

**Grzegorz LESIUK\***  
**Józef RABIEGA\*\***  
**Mieczysław SZATA\***

## **PROBLEM KRUCHOŚCI STALI ZGRZEWNYCH W WARUNKACH STRUKTURALNEJ DEGRADACJI – BADANIA STATYCZNE, CYKLICZNE I DYNAMICZNE**

*W pracy przedstawiono wyniki badań stali zgrzewnych pochodzących z XIX-wiecznych stalowych elementów konstrukcyjnych. Zaprezentowano rezultaty badań statycznych po przeszło 130-letnim okresie eksploatacyjnym – statyczną próbę rozciągania, całkę J, a także wyniki badań cyklicznych – rozwój pęknięcia zmęczeniowego oraz dynamicznych – udarność. Wyniki wskazują na znaczący wpływ procesów degradacji mikrostruktur na właściwości eksploatacyjne stali zgrzewnych. Badania prowadzono dla materiału w dwóch stanach, tj. poeksploatacyjnym i normalizowanym. Zgodnie z wytycznymi opracowanymi w ramach teorii degradacji [4] i jej materiałowymi aspektami [8], normalizowanie ma na celu odtworzenie mikrostruktury stali w stanie wyjściowym. Przedstawione w pracy wyniki pozwalają wyciągnąć wnioski dotyczące określenia charakteru i tendencji przyszłych zmian właściwości wytrzymałościowych.*

**Słowa kluczowe:** stal zgrzewna, degradacja, całka J, udarność, kruchość, pęknięcie zmęczeniowe

### **WSTĘP**

Szacuje się (na podstawie danych zawartych w pracy [3]), że w Polsce eksploatowanych jest blisko 45% obiektów infrastruktury kolejowej w wieku powyżej 100 lat. Z drugiej strony zaledwie 3,6% wszystkich obiektów nie przekroczyło swojej „20” użytkowania. Należy zaznaczyć, że konstrukcje stalowe stanowią najliczniejszą grupę – 42% – spośród wszystkich obiektów. Troska o bezpieczeństwo eksploatacyjne takich przepraw staje się, wobec czynników ekonomiczno-infrastrukturalnych, sprawą priorytetową. Uzasadnia tym samym potrzebę właściwej diagnostyki i wiarygodnej analizy stanu takich konstrukcji stalowych – zwłaszcza wtedy, gdy mamy do czynienia

---

\* mgr inż. Grzegorz LESIUK, dr hab. inż. Mieczysław SZATA, prof. nadzw. PWr. - Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej

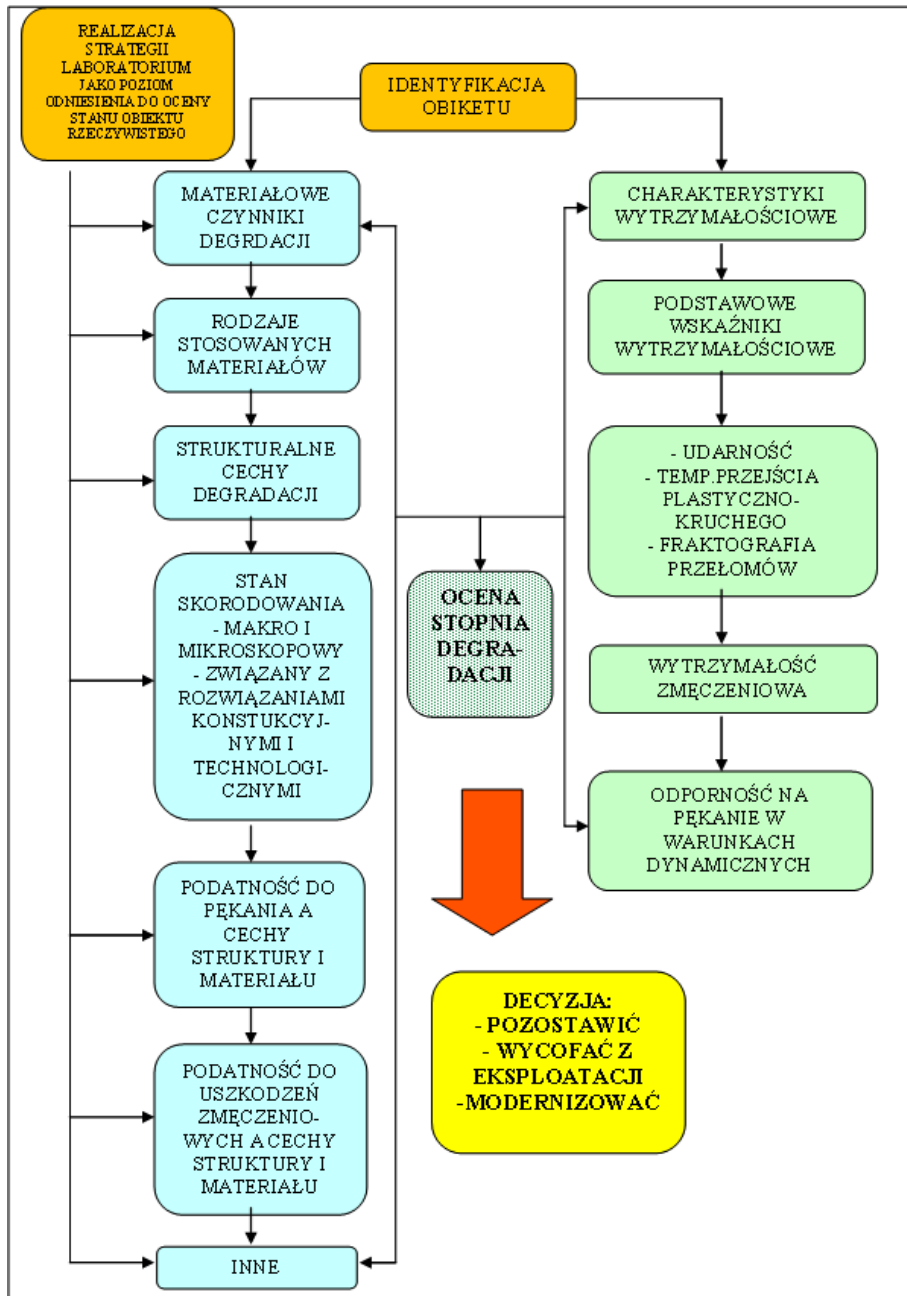
\*\* dr inż. Józef RABIEGA - Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej

z zabytkowymi gatunkami stali. Pogarszające się własności użytkowe starych konstrukcji są w znaczącej mierze stymulowane przez synergistyczne powiązania procesów zmęczeniowych i starzeniowych zachodzących w długotrwanie eksploatowanych stalach. Na przełomie XIX i XX wieku do budowy mostów i wiaduktów używano głównie stali zgrzewnej (do ok. 1890 – 1900 r.), jak i niskowęglowej stali zlewnej (od ok. 1890-1900 r.). Te niskowęglowe stale (zgrzewne i głównie nieuspokojone zlewne) wykazują skłonności do procesów degradacji mikrostruktur. Krótki opis tych zjawisk i ich wpływ na własności mechaniczne (na przykładzie stali pochodzącej z Mostu Piaskowego we Wrocławiu) przedstawiono m.in. na łamach numeru 1/2010 Zeszytów Naukowych [5].

