MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-M/2009
ZESZYT 6
ROK 106
ISSUE 6
YEAR 106

STANISŁAW PYTEL*, WIOLETTA TOMASZEWSKA-GÓRECKA**

MIKROMECHANIZMY PĘKANIA NISKOWĘGLOWEJ STALI BAINITYCZNEJ

FRACTURE MICROMECHANISMS OF LOW CARBON BAINITIC STEELS

Streszczenie

W artykule przedstawiono dwa mechanizmy mikropęknięć w niskowęglowych stalach bainitycznych. Mechanizm M_1 powstaje w wyniku zarodkowania pustek w otoczeniu wtrąceń niemetalicznych. Mechanizm M_2 polega na zarodkowaniu szczelin w bainitycznej osnowie wewnątrz granic byłego ziarna austenitu.

Słowa kluczowe: *niskowęglowe stale bainityczne, badania fraktograficzne, mechanizmy pękania*

Abstract

Two fracture micromechanisms of ultra low carbon bainitic steels have been presented in this paper. Mechanism M_1 occurs as result of void nucleation in vicinity of non metallic inclusions. Mechanism M_2 occurs as result of microcracks nucleation in bainite inside primary austenitic boundaries.

Keywords: *ultra low carbon bainitic steels, fractography, fracture mechanisms*

* Dr hab. inż. Stanisław Pytel, prof. PK, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.
** Dr inż. Wioletta Tomaszewska-Górecka, Zespół Szkół Mechanicznych w Przemyślu.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

W ostatnich dwóch dekadach notuje się znaczny wzrost zainteresowania niskowęglowymi stalami bainitycznymi o podwyższonych właściwościach mechanicznych i technologicznych. Przy zawartości węgla nieprzekraczającej 0,05−0,08% stale te osiągają granicę plastyczności w zakresie od 700 do 900 MPa. Materiały te charakteryzują się również podwyższoną odpornością na pękanie w temperaturze pracy nawet do –80°C oraz dobrą spawalnością. