

INICJACJA WZROSTU PĘKNIĘĆ W DŁUGOTRWALE EKSPLOATOWANYCH STALACH MOSTOWYCH Z PUNKTU WIDZENIA METOD ENERGETYCZNYCH

Streszczenie

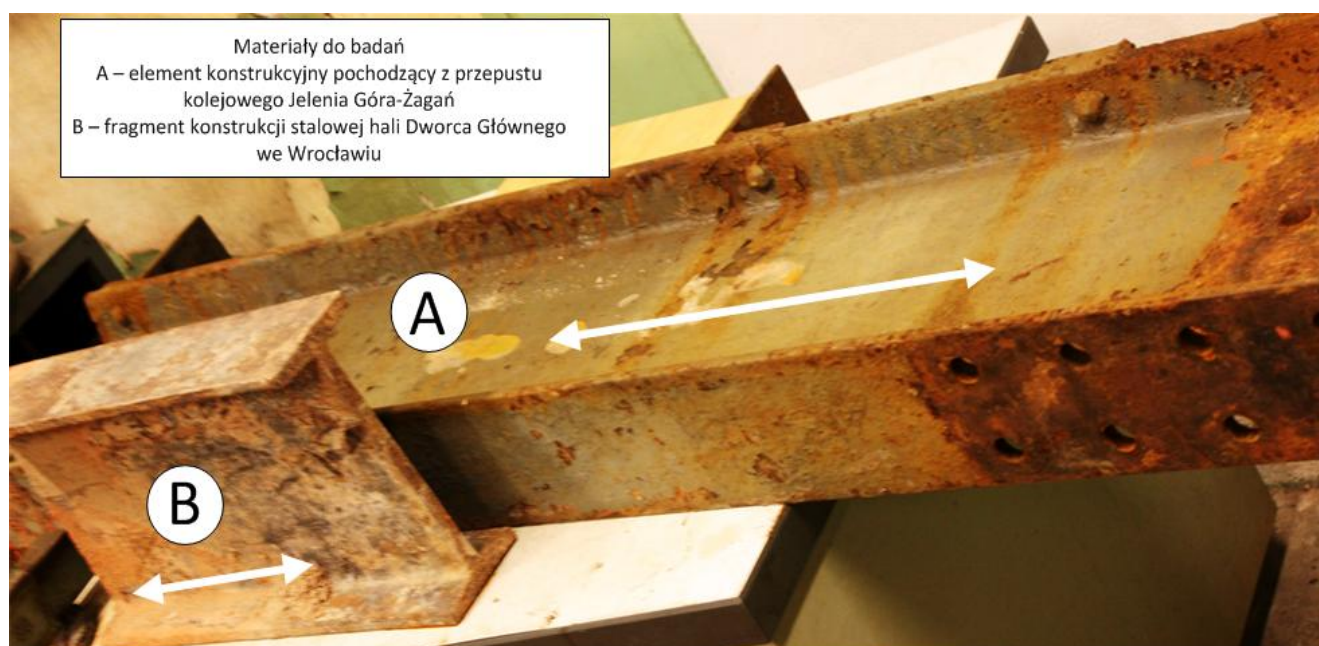
W artykule omówiono zostało zagadnienie odporności na pękanie stalowych elementów konstrukcyjnych obiektów mostowych ze stali zgrzewnych (XIX wiek). Obiektem zainteresowań autorów były fragmenty konstrukcji stalowych hali Dworca Głównego we Wrocławiu (ozn. B) oraz przepustu kolejowego na trasie Jelenia Góra-Żagań – szlak Lwówek Śląski (ozn. A). Dokonano analiz metalograficznych wybranych elementów konstrukcyjnych. W toku przeprowadzonych badań wykazano obecność procesów degradacyjnych tych zabytkowych gatunków stali. Procesy te polegały głównie na wydzieleniach kruchych faz we wnętrzach ziaren ferrytu jak również na ich granicach. Wyznaczono właściwości mechaniczne oraz odporność na pękanie metodą całki J dla próbek pobranych z elementów Dworca Głównego we Wrocławiu. Wykazano, że odporność na pękanie – wyrażona krytyczną wartością całki J – w kierunku walcowania jest znacząco wyższa niż w kierunku poprzecznym do walcowania. Przeprowadzono także symulację komputerową inicjacji wzrostu pęknięcia. Uzyskane na drodze symulacji numerycznych (w środowisku Abaqus) wyniki dobrze korespondują z danymi doświadczalnymi krzywych J - R . Wartym odnotowania jest fakt, że każdorazowo, uzyskane wyniki (na drodze symulacji) wykazują tendencję do „przeszacowania” wartości odporności na pękanie wyrażonej w krytycznych wartościach całek J w stosunku do danych eksperymentalnych. Mimo to, uzyskane wyniki są dalece niższe od wartości krytycznych całek J charakteryzujące współczesne niskowęglowe stale konstrukcyjne (S235JR lub S355JR).

WSTĘP

Zmęczenie i pękanie zmęczeniowe jest jedną z najczęstszych przyczyn awarii i katastrof stalowych konstrukcji obiektów mostowych. W celu oceny momentu niestabilności prowadzone są prace badawcze zmierzające do wyznaczenia podkrytycznego (bezpiecznego) okresu rozwoju pęknięcia. Wykryte w trakcie eksploatacji obiektu pęknięcie (zazwyczaj) propaguje od wartości początkowej do krytycznej – po przekroczeniu której wzrasta z prędkością porów-

nywalną do rozchodzenia się fali dźwiękowej w materiale.