Dotychczasowe metody badawcze służące identyfikacji i ocenie poziomu zaawansowania postępujących procesów degradacyjnych w zabytkowych stalach, z powodu braku odpowiednich procedur badawczych, jak i fizykalnych kryteriów nie dają odpowiedzi w sposób jawny (i ilościowy) na zasadnicze pytania: *Czy konstrukcję można nadal użytkować?, Jeśli tak, to jak długo? Z jaką częstotliwością monitorować jej stan techniczny?*

Wypracowana na Politechnice Wrocławskiej teoria degradacji [4] i jej koncepcja (rys. 1.) wielokryterialnego systemu rozwiązywania problemów materiałowych [8] przybliżyła nas do odpowiedzi na powyższe pytania. Osobną kwestią do rozstrzygnięcia (nieujęta na rys. 1.) jest stan struktury materiału w momencie jego zastosowania. Stale niestopowe stosowano najczęściej w stanie surowym, lub na życzenie zamawiającego, normalizowanym (co często miało miejsce). Takich danych nie można zazwyczaj uzyskać, a dociekanie wyjściowego stanu struktury na podstawie badań mikroskopowych próbek zdegradowanych jest wątpliwe. Wobec powyższego wydaje się, że pewnym rozwiązaniem byłoby przyjęcie stanu znormalizowanego, jako poziomu odniesienia w stosunku do stanu sprzed degradacji. Takie podejście jest uzasadnione np. faktem stosowania zabiegu wyżarzania normalizującego jako regenerującego sposobu obróbki cieplnej. Normalizowanie powoduje bowiem zbliżenie struktury materiału do postaci równowagowej. Jest też bliższe pod względem budowy struktury i segregacji występującej w materiale niż np. wyżarzanie zupełne. Powoduje ono jednocześnie zazwyczaj rozdrobnienie ziarna badanego materiału. Ma to z kolei wpływ na podwyższenie jego granicy plastyczności i wytrzymałości, utrudniając ocenę rzeczywistych zmian wytrzymałości w toku wieloletniej eksploatacji [8].

Wraz z rozwojem dostępnych technik pomiarowych i metod badawczych, teoria degradacji i jej materiałowe aspekty są wzbogacane o współczesne osiągnięcia z zakresu materiałoznawstwa czy mechaniki. Mechanika pękania jest gałęzią dynamicznie rozwijającą się. Łącząc w sobie problemy materiałoznawcze i mechaniki ciała stałego, stała się narzędziem predestynowanym do opisu własności eksploatacyjnych stali zgrzewnych w warunkach strukturalnej degradacji. Wpływ procesów degradacji mikrostruktur na rozwój pękania zmęczeniowego i odporności na pęknięcie zostanie omówiony w dalszej części pracy na tle dotychczasowych metod badawczych.

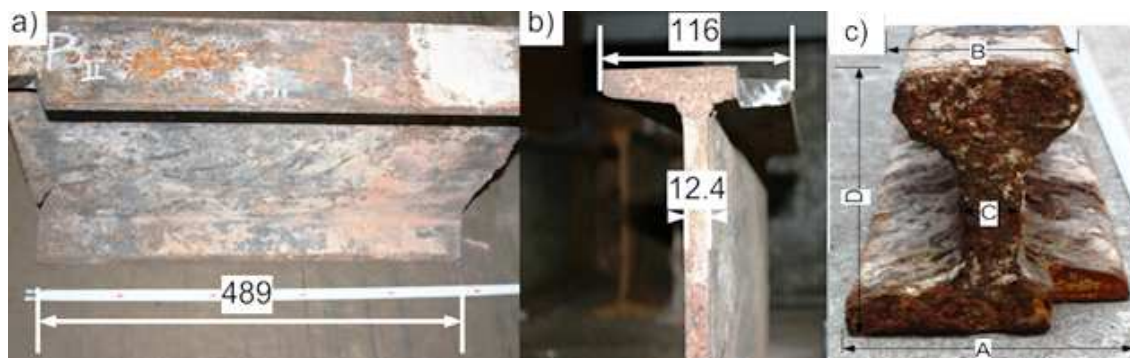


Rys. 1. Koncepcja wielokryterialnego systemu rozwiązywania problemów materiałowych w teorii degradacji

Źródło: [8], s. 107

## 1. WYNIKI ANALIZ CHEMICZNYCH I OBSERWACJI METALOGRAFICZNYCH

Przedmiotem badań autorów były XIX-wieczne stalowe elementy konstrukcyjne (rys. 2) pochodzące z przebudowywanych lub rozbieranych zabytkowych stalowych konstrukcji.



Rys. 2. Fragment belki dwuteowej pochodzącej z XIX wieku  
 a) widok w kierunku wzdłużnym, b) widok w kierunku poprzecznym, c) szyna S1 –  
 wymiary: A=100 mm, B=60 mm, C=25 mm, D=100 mm, długość L=1400 mm

Źródło: Opracowanie własne

### 1.1. Analizy chemiczne

W celu ustalenia składu chemicznego pobrano do badań wióry. Skład chemiczny ustalono metodą grawimetryczną. W tabeli nr 1 zamieszczono wyniki analiz chemicznych (uzyskane metodą grawimetryczną) badanych materiałów.

Tabela 1. Składy chemiczne badanych materiałów

| Lp. | Materiał      | Zaw. N [ppm] | %C    | %Mn     | %Si     | %P    | %S    | %Cr            | %Ni            |
|-----|---------------|--------------|-------|---------|---------|-------|-------|----------------|----------------|
| 1   | B2            | 60           | 0,05  | 0,13    | 0,03    | 0,29  | 0,028 | śladowe ilości | śladowe ilości |
| 2   | S1            | 62           | 0,06  | 0,1     | 0,17    | 0,198 | 0,025 | śladowe ilości | śladowe ilości |
| 3   | Stal zgrzewna | bd.          | 0,03  | 0,04    | śladowa | 0,004 | 0,004 | -              | -              |
|     |               |              | -     | -       | -       | -     | -     | -              | -              |
| 4   | Stal zlewna   | bd.          | 0,35  | 0,75    | 0,18    | 0,16  | 0,16  | -              | -              |
|     |               |              | 0,018 | śladowa | 0,1     | 0,02  | 0,01  | -              | -              |
|     |               |              | -     | -       | -       | -     | -     | -              | -              |
|     |               |              | 0,3   | 0,33    | 0,33    | 0,46  | 0,06  | -              | -              |

