

Jerzy OKRAJNI  
Alicja BALIN

**SYMULACYJNE METODY BADAŃ MATERIAŁÓW  
NA ELEMENTY URZĄDZEŃ EKSPLOATOWANYCH W WARUNKACH  
ODDZIAŁYWANIA ZMIENNYCH OBCIĄŻEŃ I PODWYŻSZONYCH TEMPERATUR**

**Streszczenie.** Opracowanie zawiera analizę warunków pracy młynów pierścieniowo-kulowych do przemiału węgla z punktu widzenia trwałości elementów układu mielącego. Określono przyczyny niszczenia kul, pierścienia miażdżącego i pierścienia dociskowego młynów. Zaproponowano metody oceny własności materiałów na wymienione elementy zespołu mielącego. Proponowane metody dają możliwość symulacji procesów fizycznych związanych z mechanizmami niszczenia.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano celowość zastosowania w szerszym zakresie symulacyjnych metod badania materiałów w zagadnieniach doboru cech materiałowych elementów urządzeń pracujących w warunkach oddziaływania zmiennych obciążeń i podwyższonych temperatur.

## 1. Wstęp

Konieczność zapewnienia niezawodności urządzeń energetycznych skierowała w ostatnich latach zainteresowanie wielu ośrodków badawczych na podstawowe i poznawcze problemy trwałości. Prowadzone prace obejmują analizę warunków niszczenia obiektów poddanych złożonym oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym, badania materiałów przy zastosowaniu metod symulujących procesy niszczenia, jak również dotyczą wybranych zagadnień z zakresu metodyki oceny trwałości obiektów. Cechą wyróżniającą warunki eksploatacji urządzeń energetycznych spośród innych obiektów jest dominujące znaczenie oddziaływania temperatury i jej wpływu na własności i zachowanie się tworzyw.

Połączenie oddziaływania zazwyczaj zmiennej w czasie temperatury z obciążeniami mechanicznymi, korozją i erozją sprawia, że podstawowe własności mechaniczne nie dają dostatecznych informacji na temat zachowania się materiału podczas eksploatacji i nie zapewniają możliwości jego racjonalnego doboru na elementy urządzeń pracujących w energetyce. Pojawia się potrzeba szczegółowej analizy warunków niszczenia urządzeń oraz opracowania stosownych dla tych warunków metod badania materiałów.

W pracy poddano analizie procesy niszczenia elementów młynów pierścieniowo-kulowych, dążąc jednocześnie do wykazania celowości zastosowania w szerszym zakresie symulacyjnych metod badania materiałów w zagadnieniach

doboru cech materiałowych elementów urządzeń pracujących w energetyce.

Różne warunki eksploatacji poszczególnych młynów pierścieniowo-kulowych pracujących w krajowych elektrowniach powodują zróżnicowanie ich trwałości, która w zależności od rodzaju młynów i lokalnych warunków pracy waha się w granicach od 5 tys. do 20 tys. godzin [1-6]. Za miarę trwałości przyjęto w danym przypadku okres pracy pomiędzy generalnymi remontami, podczas których wymieniane są elementy układu mielącego. Trwałość ta zdeterminowana jest zarówno własnościami węgla, jak również jakością wykonania elementów młyna, a także jakością i sprawnością techniczną elementów współpracujących z młynem, w tym urządzeń, których zadaniem jest separacja elementów metalowych znajdujących się w węglu. Znaczny rozrzut czasu bezawaryjnej pracy młynów związany może być również z rodzajem i jakością materiałów stosowanych na elementy układu mielącego. O ile w literaturze znaczną uwagę poświęcono zagadnieniom zużycia ściernego elementów tego układu, to brak jest prac na temat innych mechanizmów niszczenia, a w szczególności pęknięcia wywołanego obciążeniami mechanicznymi i uderzeniami cieplnymi.