Wartość krytyczna cyklicznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} często utożsamiana jest z wartością statyczną odporności na pękanie K_{Ic} . W przypadku stali konstrukcyjnych (zwłaszcza niskowęglowych) kluczową rolę w procesie pęknięcia i tym samym oszacowania odporności na pękanie odgrywa krytyczna wartość całki $J - J_Q$, bądź jej (techniczna) wartość odpowiadającą arbitralnie przyjętemu momentowi inicjacji pęknięcia o wartości $0.2 \text{ mm} - J_{0.2}$. W niniejszej pracy podjęto się określenia odporności na pękanie w



Rys. 1. Elementy konstrukcyjne pobrane do badań (strzałką zaznaczono kierunek walcowania)

długotrwale eksploatowanych stalach zgrzewnych (pochodzących z przełomu XIX i XX wieku) na podstawie wyników badań eksperymentalnych i na drodze symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W przypadku tych zabytkowych gatunków stali zachodzi uzasadniona naukowo (patrz prace [1], [2]) teza o obecności procesów degradacji mikrostruktur. Procesy te w sposób znaczący powodują pogarszanie ciągliwości materiału. W połączeniu z np. niską temperaturą eksploatacji oraz budową stali zgrzewnych (liczne nieciągłości i wtrącenia niemetaliczne w obecności procesów degradacyjnych) mogą powodować istotny czynnik ryzyka, który powinien być uwzględniony przy ocenie bezpieczeństwa tego typu obiektów.

1. WYNIKI BADAŃ MATERIAŁOWYCH

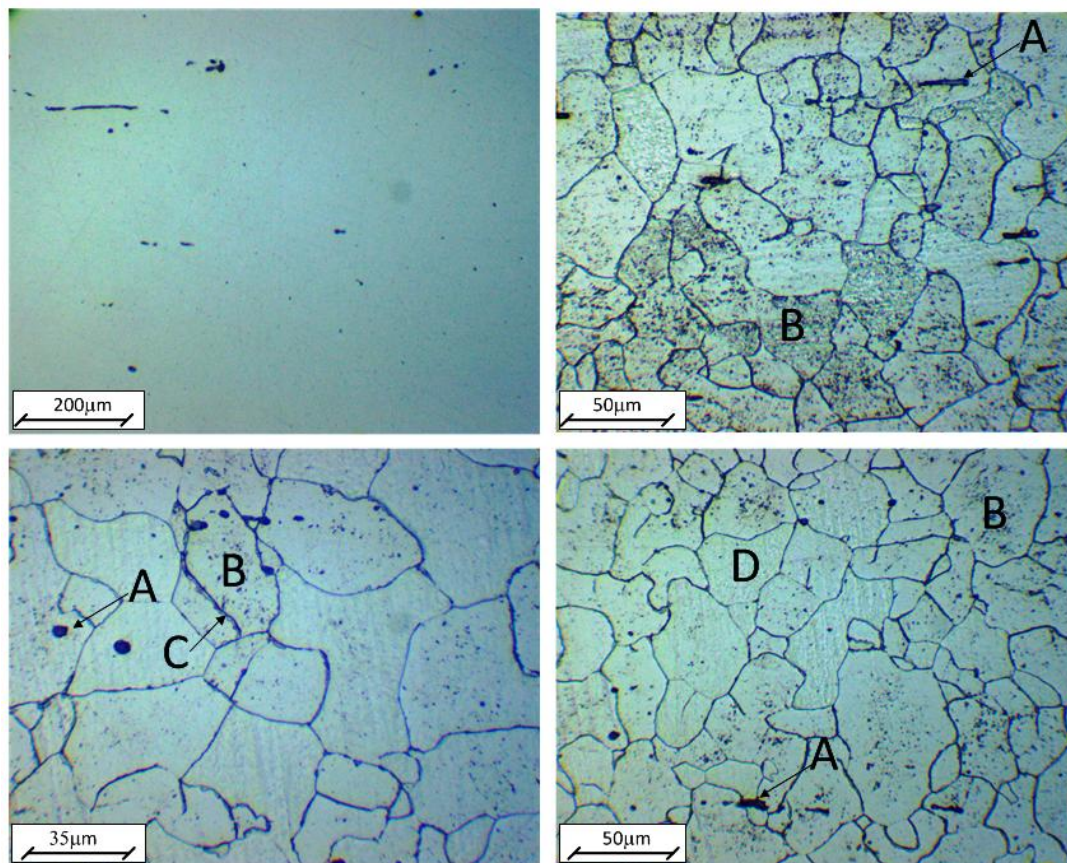
Objektem zainteresowań autorów były fragmenty konstrukcji stalowych hali Dworca Głównego we Wrocławiu (materiał B, dwuteownik I220) oraz przepustu kolejowego zlokalizowanego na trasie Jelenia Góra – Żagań (materiał A, dwuteownik I320). Obiekty te wzniesione zostały na przełomie XIX i XX wieku. Materiał badawczy do badań pozyskano w trakcie prac rewitalizacyjnych i naprawczych.

W celu identyfikacji typu i gatunku materiału przeprowadzono analizy chemiczne. Analizy chemiczne przeprowadzono wykorzystując metodę grawimetryczną. W celu przeprowadzenia tej analizy pobierano reprezentatywną partię wiórów. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 1. Zgodnie z uwagami zawartymi w pracach [1, 4] przeprowadzono pięcio-składnikową analizę chemiczną. Wysoka zawartość fosforu (stal B) wskazuje na przynależność badanych materiałów do grupy stali zgrzewnych. Wniosek ten powinien znaleźć swoje odbicie w badaniach mikrostrukturalnych tych elementów.

Tab.1. Wyniki analiz chemicznych

	%C	%Mn	%Si	%S	%P
A [3]	0.03	0.06	0.03	0.045	0.028
B [3]	0.05	0.13	0.03	0.028	0.29

Na rys. 2. Przedstawiono mikrostrukturę stali zgrzewnej z Dworca Głównego we Wrocławiu (stal B). W stanie nietrawionym mikrostruktura tego materiału charakteryzowała się znaczną ilością wielofazowych wtrąceń niemetalicznych. Po wytrawieniu 3% roztworem HNO_3 ujawniono ferrytyczną mikrostrukturę – odpowiadającą zawartości węgla w stali (rys. 2. Prawy dolny i górny). Zaznaczono markerem (A) wtrącenia niemetaliczne oraz liczne, drobne wydzielenia kruchych faz we wnętrzu ziaren ferrytu (B). Na nieznacznych obszarach dostrzegalne były ziarna ferrytu o prawidłowej budowie – pozbawione degradacyjnych produktów (D). W celu dokonania analizy porównawczej stopnia zdegenerowania mikrostruktury i określenia intensywności procesów degradacyjnych materiał poddano zabiegowi obróbki cieplnej – normalizowania (950°C , 2h, powietrze). W toku prac badawczych teorii degradacji [1] - porównywanie mikrostruktur w stanie poeksploatacyjnym i normalizowanym jest jedynym racjonalnym sposobem oceny stopnia wyeksploatowania mikrostruktur. Na rys. 2. (lewa dolna mikrofotografia) obserwuje się zmniejszoną liczbę wydzielań degradacyjnych (B) i większy udział czystych ziaren ferrytu. Ujawniono także wydzielenia kruchych faz na granicach ziaren (C). W następstwie przeprowadzanych badań metalograficznych z wykorzystaniem metod mikroskopii świetlnej należy uznać materiał ten za mikrostrukturalnie zdegradowany.



