu eksploatacyjnego i związanego z nim ryzyka użytkowania: projektanta, wytwórcy i eksploatatora. Tu, w ramach PEXPRO, czynione głównie na rzecz projektanta.

Z kolei PEXEX to część projektu eksploatacyjnego skierowana na potrzeby eksploatatora. Składają się nań tak jak uprzednio bloki KOZA1 i KOZA2 oraz dodatkowo blok KOZA3. Zakresy oraz układ wzajemnych powiązań w obrębie PEX ukazuje rysunek 5.

Za pomocą dwóch pierwszych, stosowanych tu często w układzie połączonym – KOZA1-2, (szacującym łącznie wpływ jakości wykonania i intensywności obciążeń) eksploatator jest w stanie przeprowadzić szacowanie degradacji zmęczeniowej zachodzącej w poszczególnych uprzednio wybranych węzłach



Rys.5. Wzajemne powiązania w zakresie Projektu Eksploatacyjnego PEX
Fig. 5. Correlations in PEX Exploitation Project

konstrukcji (PSOT – potencjalnych słabych ogniowach trwałościowych), narastającej wraz z upływem czasu użytkowania i określać na tej podstawie to, co eksploatatora najbardziej interesuje – okresy inspekcyjne mające za cel wystarczająco wczesne wykrycie pęknięcia zmęczeniowego. Wyznacznikiem, miarą, tego zużycia na etapie inicjacyjnym – określającą aktualny stan techniczny obiektu, jest tutaj uszkodzenie zmęczeniowe przyjmowane jako $D=n/N$ (stosunek liczby cykli obciążeń zrealizowanych do liczby cykli uszkodzenia powodujących inicjację pęknięcia – przy tych samych wartościach obciążeń). Miarę tę z punktu widzenia bezpieczeństwa traktować można jako narażenie i używać jako podstawowy składnik przy ocenie ryzyka.

W momencie wystąpienia pęknięcia zmęczeniowego (jego zainicjowania) należy stosować postępowanie ocenowe przewidziane w bloku KOZA3. Za jego pomocą eksploatator ma możliwość szacowania uszkodzenia zmęczeniowego, w propagacyjnej fazie rozwoju pęknięcia. Stanowi to clou działalności prowadzonej w ramach PEXEX. Miarą uszkodzenia staje się teraz stosunek wielkości mierzalnych, długości pęknięcia aktualnej do długości pęknięcia krytycznej (po osiągnięciu której następuje lawinowy, kruchy, jego wzrost) – $D=l_a/l_{kr}$. Stosunek ten w procesie szacowania bezpieczeństwa technicznego może być również traktowany jako narażenie. To także stanowi podstawę do wyznaczania okresów inspekcyjnych – tym razem w fazie propagacji pęknięcia zmęczeniowego.

W ten sposób eksploatator, postępując według wskazań zawartych w blokach KOZA1, KOZA2 i KOZA3 jest w stanie szacować na bieżąco, dla danego obiektu poprzez wybrane węzły konstrukcyjne uznane za krytyczne tzw. PSOT, stopień degradacji zmęczeniowej, na obydwu etapach inicjacji i propagacji rozwoju pęknięcia. Czyni to na podstawie dwóch grup informacji, symptomów degradacji obejmujących:

- widma (zespoły) naprężeń eksploatacyjnych gromadzone w punktach referencyjnych,
- przyrosty wymiarów zainicjowanego pęknięcia.

Posługując się, w oszacowaniu uszkodzenia zmęczeniowego, odmiennymi ujęciami opisowymi procesu zmęczenia – wysokocyklowym bądź mechaniki pęknięcia, stosowanymi adekwatnie do przebiegu procesu zmęczenia i pozyskiwanych informacji napływających ze sfery użytkowania obiektu.

Stosowanie przez eksploatatora w ramach PEXEX narzędzi ZASE WC QW i ZASE WC IN jest analogiczne do postępowania projektanta. Tu, ich zastosowanie ma sygnalizować eksploatatorowi, że następuje zbliżanie do momentu zainicjowania pęknięcia zmęczeniowego. Powinno to obligować eksploatatora do zwiększenia aktywności w jego poszukiwaniach. Wykrycie pęknięcia, jego lokalizacja, wymiarowa identyfikacja oraz określenie wyężenia w jego obrębie stwarzają podstawę do zastosowania narzędzia ZASE MP. Z jego pomocą można oceniać zasób eksploatacyjny i ryzyko odnoszone do propagacyjnej fazy degradacji konstrukcji nośnej procesem zmęczenia powodowanej.