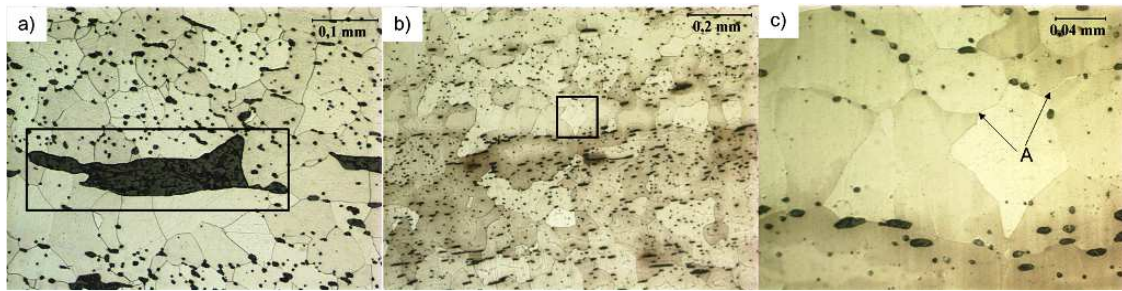
Źródło: Opracowanie własne

Wyniki analiz chemicznych mieszczą się w szerokim zakresie, typowym dla stali zgrzewnych (por. tab. 1). Zawartość fosforu wskazuje na przynależność badanych stali do grupy stali zgrzewnych. Przypuszczenia autorów potwierdzają obserwacje metalograficzne – przedstawione w kolejnym podpunkcie niniejszej pracy. Na podstawie analizy składu chemicznego i wieku elementów można przypuszczać, że badane stale mogą wykazywać skłonności do procesów degradacji mikrostruktur.

### 1.2. Mikroskopia świetlna

Obserwacje metodami mikroskopii świetlnej dowiodły, że badane stale mają budowę ferrytyczną ze znaczącą ilością wtrąceń niemetalicznych oraz nieciągłości struktury (rys. 3). Ziarna ferrytu wykazują charakterystyczne dla stali zgrzewnych różnicowanie rozmiarów. Wstępne wnioski wypływające z analizy składu chemicznego

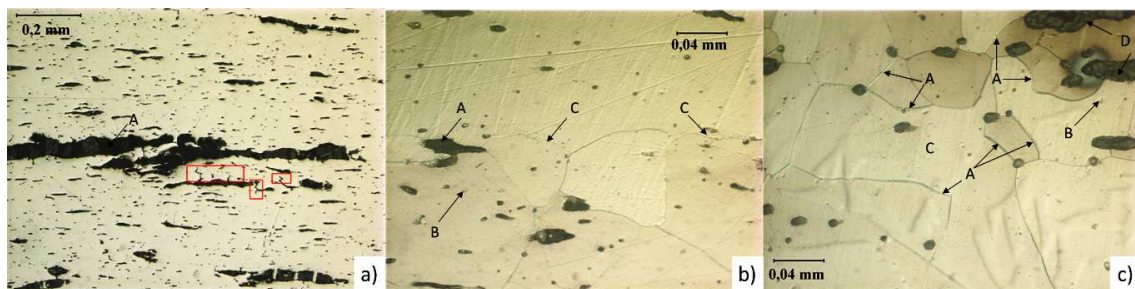
(niska zawartość węgla oraz wysoka zawartość fosforu i siarki, wywołujące segregację składu chemicznego) zostały potwierdzone w trakcie obserwacji mikroskopowych.



Rys. 3. Mikrostruktura stali zgrzewnej B2

a) w stanie poeksploatacyjnym; widoczne ziarna ferrytu oraz znaczna ilość wtrąceń niemetalicznych – także wielofazowych (zaznaczono ramką), b) w stanie normalizowanym, c) w stanie normalizowanym – powiększony obraz zaznaczony ramką z rysunku b) – znacznikiem A wskazano pogrubioną otoczką cementytu trzeciorzędowego granice ziarn ferrytu, mikroskopia świetlna, trawiono 3% HNO<sub>3</sub>.

*Źródło: Opracowanie własne*



Rys. 4. Mikrostruktura stali zgrzewnej S1

a) w stanie poeksploatacyjnym; widoczne pęknięcia zlokalizowane w pobliżu wtrąceń niemetalicznych (zaznaczono czerwoną ramką) oraz zawalcowane łańcuszki wtrąceń niemetalicznych – także wielofazowych (A) – stan nietrawiony, b) w stanie poeksploatacyjnym – A – wtrącenia niemetaliczne, B – wydzielenia azotków wewnątrz ziaren ferrytu, C – pogrubione otoczką Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub> granice ziaren, c) w stanie normalizowanym – A otoczka cementytu trzeciorzędowego na granicach ziarn ferrytu, B – wydzielenia azotków wewnątrz ziaren ferrytu, C – pozostałości po wydzieleniach wewnątrz ziaren ferrytu, D – wtrącenia niemetaliczne, mikroskopia świetlna, trawiono 3% HNO<sub>3</sub>.

*Źródło: Opracowanie własne*

Badane materiały wykazują symptomy typowe dla procesów degradacji mikrostruktur stali zgrzewnych. W przypadku stali B2 wydają się one być relatywnie mniej intensywne niż w przypadku stali S1. O znaczącym stopniu zdegradowania stali S1 może zaświadczyć fakt, że normalizowanie nie usunęło produktów degradacyjnych w postaci wydzieleni (głównie azotków). Z kolei pęknięcia zlokalizowane w okolicach wtrąceń niemetalicznych zdają się potwierdzać zasadność rozważań na gruncie mechaniki pęknięcia. Obserwacje z wykorzystaniem metod skaningowej mikroskopii elektronicznej powinny dostarczyć bardziej szczegółowych informacji nt. mikrostruktury analizowanych stali i rodzaju, ilości czy stopnia zaawansowania procesów degradacyjnych – jednak z uwagi na limitację objętościową niniejszej pracy wyniki te nie będą tutaj przytaczane.

## 2. WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH (STATYCZNA PRÓBA ROZCIĄGANIA I UDARNOŚĆ)

### 2.1. Statyczna próba rozciągania

Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono w Laboratorium Dynamiki Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Do badań użyto próbek okrągłych, proporcjonalnych pięciokrotnych o średnicy  $d=8$  mm (stal B2) i średnicy  $d=11$  mm (stal S1). Badania zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej MTS810 (zakres siłomierza 0-100kN) z wykorzystaniem ekstensometru o bazie pomiarowej 25 mm (stal B2) i 50 mm (stal S1) zakresie odkształcenia  $\Delta\varepsilon=20\%$  (B2) oraz  $\Delta\varepsilon=50\%$ . Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą [10], sterowano siłą, zachowując stałą prędkość przyrostu naprężenia na poziomie 10MPa/s. Wyniki badań zebrano w tabeli 2. Prezentowane wyniki przedstawiają wartość średnią z badań pięciu próbek.