Rys. 2. Mikrostruktura stali zgrzewnej (B) z Dworca Głównego we Wrocławiu w stanie poeksploatacyjnym nietrawionym i trawionym 3% HNO_3 (stan poeksploatacyjny i normalizowany – dolna mikrofotografia po lewej stronie – opis mikrostruktur w tekście)

2. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Dla potrzeb oceny odporności na pękanie i przeprowadzenia prac symulacyjnych w środowisku Abaqus przeprowadzono statyczną próbę rozciągania i badania odporności na pękanie z wykorzystaniem całki Rice'a – J jako wielkości krytycznej. Zbiórce wyniki badań wytrzymałościowych przedstawiono w tabeli 2. Wyniki w tabeli 2 (statyczna próba rozciągania i uderność) reprezentują wartości średnie z 5 próbek, zaś w przypadku całek J – wartości średnie z 2 próbek. Z uwagi na stopień wykorzystania materiału do innych prac badawczych (nie publikowanych tutaj) nie było możliwe pozyskanie większej liczby próbek do badań.

Tab.2. Wyniki badań wytrzymałościowych

	Re [MPa]	Rm [MPa]	E [GPa]	J _i [N/mm]	J _{0,2BL} [N/mm]	KCV [J/m ²]
Stal B2 LT	264,8 [3]	372,8 [3]	191,8 [3]	10,8	85,9	36 [3]
Stal zgrzewna A/B TL	223,5 (stal A - kierunek T)	237 (stal A - kierunek T)	183,4 (stal A - kierunek T)	5 (stal B)	29,5 (stal B)	bd

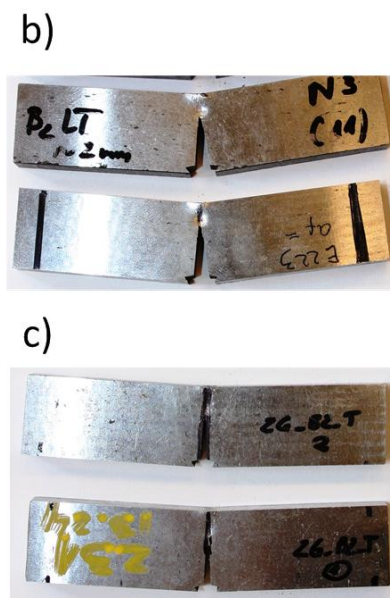
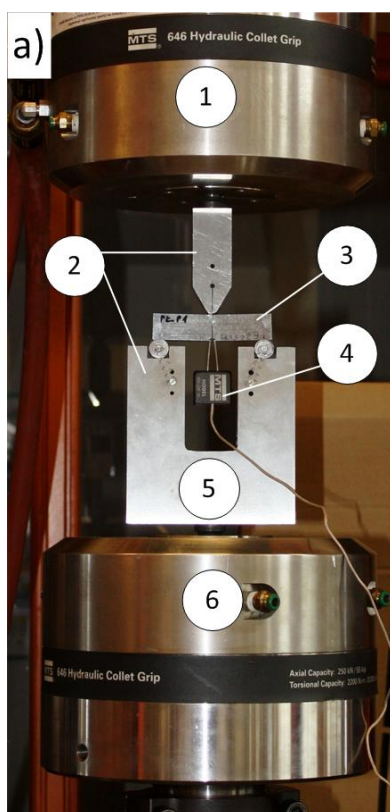
Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS809, zgodnie z normą ASTM E1820-13 na próbkach trójkątno-zginanych typu SEN(B). Wymiary próbki (B = 10mm, W=20mm). We wszystkich próbkach wykonano karb mechaniczny o długości a=10.7-11.5mm oraz pęknięcie zmęczeniowe o długości af=1.8-2.0 mm tak aby stosunek a/W był możliwie jednakowy dla wszystkich materiałów i wynosił ok. 0.65-0.7. Karb został wykonany metodą elektroiskrowego drażenia, a powierzchnie próbki były szlifowane i polerowane w celu umożliwienia obserwacji rozwoju pęknięcia zmęczeniowego za pomocą mikroskopu stereoskopowego

(zakres powiększeń 8-50x). Układ pomiarowy składał się z:

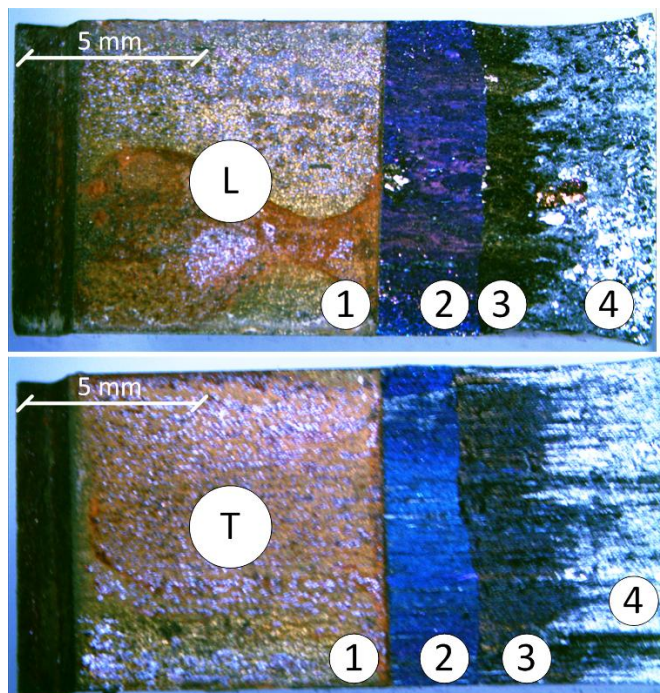
- pulsatora hydraulicznego MTS809 (zakres pomiarowy siły 0÷50kN);
- czujnika rozwarcia pęknięcia - ekstensometru firmy MTS (baza 2.5 mm, zakres 3.5 mm);
- układu optycznego do pomiarów długości szczelin, sprzężonego z kamerą cyfrową do rejestracji obrazu – dokładność pomiaru mm),
- komputera PC.

