

*Józef Augustynowicz**, *Dionizy Dudek**,
*Krzysztof Dudek**, *Andrzej Figiel**

PROGNOZOWANIE OKRESU BEZPIECZNEJ EKSPLOATACJI MASZYN GÓRNICZYCH. ROZWAŻANIA O DEGRADACJI OBIEKTU**

1. Uwagi wstępne

Maszyny podstawowe w górnictwie odkrywkowym to szczególnie trudne obiekty dynamiczne, w których niepewność występuje na wejściu, na wyjściu i w samej ich naturze. Proces obciążenia takich maszyn — zwłaszcza w zwartych, trudno urabialnych skałach — jest mało poznany i w ogólności nieopisywalny w sposób deterministyczny. Opracowanie ogólnych, prognostycznych metod obliczeniowych takich obiektów w zakresie oceny niezawodności i jakości wymaga stworzenia podstaw identyfikacji tych obiektów poprzez modelowanie oraz badania rzeczywiste. Bardzo istotna jest oczywiście stała kontrola stanu obiektu umożliwiająca aktualizację i weryfikację opracowanych lub przyjętych kryteriów oceny stopnia jego degradacji. Jest to zadanie dla diagnostyki technicznej, zarówno w sensie diagnozowania stanu technicznego maszyny, jak i diagnozowania funkcji przez nią realizowanych. Stałe monitorowanie stanu urządzenia niesie — poza wartościami istotnymi dla prawidłowej diagnozy tego stanu — olbrzymią liczbę informacji, którą można spożytkować również do innych celów. Jako główne i chyba najbardziej wartościowe obszary wykorzystania tej informacji, to zagadnienia prognozowania stanów przyszłych obiektu i ocena tempa jego degradacji, a więc zdecydowanej, niekorzystnej zmiany jakości w wyniku użytkowania maszyny. Można w tym znaczeniu w ogóle mówić o diagnozowaniu jakości w określonych interwałach jej eksploatacji.

Maszyny podstawowe górnictwa odkrywkowego są typowym przykładem układów pracujących w warunkach o charakterze stochastycznym. Wynika to z właściwości procesu

* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska, Wrocław

** Praca została wykonana w ramach projektu badawczego 4 T07A 038 28 pt.: „Degradacja zmęczeniowa dźwignów pierścieniowych obciążonych dyskretnym polem losowym”

technologicznego, który z natury swej jest procesem niestabilizowanym, o bardzo zróżnicowanych wartościach obciążeń zewnętrznych. Wzajemne zależności pomiędzy poszczególnymi elementami takiego układu są z gruntu niejednoznaczne, nieokreślone ścisłymi zależnościami. Ponadto informacja o nich jest niepewna i niepełna. Rozwiązaniem dającym najlepsze efekty dla przetwarzania takiej niepewnej informacji wydaje się sytuacja, w której człowiekowi pozostawia się jedynie wykrywanie istniejących między zdarzeniami korelacji, zaś cały proces przetwarzania, scalania i wnioskowania poddaje się właściwej algorytmizacji.

Proces degradacji obiektu jest wielkością zmienną w czasie, podlegającą ciągłym zmianom destrukcyjnym obniżającym przydatność obiektu. Staje się on zagadnieniem bardzo istotnym zwłaszcza z punktu widzenia ekonomicznego (opłacalność dalszej eksploatacji) i bezpieczeństwa użytkownika. Występuje ze szczególną ostrością w obrębie konstrukcji nośnych obiektów stacjonarnych (mosty, wiadukty, platformy wiertnicze) oraz konstrukcji nośnych wielkogabarytowych maszyn roboczych (dźwigi portowe, sunnice bramowe, wywrotnice wagonowe, koparki wielonaczyniowe, zwałowarki, ładowarki).

W mechaniczno-wytrzymałościowym znaczeniu degradacja maszyn jest związana z fizycznymi zmianami obiektów technicznych na skutek ich użytkowania. Jest procesem pogarszania się właściwości wytrzymałościowych i użytkowych elementów, węzłów i zespołów, a tym samym i całych obiektów. Następuje zarówno w wyniku ich intensywnej eksploatacji, jak i agresywnego oddziaływania środowiska; dwóch podstawowych czynników zdecydowanie sprzyjających przedwczesnemu zużyciu się tych obiektów. W potocznym rozumieniu degradacja jest utożsamiana z pojęciem starzenia się maszyn nierozzerwalnie związanym ze znacznym upływem czasu — liczonym latami eksploatacji — oraz wpływem wszystkich czynników egzogenicznych tworzących środowisko pracy maszyny (otoczenie). W rzeczywistości degradacja maszyn jest procesem bardziej złożonym. Zależy nie tylko od wpływów eksploatacyjnych, ale i od kumulowania się skutków rozmaitych procesów zużycia takich jak: zużycie zmęczeniowe, pęknięciowe, ścierne, odkształceniowe i pełzaniowe.