Postępowanie ocenowe prowadzone w sferze eksploatacji odbywa się w odmiennym ujęciu niżli w fazie projektowania. Tu przebiega ono w układzie pętli nazwanej Eksploatacyjna Pętla Decyzyjna – EPD (rys. 6), na którą składa się szereg wzajemnie odpowiednio powiązanych modułów posługujących się narzędziami ZASE WC QW, ZASE WC IN, ZASE WC P, ZASE MP. Na ich podstawie dochodzi do podejmowania decyzji o prowadzeniu czynności eksploatacyjnych, głównie

z zakresu utrzymania obiektu, prowadzących do użytkowania go po możliwie minimum kosztów i jednocześnie na wymaganym poziomie bezpieczeństwa.

Na tej podstawie, posługując się przedstawionymi powyżej pojęciami uszkodzenia zmęczeniowego można szacować na bieżąco – w czasie rzeczywistym – dwie podstawowe, tak dla projektanta jak i dla eksploatatora, miary: zasób eksploatacyjny – ZE oraz techniczne ryzyko użytkowania – R, obie określane zagrożeniem pękaniem zmęczeniowym. Zasób eksploatacyjny to miara trwałości, ryzyko to miara bezpieczeństwa. Trwałość poprzez pęknięcie zmęczeniowe implikuje bezpieczeństwo. Zatem, występuje również ściśle, acz nie bezpośrednio powiązanie tych miar. Ogólnie można powiedzieć, że zasób eksploatacyjny ma wyraźny charakter ekonomiczny, zaś ryzyko także etyczny – wraz ze wszystkimi rozległymi konsekwencjami społecznymi i ekonomicznymi także.

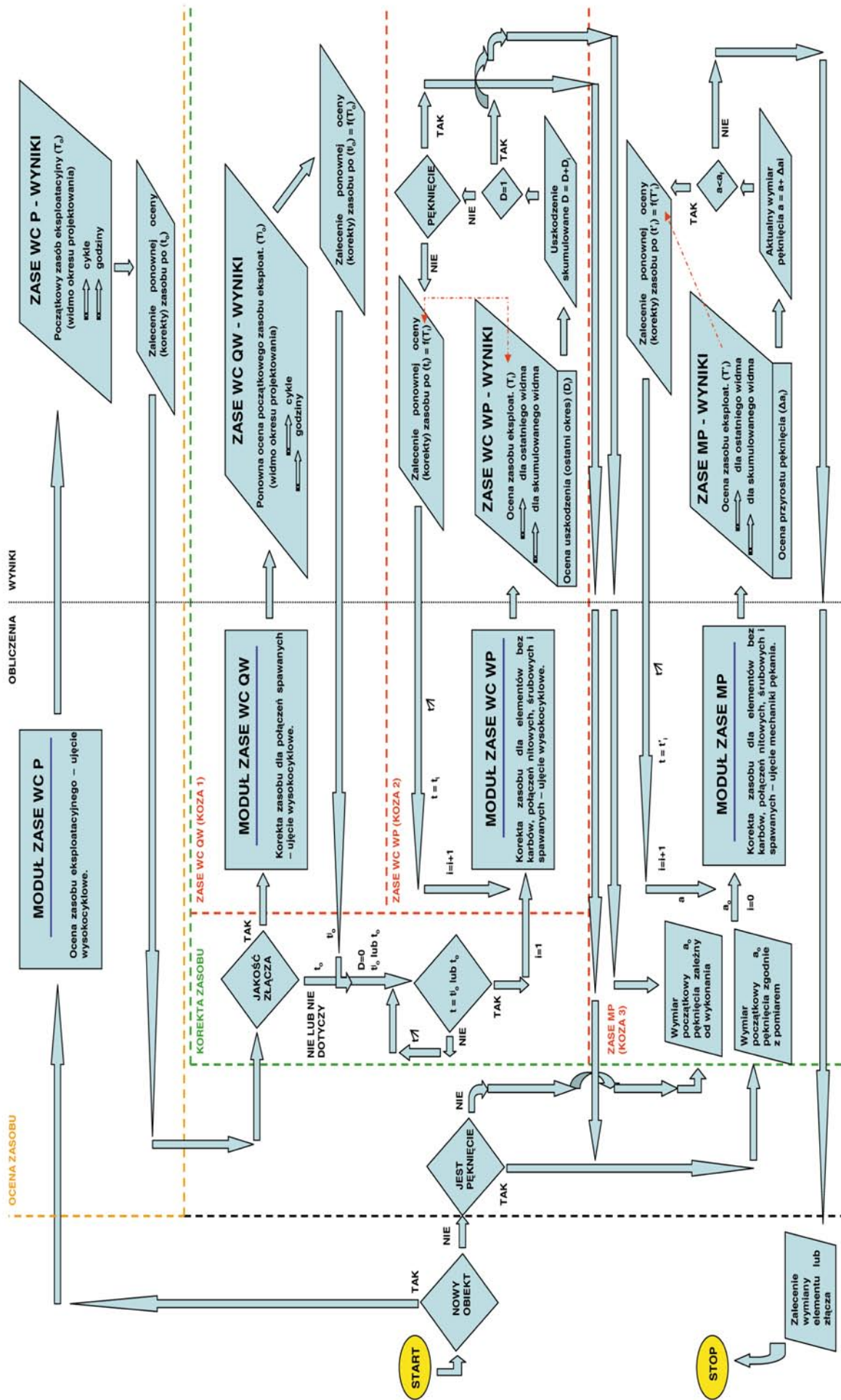
Podstawowym celem integracji, ukazanym na schemacie ZIP – osiąganym głównie poprzez projekt eksploatacyjny PEX, jest dostarczenie podstaw dla sterowania procesem eksploatacji adekwatnie do aktualnego stanu technicznego obiektu, w zakresie zarządzania ryzykiem i zasobem eksploatacyjnym, określonymi przebiegiem degradacyjnego procesu zmęczeniowego. W ostatecznym rezultacie takie postępowanie ma:

- dostarczyć podstaw merytorycznych, wspartych narzędziami analitycznymi, dla stałej współpracy projektanta i eksploatatora obejmującej podstawowe fazy istnienia wyrobu – projektowanie, wytwarzanie i eksploatację (wraz z modernizacją, modyfikacją),
- doprowadzić do poprawy efektów ekonomicznych oraz stopnia bezpieczeństwa użytkowania – osiąganym poprzez działania prowadzone przez eksploatatora w obszarze PEXEX (projektu eksploatacyjnego). Wskaźnikami, natury technicznej, na podstawie których podejmowane są decyzje silnie skutkujące w zakresach ekonomii i bezpieczeństwa eksploatacji, to odpowiednio zasób eksploatacyjny i ryzyko techniczne użytkowania. Te wskaźniki (miary) są szacowane w ramach bloków KOZA1, KOZA2, KOZA3, w oparciu o dane zaczerpnięte z bezpośredniej, bieżącej eksploatacji określonego, indywidualnie traktowanego obiektu,
- spowodować, by projektant mógł konfrontować efekt swych prac projektowych z uzyskanym poziomem wykonawstwa i realizowanymi warunkami eksploatacji. W przedstawionej propozycji może to czynić posługując się powyższymi wskaźnikami, w ramach bloków KOZA1, KOZA2, a także poprzez realizację elementów zawartych w blokach sprzężeń zwrotnych - SPZ, obszaru PEXPRO projektu eksploatacyjnego,
- spowodować również, by modernizacje, modyfikacje i ewentualne projektowanie następnego wyrobu przebiegały przy lepiej poznanych wpływie warunków wytwarzania i eksploatacji i aby efekty kolejnych prac projektowych, mogły być porównywane za pomocą tych samych narzędzi.