## 2. Warunki pracy młynów pierścieniowo-kulowych

Podstawowym czynnikiem determinującym warunki eksploatacji młynów pierścieniowo-kulowych jest rodzaj mieliwa. Jednakże nawet w przypadku tego samego mieliwa należy wziąć pod uwagę zróżnicowanie jego własności. Dotyczy to w szczególności jakości węgla spalonego w poszczególnych elektrowniach w kraju. Dane uzyskane od użytkowników młynów wykazują, że wilgotność węgla może zmieniać się w zakresie od 5% do 25%, jego wartość opałowa wynosi od 16 kJ/kg do 35 kJ/kg, podatność przemiałowa przyjmuje wartości od 50<sup>o</sup>H do 105<sup>o</sup>H. Często w tej samej elektrowni spalane są różne gatunki węgla [1-5].

Temperatura pracy układu mielącego waha się w zakresie od 100<sup>o</sup>C do 500<sup>o</sup>C. Pomiarzy wykazały wartości temperatury przed młynem od 190<sup>o</sup>C do 370<sup>o</sup>C, jest to temperatura gorących spalin lub powietrza. Temperatura przed odsiewaczem jest zazwyczaj wyższa i przyjmuje wartości z przedziału od 100<sup>o</sup>C do 500<sup>o</sup>C [1-5].

Kule dociskane są do pierścienia miażdżącego siłą 2200-5000 daN każda [1-6]. W przypadku oddziaływania przeciętnych związanych z obecnością węgla części metalowych siły te mogą jednakże znacznie przekraczać podany zakres.

Podczas awarii, a zwłaszcza pożaru w młynie, jego elementy narażone są na przegrzanie, a następnie intensywne chłodzenie.

### 3. Przyczyny niszczenia układu mielącego

Elementy układu mielącego narażone są w głównej mierze na zużycie ścierne, którego mechanizmy stanowią przedmiot licznych prac badawczych ujmających to zagadnienie zarówno w aspekcie poznawczym, jak i utylitarnym. W opracowaniu skoncentrowano się w związku z tym na analizie oddziaływania innych mechanizmów niszczenia, których wpływ na trwałość młynów jest również istotny, biorąc zwłaszcza pod uwagę możliwość występowania przeciążeń, pożarów w młynach oraz spalania węgla o własnościach różnych od założonych przez projektantów tych urządzeń.

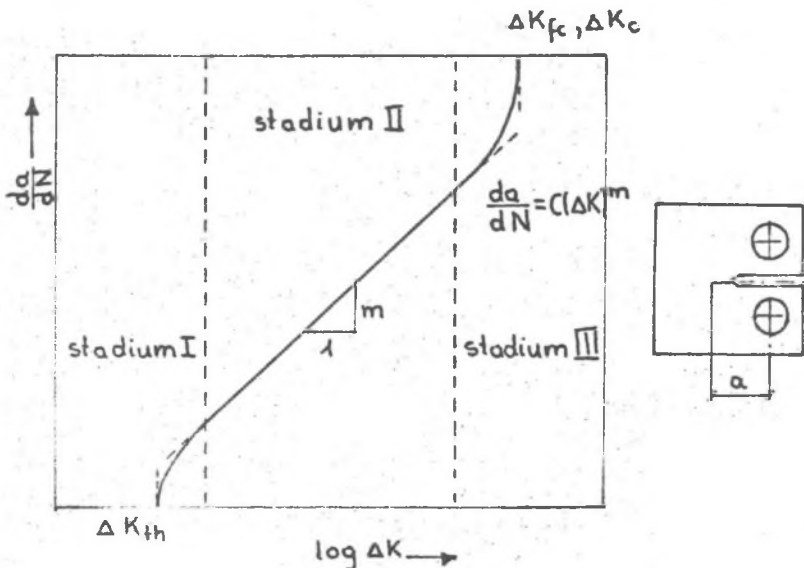
Kule młynów pierścieniowo-kulowych poddane są w warunkach normalnej eksploatacji obciążeniom mechanicznym wynikającym z oddziaływania układu sprężyn na pierścień dociskowy. Siły wywołane wstępnym ugięciem sprężyn są zbyt małe, aby mogły spowodować obserwowane podczas eksploatacji pęknięcia kul. Istotną rolę pełnią w tym przypadku oddziaływania związane z obecnością w węglu części metalowych i kamieni. Ich przedostanie się do młyna wywołuje udarowe obciążenia kul, które mogą być wielokrotnie powtarzane, jeżeli elementy te nie będą usuwane z młyna w sposób ciągły. Obciążenie kul ma charakter powierzchniowy, liniowy lub punktowy w zależności od rodzaju oddziaływania i stopnia wyeksploatowania elementów układu mielącego. W przypadku kuli i pierścienia miążdżącego oddziaływanie odbywa się poprzez warstwę mielonego węgla i rozłożone jest powierzchniowo. Jedynie obecne w węglu części niepalne mogą spowodować udarowe obciążenia o charakterze hertzowskim. Liniowy rozkład ma oddziaływanie pomiędzy kulą i pierścieniem dociskowym. Obciążenie to rozłożone jest wzdłuż linii styku kuli z pierścieniem, której długość wzrasta w miarę wycierania się pierścienia. Wycieranie pierścienia dociskowego odbywa się równocześnie ze zużywaniem się kul. Długość linii styku ma w danym przypadku istotne znaczenie z uwagi na równomierne zużywanie się kul obserwowane zwłaszcza w odniesieniu do wąskich pierścieni miążdzących.

Dodatkowo podczas awarii młynów mogą występować dynamiczne oddziaływania pękniętych kul lub obciążenia cieplne spowodowane pożarami.

### 4. Metody oceny własności materiału

W odniesieniu do materiałów o podwyższonej wytrzymałości, odznaczających się korzystnym zespołem własności wytrzymałościowych i plastycznych, istotnego znaczenia nabiera zagadnienie przechodzenia tych materiałów w stan kruchy, charakteryzujący się podatnością do nagłego pęknięcia bez uprzedniego makroodkształcenia plastycznego. Występowanie tego zjawiska uwarunkowane jest oddziaływaniem wielu czynników związanych zarówno ze składem chemicznym i strukturą materiału, jak również temperaturą oraz charakterem i szybkością działania obciążeń.

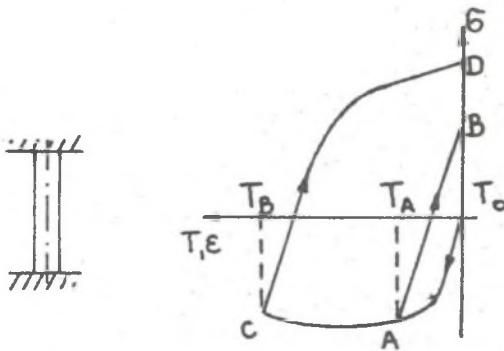
Niszczanie wywołane pękaniem często występuje w przypadku dużych elementów wykonanych z materiałów o względnie dobrych własnościach plastycznych. Zjawisko to związane jest z obecnością szczelin w materiale, które można ogólnie podzielić na dwie grupy. Do pierwszej z nich zalicza się te, których źródłem są zjawiska i zabiegi zachodzące w procesie wytwarzania i przetwarzania tworzyw, do drugiej natomiast szczeliny, które powstają podczas eksploatacji obiektu. Niezależnie od pochodzenia, nieciągłości podczas pracy danego urządzenia mogą się powiększać w wyniku cyklicznie zmiennych oddziaływań lub gwałtownie propagować, jeżeli osiągną krytyczną długość. Ze względów praktycznych ważna jest znajomość prędkości propagacji szczeliny (pęknięcia), pozwala ona bowiem określić czas, po którym szczelina osiągnie długość krytyczną, co jednocześnie determinuje trwałość danego elementu. W odniesieniu do elementów układu miążącego szczeliny powstają w procesie odlewania, jak również w wyniku udarowego obciążenia mechanicznego lub chłodzenia. Rozwijająca się szczelina może prowadzić do łuszczenia się kuli. Sprzyja temu między innymi charakter rozkładu naprężeń hertzowskich. Poza granicą obszaru trójosiowego ściskania maksymalne naprężenia zastępcze występują pod powierzchnią kuli. Podczas udarowego obciążenia szczeliny istniejące w pierścieniu dociskowym i miążącym mogą spowodować gwałtowne zniszczenie tych elementów.



Rys.1 Wykres zmian prędkości wzrostu pęknięcia zmęczeniowego  $da/dN$  w funkcji współczynnika intensywności naprężeń  $\Delta K$

Miarą odporności elementów układu mielącego na rozwój pęknięć będą charakterystyki prędkości propagacji pęknięcia, określone w warunkach zbliżonych do warunków eksploatacji (rys.1) [7].

Przegrzanie, a następnie udarowe chłodzenie młyna w warunkach jego pożaru wywołuje nierównomierne pole temperatur i naprężeń cieplnych w elementach układu mielącego. Wartości naprężeń zależne są przy tym od szybkości i równomierności chłodzenia. Zachowanie się elementarnej objętości materiału w przypadku takich oddziaływań można zamodelować przy zastosowaniu układu przedstawionego na rys.2, stanowiącego pręt dwustronnie sztywno utwierdzony.



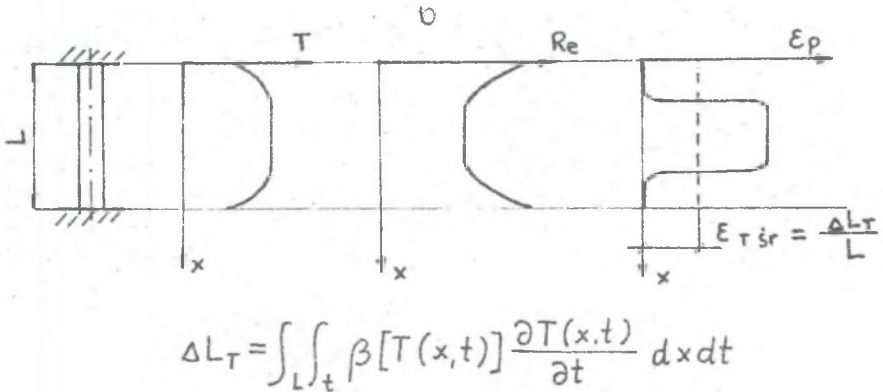
Rys.2 Model Coffina oraz odpowiadająca mu charakterystyka odkształcania

Przebieg procesu odkształcania wywołanego nagrzewaniem i chłodzeniem pręta, przy założeniu równomiernego rozkładu temperatury na jego długość, można scharakteryzować zależnością pomiędzy naprężeniami i temperaturą (rys.2). Przedstawione na rysunku wykresy naprężeń w funkcji temperatury charakteryzują odkształcanie przy ograniczonej swobodzie przemieszczeń. Przypadek taki występuje na przykład w warunkach powierzchniowego udaru cieplnego. W zakresie temperatur  $T_0 - T_A$  wystąpi odkształcanie plastyczne, a następnie plastyczne przystosowanie. W zakresie  $T_0 - T_B$  kolejne zmiany temperatury wywoływać będą odkształcania plastyczne przy grzaniu i chłodzeniu.

Szczególnie istotny dla przebiegu zależności  $\sigma(\epsilon)$  jest wpływ nierównomierności rozkładu temperatury na długości pręta. W związku z nierównomiernością rozkładu temperatury odkształcania plastyczne mają tendencję do lokalizacji w najbardziej nagrzanych obszarach. Jeden z możliwych mechanizmów lokalizacji przedstawiono na rys. 3. Niższa granica plastyczności w obszarze o wyższej temperaturze powoduje, że odkształcanie w środku

analizowanego modelu może być kilka razy większe od średniej wartości  $L_T$ .

Przedstawiony mechanizm, który obserwować można w skali laboratoryjnej dla tak prostego elementu, jakim jest omawiany model, oddziałuje również, jednak w o wiele bardziej złożonej postaci, w konkretnych obiektach. Stanowi to o znacznych trudnościach w ustaleniu ilościowych relacji pomiędzy istotnymi dla procesu niszczenia parametrami.



Rys.3 Ilustracja efektu lokalizacji odkształceń

Nierównomierne chłodzenie pierścieni, które charakteryzują się znacznymi wymiarami i w warunkach normalnej eksploatacji poddane są działaniu podwyższonej temperatury, może wywołać efekt opisany na przykładzie modelu (rys.2). Pomimo zadowalających własności plastycznych materiału oraz niewielkich wartości średnich odkształceń cieplnych może nastąpić wówczas zniszczenie tych elementów w jednym cyklu lub mogą powstać w nich szczeliny, które będą się rozwijać podczas dalszej eksploatacji.

Biorąc pod uwagę kompleks zjawisk decydujących o niszczeniu elementów układu mielącego, należy zwrócić uwagę na fakt, że oprócz dominującego znaczenia odporności na ścieranie, o ich trwałości w znacznym stopniu decyduje również odporność na udary cieplne.

##### 5. Podsumowanie

Powszechnie stosowanym kryterium oceny jakości materiałów na elementy urządzeń energetycznych są obecnie jego podstawowe własności wytrzymałościowe i plastyczne. W szczególnych warunkach brana jest również pod uwagę odporność korozyjna i żaroodporność.

Tablica 1

Zestawienie kryteriów oceny własności materiału w różnych warunkach eksploatacji

Warunki pracy	Własności													
	$R_m$	$R_e$	$R_e^p$	$A_{5Z}$ , $A_{10}$	$K_{CU}$	$K_{Id}$ , $K_{IC}$	$Z_G$	$R_z$	$\beta$	$\alpha$	E	Żaroodporność	$N_a(\Delta E)$ $N_r(\Delta T)$	
Elementy słabo obciążone pracujące w stałych podwyższonych temperaturach														
Elementy silnie obciążone mechanicznie pracujące w warunkach oddziaływania zmiennych temperatur														
Elementy silnie obciążone pracujące w stałych podwyższonych temperaturach														
Elementy poddane cyklicznym mechanicznym przeciążeniom														
Elementy poddane zmęczeniu mechanicznemu														
Duże elementy poddane obciążeniom statycznym														
Elementy poddane obciążeniom uderowym														

Pomimo iż własności te związane są z wieloma innymi cechami materiałów, dobór tworzywa przeprowadzony przy uwzględnieniu jedynie wymienionych powyżej cech może w wielu przypadkach okazać się niewłaściwy. Z uwagi na specyficzne warunki pracy niektórych elementów, własności te mogą okazać się niemiarodajne, a wymagania odnośnie do np. wysokich wytrzymałości na rozciąganie mogą spowodować odrzucenie przez projektanta materiału, dla którego w danych warunkach wytrzymałość ta jest nieistotna lub mało istotna. Dążąc więc do usystematyzowania kryteriów doboru i oceny własności materiału [7-12] w pracy przedstawiono uporządkowane zestawienie tych cech materiałowych, które są istotne w różnych warunkach eksploatacji. Zestawienie to ujęto w formie tablicy 1. Kolumna 1 tablicy 1 zawiera opis warunków eksploatacji. Kolumny kolejne ujmują poszczególne własności materiałów. Zakreskowane prostokąty odpowiadają tym własnościom, które są najistotniejsze w warunkach opisanych w kolumnie 1. W zestawieniu nie ujęto, oczywiście, wszystkich własności. Poszczególne kolumny reprezentują niekiedy grupę cech i charakterystyk materiałowych.

## 6. Wnioski

1. Brak jest w chwili obecnej miarodajnego, obiektywnego źródła danych na temat trwałości młynów kulowych, a w szczególności ich układu mielącego, w zależności od własności węgla i warunków technicznych eksploatacji.
2. Z uwagi na mechanizm niszczenia kul (ścieranie i pęknięcia), dobór materiału na te elementy powinien opierać się na danych odnośnie do ścieralności, twardości i parametrów mechaniki pękania.
3. Istotną rolę w wyłuszczeniu się kul może pełnić propagacja szczeliny zmęczeniowej przy cyklicznym oddziaływaniu naprężeń kontaktowych.
4. Istnieje potrzeba i możliwość doboru parametrów technologicznych procesu produkcji kul, zapewniających korzystne połączenie ścieralności i odporności na pęknięcie.
5. Najbardziej prawdopodobnymi przyczynami pęknięcia pierścienia miążdżącego i dociskowego są udarowe oddziaływania części metalowych zawartych w węglu lub części pękniętej kuli, w przypadku jej zniszczenia, jak również działanie nierównomiernego pola temperatur podczas gwałtownego chłodzenia.
6. W związku ze znacznym prawdopodobieństwem zniszczenia elementów układu mielącego podczas udarowego grzania i chłodzenia młynów kulowych, dobór materiałów na elementy tego układu powinien opierać się między innymi na ocenie ich odporności na udar cieplny przy uwzględnieniu możliwości występowania efektu lokalizacji odkształceń.