Każdy z tych procesów związany jest nierozzerwalnie z procesem zmiany obciążenia zewnętrznego przenoszonego przez maszynę podczas eksploatacji. Jest to — bez względu na charakter zmian — proces dający się na ogół dobrze zaprojektować metodami matematycznymi, pod warunkiem, że uda się go estymować na podstawie obserwacji stanu obiektu. W odróżnieniu od niego istnieje także nieopisywalny matematycznie proces, „moralnego starzenia się” maszyn wychodzący poza ich sprawność czysto mechaniczną.

Degradacja obiektów technicznych ma wiele zalet systemowych, a mianowicie:

- wprowadza sporą dozę obiektywizmu do subiektywnie przez człowieka ocenianego procesu „starzenia się” obiektu;
- otwarcie uwzględnia czynnik niepewności oraz nieokreśloności występujący zwłaszcza przy próbach odtworzenia historii wcześniejszych obciążeń;
- w sposób jednolity i systematyczny ocenia oraz porównuje relacje istniejące pomiędzy celami modernizacji a wynikami możliwymi do osiągnięcia.

Nie jest jednak degradacja całkowicie niezależna od sądów subiektywnych, nie dostarcza zatem wniosków czysto obiektywnych i ściśle uzasadnionych — nawet w odniesieniu do zagadnień o charakterze czysto naukowym. Jednak prawidłowe ujęcie statystyczne niepewnych i niekompletnych danych degradacyjnych może bezlitośnie odsłonić luki w badaniach, hipotezach i faktach tych dyscyplin szczegółowych, z których teoria degradacji chce skorzystać. Już przecież podstawowa dla degradacji teoria zmęczenia bazuje na nie do końca jasnych hipotezach zmęczeniowych. A istnieją przecież także czynniki niemierzalne, co do wpływu których teoria nie może wypowiedzieć się jednoznacznie.

Aby zatem przestać być tylko sztuką inżynierską, musi degradacja bazować na określonych kategoriach statystycznych, musi w ściśle określony sposób gromadzić, porządkować i przetwarzać informacje. Można nawet użyć sformułowania, że powinna ona eksperymentować na zbiorze uzyskanych informacji. Tworzyć określone konstrukcje zbudowane wyłącznie na podstawie informacji zgromadzonej w postaci zbioru danych eksperymentalnych (modele sformalizowane) lub bazy wiedzy (modele intuicyjne).

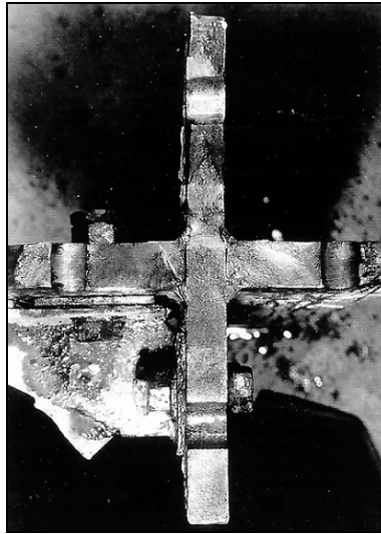
Jak zawsze w takich przypadkach, ogólna teoria nie może opierać się na procesach czy też zjawiskach rzeczywistych, ale wyłącznie na odpowiednich modelach tych procesów lub zjawisk. Tylko w taki sposób może się ona pozbyć mimowolnego subiektywizmu wywołanego dodatkowymi czynnikami wpływającymi przypadkowo na rejestrowany obraz procesu lub zjawiska.

2. Zmęczeniowe aspekty degradacji maszyn

Na resztkową, zmęczeniową trwałość obiektu — a więc na pozostały w nim zasób możliwości eksploatacyjnych — składają się trwałość zmęczeniowa inicjacyjna i trwałość zmęczeniowa wzrostu. Z punktu widzenia oceny stopnia degradacji zmęczeniowej konstrukcji koniecznością staje się określenie zakresu wyczerpania wspomnianego zasobu, bądź też — bardziej interesującej i cenionej przez eksploatatora — trwałości zmęczeniowej resztkowej będącej różnicą pomiędzy trwałością całkowitą a aktualnie osiągniętym poziomem wyczerpania jej zasobu (rys. 1).