Na rys. 3a przedstawiono widok rzeczywistego układu pomiarowego wraz ze zdeformowanymi próbkami po badaniach (rys. 3 b i c). W celu dokonania pomiarów długości szczeliny, po przeprowadzonych badaniach, próbki poddano obróbce termicznej – strefa rozciągania zabarwiona została na niebiesko – co dobrze pokazano na rys. 4. Po obróbce termicznej, próbki dołamano i dokonano pomiarów długości szczelin. Charakterystyczne strefy przelomów oznaczono numerami 1-4. Karb mechaniczny, powstały w wyniku elektroiskrowego drażenia oznaczono jako -1, pęknięcie zmęczeniowe – 2, plastyczną strefę rozciąganą w trakcie badania – 3, przelom doraźny – 4. Zgodnie z wymogami normy ASTM E1820-13 długość szczeliny mierzono w 9. Równo rozmieszczonych punktach przekroju wzdłuż grubości próbki. Makroskopowo przelomy wykazują zróżnicowaną budowę spowodowaną znaczną anizotropią właściwości mechanicznych stali zgrzewnych. Potwierdzają to także różnice w odkształceniach próbek (por. rys. 3b i 3c).

Przebiegi krzywych J-R dla badanych materiałów zaprezentowano na rys. 5. Na podstawie analizy ich przebiegów, zgodnie z nomenklaturą [4] w tabeli 2 przedstawiono wartości całek J – J_i , $J_{0,2BL}$.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe a) próbka w trakcie badań; 1- siłomierz (zakres 0-50kN), 2 – układ obciążający, 3- próbka, 4 - ekstensometr, 5 – dolna podpora, 6 – tłok maszyny wytrzymałościowej (dolna szczęką), b) próbki po badaniach – kierunek LT, c) próbki po badaniach - kierunek TL.



Rys. 4. Przykładowe przełomy próbek po badaniach odporności na pękanie w kierunku walcowania (L) i w kierunku prostopadłym (T).

Na podstawie uzyskanych wyników należy wnioskować, że badany materiał, w porównaniu z jego współczesnymi odpowiednikami, odznacza się znacznie niższą wartością krytycznej całki J oraz J_i . Jako przykład można wskazać wartość $J_i=145$ N/mm cechującą stal S235 (źródło: [4]). Ponadto uzyskane wartości są porównywalne z wartościami krytycznymi całek J uzyskanymi w innych ośrodkach dla podobnej klasy materiału – [5] ($J_Q=87$ N/mm dla LT i 58 N/mm

dla TL). W tym przypadku uwagę zwraca znacząco niższa odporność na pękanie stali B w kierunku poprzecznym do walcowania. Ponadto wartości inicjacyjne całek $J - J_i$ są dla tej stali niedopuszczalnie małe – mieszczące się w dolnej granicy uzyskiwanych wyników dla stali zgrzewnej.

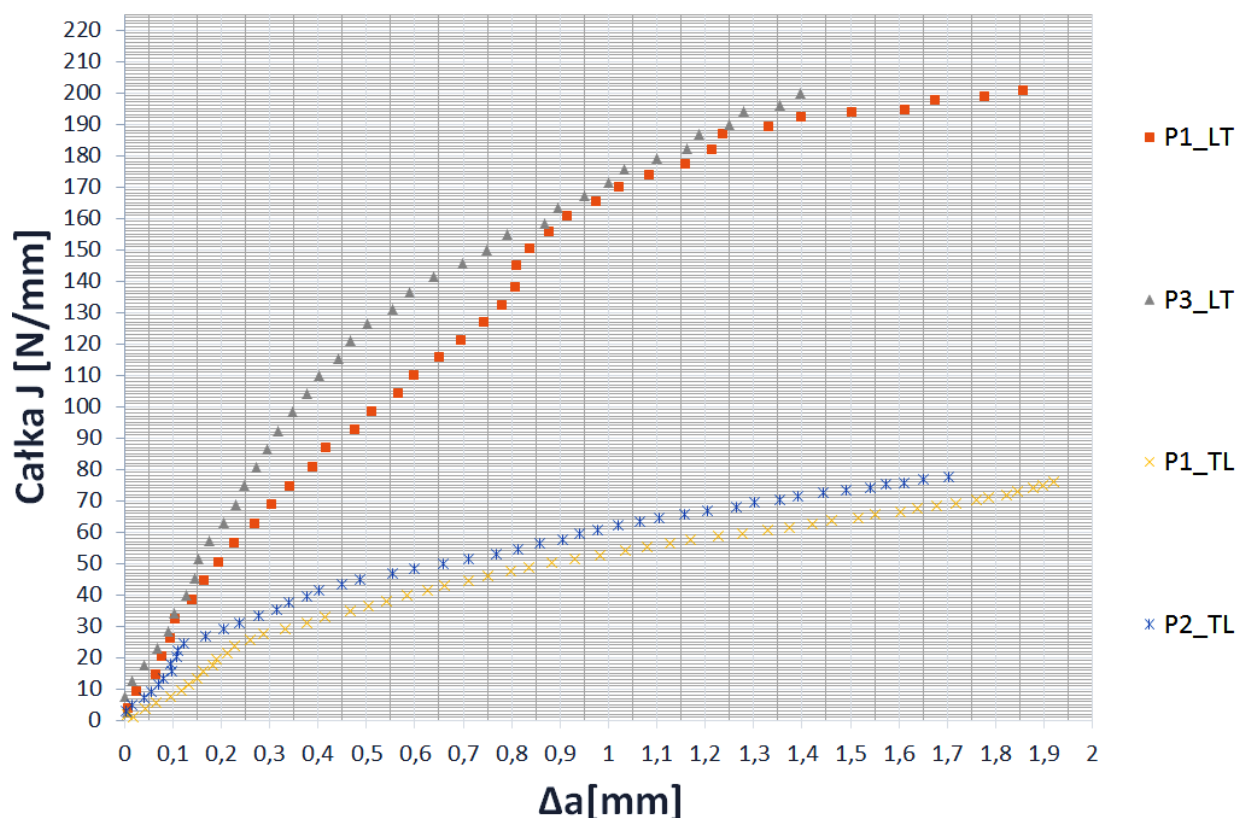
3. ANALIZA NUMERYCZNA BELKI TRÓJPUNKTOWO ZGINANEJ

Metody numeryczne mechaniki pęknięcia stają się coraz bardziej popularne, szczególnie w przypadkach badania propagacji szczeliny przy złożonych stanach naprężeń (na przykład w [6]). W ramach przeprowadzonych badań, wykonano analizę metodą elementów skończonych. Do tego celu skorzystano z komercyjnego pakietu ABAQUS 6.12. Wykonane obliczenia mają charakter porównawczy w odniesieniu do badań eksperymentalnych. Przeprowadzono dwie analizy nieliniowe dla materiału w dwóch prostopadłych kierunkach walcowania.

3.1. Sposób modelowania - warunki brzegowe, modelowanie materiału

Z uwagi na występującą symetrię w belce trójpunktowo zginanej, zamodelowano jedynie połowę postaci geometrycznej badanego elementu. Takie podejście jest korzystne w tym konkretnym przypadku z dwóch powodów:

- opis tego samego problemu, przy podobnej dokładności jest możliwy przy użyciu 2 razy mniejszej liczby elementów, ominięto w ten sposób również konieczność zdefiniowania dodatkowej pary kontaktowej (wyraźne skrócenie czasu obliczeń)
- pozwala łatwą implementację modelu typu „debond” w celu symulacji propagacji szczeliny – stosowne omówienie tego podejścia zostanie przedstawione poniżej



Rys. 5. Przebiegi eksperymentalnych krzywych J-R dla stali zgrzewnej B2

Zbudowany model belki trójpunktowo zginanej został przedstawiony na rysunku 6.

Wálki pracujące jako podpora przesuwna są reprezentowane w symulacji jako powierzchnie analityczne (*analytical surface*) – posiadają one nieskończoną sztywność, zatem nie ulegają odkształceniu. Pomiędzy belką a wálkami istnieje kontakt powierzchniowy. Dolny wálek, pracujący jako podpora, został utwierdzony, natomiast górny ma możliwość translacji wzdłuż osi symetrii. Propagacja szczeliny następuje wzdłuż wcześniej określonego kierunku (zgodnie z linią symetrii). Założenie kierunku propagacji *a priori* jest możliwe, ponieważ kierunek pęknięcia dla belki trójpunktowo zginanej jest dobrze znany (I sposób pęknięcia).

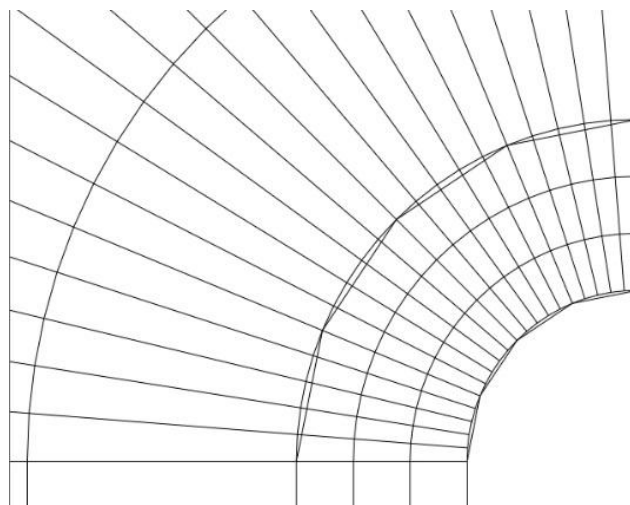
Komentarza wymaga sposób symulacji zjawiska propagacji pęknięcia. Część węzłów (odcinek 4 mm – licząc od wierzchołka szczeliny wzdłuż osi symetrii) jest związana z utwierdzoną powierzchnią analityczną. W momencie, gdy w węźle spełnione jest zadane kryterium propagacji szczeliny, następuje w tym miejscu zerwanie kontaktu belka – powierzchnia analityczna. Główną zaletą takiego podejścia jest brak potrzeby „remeshingu” podczas propagacji, jednakże możliwy jest rozwój pęknięcia w ściśle określonym kierunku. Należy mieć świadomość, że technicznie rzecz ujmując, analizę zniszczenia (opisywaną przez wielkości związane z mechaniką pęknięcia) budujemy w oparciu o narzędzia związane z analizą zagadnień kontaktowych. W przeprowadzonych symulacjach sterowano propagacją szczeliny w zależności od czasu, co wydaje się wystarczające do wyznaczenia krzywej J_R . Pozostałym węzłom znajdującym się na osi symetrii odebrano możliwość translacji prostopadłej do kierunku działania siły (standardowa procedura stosowana podczas badania elementów symetrycznych) [7].

Przebieg obciążeń podczas analizy wyglądał następująco:

- wywołanie wstępnego naprężenia poprzez przesunięcie dociskającego wálka o 0,0001 mm,
- przemieszczenie wálka dociskającego wzdłuż osi symetrii o 0,5 mm (propagacja szczeliny nie jest rozpatrywana),
- przemieszczenie wálka dociskającego o dodatkowe 3,5 mm (możliwa propagacja szczeliny, obliczana jest wartość całki J).

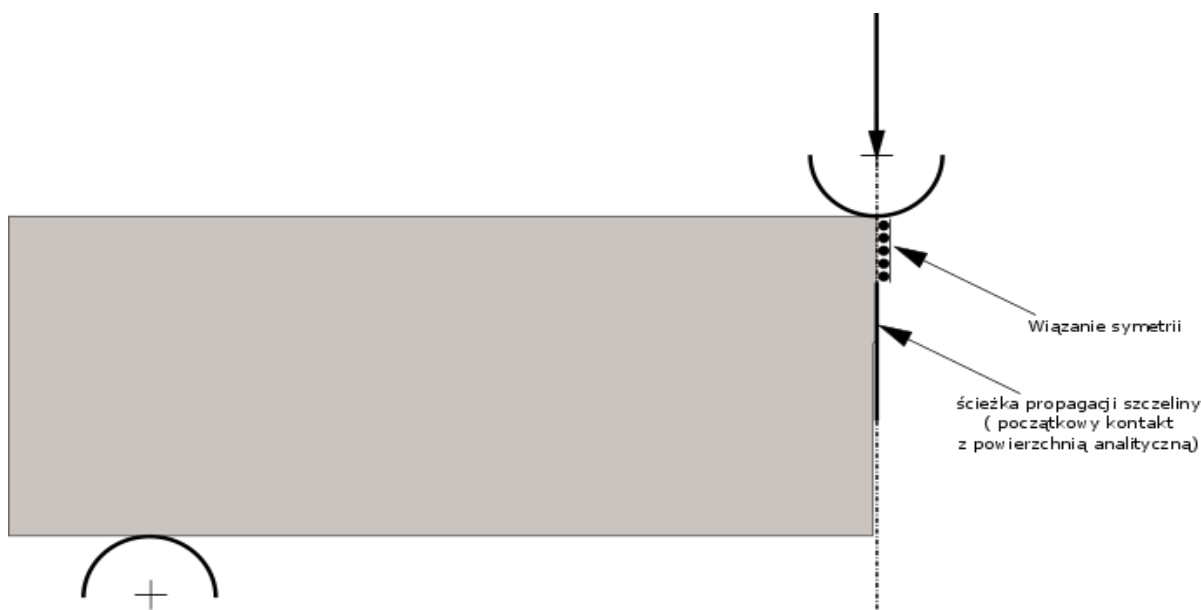
Podczas analiz wykorzystano elementy 2D, czworokątne (CPE4) zakładając płaski stan odkształceń. W pobliżu wierzchołka

szczeliny, ilość elementów została zwiększona w celu uzyskania bardziej dokładnych wyników. Model dyskretny, zbudowany z 1679 elementów, został przedstawiony na **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**

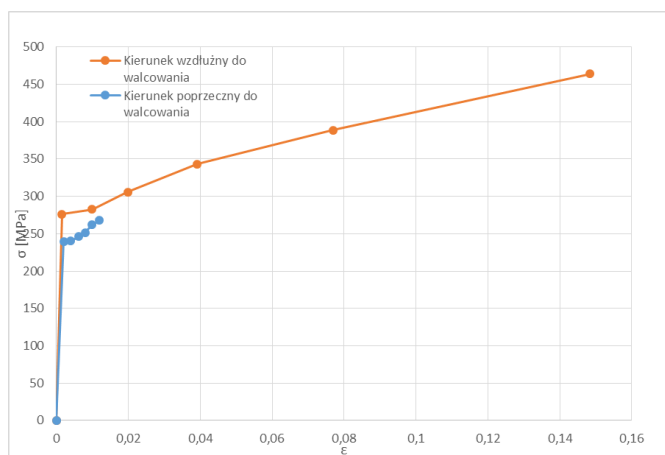


Rys. 7. Zagęszczenie elementów skończonych w otoczeniu wierzchołka pęknięcia (model dyskretny) belki trójpunktowo zginanej.

Materiał został opisany w sposób nieliniowy – możliwe jest płynięcie plastyczne. Zachowanie materiału jest opisane poprzez teorię powierzchni płynięcia Misesa [8]. Należy mieć świadomość istniejących uproszczeń – materiał w pobliżu wierzchołka szczeliny będzie w stanie trójosiowego wyężenia, jednak w ramach naszych symulacji, mający charakter weryfikacyjny w odniesieniu do eksperymentu pomijamy takie rozważania. Aby prawidłowo wprowadzić dane materiałowe do środowiska, każdorazowo należało tworzyć pary wielkości naprężenie – odkształcenie, co zostało uwidocznione w postaci wykresu (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**8). Widoczna jest różnica własności wytrzymałościowych w zależności od kierunku walcowania. Należy zwrócić uwagę iż modelowany materiał jest wolny od wad i niezgodności metalurgicznych – w przeciwieństwie do rzeczywistego materiału.



Rys. 6. Schemat modelu numerycznego przedstawiającego powierzchnie analityczne, oraz istniejące warunki brzegowe (kontakty, obciążenia, wiązania)



Rys. 8. Krzywe naprężenie - odkształcenie dla badanej stali dla dwóch kierunków walcowania.

Do oprogramowania nie można wprowadzić danych pochodzących z maszyny wytrzymałościowej to znaczy w postaci inżynierskiej. Należy je przekształcić na rzeczywiste odkształcenie i naprężenie (*true stress, true strain*). Można to zrobić stosując zależności (1-2).

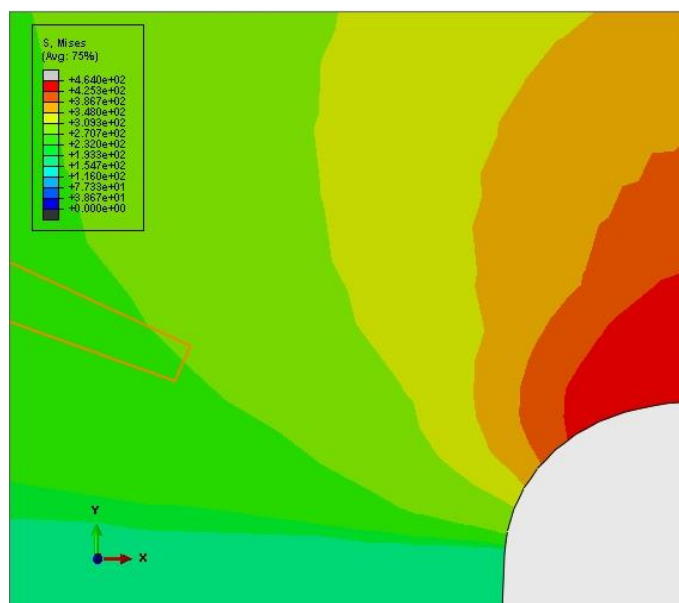
$$\sigma_{tru} = \sigma_{eng}(1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{tru} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (2)$$