Metoda oceny zasobu eksploatacyjnego i ryzyka

- MOZER

Dla zrealizowania przedstawionych celów zbudowana została metoda oszacowania zasobu eksploatacyjnego oraz technicznego ryzyka użytkowania – nazwana MOZER. Składa



Rys. 6. Algorytm Eksploatacyjnej Pętli Decyzyjnej – EPD
Fig. 6. Algorithm of exploitation decision making loop (EPD)

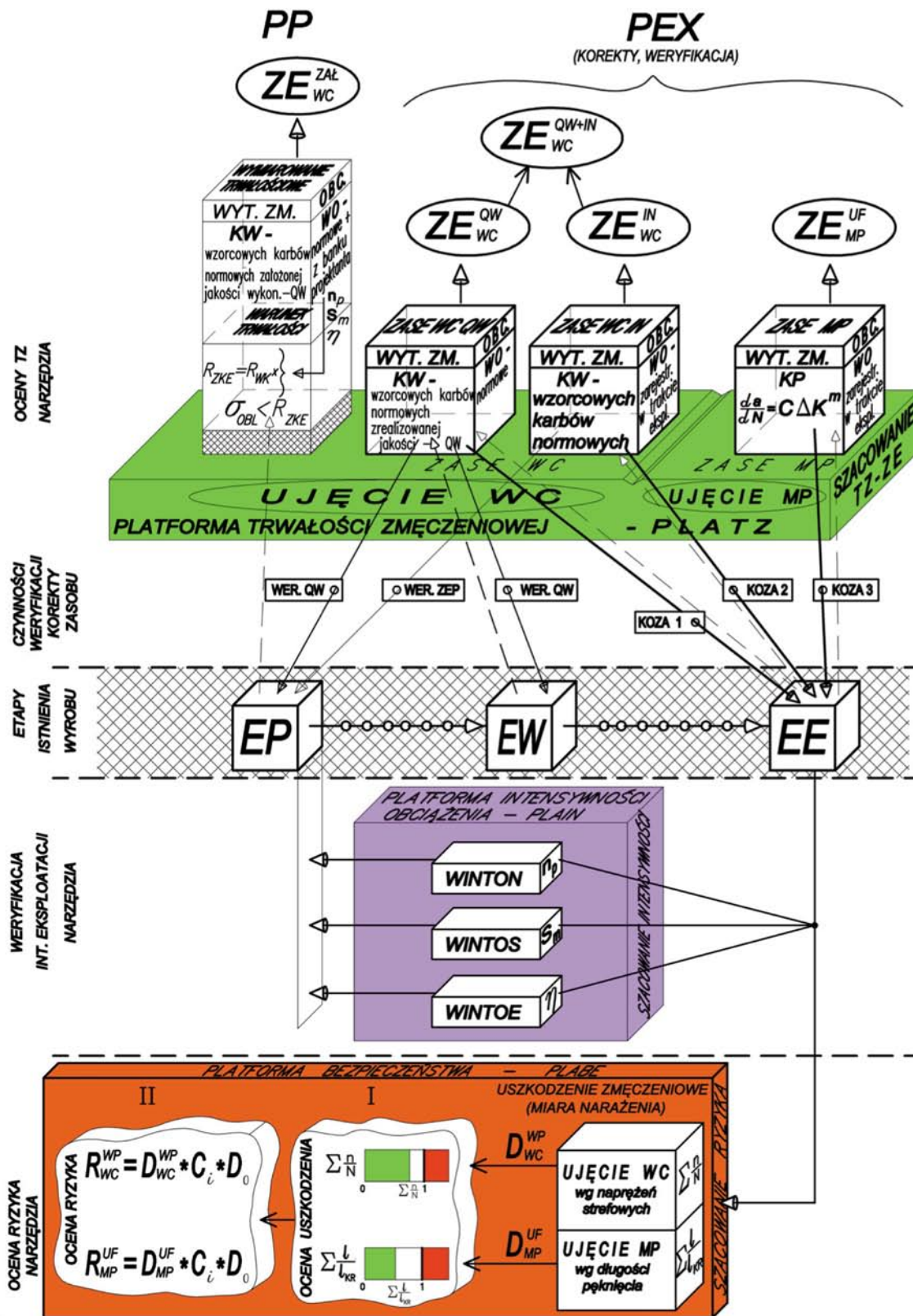
się na nie szereg narzędzi – pod postacią programów obliczeniowych, stanowiących treść postępowania w ramach bloków korekcyjnych KOZA1, KOZA2, KOZA3. Struktura metody została przedstawiona na rysunku 7.