Jedną z istotnych trudności przy dokonywaniu aktualnej oceny stanu technicznego maszyny i przewidywaniu jej przydatności do dalszej bezpiecznej pracy jest problem ograniczonej liczby danych o obiekcie będących do dyspozycji w momencie dokonywania tej oceny. W szczególności dotyczy to danych eksploatacyjnych z przeszłości obiektu, które należy w tej sytuacji rozsądnie odtworzyć. Zmęczeniowe zmiany degradacyjne w obiektach mechanicznych są z natury swojej zmianami wolnozmiennymi. Przy prawidłowo prowadzonej eksploatacji i w miarę bezbłędnej konstrukcji istotne wartości tych zmian obserwować można dopiero po upływie znacznego czasu, najlepiej porównując obserwacje prowadzone w różnych przedziałach całkowitego czasu „życia” maszyny. W tym rozumieniu zmęczeniowy proces degradacji maszyn jest procesem przedziałami quasi-statycznym, tzn. nie obserwuje się istotnych zmian zmęczeniowych podczas badań krótkotrwałych, zmiany takie widoczne są dopiero podczas badań długoterminowych. Rozsądnie oraz wygodnie jest w tej

sytuacji poszukiwać dla niego stosunkowo prostych modeli matematycznych, tj. modeli wymagających niezbyt wielkiej liczby parametrów. Dlatego praktycznie w zagadnieniach teorii degradacji można mówić nie tyle o identyfikacji procesu degradacji, co raczej o jego aproksymacji. Umożliwia to konstruowanie modeli będących najlepszym przybliżeniem badanego procesu, najlepszym jakie można uzyskać w oparciu o dostępne dane. W zmęczeniowym procesie degradacji powinny to być modele o parametrach stałych lub bardzo wolno zmieniających się. Tym bardziej, że modele takiego typu mogą być również przydatne przy rozpatrywaniu innych degradacyjnych procesów zużycia.



Rys. 1. Przełom zmęczeniowy cięgna stałego koparki SRs-2400

3. Starzenie się tworzywa konstrukcyjnego

Jednym z podstawowych zagadnień teorii degradacji konstrukcji są problemy oceny wpływu czasu na procesy zachodzące wewnątrz tworzywa konstrukcyjnego. Są to samorzutnie zachodzące procesy — takie jak starzenie się materiału czy korozja — obniżające pierwotną wytrzymałość tego tworzywa, a tym samym obniżające potencjał użytkowy długotrwałe eksploatowanego obiektu. Przez proces starzenia tworzywa konstrukcyjnego rozumie się zmiany jego mikrostruktury w czasie długotrwałej eksploatacji maszyny. Zmiany te są wynikiem wpływów wewnętrznych (samoistne procesy fizykochemiczne) oraz obciążenia zewnętrznego działającego na obiekt. Obniżają one oczywiście własności wytrzymałościowe materiału wyjściowego. Oceną wpływów fizykochemicznych zajmuje się inżynieria materiałowa. Analizie poddawane są próbki materiału pobrane z ważnych węzłów konstrukcyjnych. W przypadku maszyn odkrywkowych — dla których podstawowe tworzywo konstrukcyjne stanowią określone gatunki stali — badaniom można poddać próbki materia-

lu pobrane z obiektów eksploatowanych od 15 do 35 lat. Po zabiegu normalizowania — odpowiadającym przywróceniu własności stanu wyjściowego materiału w początkowych warunkach eksploatacji obiektu — można uzyskać trzeci punkt charakterystyczny na krzywej degradacji tego tworzywa. Kolejna operacja, polegająca na sztucznym postarzeniu materiału, odpowiadającemu warunkom jego maksymalnego zestarzenia się i maksymalnemu obniżeniu własności mechanicznych spowodowanych tym starzeniem, dostarcza następnych danych. I to jest ewentualny czwarty punkt charakterystyczny na krzywej degradacji tworzywa konstrukcyjnego w funkcji czasu. Trzeba przyznać obiektywnie, że jest to już dosyć spory zbiór informacji — i to informacji nie wymagających zbyt kosztownych i długotrwałych badań. Teoria prognozowania stanów przyszłych, będąca — co tu ukrywać — podstawową nauką w ogólnej teorii degradacji konstrukcji, potrafi wykorzystywać taki zbiór danych.

Opisane tu procesy „kształtowania” materiału wyjściowego są co prawda procesami sztucznymi, ale w każdym przypadku powtarzalnymi. Dlatego bez względu na uzyskaną wartość nominalną wyniki identycznie prowadzonych badań gwarantują ich całkowitą porównywalność. Tym bardziej że, w badaniach wykorzystuje się najnowocześniejsze techniki badań mikrostruktury materiału.

Nieco inaczej wygląda sprawa wpływu środowiska na utratę własności mechanicznych materiału konstrukcyjnego. Jest to zagadnienie ogólnie pojętej korozji materiału. Środowisko bowiem wpływa nie tylko na rodzaj i charakter korozji, ale i na szybkość jej zachodzenia. Co prawda fizykochemiczne badania składu chemicznego produktów korozji powstałych w warunkach eksploatacji umożliwiają na ogół prawidłowy dobór zabezpieczeń antykorozyjnych, ale pozostaje otwarta sprawa korozji naprężeniowej. Teoria degradacji może się tu posłużyć dobrze opracowanymi metodami badań przyśpieszonych skracających czas korodowania próbek i umożliwiających kontrolę przebiegu procesów korozyjnych oraz odtworzenie przybliżonego profilogramu powierzchni skorodowanej. Analiza struktur dyslokacyjnych obserwowanych na cienkich foliach pobranych ze stref podpowierzchniowych próbek modelowo skorodowanych oraz poddanych znanemu widmu obciążeń umożliwia wiarygodną ocenę wpływu procesów korozyjnych na ważne własności mechaniczne materiału. Oczywiście sprawą jest bowiem to, że równoległe z badaniami metaloznawczymi prowadzone powinny być również badania własności mechanicznych. Oprócz określania powszechnie stosowanych statycznych własności wytrzymałościowych oraz odporności na udarność istotne są badania własności zmęczeniowych; i to w szerokim zakresie amplitud widma obciążeń obiektu. W przypadku maszyn roboczych pracujących na otwartym terenie muszą one również uwzględniać wpływ obniżonych temperatur występujących w porze zimowej. Istnieją już oryginalne, polskie metodyki dokładnego określania wielkości charakteryzujących zmęczenie. Bazują one głównie na eksperymentalnie wyznaczonej energii odkształcenia — zwanej powszechnie energią histerezy — i to w szerokim zakresie obciążeń. Konieczne jest przy tym prowadzenie równoczesnego pomiaru innych wielkości charakteryzujących proces zmęczenia, takich jak np. odkształcenie plastyczne, odkształcenie sprężyste czy wreszcie kąt przesunięcia fazowego pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. Metodyka takich badań przewiduje możliwość numerycznej syntezy dowolnego cyklu wymuszenia, w tym również obciążeń losowych, co oznacza jej podatność na badania symulacyjne.

Kolejnym procesem wpływającym na przyspieszenie degradacji jest ogólnie pojęta korozja. Czynniki wpływające na jej przebieg wywierają zróżnicowany wpływ na jej inicjowanie i szybkość. Wyluczając te czynniki, na które konstruktorzy maszyn nie mają realnego wpływu, tj. wilgotność i zanieczyszczenia środowiska, zawsze pojawiają się dodatkowe zagrożenia przyspieszające procesy korozji atmosferycznej. W maszynach roboczych są to np. zanieczyszczenia stałe osadzające się na metalowej konstrukcji.

Ponadto do czynników tych zaliczyć można:

- rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych węzłów,
- rodzaje i liczbę gatunków materiałów konstrukcyjnych,
- zagrożenia wynikające z stosowania połączeń spawanych i nitowanych,
- zagrożenia związane ze stanem naprężeń w konstrukcji wynikającym z rozkładu obciążeń zewnętrznych,
- stan struktury materiałów wynikający z obróbki cieplnej z wyłączeniem zmiennych struktur połączeń spawanych,
- zagrożenia wynikające z korozji galwanicznej.