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałościowych

|   | Material                     | $R_{m\bar{s}r}$<br>[MPa] | $R_{e\bar{s}r}$<br>[MPa] | $A_5$<br>[%] | Z<br>[%] | E<br>[GPa]      |
|---|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|----------|-----------------|
| 1 | B2<br>stan<br>poeksploacyjny | 387                      | 270                      | 20,4         | 28,3     | 194             |
| 2 | B2<br>stan<br>normalizowany  | 389                      | 261                      | 25,3         | 27,1     | 194             |
| 3 | S1<br>stan<br>poeksploacyjny | 376                      | 258                      | 21,7         | 35,4     | 180             |
| 4 | S1<br>stan<br>normalizowany  | 360                      | 253                      | 22,4         | 37,7     | 179             |
| 5 | Stal zgrzewna                | 300-400                  | 210-270                  | 8-25         | bd.      | 180<br>-<br>215 |
| 6 | Niskowęglowa stal<br>zlewna  | 370-450                  | 180-240                  | ok.20        | bd.      | ok. 215         |

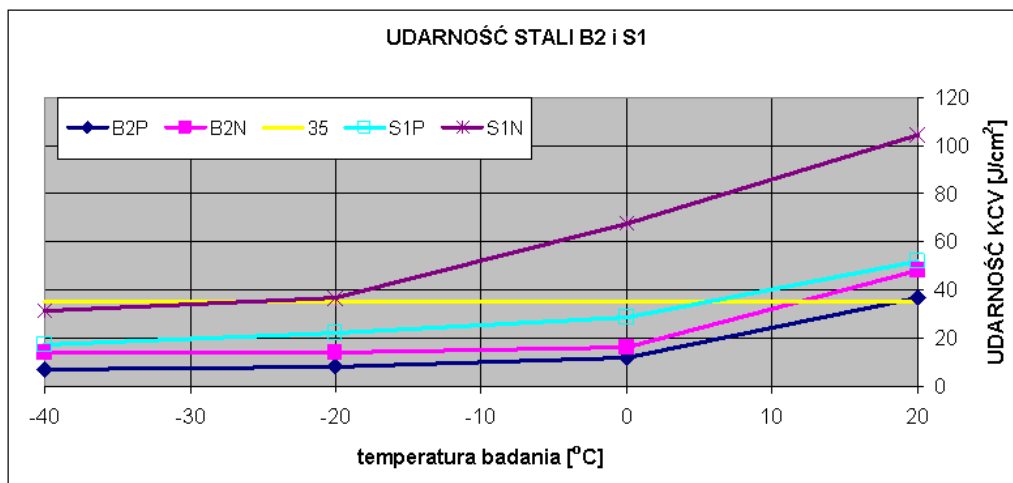
*Źródło: Opracowanie własne*

Badania wytrzymałościowe potwierdzają wyniki analiz chemicznych i badań mikroskopowych. Każdorazowo po normalizowaniu plastyczność stali ulegała zwiększeniu w stosunku do stanu poeksploacyjnego. Związane jest to z rozpuszczaniem podczas normalizowania wydzieleń kruchych faz wewnątrz jak i na granicach ziaren. Na uwagę zasługuje znaczący wzrost wydłużenia  $A_5$  dla stali B2. Z uwagi na wartości odchyłeń standardowych przewężenia Z nie wykazano statystycznie istotnej różnicy pomiędzy uzyskiwanymi wartościami.

### 2.2. Udarność

Próby udarnościowe przeprowadzono w Wydziałowym Zakładzie Wytrzymałości Materiałów Politechniki Wrocławskiej z wykorzystaniem młota Charpy'ego, zgodnie z wymaganiami normy [11]. Próby wykonywano na próbkach KCV o wymiarach 10x10x55 mm w stanie poeksploacyjnym, jak również normalizowanym. W celu wyznaczenia krzywej przejścia plastyczno – kruchego, pracę łamania określono w temperaturach:  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$ . Próbkę chłodzone były ciekłym azotem

w całej swojej objętości. Na rysunku 5 przedstawiono przebieg zmian udarności w funkcji temperatury. Jako kryterium przejścia plastyczno – kruchego wykorzystano udarność na poziomie  $35\text{J}/\text{cm}^2$ . Wartość ta jest również uważana za minimalną dla współczesnych stali konstrukcyjnych. Należy zaznaczyć, że kryterium przejścia plastyczno – kruchego określanego na poziomie  $35\text{J}/\text{cm}^2$  powinno być każdorazowo weryfikowane przez badania fraktograficzne określające procentowy udział przełomu plastycznego i kruchego.



Rys. 5. Krzywe zmian udarności w funkcji temperatury materiałów dostarczonych do badań

*Źródło: Opracowanie własne*

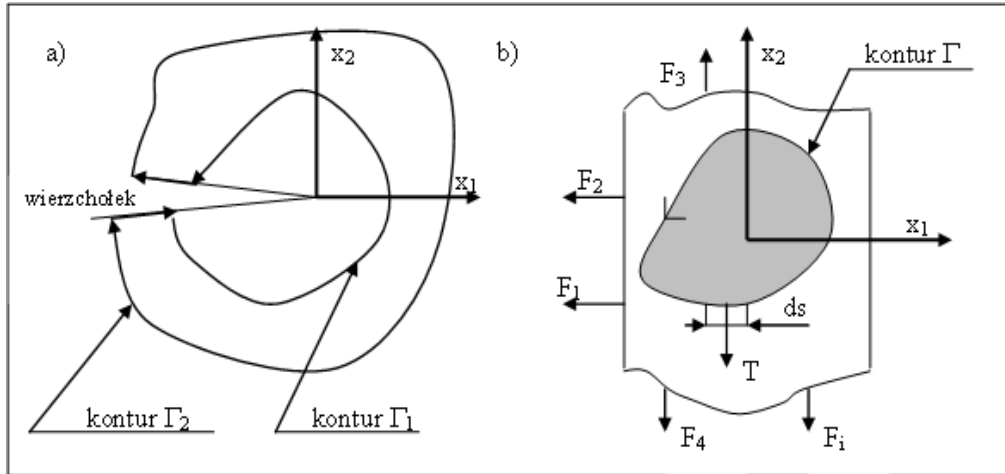
Każdorazowo po normalizowaniu obserwowano wzrost udarności każdej z badanych stali. Wyniki uzyskane dla materiału S1 (w stanie poeksploatacyjnym) i B2 (w stanie poeksploatacyjnym, a nawet normalizowanym) są praktycznie w całym zakresie temperaturowym poniżej kryterialnej wartości  $35\text{J}/\text{cm}^2$ . Dla stali S1 normalizowanie spowodowało znaczący wzrost udarności spełniając praktycznie w całym zakresie temperaturowym kryterium  $35\text{J}/\text{cm}^2$ . Na podstawie kryterium  $35\text{J}/\text{cm}^2$  określono temperatury przejścia plastyczno-kruchego:

- dla stali B2 na poziomie  $+17^{\circ}\text{C}$  w stanie poeksploatacyjnym oraz  $+12^{\circ}\text{C}$  w stanie normalizowanym;
- dla stali S1 na poziomie  $+5^{\circ}\text{C}$  w stanie poeksploatacyjnym oraz  $-26^{\circ}\text{C}$  w stanie normalizowanym.