Tło metody stanowią etapy istnienia wyrobu: etap projektowania – EP, etap wytwarzania – EW, etap eksploatacji – EE.

W strukturze metody MOZER można wyróżnić trzy podstawowe obszary poczynić, nazwane platformami.

Są to:

- platforma trwałości zmęczeniowej, nazwana – PLATZ
 - platforma bezpieczeństwa, nazwana – PLABE
 - platforma intensywności obciążeń, nazwana – PLAIN.
- W obrębie każdej z nich dokonywane jest, stosownie do ich nazw, szacowanie:
- trwałości zmęczeniowej, wyrażanej jej podstawową miarą, 90% zasobem eksploatacyjnym – N_{90}



Rys.7. Metoda oceny zasobu eksploatacyjnego i ryzyka – MOZER
Fig. 7. Method of exploitation reserves and risk assessment (MOZER)

Tab. 1. Zalecenia określania składników oceny ryzyka
 Tab. 1. Recommendations of risk assessment element definition

Uszkodzenia zmęczeniowe D_{WC}/D_{MP}			Liczby priorytetowe	Ciężkość zdarzenia C_i	Liczby priorytetowe	Dostępność D_0	Liczby priorytetowe
0	$<D \leq$	0.2	1	pomijalna	1	pełna	1
0.2	$<D \leq$	0.4	2÷3	niewielka	2÷3	wysoka	2÷5
0.4	$<D \leq$	0.6	4÷6	umiarkowana	4÷6	umiarkowana	6÷8
0.6	$<D \leq$	0.8	7÷8	istotna	7÷8	niska	9
0.8	$<D \leq$	1.0	9÷10	b. istotna	9÷10	żadna	10

- technicznego bezpieczeństwa użytkownika, wyrażanego za pomocą miary ryzyka – R
 - intensywności obciążenia użytkowego, poprzez miary zwane współczynnikami: natężenia pracy – n_p , przebiegu naprężeń – s_m , naprężeń eksploatacyjnych – η_E .
- Na platformach tematycznych umieszczone zostały narzędzia – programy obliczeniowe.

Platforma PLATZ zawiera:

- program ZASE WC QW szacowania zasobu eksploatacyjnego z uwzględnieniem jakości wytwarzania „QW” złączy spawanych
- program ZASE WC IN szacowania zasobu eksploatacyjnego z uwzględnieniem intensywności obciążenia „IN”. Można te dwa programy połączyć otrzymując ZASE WC QW+IN. Obydwa programy reprezentują wysokocyklowe „WC” ujęcie procesu zmęczenia
- program ZASE MP szacowania zasobu eksploatacyjnego w obecności zainicjowanego pęknięcia. Opracowany został w ujęciu mechaniki pęknięcia „MP”.

Platforma PLABE zawiera narzędzia do szacowania ryzyka technicznego (powodowanego zagrożeniem pęknięciem zmęczeniowym) zbudowane w dwóch ujęciach WC i MP stosownie do fazy uszkodzania zmęczeniowego.

Oszacowanie ryzyka, tu przedstawione, wymaga komentarza bowiem czynione jest w odmienny sposób do zaleceń norm PN-EN ISO 12100-1,2 oraz PN-EN ISO 14121-1 odnoszących się właśnie do klasyfikacji zagrożeń oraz zasad oceny ryzyka.

Wymienione w nich rodzaje zagrożeń związane są jedynie z bodźcami o charakterze skokowym, tymczasem zagrożenie pękaniem zmęczeniowym jest rezultatem działania bodźców o charakterze kumulacyjnym. W pierwszym przypadku pojedynczy bodziec jest w stanie uszkodzić obiekt, w drugim do zainicjowania uszkodzenia potrzebne jest wielokrotne (nierzadko liczone w milionach powtórzeń) zadziaływanie bodźców-obciążen. Nadto w oszacowaniu ryzyka podstawowym elementem jest prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na wystąpieniu zagrożenia. W rozpatrywanym przypadku:

- zagrożenie powodowane jest bodźcami o charakterze kumulacyjnym
- obiekty, w których dochodzi do zagrożenia pęknięciem zmęczeniowym są wytwarzane jednostkowo, co uniemożliwia ocenę prawdopodobieństwa zdarzenia.

