

Lech Skopiak, Waclaw Stachurski**, Maria Maj**, Jarosław Piekło***

MONITOROWANIE ZMIAN NAPRĘŻEŃ W ŻELIWNYCH TUBINGACH METODĄ ELASTOPTYCZNA

1. Wstęp

Wieloletnia eksploatacja szybów w Zagłębiu Miedziowym spowodowała wyraźne pogorszenie ich wyjściowych parametrów technicznych, w związku z czym zaistniała konieczność szczegółowej analizy powstałych uszkodzeń i oceny możliwości dalszej eksploatacji. Przede wszystkim istotne z punktu widzenia eksploatacji są ubytki korozyjne oraz pęknięcia powodujące nieszczelności obudowy szybu. Ma to miejsce przede wszystkim w obrębie tubingów pikotażowych, gdzie występują duże siły oddziałujące na obudowę.

Bezpieczeństwo szybu związane jest ściśle z wytrzymałością obudowy z segmentów żeliwnych, postępowaniem korozji śrub tubingowych oraz ubytkami ścian tubingów i elementów zabezpieczających szczeliny pikotażowe. Analiza powyższych wielorakich czynników, wpływających na jakość szybu jest trudna do przeprowadzenia, ale najistotniejszym niebezpieczeństwem wydają się szczeliny i pęknięcia. W związku z tym zaistniała konieczność monitorowania zmian naprężeń w wybranych pierścieniach pikotażowych. Niniejsza praca dotyczy metodyki badawczej polegającej na numerycznym określeniu niebezpiecznych obszarów spiętrzenia naprężeń i wykorzystaniu elastooptycznego pomiaru odkształceń do ich okresowej obserwacji.

2. Uzasadnienie wybranej metody badawczej

W dotychczasowej analizie przemieszczeń osi szybu i ewentualnych anomalii kształto-wo-wymiarowych uwzględniano pomiary geodezyjne, polegające na określeniu odstępstw od osiowości, a z kolei odkształcenia pojedynczych elementów badano, wykorzystując metodę nawiercania otworów (punktowy pomiar naprężeń metodą Mathara) [1]. Wymienione

* KGHM „Polkowice-Sieroszowice”, Lubin

** Wydział Odlewnictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

metody nie dostarczały jednak wystarczającej ilości informacji dotyczących stanu naprężeń w poszczególnych pierścieniach szybu. Można było jedynie zaobserwować i analizować skutki w postaci nieszczelności, znacznych przemieszczeń i pęknięć, ponadto metodą Mathara można określać naprężenia punktowo, bez możliwości ponowienia w tym samym miejscu pomiaru. Stąd wynikała konieczność przeprowadzenia analizy metod badawczych pod kątem pomiaru naprężeń na większej powierzchni i wielokrotnie, co w konsekwencji miało umożliwić monitorowanie stanu naprężeń w czasie [2]. Po szczegółowych studiach literaturowych, wielu badaniach i próbach została wybrana metoda elastoptycznej warstwy powierzchniowej jako jedna z najlepszych metod pomiaru naprężeń w tubingach zlokalizowanych w szybach kopalnianych Zagłębia Miedziowego. Stwierdzenie powyższe zostało poprzedzone analizą rozkładu naprężeń w tubingach szybu kopalnianego [3] oraz analizą różnych metod doświadczalnych, które ewentualnie mogłyby być wykorzystane w warunkach kopalni [1]. Zapis efektów elastoptycznych za pomocą fotografii cyfrowej umożliwił równocześnie stosowanie światła białego do analizy naprężeń i odkształceń w świetle spolaryzowanym i rejestrację tych efektów w postaci barwnej, co niewątpliwie przyczyniło się do zwiększenia dokładności pomiaru.

W tym stanie rzeczy zaproponowana w pracy metoda elastoptycznego pomiaru naprężeń okazała się nie tylko konkurencyjną metodą w stosunku do powszechnie stosowanej metody tensometrycznej, ale też umożliwiła śledzenie zmian poziomu naprężeń z upływem czasu, w odniesieniu do reakcji obudowy tubingowej na przemieszczenia górotworu. Dlatego też zaproponowana metodyka badań, sprowadza się do wykonania i naklejania na badane tubingi płytek optycznie czułych z żywicy epoksydowej i okresowej ich obserwacji. W związku z tym, że naklejane płytki epoksydowe wykazują dużą odporność na zmiany klimatyczne i środowiskowe występujące w obudowie szybów (wilgotność, temperatura), nadają się do długotrwałego monitorowania wspomnianych zmian naprężeń.

W pracy [2] szczegółowo przedstawiono metodykę wykonywania i klejenia takich płytek z żywicy epoksydowej oraz sposoby interpretacji wyników zarejestrowanych podczas każdorazowej inspekcji szybu. Zaproponowana metoda jest tym bardziej godna uwagi, że nie wymaga stosowania drogiej aparatury elektronicznej, a efekty wywołane naprężeniami można rejestrować wyłącznie przy użyciu „kieszonkowego” polaryskopu refleksyjnego, stanowiącego zwykły filtr polaryzacyjny z ćwierćwałówką, przez który przechodzi białe światło z lampy górniczej, a które, odbite od powłoki, może być rejestrowane aparatem cyfrowym. System gromadzenia, identyfikacji, analizy itp. wyników dotyczących tych samych punktów w różnych odstępach czasu może być wówczas prawdziwym, źródłowym dokumentem zachodzących zmian, a w szczególnych przypadkach umożliwi przewidywanie pęknięć bądź też monitorowanie pęknięć już istniejących.

3. Obliczenia numeryczne

W przypadku gdy przyrost naprężenia w tubingu w miejscu naklejania powłoki jest na tyle mały, że nie wywołuje dającego się jednoznacznie interpretować efektu elastoptycz-

nego, można wywołać go poprzez nawiercenie otworu w powłoce. Otwór taki powoduje spiętrzenie naprężeń w jego otoczeniu i w ten sposób zwiększa w pewnym sensie „czułość” powłoki elastooptycznej.

Wartość naprężenia σ_y w bezpośrednim sąsiedztwie nieciągłości materiału, o kształcie elipsy i okręgu podają kolejno wzory Inglisa i Kirscha. Naprężenie σ_y dla otworu eliptycznego (rozwiązanie Inglisa) wynosi

$$\sigma_y = \sigma_{nom} \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$2a$ — dłuższa oś elipsy,

$2b$ — krótsza oś elipsy,

σ_{nom} — naprężenie nominalne.

W przypadku otworu kołowego, gdy $a = b$, zależność (1) upraszcza się do postaci (rozwiązanie Kirscha)

$$\sigma_y = 3\sigma_{nom} \quad (2)$$

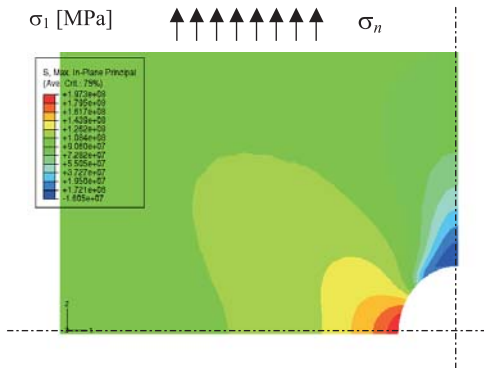
Rozwiązania teoretyczne podane powyżej nie uwzględniają wpływu współczynnika Poissona, stąd też w otoczeniu otworu w paśmie rozciągającym brak strefy ściskanej. W rzeczywistości odkształcenia i związane z nimi naprężenia ściskające w tej strefie zależą od tego współczynnika i mogą zostać wyznaczone w oparciu o obliczenia numeryczne.

Na rysunku 1 przedstawiono obraz naprężenia głównego σ_1 w otoczeniu otworu w paśmie rozciągającym. Naprężenie σ_1 na brzegu otworu odpowiada doświadczalnie wyznaczonemu na podstawie obrazu izochrom naprężeniu, albowiem składowa σ_2 przyjmuje w tym przypadku wartość równą 0 i z poniższej zależności

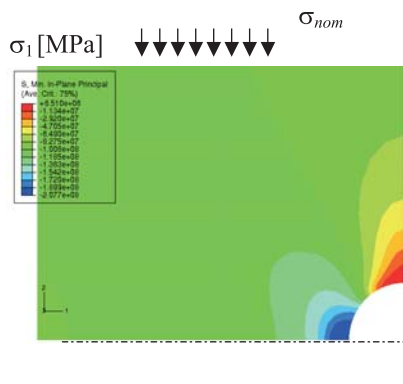
$$\sigma_1 - \sigma_2 = m \cdot K$$

można wprost na podstawie doświadczalnie określonego rzędu izochromy wyznaczyć wartość naprężenia $\sigma_1 = m \cdot K$. Podobnie można rozważać przypadek, gdy pasmo z otworem jest ściskane (rys. 2). Również w przypadku złożonego obciążenia, gdy występują dwie składowe naprężenia nominalnego σ_{nom} , można wyznaczyć wartość naprężenia na brzegu otworu (rys. 3).

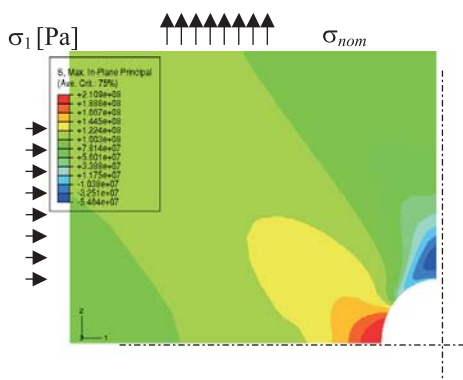
Wyznaczony numerycznie stan naprężenia w otoczeniu otworu różni się nieco od rozwiązania teoretycznego. Wynika to z uwzględnienia w obliczeniach współczynnika Poissona i złożonego stanu naprężenia. Podobne rezultaty daje analiza obrazu elastooptycznego, w wyniku której otrzymujemy zaniżone wartości naprężenia w porównaniu z rozwiązaniem Kirscha.



Rys. 1. Rozkład naprężenia głównego σ_1 w otoczeniu otworu w paśmie rozciągającym



Rys.2. Rozkład naprężenia głównego σ_1 w otoczeniu otworu w paśmie ściskającym



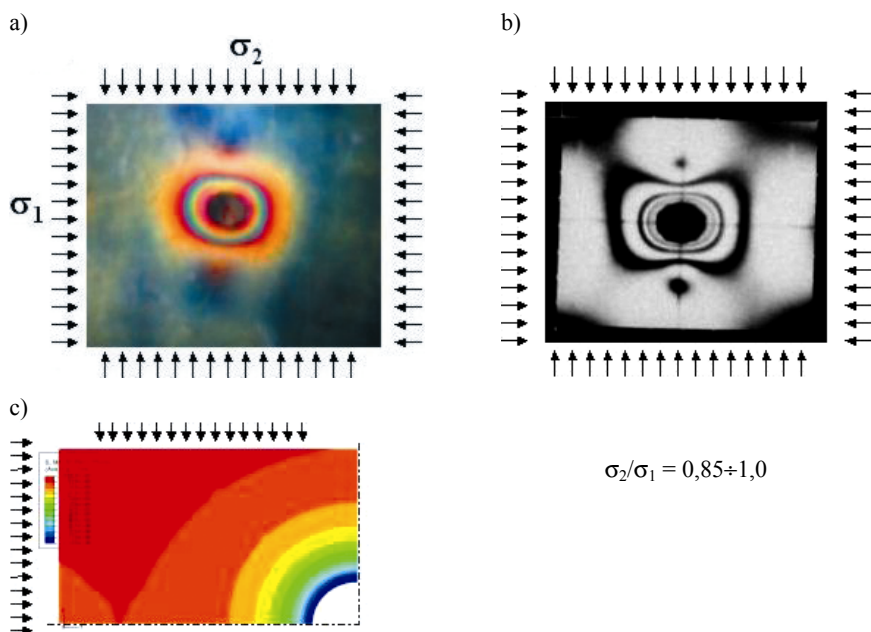
Rys. 3. Rozkład naprężenia głównego σ_1 w otoczeniu otworu w paśmie jednocześnie ściskającym i rozciągającym

3.1. Zestawienie obrazów elastoptycznych z wynikiem obliczeń numerycznych

Stan dwuosioowego ściskania lub dwuosioowego rozciągania zaburzony karbem w postaci otworu kołowego powinien wykazywać współśrodkowe kołowe izochromy reprezentujące stałą różnicę naprężeń głównych w każdym punkcie o jednakowym zabarwieniu. Każda zmiana stosunku $\sigma_2/\sigma_1 \neq 1$ zmienia kształt izochrom z kołowego na podobny do elipsy.

Na rysunku 4 zestawiono trzy stany dwuosioowego ściskania przy $\sigma_2/\sigma_1 = 0,85 \div 1,0$:

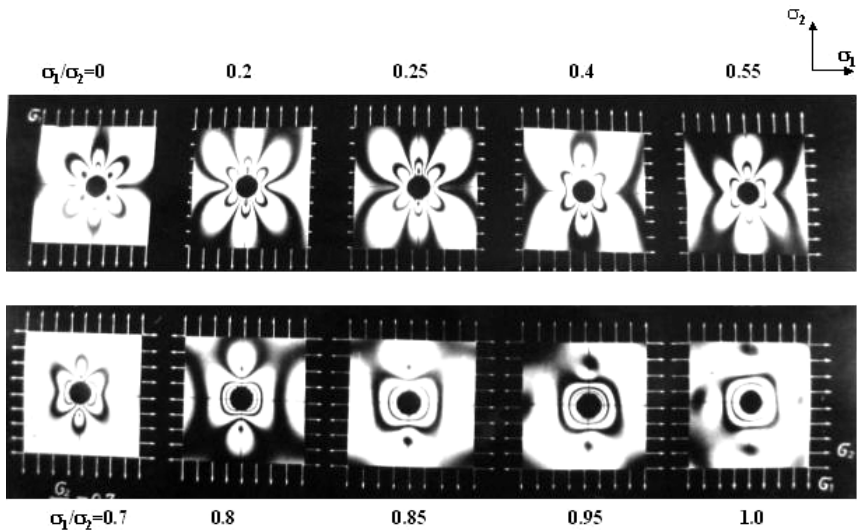
- 1) zarejestrowane na powłoce elastoptycznej w świetle białym (rys. 4a),
- 2) zarejestrowane na przezroczystym modelu elastoptycznym prześwietlanym spolaryzowanym światłem monochromatycznym (rys. 4b),
- 3) wyniki obliczeń numerycznych (rys. 4c).



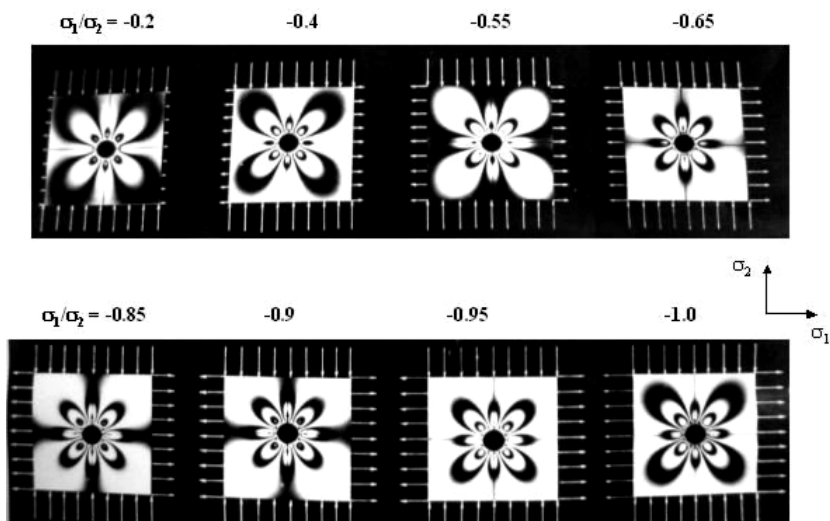
Rys. 4. Porównanie obrazów elastoptycznych i wyników obliczeń numerycznych:
a) pomiar wykonany w szybie; b) wzorec; c) wynik obliczeń numerycznych

Z obrazów można wnioskować, jak wielkość stosunku σ_2/σ_1 wpływa na kształt i rozmieszczenie powstałych izochrom. Niezbędne są do tego celu wzorce takich obrazów, wykonane w świetle białym, gdzie łatwiej odczytać ułamkowe rzędy izochrom w badanym punkcie. Konieczny jest do realizacji tego celu profesjonalny polaryskop.

Na kolejnych rysunkach (rys. 5 i 6) pokazano przykładowy zestaw fotografii dla izochrom w otoczeniu otworu wykonanego w płycie elastoptycznej znajdującej się w płaskim stanie naprężeń.



Rys. 5. Wzorcowe obrazy izochrom w otoczeniu otworu przy dziesięciu różnych wartościach stosunków naprężeń głównych tego samego znaku



Rys. 6. Wzorcowe obrazy izochrom w otoczeniu otworu przy ośmiu różnych wartościach stosunku naprężeń głównych różnych znaków

Obrazy na rysunku 5 dotyczą różnych wartości stosunków σ_2/σ_1 tego samego znaku (w tym przypadku naprężenia rozciągające). Obrazy te zmieniają się znacznie co do kształtu, jednak bardzo trudno ocenić jest rząd izochromy bez głębszej analizy problemu.

Elastoptyka refleksyjna (barwna) przychodzi w tej kwestii z dużą pomocą, gdyż barwę niebieską przypisywaną tylko I rzędowi izochromy łatwo odróżnić od barwy zielonej związanej z wyższymi rzędami.

Bardzo interesujące z punktu widzenia rozkładu naprężeń w tubingach wydają się obrazy na rysunku 6, przedstawiające izochromy w otoczeniu otworu przy równoczesnym działaniu naprężeń głównych ściskających i rozciągających. Uwagi dotyczące zastosowania światła białego do rejestracji izochrom zyskują w tym przypadku jeszcze bardziej.

4. Doświadczalna weryfikacja na modelu elastoptycznym

Wyniki symulacji komputerowej zależą w dużej mierze od przyjętych założeń. Odnosi się to w szczególności do schematów obciążeń, warunków początkowych i brzegowych oraz znajomości danych materiałowych. Jeżeli wyniki obliczeń są zgodne z przewidywanymi co do znaków i rzędów wielkości, wówczas problem staje się łatwy do uściślenia. Jeżeli jednak w trakcie symulacji otrzymuje się niespodziewane wyniki, wówczas okazuje się konieczna budowa modelu fizycznego, który w większości przypadków rozstrzyga i rozwiewa wątpliwości. Model taki całkuje równania różniczkowe rządzące zjawiskiem, których rozwiązań nawet nie znamy

Zbliżony przypadek występuje w obudowie tubingowej, która — ściskana wszechstronnie od zewnątrz — powinna wykazywać ogólnie ściskający stan naprężenia, a jednak w pewnych fragmentach pęka, co przeczy ściskaniu w całej objętości.

W celu wyjaśnienia problemu zastosowano klasyczną metodę elastoptyczną badania modeli przezroczystych — w świetle przechodzącym.

Model fragmentu pikotazowego tubingy wykonano z płyty epoksydowej o grubości 4,2 mm. Jego wielkość dostosowano do wymiarów laboratoryjnego polaryskopu. W świetle spolaryzowanym kołowo na obciążonym w rozmaity sposób modelu obserwowano barwne izochromy, zgodnie z podstawowym prawem elastoptyki, mówiącym, że różnica naprężeń głównych bądź odkształceń głównych jest proporcjonalna do rzędu izochromy m

$$m \cdot K_{\sigma} = \sigma_1 - \sigma_2$$

$$m \cdot K_{\epsilon} = \epsilon_1 - \epsilon_2$$

gdzie:

K — stała modelowa,

m — rząd izochromy,

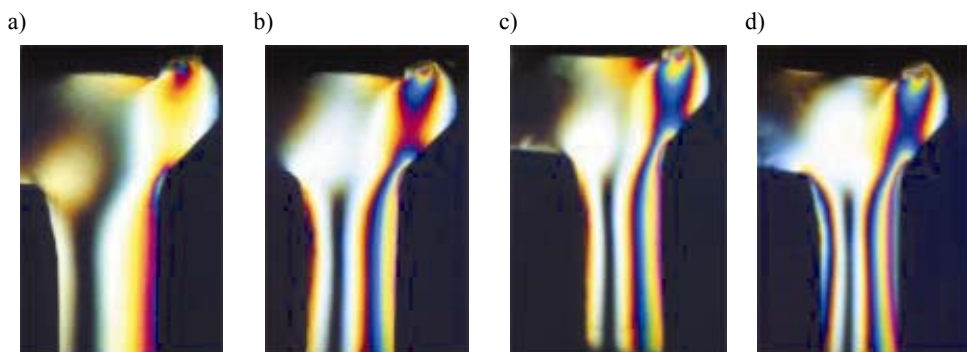
σ_1, σ_2 — naprężenia główne,

ϵ_1, ϵ_2 — odkształcenia główne.

Na nieobciążonej krawędzi modelu, gdzie w płaskim stanie napięcia jedno z naprężeń głównych równe jest zeru, obserwuje się izochromy wywołane naprężeniem stycznym do krawędzi

$$\sigma = m \cdot K \text{ [MPa]}.$$

Na rysunku 7 pokazano przebieg izochrom przy narastającym nacisku na górnym występie, wywołanym przez tubingi przemieszczone poza obręb swego normalnego położenia. Widoczne z lewej strony u góry fotografii ramię nie jest obciążone i nie występują na nim żadne efekty odkształceń (naprężeń). Pionowa część modelu przedstawia fragment przeniesienia obciążeń przez płaszczyznę tubingu. Ten fragment modelu został od dołu utwierdzony i nie mógł się przemieszczać, natomiast obciążony został siłą skupioną na występie u góry modelu.



Rys. 7. Fragment modelu tubingu (dolny pikotazowy) obrazujący rozwój izochrom przy wzrastającym obciążeniu na górnym występie (ramce)

Objaśnienia w tekście

Przypadek „a” (rys. 7a) dotyczy działania niewielkiej siły, która wywołuje jednak ściskanie (strona zewnętrzna) na całej krawędzi ($m = 1$) i niewielkie rozciąganie po przeciwnej stronie wewnętrznej. W rejonie karbu widoczne jest spiętrzenie naprężeń. Zwiększona siła (przypadek „b”, rys. 7b) wywołuje wyraźniejszy efekt elastoptyczny. Obszar ścispany obejmuje rejon, w którym występuje większy gradient, natomiast w karbie rysuje się drugi rząd izochromy ($m = 2$). Od strony wewnętrznej obserwuje się wyraźny obszar naprężeń rozciągających ($m = 1$). Przypadki „c” i „d” (rys. 7c i d) wskazują wyraźnie na pola naprężeń ścisających na zewnątrz i rozciągających — od strony wewnętrznej.

Przedstawione obrazy izochrom wskazują na zginanie płyty (belki) płaszczyzn tubingu w modelu wykonanym z materiału o zbliżonej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. W przypadku żeliwa, gdzie $R_c > 3 - 4 R_m$ odpowiedź ściskanego materiału będzie inna. Obszar obejmujący strefę ściskaną znacznie się zmniejszy kosztem strefy rozciąganej.

5. Wnioski

- 1) Wyniki prezentowanej pracy potwierdzają trafność wyboru metody elastooptycznej do monitorowania zmian naprężeń w tubingach.
- 2) Badania doświadczalne w przypadku złożonego stanu napięcia mogą być uzupełniane obliczeniami numerycznymi.
- 3) Opisana w pracy metodyka badań została sprawdzona w warunkach szybu kopalni miedzi w Polkowicach, wdrożenie jej wymaga okresowej rejestracji obrazów elastooptycznych, stworzenia bazy danych i bieżącej analizy zachodzących zmian.

LITERATURA

- [1] Pomiar naprężeń w segmentach tubingowych pierścieni pikotazowych nr 7 i 8 pikotazu w szybie P-V 0/ZG „Polkowice-Sieroszowice. Centrum Badawczo-Projektowe Miedzi „Cuprum” Sp. z o.o., Wrocław
- [2] *Stachurski W., Siemieniec A., Maj M., Piekło J.*: Badanie naprężeń występujących w obudowie tubingowej szymbów. Kraków, wrzesień 2004. Praca na zlecenie KGHM Polska Miedź S.A. ZG „Polkowice-Sieroszowice”
- [3] *Stachurski W., Siemieniec A., Maj M., Piekło J.*: Badanie naprężeń występujących w obudowie tubingowej szymbów. Praca nr 415/2003 KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakłady Górnicze „Polkowice-Sieroszowice”, 2003
- [4] *Bochenek A.*: Elementy mechaniki pękania. Częstochowa, 1998