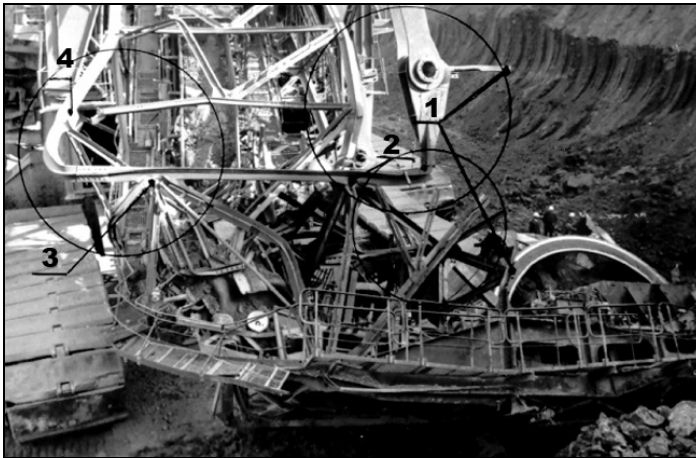
4. Dynamiczne parametry wektora obciążenia

Z przyczyn zarówno poznawczych, jak i utylitarnych można obserwować wiele różnych wielkości fizycznych. Mogą to być wielkości pomiarowo niezależne, tzn. prawie nierozmyte, czyli o prawie zerowych kowariancjach, lub wielkości pomiarowo zależne, tzn. rozmyte. Posiadają one określoną dynamikę, a więc poddają się rutynowemu przetwarzaniu w dziedzinach czasu, częstotliwości i amplitud. W miarę potrzeb dla każdej sytuacji pomiarowej można zaprojektować odpowiednią strukturę zbioru przetworników pomiarowych o określonych właściwościach. W przypadku maszyn odkrywkowych są to najczęściej przetworniki drgań, przemieszczeń lub odkształceń. Niekiedy są to również przetworniki pomiaru natężenia hałasu, światła lub temperatury. Posiadają z reguły bardzo dużą rozdzielczość i niezawodność oraz odporność na warunki zewnętrzne. A jednak w długoterminowym procesie badawczym uzyskane obserwacje obiektu mogą być znacznie rozmyte. W decydującym stopniu zależy to od społeczności prowadzącej badania (interpretacja rezultatów), ale także od wartości informatycznych przetwarzanych przez te przetworniki (niewłaściwa konfiguracja torów obserwacyjnych). Dlatego prowadząc długoterminowe obserwacje procesu degradacji, należy pamiętać, że z uwagi na konieczność statystycznej obróbki ogromnego zbioru rezultatów uzyskiwanych w badaniach długoterminowych oraz na odpowiednią weryfikację stawianych hipotez właściwsze do oceny jakości obserwacji wydają się być wielkości pomiarowo niezależne. W przypadku maszyn roboczych są to najczęściej wielkości wektorowe o ściśle ustalonym kierunku działania wywołane wektorem obciążenia zewnętrznego (momenty zginające lub skręcające, siły wzdłużne lub poprzeczne itp.) (rys. 2), a możliwe do zaobserwowania poprzez odpowiednią konfigurację tensometrycznych torów

pomiarowych. Porównywanie ich sprowadza się w takim przypadku do porównywania ich modułów. Sytuacja pomiarowa jest tu klarowna i jednoznaczna, a wnioskowanie o zjawisku fizycznym proste. Podobnie jest z organizacją akwizycji i przetwarzania danych dla parametrów pomiarowo niezależnych.

Jest ona stosunkowo nieskomplikowana i wykorzystuje znane algorytmy:

- kwantyfikowania zbioru danych wzdłuż osi czasu,
- porządkowania wartości skwantowanych przekroczeń amplitud dla potrzeb odpowiedniej hipotezy zmęczeniowej,
- porządkowania zbioru wartości skwantowanych oraz obliczenia jego wartości średniej i wariancji,
- podziału zbiorów na szereg rozłącznych przedziałów klasowych,
- obliczania podstawowych statystyk w poszczególnych klasach, tzn. średniej ważonej, wariancji, współczynnika zmienności, asymetrii, ekscesu,
- estymacji uzyskanego histogramu matematycznym modelem statystycznym (rozkładem prawdopodobieństwa),
- weryfikacji hipotezy o przyjętym, modelowym rozkładzie statystycznym — najlepiej testami nieparametrycznymi, niewymagającymi założeń o normalności rozkładu.



Rys. 2. Złamany wysięgnik koparki SRs-1200 po uderzeniu w kamień

5. Proces pęknięcia — defektoskopia eksploatacyjna

Podstawowymi wadami eksploatacyjnymi w maszynach górnictwa odkrywkowego są pęknięcia powstające w wyniku zmęczenia materiału. Ogniska złomu, z których rozwijają się pęknięcia, znajdują się z reguły na powierzchniach elementów, w miejscach lokalnych

spiętrzeń naprężeń lub różnego rodzaju wad powierzchniowych i podpowierzchniowych (rys. 3). W niektórych przypadkach aktywnym zarodkiem pęknięcia może stać się wada wewnętrzna. Podczas eksploatacji elementy mogą zmieniać swoje wymiary wskutek ubytków korozyjnych lub erozyjnych. Pomiary grubości są więc istotnym parametrem informacji pozwalającym na prawidłowe prognozowanie stanu technicznego urządzeń.