Zatem zalecenia zawarte w ww. normach nie znajdują zastosowania. Jak rozwiązać problem?

Otóż za pierwotną wielkość w szacowaniu ryzyka technicznego powodowanego zagrożeniem – pęknięcie zmęczeniowe, przyjęto uszkodzenie zmęczeniowe – D, definiowane jako $\Sigma n/N$

dla fazy inicjacji pęknięcia (wg reguły Palmgren-Minera), i analogicznie jako $\Sigma //l_{kr}$ dla fazy rozwoju pęknięcia. Obydwie wielkości w ujęciu terminologii stosowanej w ocenie ryzyka nazwano narażeniem i użyto w miejsce prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia. dopełnieniem, w szacowaniu ryzyka, staje się zgodnie z wymogami ww. norm, ciężkość zdarzenia – C_i oraz dostępność – D_0 (tu do miejsca inicjacji i rozwoju pęknięcia zmęczeniowego). Zatem zależności dla szacowania ryzyka technicznego przyjmują formę:

- dla fazy inicjacyjnej

$$RI = \Sigma n/N * C_i * D_0 = D_{WC} * C_i * D_0$$

- dla fazy propagacyjnej

$$RP = \Sigma //l_{kr} * C_i * D_0 = D_{MP} * C_i * D_0$$

Każdej z wielkości D_{WC} , D_{MP} , C_i oraz D_0 nadane zostały wagi pod postacią liczb priorytetowych. Zalecenia, co do przyjmowania liczb priorytetowych, podane zostały w tabeli 1. Dane te należy traktować jako wstępne. Ich sprecyzowanie następuje zawsze w toku konsultacji z projektantami i użytkownikiem.

Poziom ryzyka jest określany bezpośrednio za pomocą liczb priorytetowych. Wynik tego iloczynu może zawierać się w przedziale $R(1 \div 1000)$. Wartość 1 oznacza minimalne ryzyko, zaś wartość 1000 – maksymalne ryzyko związane z wystąpieniem pęknięcia zmęczeniowego.

W przypadku obiektów podlegających degradacji w następstwie działania procesów o charakterze kumulacyjnym, znaczenie naczelnie tkwi w trwałości, tu zmęczeniowej. Ocena ryzyka staje się sprawą wtórną, wynikającą bezpośrednio z osiąganego zasobu eksploatacyjnego. W normie PN-EN ISO 12100 traktującej o zagrożeniach wymieniane są tylko te pochodzące od bodźców o charakterze skokowym.

Przedstawiony tok postępowania dotyczy obiektów nowych, wdrażanych do użytkowania bezpośrednio po zaprojektowaniu i wytworzeniu. W trakcie eksploatacji może jednak dochodzić do przynajmniej dwóch rodzajów odmiennych sytuacji:

- wprowadzania do eksploatacji obiektu już uprzednio użytkowanego w innym urobisku, przez innego właściciela,
- rozpoczynaniu eksploatacji według przedstawionej zintegrowanej 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? Będzie to treścią oddzielnej publikacji.

Podsumowanie

W przedstawiony sposób, w ramach projektu eksploatacyjnego – PEX, posługując się metodą MOZER, uzyskane zostają informacje – w formie ilościowej, dotyczące stopnia degradacji konstrukcji nośnej, przekładające się na eksploatacyjny zasób pozostający – EZP, oraz techniczne ryzyko użytkowania – R. Obydwie te wielkości szacowane są w czasie bieżącym użytkowania konstrukcji, dając w ten sposób aktualny i wymierny obraz zużycia, przenoszony na koszty i bezpieczeństwo eksploatacji rozpatrywanego wyrobu.

Posiadanie takich informacji daje podstawę do realizacji zarządzania ryzykiem, po możliwie niskich kosztach wynikają-

cych z unikania uszkodzeń, awarii, nawet katastrof, przeprowadzania odnow w właściwym czasie i o niezbędnym zakresie, także na bezpiecznym wydłużaniu zasobu eksploatacyjnego, zatem generalnie realizowaniu eksploatacji wyrobu według zaleceń strategii stanu technicznego – SST.