Gdzie σ_{tru} oznacza naprężenie rzeczywiste, σ_{eng} naprężenie inżynierskie wyznaczone wprost z pomiarów próbki rozciąganej na maszynie wytrzymałościowej ϵ_{tru} – rzeczywiste odkształcenie, ϵ_{eng} odkształcenie inżynierskie. Wobec braku danych doświadczalnych dla kierunku poprzecznego (stal B) do analiz użyto (z uwagi na zbliżone właściwości, skład chemiczny, okres budowy mostu) danych materiałowych dla stali A.

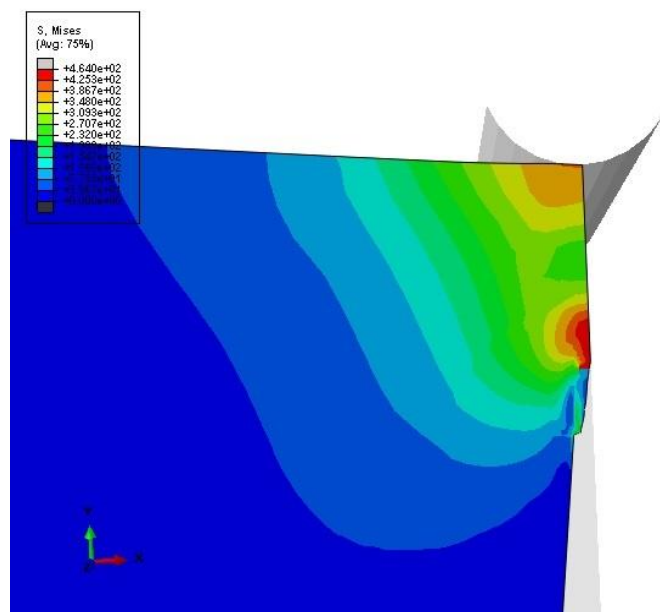
3.2. Wyniki analiz numerycznych

Wyniki analiz są przedstawione zarówno w postaci wstwic naprężeń wg hipotezy Hubera – Misesa, jak również uzyskano krzywe odporności na pęknięcie J_R . Otrzymane rozkłady naprężeń mają prawidłowy charakter w odniesieniu do danych literaturowych.



Rys. 9. Warstwy naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera przed początkiem propagacji pęknięcia

Kalkulacja całki J odbywała się po 20 konturach. W podejściu analitycznym wartość całki J nie jest zależna od wybranego konturu, jednak w metodach numerycznych wartość całki J przyrasta proporcjonalnie do wielkości wybranego konturu. Zmiany wartości są coraz mniejsze im dalszy kontur wybieramy. W praktyce przyjęło się odrzucać wartości pierwszego konturu, obliczając wartość całki J jako średnią arytmetyczną z pozostałych konturów, lub – o ile różnice nie są znaczne – jeden z ostatnich. W analizowanych przypadkach wartość całki J wyznaczono na podstawie 18 konturu [9].



Rys. 10. Warstwy naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera przed podczas propagacji pęknięcia

Wyniki obliczonych drogą numeryczną całek J – J_i oraz $J_{0,2PL}$ zebrano w tabeli 3. Na rys. 11 przedstawiono przebiegi krzywych J-R (uzyskanych przy pomocy metody elementów skończonych) na tle danych empirycznych.

Tab.3. Wyniki badań wytrzymałościowych

	J_i [N/mm] MES	$J_{0,2BL}$ [N/mm] MES	J_i [N/mm]	$J_{0,2BL}$ [N/mm]
Stal B LT	63,5	103	10,8	85,9
Stal zgrzewna B TL	27	53	5	29,5

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że uzyskiwane wyniki dla stanu poeksploatacyjnego (kierunek LT) mieszczą się w zakresie wyników uzyskiwanych na drodze eksperymentalnej – jednak każdorazowo nie są one konserwatywne i mogą prowadzić do przeszacowania odporności na pęknięcie. Natomiast w przypadku analiz prowadzonych dla próbek w kierunku prostopadłym do walcowania obserwuje się podobny przebieg krzywych J-R tylko w zakresie dużych zmian długości szczeliny – co dobrze koresponduje ze znaczącymi różnicami uzyskiwanych całek J dla tego przypadku.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań XIX-wiecznych elementów konstrukcyjnych pochodzących z konstrukcji hali Dworca Głównego we Wrocławiu oraz przepustu kolejowego zlokalizowanego na szlaku Jelenia Góra – Żagań szlak Lwówek Śląski. Wykazano obecność mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych. Wyznaczono podstawowe właściwości mechaniczne na podstawie prostej