Specyfika badań eksploatacyjnych oraz warunki ich przeprowadzania (silnie zabrudzone i skorodowane powierzchnie) wymagają stosowania dwóch nieniszczących metod badań:

- 1) magnetyczno-proszkowej do wykrywania wad powierzchniowych,
- 2) ultradźwiękowej do wykrywania wad wewnętrznych oraz oceny ubytków korozyjnych i erozyjnych.

Metody te zapewniają optymalną wykrywalność wad przy stosunkowo małym nakładzie prac na przygotowanie badań. Inne metody badań nieniszczących są stosowane w sytuacjach specjalnych, gdy koszty i czas badań są nieistotne w stosunku do wagi technicznych aspektów spodziewanych wyników.

Badania magnetyczno-proszkowe pozwalają na wykrycie w materiałach ferromagnetycznych szczelinowych wad powierzchniowych i podpowierzchniowych typu pęknięcia o szerokości rzędu 1 mikrometra. Wady uwidaczniane są w miejscu występowania na obiekcie. Wybór odpowiedniej metody magnesowania zależy od wielu czynników, takich jak: zakładana wykrywalność wad, wielkość i kształt badanego elementu, własności magnetyczne kontrolowanego materiału oraz przewidywana wielkość i rozmieszczenie wad. Na podstawie defektogramów proszkowych możemy określić długość wykrytych wad. Badania ultradźwiękowe przeprowadza się zgodnie z procedurą uwzględniającą specyfikę badanego elementu i stosowanej aparatury.



Rys. 3. Wadliwie wykonane spoiny dźwigara koparki KWK-1500s

Dobrze wyszkoleni operatorzy badań ultradźwiękowych, niezależnie od zastosowanego typu aparatury, mogą prowadzić kontrolę z wystarczającą dokładnością, dostarczając informacji do prawidłowego diagnozowania stanu elementu oraz budowy wektora parametrów degradacji ustroju nośnego. Poza tym pozwala to uniknąć sytuacji niekontrolowanego rozwoju wad do rozmiarów krytycznych grożących powstaniem stanu katastrofalnego.

6. Symptomy termiczne w ocenie degradacji maszyn

Termin termografia określa metodę detekcji, akwizycji i wizualizacji temperatury powierzchni obiektów na podstawie pomiaru intensywności emitowanego przez nie promieniowania elektromagnetycznego. Większość emitowanej w ten sposób energii cieplnej przypada na promieniowanie podczerwone, przy czym dla potrzeb termowizji wykorzystuje się jedynie wąski jej zakres. Energię tę można zatem traktować jako jedno ze źródeł informacji diagnostycznych, oczywiście po przetworzeniu jej za pomocą kamery termowizyjnej na określony zbiór cech wyjściowych, odbiorcą których może być człowiek lub system kontrolny.

Promieniowanie podczerwone emitowane przez obiekt i dochodzące do obiektywu kamery termowizyjnej można podzielić na trzy grupy:

- 1) promieniowanie, które jest funkcją emisyjności obiektu i jego temperatury;
- 2) promieniowanie odbite od badanego obiektu, ale pochodzące z otoczenia o znanej temperaturze; ta część promieniowania jest funkcją współczynnika odbicia powierzchni badanego obiektu i temperatury otoczenia;
- 3) promieniowanie przechodzące przez badany obiekt i emitowane przez jego tło; w większości technicznie ważnych przypadków może ono być pominięte.

Summaryczne promieniowanie trafiające do kamery termowizyjnej, padając na detektor fotonów wykonany z krzemku platyny generuje sygnał elektryczny. Wychodzące z kamery sygnały elektryczne są proporcjonalne do natężenia promieniowania podczerwonego emitowanego przez poszczególne punkty badanego obiektu. Aby uzyskać termogram w postaci izoterm do kamery termowizyjnej posiadającej zakodowaną w wewnętrznym programie krzywą kalibracji, należy podać współczynnik emisyjności badanego obiektu, temperaturę otoczenia, wilgotność względną oraz odległość obiektu od kamery.