Z punktu widzenia użytkowego (temperatury przejścia plastyczno-kruchego w zakresie temperatur dodatnich) należy uznać obydwie stali za zdegradowane. Eksploatacja takich stali w warunkach zimowych może skutkować kruchym pękaniem. Fraktografia przełomów pozwoliła zweryfikować kryterium  $35\text{J}/\text{cm}^2$  ze skutkiem pozytywnym. Z uwagi na ramy objętościowe wyniki te nie zostaną w niniejszej pracy zamieszczone.

### 3. POMIAR KRYTYCZNEJ WARTOŚCI CAŁKI $J - J_C$

Pojęcie całki energii  $J$  sformułowali niezależnie od siebie Rice i Czerepanow. Jednak jej użyteczną wartość dla mechaniki pękania wprowadził Eshelby. Korzystając z zasady zachowania energii, Eshelby wykazał zerową wartość całki  $J$  dla zamkniętego konturu pokazanego na rysunku 6.



Rys. 6. Kontury całki J

a) wokół szczeliny b) dla dowolnego ciała z obciążeniem zewnętrznym  $F_1, F_2, F_3, \dots, F_i$ .

Źródło: Opracowanie własne

Dla konturu zaznaczonego na rysunku 6b definicja całki J jawi się w następujący sposób:

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dx_2 - T \frac{\partial u}{\partial x_1} ds \right) = 0 \quad (1)$$

gdzie:

$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$  - energia odkształcenia sprężystego na jednostkę objętości,

$T$  – składowa wektora naprężenia prostopadła do konturu  $\Gamma$  przy  $ds$  i skierowana na zewnątrz obwodu,

$ds$  – element długości odmierzany wzdłuż konturu  $\Gamma$ ,

$u$  – wektor przemieszczenia w kierunku  $x_1$ .

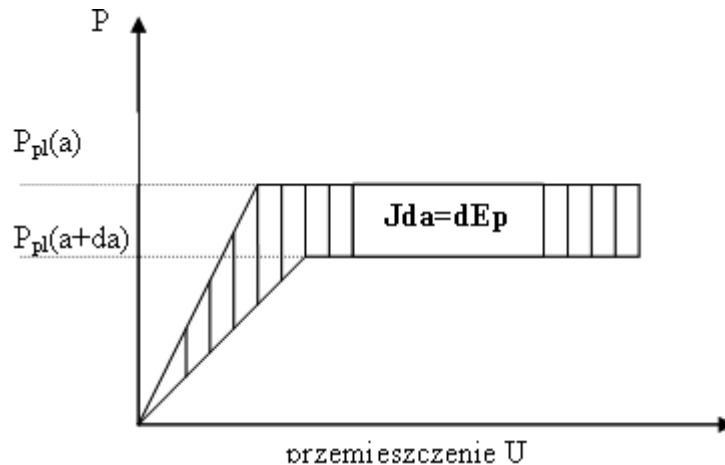
Zerowa wartość całki wykazana przez Eshelby'ego, daje bardzo praktyczną i pożyteczną właściwość – niezależnia drogę całkowania od wartości całki tj.:

$$|J_{\Gamma_1}| = |J_{\Gamma_2}| \quad (2)$$

Tak więc całka J dając niezerową wartość dla konturu  $\Gamma_1$  czy  $\Gamma_2$  jest miarą krytycznej energii uruchamiającej proces pęknięcia. Może być interpretowana jako różnica energii potencjalnej dwóch identycznych ciał zawierających szczelinę, co przedstawia rysunek 7 oraz zależność (3)

$$J = -\frac{dEp}{da} = -\int \frac{\partial P}{\partial a} du = \int \frac{\partial u}{\partial a} dP \quad (3)$$





Rys. 7. Interpretacja fizyczna całki J

Źródło: Opracowanie własne

Podobnie jak w poprzednich wielkościach opisujących szczelinę, pomiar krytycznej wartości  $J_{IC}$  upoważnia nas do używania kryterium sformułowanego w myśl zależności:

$$J = J_{IC} \quad (4)$$

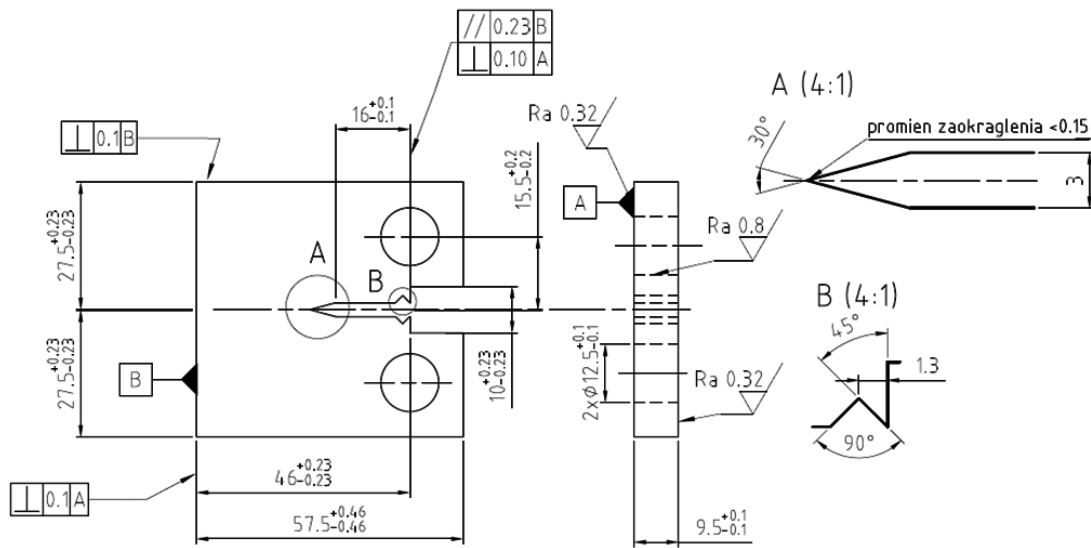
Kryterium (4) jest uniwersalnym kryterium pęknięcia, albowiem całka J może być stosowana również w warunkach dużych odkształceń plastycznych. Szczegółów dotyczących sposobów pomiaru wartości  $J_{IC}$  dostarcza nam norma polska [9] lub amerykańska [1]. Istnieje wiele różnic pomiędzy normami – m.in. takich jak określanie momentu inicjacji pęknięcia czy funkcja aproksymująca punkty pomiarowe. Autorzy zdecydowali się na wyznaczenie całki J z wykorzystaniem amerykańskiej normy [1].

### 3.1. Metodyka badania

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS809, zgodnie z normą [1] na próbkach zwartych CT. Wymiary próbki oraz geometrię karbu pokazano na rysunku 8. 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÷250kN);
- czujnika rozwarcia pęknięcia - ekstensometru firmy MTS (baza 2.5 mm, zakres 3.5 mm);
- komputera PC;
- układu optycznego do pomiarów długości szczeliny zmęczeniowej, sprzężonego z kamerą cyfrową do rejestracji obrazu – dokładność pomiaru 0.05 mm).



Rys. 8. Geometria próbki zwartej

Źródło: Opracowanie własne

W trakcie badań rejestrowano sygnały siły, przemieszczenia, rozwarcia pęknięcia (COD). Długość szczeliny w trakcie przykładania monotonicznie narastającego obciążenia wyznaczano, wykorzystując zjawisko zmiany podatności w trakcie przyrostu pęknięć. Dla próbki kompaktowej związek pomiędzy zmianą długości pęknięcia a przemieszczeniem brzegów szczeliny określony jest za pomocą zależności:

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 u_x + C_2 u_x^2 + C_3 u_x^3 + C_4 u_x^4 + C_5 u_x^5 \quad (5)$$

gdzie:

$a$  oznacza długość szczeliny,  $W$  szerokość próbki (46 mm). Współczynniki  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  określa szczegółowo norma [1] lub [2] w zależności od lokalizacji punktów pomiarowych rozwarcia pęknięcia (COD). Wielkość  $U_x$  określa z kolei zależność:

$$U_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{BEV}{F} + 1}} \quad (6)$$

gdzie:

- $B$  – grubość próbki [mm],
- $E$  – moduł sprężystości podłużnej [MPa],
- $v$  – rozwarcie szczeliny (COD) [mm],
- $F$  – siła [N],
- $V/F$  – nachylenie krzywej (przemieszczenie/siła) podczas testu [mm/N].

Całka  $J=J_s+J_{pl}$  składa się z dwóch komponentów, tzn. części sprężystej  $J_{sp}$  i części plastycznej  $J_{pl}$ . W  $i$ -tym kroku obciążeniowym całka  $J$  może zostać zdefiniowana jako:

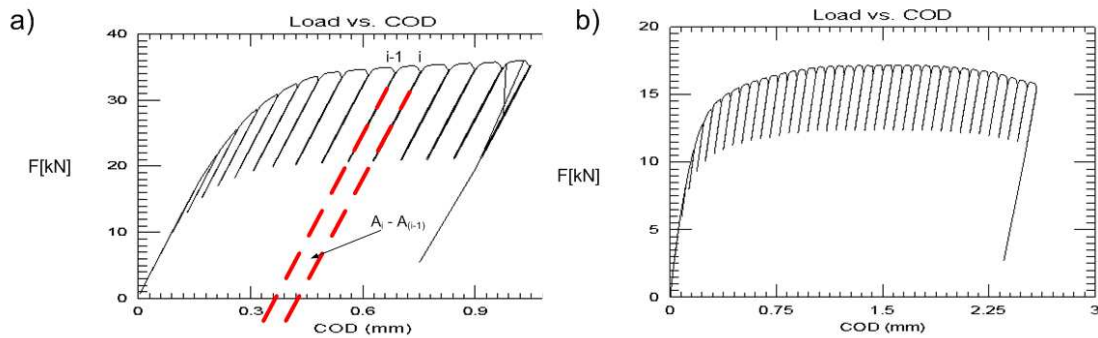
$$J_i = \frac{K_i^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad (7)$$

Przy czym  $K_i$  oznacza współczynnik intensywności naprężeń obliczony dla  $i$ -tego kroku obciążeniowego [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ],  $\nu$  – ułamek Poissona [-].

Część plastyczna  $J_{pl(i)}$ , występująca w formule (8) może być wyznaczona eksperymentalnie w oparciu o zależność:

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \frac{\eta_i}{b_i} \cdot \frac{(A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)})}{B} \right] \left[ 1 - \frac{\gamma_i}{b_i} (a_i - a_{i-1}) \right] \quad (8)$$

Jako  $b_i$  oznaczono długość niepękniętego odcinka próbki ( $W - a_i$ ), zaś  $A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}$  oznacza różnicę energii odkształcenia plastycznego obliczoną jako pole pod krzywą pomiędzy punktami odciążenia próbki. Zaś  $\eta_i$  i  $\gamma_i$  są stałymi zdefiniowanymi w normie [1]. Program obciążania i odciążania próbki przedstawiono na rysunku 9, wraz z opisem występującej we wzorze (8) różnicy  $A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}$ .



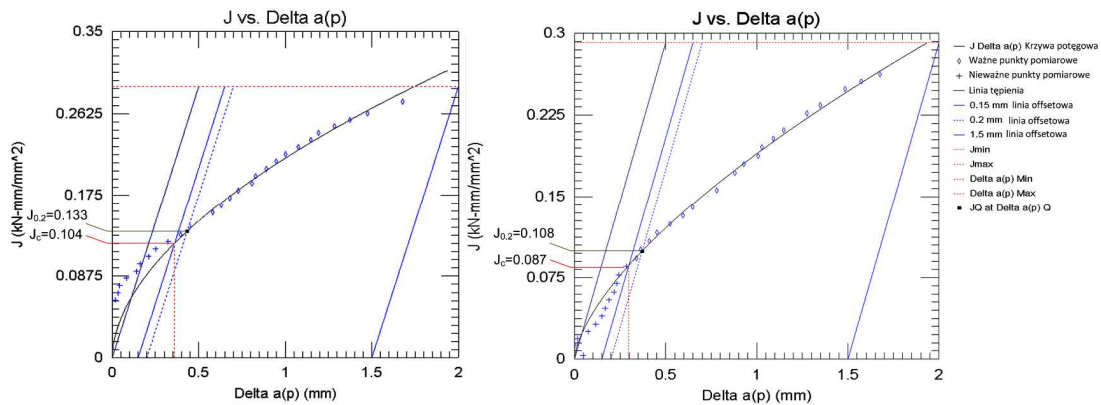
Rys. 9. a) fizyczne określenie obszarów  $A_i - A_{i-1}$ , b) schemat obciążenia próbki S1 podczas badań

Źródło: Opracowanie własne

Przed właściwym badaniem wykonano pęknięcie zmęczeniowe, obciążając próbkę w zakresie sprężystym obciążeniem sinusoidalnie zmiennym ( $f=12.5\text{Hz}$ ) nieprzekraczającym maksymalnej wartości współczynnika intensywności naprężeń w cyklu  $K_{\max}=16$  [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ], tak aby stosunek  $a/W$  wynosił ok 0.6. Badania właściwe przeprowadzono przy kontrolowanym przemieszczeniu trawersy maszyny wytrzymałościowej. Bloki odciążania realizowano, sterując sygnałem siły.

### 3.2. Wyniki badań

W oparciu o postanowienia normy [1] wykreślono krzywe J-R. Ważne punkty pomiarowe (zawarte pomiędzy liniami offsetowymi 0.15 mm, a 1.5 mm) aproksymowano krzywą potęgową, zgodnie z sugestią cytowanej normy (norma polska [9] sugeruje aproksymację funkcją liniową). Linię tępienia wykreślono, wykorzystując uśrednioną wartość  $R_e$  i  $R_m$  (zgodnie z [1]). Krytyczne wartości całek J –  $J_c$  reprezentują wartości odpowiadające punktom przecięcia krzywej potęgowej z linią tępienia. Dodatkowo wyznaczono wartości całek  $J_{0.2}$ . Wyniki badań stali S1 przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Krzywe J-R dla stali zgrzewnej S1 w stanie poeksploatacyjnym (po prawej) i normalizowanym (po lewej)

Źródło: Opracowanie własne

Z uwagi na niespełnienie wszystkich warunków normy (zwłaszcza w zakresie zapewnienia płaskiego stanu odkształceń przed frontem szczeliny), uzyskane wartości krytycznych całek J nie mogą być stałymi materiałowymi  $J_{IC}$ . Jednak z uwagi na fakt, że grubość XIX-wiecznych elementów konstrukcyjnych nie przekracza zazwyczaj 18 mm, to wartości  $J_C$  może być traktowania jako zastępcza (warunkowa) odporność materiału na pękanie. Z analizy danych eksperymentalnych wynika, że w stanie normalizowanym wartość całki  $J_C$  wynosiła  $J_C=104$  [kJ/m<sup>2</sup>] ( $J_{0,2}=133$  [kJ/m<sup>2</sup>]), zaś w stanie poeksploatacyjnym  $J_C=87$  [kJ/m<sup>2</sup>] ( $J_{0,2}=108$  [kJ/m<sup>2</sup>]). Z punktu widzenia współczesnych niskowęglowych stali wartości te są dalece niższe od krytycznych całek J – przykładowo dla stali 18G2A (S355J0)  $J_{IC}=320$  [kJ/m<sup>2</sup>]. Niespełna 20% wzrost wartości odporności na pękanie w stanie normalizowanym musi być związany z obecnością procesów degradacji mikrostruktur w stanie poeksploatacyjnym.

#### 4. KINETYKA PĘKANIA ZMĘCZENIOWEGO

##### 4.1. Metodyka badania

Do badań wykorzystano stanowisko pomiarowe, osprzęt i próbki identyczne jak w przypadku procedury wyznaczania krytycznej wartości całki J. Wykresy kinetyki pękania zmęczeniowego sporządza się w e współrzędnych  $\log(da/dN) - \log \Delta K(K_{max})$ , gdzie w układzie podwójnie logarytmowanym na rzędnych odkłada się  $da/dN$  dla określonej długości pęknięcia, a na osi odciętych  $\Delta K$ ,  $K_{max}$ . Dla próbki zwartej współczynnik intensywności naprężeń można wyznaczyć, wykorzystując zależność przedstawioną w normie [2] lub w pracy [7]:

$$K = \frac{\Delta F}{B\sqrt{W}} f(\alpha) \tag{9}$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{a}{W}, f(\alpha) = \frac{(2+a)(0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)}{\sqrt{(1-\alpha)^3}} \tag{10}$$

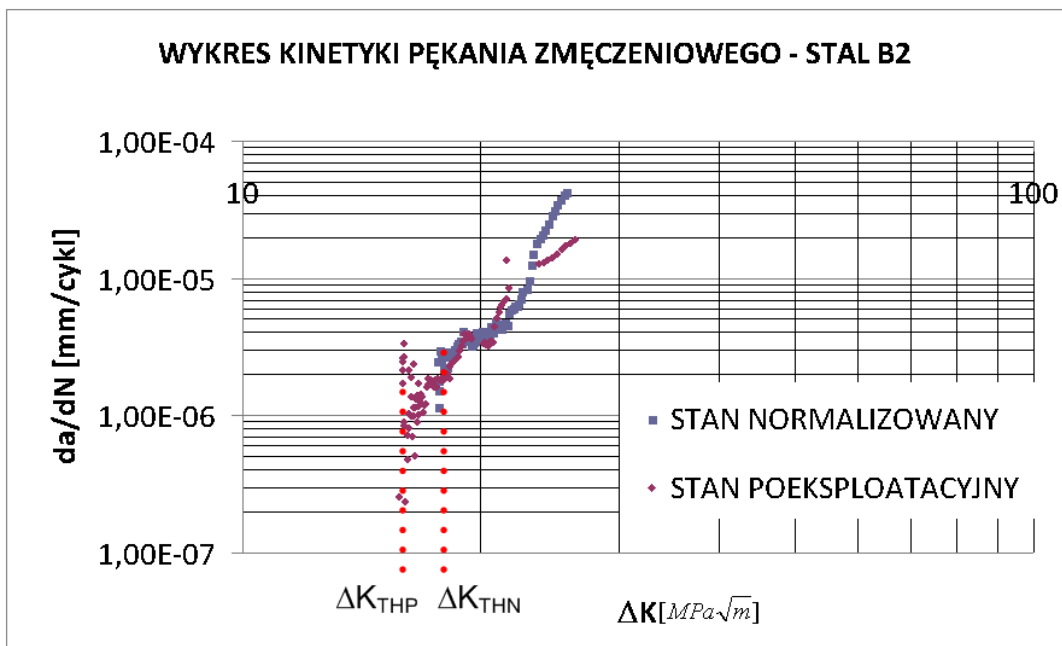
przy czym:

- $a$  – długość szczeliny [mm],
- $B$  – grubość próbki [mm],
- $W$  – szerokość próbki [mm],
- $\Delta F$  – amplituda siły [N].

Badania zrealizowano z wykorzystaniem dwóch dostępnych technik pomiarowych, tj. przy kontrolowanej malejącej amplitudzie  $\Delta K$  (okolice przyprogowe  $\Delta K_{th}$ ) i stałej amplitudzie siły  $\Delta F$ . Przed badaniem właściwym wykonano wstępne pęknięcie zmęczeniowe, zachowując przy tym cały czas warunki obciążania opisane w normie [2]. W przypadku badań stałoamplitudowych próbki obciążano, zachowując stałą wartość współczynnika asymetrii cyklu  $R=0.1$ , obciążeniem sinusoidalnie zmiennym w zakresie od 0.5 kN do 5kN z częstotliwością  $f=12.5$  Hz. Długość szczeliny monitorowano, wykorzystując zjawisko zmiany podatności (równanie 5). Okresowo kontrolowano i korygowano długość szczeliny, wykorzystując do tego celu mikroskop stereoskopowy wraz z cyfrową kamerą sprzężony z maszyną wytrzymałościową MTS809.

#### 4.2. Wyniki badań

Wykresy kinetyki pęknięcia zmęczeniowego dla stali B2 przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Wykres kinetyki pęknięcia zmęczeniowego dla stali zgrzewnej B2 (stan normalizowany i poeksploatacyjny)

Źródło: [6]

W celu określenia podkrytycznego czasu życia szczeliny zmęczeniowej najczęściej stosuje się empiryczną zależność Parisa-Erdogana opisaną równaniem:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (11)$$

gdzie:

$a$  – długość szczeliny [mm],

$C, m$  – stałe wyznaczone eksperymentalnie,

$\Delta K$  – amplituda współczynnika intensywności naprężeń [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ].