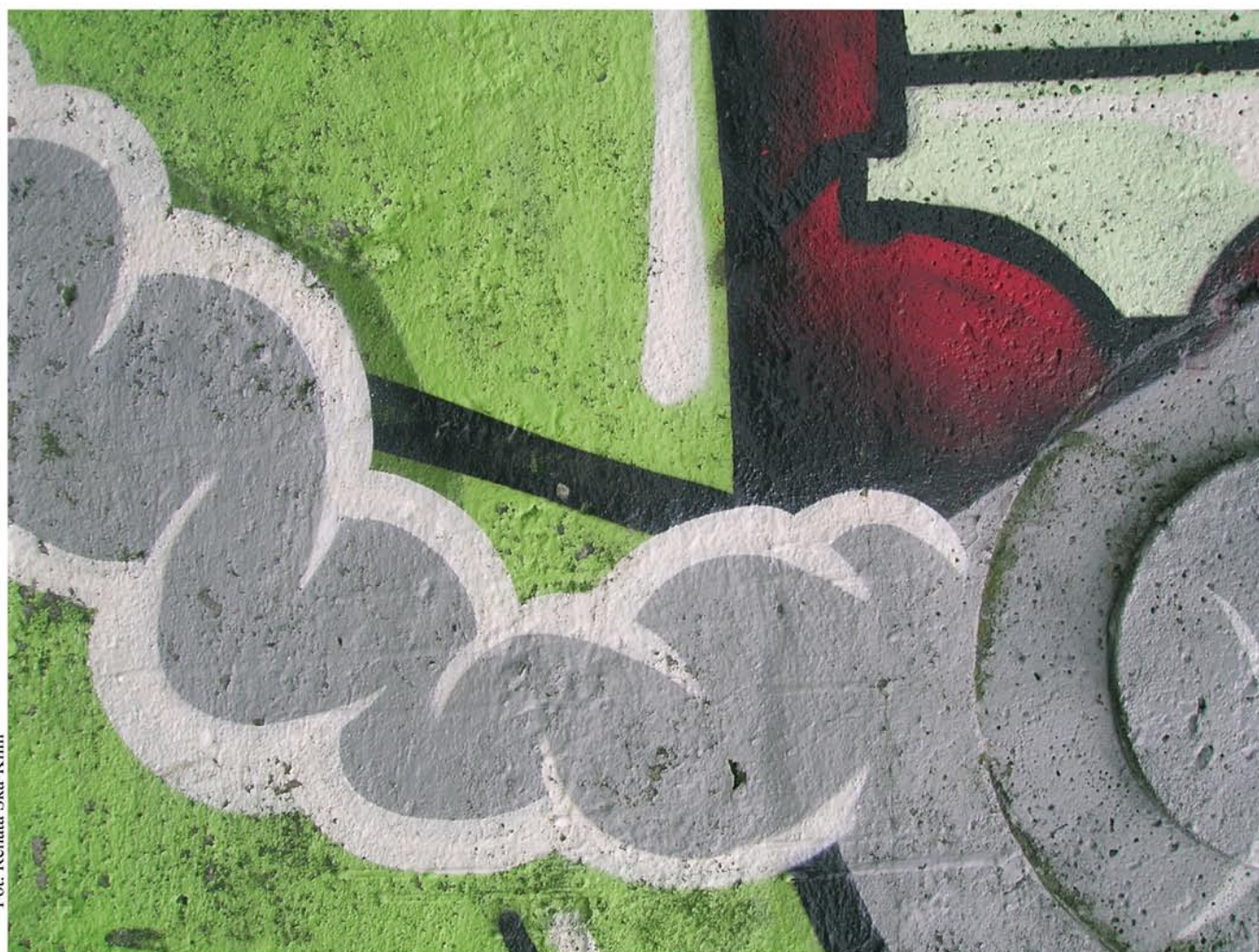
Ilustracja posługiwania się metodą MOZER w ramach Projektu Eksploatacyjnego przedstawiona zostanie w oddzielnej publikacji.

Artykuł powstał w ramach realizacji Projektu Rozwojowego Nr 03 0039 06.

Artykuł recenzowali dr hab. inż. Mieczysław Szata, prof. PWr

doc. dr inż. Andrzej Figiel

*Rękopis otrzymano 11.08.2011 r. *2228*



Cykl: prolog do konstrukcji...