Badania diagnostyczne obiektów technicznych można — w zależności od potrzeb — podzielić na trzy rodzaje:

- 1) diagnostykę termiczną wielu jednakowych elementów pracujących w zbliżonych warunkach; podwyższone temperatury świadczą zwykle o ich pogorszonym stanie technicznym (łożyska krażników w przenośnikach taśmowych);
- 2) badanie zmian pola temperaturowego powierzchni tego samego elementu w czasie trwania krótkotrwałego procesu technologicznego celem określenia jego prawidłowości (lokalizacja i ocena ilościowa przyczyn zmienności stanu cieplnego);

- 3) analizę zmian pola temperaturowego tego samego elementu w długim czasie jego eksploatacji celem określenia stopnia jego degradacji (ocena stopnia zużycia naroży czerpaków koparek kołowych).

Przykładem zastosowania diagnostyki termograficznej jest m.in. pomiar rozkładu temperatur w trakcie pracy przenośnika taśmowego. Można go wykorzystać do oceny stanu technicznego łożysk w krażnikach taśmociągów. Praca krażników z uszkodzonymi lub nadmiernie zużytymi i źle smarowanymi zespołami łożyskowymi objawia się wzrostem temperatury łożysk oraz piasty i płaszcz krażnika. Badania prowadzone w polskich kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego wykazały, że temperatura łożysk w krażnikach o dobrym stanie technicznym wzrasta względem temperatury otoczenia o około 10°C. Ewentualne różnice w temperaturze węzłów łożyskowych na trasie przenośnika wskazują na występowanie różnic w warunkach pracy krażników. Krażniki, których temperatura węzłów łożyskowych przewyższa temperaturę otoczenia o 20°C, wykazują się zwiększonymi oporami ruchu. Wczesne wykrycie i wyeliminowanie wadliwych krażników przyczynia się do zmniejszenia energochłonności transportu i zapobiega groźniejszym awariom taśmociągów, zwłaszcza pożarom.

7. Prognozowanie czasu bezpiecznej eksploatacji

Ocena nośności konstrukcji maszyn i ich obciążeń zewnętrznych dokonana w fazie projektowania nie pokrywa się na ogół z nośnością i rozkładem obciążeń uzyskanych w momencie ich wytworzenia, a ponadto ulega dalszym zmianom w procesie użytkowania tych maszyn. Przyczyną jest redystrybucja naprężeń wewnętrznych, w wyniku której naprężenia te od pewnego momentu nie rosną proporcjonalnie do obciążeń. Redystrybucja ta zachodzi na skutek powolnych dystorsji wymiarów geometrycznych ustroju nośnego, jego gwałtownych odkształceń plastycznych, deformacji nadkrytycznych, zarysowań i pęknięć, korozji międzykrystalicznej, a także reologicznej utraty wyjściowych własności tworzywa konstrukcyjnego. Wszystkie te czynniki wpływające na obniżenie nośności konstrukcji w czasie jej użytkowania stanowią właśnie przedmiot rozważań rozwijającej się teorii degradacji konstrukcji. Jeżeli ma to być teoria naukowa, to jej zadaniem powinno być wyjaśnianie wszystkich prawidłowości występujących w mechanicznych systemach empirycznych w oparciu o logicznie spójne modelowe systemy abstrakcyjne zbudowane z praw fizycznych i teorii zaakceptowanych przez naukę, a także zgodnych z nagromadzoną wiedzą eksperymentalną. Wszelkie zdania i osądy wypowiedziane na gruncie naukowo sformułowanej teorii degradacji — o ile zostanie ona kiedyś tak sformułowana — muszą tworzyć system zdań identycznych ze zbiorem swych konsekwencji. Muszą tworzyć spójny system przyczynowo-skutkowy. Dziedziną tak abstrakcyjnie rozumianej teorii degradacji będzie abstrakcyjny system zbiorów zdarzeń i zdań istotnych dla tej teorii. Muszą to być niewątpliwie zbiory i zdania opisujące wpływ obciążenia zewnętrznego obiektu, jego sposobu użytkowania oraz stanu wyjściowego wyłączenia tworzywa konstrukcyjnego na zmniejszanie się jego ogólnie

pojętej trwałości. A całość służyć powinna autentycznej sztuce tworzenia nowych i trwałych — jeżeli zajdzie taka potrzeba — obiektów inżynierskich. Celem takiej nowoczesnej syntezy tych obiektów — w sensie teorii ich późniejszej degradacji — powinno być m.in. określenie:

- możliwości osiągnięcia przez elementy i podzespoły tego obiektu — w określonych warunkach jego użytkowania — poziomu granicznego wskazującego na wyczerpanie się zasobów możliwości dalszej pracy;
- czasu pracy obiektu do wystąpienia tego momentu, tzn. ustalenia najbardziej prawdopodobnego okresu prawidłowej, bezawaryjnej pracy urządzenia.