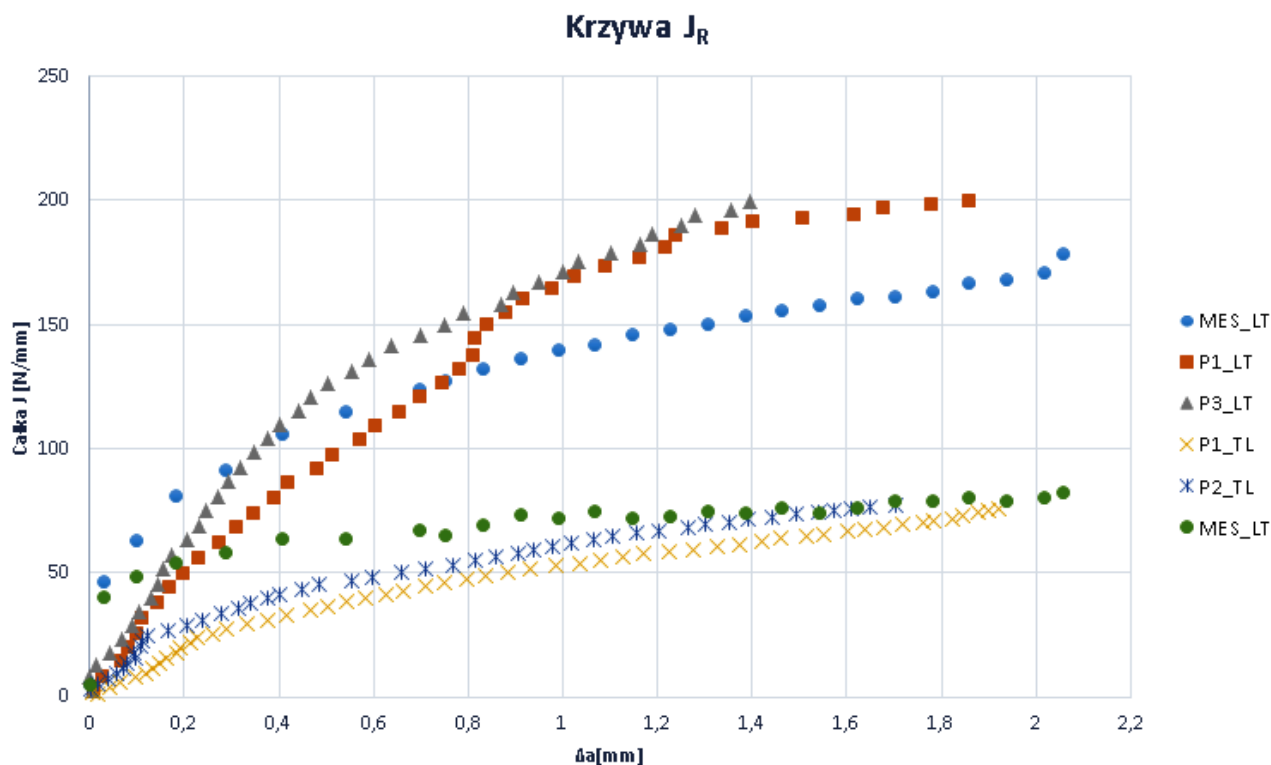
próby jednoosiowego rozciągania. Zaprezentowano wyniki badań odporności na pękanie z wykorzystaniem energetycznego parametru nieliniowej mechaniki pękania – całki J. W części numerycznej – przedstawiono i omówiono metodologię wyznaczania krzywych J-R z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku Abaqus. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz numerycznych można sformułować następujące wnioski:

- badany materiał należy uznać za wyeksploatowany ze względu na obecność i zaawansowanie mikrostrukturalnych procesów degradacyjnych,
- właściwości mechaniczne w kierunku poprzecznym do walcowania nie pozostawiają złudzeń co do kruchej natury badanego materiału,
- wartości całek J jak również przebiegi krzywych J-R sugerują znaczne różnice w zachowaniu się tego materiału w dwóch różnych kierunkach,
- wyniki uzyskane z symulacji numerycznych są znacząco wyższe w obszarze inicjacyjnym,
- w obszarze stabilnego „wzrostu” pękania z uwzględnieniem jego plastycznej natury – model numeryczny generuje wyniki zbliżone do eksperymentalnych.

W ocenie autorów krzywe J-R uzyskiwane w zaprezentowany sposób mogą być dobrym punktem wyjścia do oszacowania orientacyjnych wartości całek J na podstawie danych doświadczalnych ze statycznej próby rozciągania. Wynikające rozbieżności i różnice w uzyskiwanych wynikach należy wiązać z faktem niejednorodności stali zgrzewnych i skomplikowanym mechanizmie inicjacji pękania. Obecność licznych wtrąceń niemetalicznych uruchamia proces pękania w wielu miejscach równocześnie – hipoteza ta wydaje się być uzasadniona na podstawie kompleksowej obserwacji przelomów (nie prezentowanej w tej pracy).

BIBLIOGRAFIA

- 1) Pękalski G., Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów, Raport Instytutowy, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 1999
- 2) Lesiuk G., Szata M., Aspects of structural degradation in steels of old bridges by means of fatigue crack propagation, July 2011, Volume 47, Issue 1, pp 82-88, Materials Science, Springer Verlag
- 3) Lesiuk G., Degradacja mechaniczna i strukturalna XIX-wiecznych stali zgrzewnych, Rozprawa Doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław 2013
- 4) FKM-Guideline “Fracture Mechanics Proof of Strength for Engineering Components”, VDMA Publ., 1st Edition (2001, in German), 2nd Edition (2004, in German and English), 3rd Edition (2005, in German).
- 5) Mytych-Kumańska E., Kossakowski P., Odporność na pękanie starej stali mostowej, Budownictwo i Architektura, 12(1), 2013
- 6) Zafosnik B.; Ulbin M.; Flašker J. “Numerical Analyses Of Mixed Mode Crack Propagation Using Virtual Crack Extension Method” International Design Conference, Dubrovnik, 2002
- 7) Abaqus 6.12 Example Problems, Dassault Systemes, 2012
- 8) Abaqus 6.12 Theory Manual, Dassault Systemes, 2012
- 9) Krishnan A. “Fracture Lecture of Abaqus” Simulia Corp.2014



Rys. 11. Przebiegi krzywych J-R uzyskane dla stali B na drodze eksperymentalnej i numerycznej

THE INITIATION OF A CRACK GROWTH IN LONG-TERM OPERATED BRIDGE STEEL IN TERMS OF THE ENERGY APPROACH

Abstract

The results of tests of nineteenth century structural elements from the "Dworzec Główny" Main Railway Station in Wrocław and the structural elements from the culvert located along the train line Jelenia Góra - Lwówek Śląski are presented. The presence of microstructural degradation processes in each investigated material have been identified. The results of static tensile strength have been also presented. The fracture toughness (based on J integral) results and J-R resistance behavior have been discussed. The methodology for the determination of JR curves using the finite element method in Abaqus environment is presented and discussed in the numerical parts of issue.

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Lesiuk** – Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Grzegorz.Lesiuk@pwr.edu.pl

mgr inż. **Paweł Kucharski** – Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej, Smoluchowskiego 25, 50-370 Wrocław, Pawel.Kucharski@pwr.edu.pl