Oznaczenia własności

- $R_m$  - wytrzymałość na rozciąganie  
 $R_e$  - granica plastyczności  
 $R'_e$  - cykliczna granica plastyczności  
 $A_5, A_{10}, Z$  - własności plastyczne  
 $K_{CU}$  - udarność  
 $K_{IC}, K_{Id}$  - krytyczne współczynniki intensywności naprężeń przy obciążeniach statycznych i dynamicznych, charakteryzujące odporność na pęknięcie  
 $Z_G$  - wytrzymałość zmęczeniowa  
 $R_z$  - wytrzymałość na pełzanie  
 $\beta$  - współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej  
 $\alpha$  - współczynnik przewodnictwa temperaturowego  
 $E$  - moduł sprężystości  
 $N_z(\Delta \epsilon), N_z(\Delta T)$  - charakterystyki zmęczenia niskocyklicznego

## LITERATURA

- [1] Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla. Materiały pokonferencyjne, Rydzyna 21-24 luty 1984.
- [2] Latos J., Leroch R.: Sprawozdanie z pomiarów młynów typu MKM-33 w Elektrowni Rybnik. Energopomiar, Gliwice, wrzesień 1975.
- [3] Korzuch S.: Przeprowadzenie badań eksploatacyjnych i opracowanie pełnej charakterystyki młyna MKM-33. Etap 6.5. Opracowanie pełnej charakterystyki młyna MKM-33. OBRKiUE, Tarnowskie Góry, sierpień 1975, Oprac. nr 8.837.
- [4] Korzuch S.: Przeprowadzenie badań eksploatacyjnych i opracowanie pełnej charakterystyki młyna MKM-33. Etap 6.6. Badania zużywalności elementów mielących młyna MKM-33. OBRKiUE, Tarnowskie Góry, grudzień 1976, oprac.nr 8.996.
- [5] Gołąbek J.: Pomiary zużycia, wydajności i przemiału młyna MKM-33. Część 1: Młyn z wąskim pierścieniem dociskowym. Oprac. CBKK Tarnowskie Góry, 1983, Nr 8.1583.
- [6] Analiza pracy młynów E-70. Karta pomiarowa zużycia elementów mielących młyna E-70 w Elektrowni Halemba.
- [7] Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT, Warszawa 1985.
- [8] Manson S.S.: Tiempieraturnyje napraženiija i małocykłowaja ustałost Izd. Maszinostrojenije, Moskwa 1974. (tłumaczenie z języka angielskiego).
- [9] Moskwitin W.W.: Cykliczeskije nagruženija elementow konstrukcji. Izd. Nauka, Moskwa 1981.
- [10] Carden A.E.: Thermal Fatigue Evaluation, ASTM. STP 465, 1969, s. 163-188.
- [11] Gusienkow A.P.: Swoistwa diagram cykliczeskowo deformirowanija pri normalnych tiempieraturach. W: Soprotiwlenije deformirowaniju i rozruszeniju pri małom czisle cykłow nagruženija. Izd. Nauka, Moskwa 1967.

- [12] Feltner S.E., Morrow J.D.: Microplastic Strain Hysteresis Energy as a Criterion for Fatigue Fracture. Trans. ASME J. of Basic Engineering, Vol. 83/61, Ser. D. Nr.1, 1961.

**СИМУЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ  
ОБОРУДОВАНИЯ РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАГРУЗОК  
И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Резюме

Работа содержит анализ условий эксплуатации угольных шаровых мельниц с точки зрения долговечности их элементов. Определены причины разрушения элементов. Предложено методы оценки свойств материалов на некоторые элементы мельниц. Предложенные методы делают возможной симуляцию процессов связанных с механизмами разрушения.

На основании представленного анализа обнаружено необходимость применения симуляционных методов исследования материалов в проблемах, в которых определяется свойства материалов на элементах оборудования работающего в условиях влияния изменяющихся нагрузок и повышенных температур.