Wymagane są do takiej syntezy dane o charakterze i możliwościach maksymalnych wartości wymuszeń zewnętrznych, działających na poszczególne podzespoły. Dla maszyn roboczych, dla których losowo zmienne jest również środowisko zewnętrzne, oddziałujące stochastycznie na te wymuszenia, dane o ich charakterze są wprost konieczne. Nie ulega wątpliwości, że najwięcej informacji zawierają eksperymentalnie określone rozkłady prawdopodobieństwa parametrów modelu obiektu i sygnałów wejściowych i wyjściowych, opisujących proces eksploatacji maszyny. Można je z powodzeniem estymować dla w pełni określonego modelu lub uzupełniać w przypadku modelu niepełnego. Ponadto techniki statystycznego wnioskowania stosowane obecnie do rozwiązywania wielu problemów potrafią operować na niepewnych, niepełnych i nieprecyzyjnych informacjach.

Ta niepewność i niekompletność informacji o parametrach obiektu lub procesu jego użytkowania występuje szczególnie jaskrawo w maszynach roboczych przeznaczonych do prac ziemnych. Dotychczasowy program badawczy tych maszyn oparty na pewnych tradycyjnych hipotezach przestał spełniać swoją rolę, przestał być postępowy. Jego potencjał teoretyczny przestał się rozwijać, jego atrakcyjność naukowa i dydaktyczna znacznie zmalała. W jego miejsce należy zatem zaproponować nowy program badawczy pozwalający stawiać nowe hipotezy lepiej opisujące istniejącą rzeczywistość. Wzorce wnioskowania w tym nowym ujęciu muszą być siłą rzeczy oparte na teoriach uwzględniających pojęcie miary. Jedną z takich możliwości jest skorzystanie z wzorców umożliwiających wnioskowanie statystyczne, drugą stwarza teoria zbiorów rozmytych. Wszystko wskazuje na to, że w obszarze tych właśnie maszyn teoria degradacji konstrukcji posłuży się tymi właśnie sposobami wnioskowania.

LITERATURA

- [1] *Augustynowicz J., Dudek D., Dudek K.*: Długoterminowe bierne badania diagnostyczne maszyn odkrywkowych. Kongres Diagnostyki Technicznej KDT'96, Gdańsk 1996
- [2] *Augustynowicz J., Dudek D., Sozański L.*: Metodyka oceny stopnia degradacji konstrukcji maszyn roboczych. [W:] Zeszyty Problemowe PTBNiDT SIMP. Badania nieniszczące, nr 6, Warszawa 2001
- [3] *Dudek D.*: Elementy dynamiki maszyn górnictwa odkrywkowego. Akwizycja sygnałów, analiza układów. Oficyna Wyd. Polit. Wrocławskiej, Wrocław 1994
- [4] *Dudek D.*: Wybrane zagadnienia teorii degradacji konstrukcji maszyn roboczych. [W:] XXI Zimowa Szkoła Niezawodności „Kształtowanie i obliczanie niezawodności obiektów technicznych w procesie ich projektowania”, Szczyrk 1993

- [5] *Dudek D.*: Degradacja maszyn roboczych. Teoria czy sztuka? *Problemy Maszyn Roboczych*, nr 7, 1996
- [6] *Dudek D., Dudek K., Sozański L., Wiewiórko B.*: Charakterystyczne pęknięcia konstrukcji nośnej wieloczerpakowych ładowarek kołowych typu ŁWK-100. [W:] III Konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz Degradacja Maszyn”, Wrocław – Szklarska Poręba 1998
- [7] *Dudek D., Pękalska L., Pękalski G.*: Materiałowe aspekty degradacji maszyn podstawowych. [W:] II Konwersatorium „Bezpieczeństwo oraz Degradacja Maszyn”, Wrocław – Szklarska Poręba 1996
- [8] *Dudek K., Figiel A., Komar J.*: Ocena możliwości zastosowania termowizji do diagnozowania stopnia zużycia czerpaków koparek kołowych. [W:] XII Konferencja Naukowa „Problemy rozwoju maszyn roboczych”, Zakopane 1999
- [9] *Sozański L., Pelc W.*: Badania nieniszczące się w kontroli maszyn podstawowych kopalń odkrywkowych. *Górnictwo Odkrywkowe*, r. 29, nr 3, 1987