Na podstawie wykresu kinetyki rozwoju pęknięcia zmęczeniowego wyznaczono stałe modelu (11). Dla stali w stanie poeksploatacyjnym stałe te wynosiły:  $m=4.02$  (dla stabilnego okresu) i  $C=3,43 \times 10^{-11}$  (współczynnik dopasowania  $R^2=0.98$ ), zaś w stanie poeksploatacyjnym wynosiły one:  $m=5,7$  i  $C=3,06 \times 10^{-13}$  (współczynnik dopasowania  $R^2=0.95$ ) w układzie osi  $da/dN$  [mm/cykl] i  $\Delta K$  [ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ]. Zaobserwowano statystycznie istotne różnice w wartościach progowych  $\Delta K_{th}$ . Na podstawie wykresu (rys. 11) kinetyki pęknięcia zmęczeniowego dla stali B2 w stanie normalizowanym i poeksploatacyjnym określono krytyczne progowe wartości współczynników intensywności naprężeń  $K_{th}$  – w stanie normalizowanym  $K_{thN}=19.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ , a w stanie poeksploatacyjnym  $K_{thP}=17.53 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ . Należy zauważyć, że uzyskane wartości  $K_{th}$  są relatywnie wysokie w stosunku do wartości progowych uzyskiwanych dla współczesnych niskowęglowych stali ( $K_{th}=8-13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ). Ma to oczywiście związek z budową stali zgrzewnej (pasmowa budowa) i jej znaczącą anizotropowością w kierunku prostopadłym do walcowania. Znacznie wyższa jest także prędkość pęknięcia zmęczeniowego w zakresie podkrytycznego rozwoju – wykładnik  $m$  i stałe  $C$  osiągają większe wartości niż dla niskowęglowych współczesnych stali.

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań materiałowych i wytrzymałościowych stali pochodzących z XIX wieku. Zgodnie z koncepcją wielokryterialnego systemu oceny stanu kondycji długotrwale eksploatowanych stali [8], wykonano statyczną próbę rozciągania, jak również badania udarność w funkcji zmian temperatury. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że zmiany plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, jak i udarność (zwłaszcza w przypadku materiału S1) oraz zmian charakteru pęknięcia w różnych temperaturach spowodowane są mikrostrukturalnymi procesami degradacyjnymi, których aktywność potwierdzono w trakcie obserwacji metalograficznych. Zmiana mechanizmu pęknięcia z plastycznego na kruchy (określona na podstawie kryterium  $35 \text{ J/cm}^2$ ) odbywa się już w zakresie dodatnich temperatur. Taki stan rzeczy może być nadzwyczaj groźny podczas eksploatacji obiektów w warunkach zimowych. Badania odporności na pęknięcie materiału S1, bazujące na krytycznej wartości całki Rice'a  $J$ , są znacząco niższe (także w stanie normalizowanym) od wartości uzyskiwanych dla współczesnych niskowęglowych stali. Wykazano istotny wpływ procesów degradacji mikrostruktur na uzyskane wyniki odporności na pęknięcie. Stal zgrzewna B2 cechuje się relatywnie wysokimi (względem współczesnych stali) wartościami progowymi współczynników intensywności naprężeń  $K_{th}$ . Normalizowanie każdorazowo podwyższa uzyskiwane wartości  $K_{th}$ . Ten sam efekt zauważono i potwierdzono eksperymentalnie dla stali zgrzewnej z Mostu Piaskowego w pracy [5]. Istotnym z punktu widzenia eksploatacyjnego jest stosunkowo krótki i szybki rozwój pęknięcia zmęczeniowego w stalach zgrzewnych. Wszystkie uzyskane wyniki wskazują na potrzebę wypracowania odpowiednich narzędzi i procedur badawczych,

uwzględniających ogół wszystkich procesów i zjawisk degradacyjnych. Dalsze prace badawcze powinny skoncentrować się na opracowaniu efektywnego matematycznego modelu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego, uwzględniającego wpływ procesów degradacji mikrostruktur, jak również indywidualnych cech stali zgrzewnych (anizotropowość, pasmowość budowy). Podejście takie pozwoli w sposób racjonalny zaplanować okresowe kontrole zabytkowych konstrukcji stalowych. Dzięki mechanice pęknięcia możliwe jest również rozpatrywanie czasu życia poszczególnych krytycznych węzłów z wykorzystaniem metod numerycznych wspartych badaniami eksperymentalnymi oraz nowymi kryteriami wytrzymałości.

*Prace badawcze zostały sfinansowane ze środków stypendialnych współfinansowanych przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego*

## LITERATURA

- [1] ASTM E 813-89, Standard Test Method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness, ASTM International.
- [2] ASTM E647, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International.
- [3] Bień J., *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*, WKŁ, Warszawa 2010.
- [4] Dudek D. Oziemski S., Sobczykiewicz W., *Elementy teorii degradacji maszyn*, [w:] „Problemy Maszyn Roboczych”, 4/1994, Warszawa 1994.
- [5] Lesiuk G., Szata M., *Degradacja mikrostruktur elementów konstrukcyjnych pochodzących z mostów wzniesionych na przełomie XIX i XX wieku*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 1/2010, Wrocław 2010.
- [6] Lesiuk G., Szata M., *Numeryczno – doświadczalna analiza zachowania się elementów konstrukcyjnych ze stali zgrzewnych w warunkach statycznych i cyklicznych obciążeń przy obecności procesów degradacji mikrostruktur*, Materiały konferencyjne XXV konferencji naukowej „Problemy Maszyn Roboczych”, Zakopane 2012 (w druku).
- [7] Murakami Y., *Stress intensity factors handbook*, Pergamon Press, 1987.
- [8] Pękalski G., *Aspekty materiałowe degradacji maszyn górnictwa odkrywkowego oraz teorie zachodzących procesów*, Raport serii SPR nr 14/99, Wrocław 1999.
- [9] PN-88/H-04336, Metale. Metody określania odporności na pęknięcie przez wyznaczenie krytycznej wartości całki  $J$ ,  $J_{IC}$ , Polski Komitet Normalizacyjny.
- [10] PN-EN 10002-1:2004N.: Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia, Polski Komitet Normalizacyjny.
- [11] PN-EN ISO 148-1:2010N.: Metale – Próba udarności sposobem Charpy'ego - Część 1: Metoda badania, Polski Komitet Normalizacyjny.

**BRITTLENESS PROBLEM OF PUDDLED STEEL RESULTING FROM  
MICROSTRUCTURAL DEGRADATION PROCESSES IN TERMS OF STATIC,  
CYCLIC AND DYNAMIC TESTS**

**Summary**

*In the paper the investigation results of puddled steel from nineteenth-century constructions are presented. The results of static tensile tests after more than 130-year operating period: fracture toughness, the critical value of the J integral and the fatigue crack growth, and dynamic tests – toughness results are presented in this article. The results show a significant effect of degradation processes. The abovementioned processes caused the brittleness of puddled steel. All the tests were performed for the material in two states, i.e. post-operated and normalised ones. In accordance with the guidelines developed in the framework of the degradation theory [4] and its material aspects [8], normalising is designed to reproduce the microstructure of steel in the initial state. The results presented allow us to draw the conclusions about trends related to the nature and future negative changes in mechanical properties.*

**Key words:** puddled steel, degradation, J integral, fracture toughness, brittleness, fatigue cracking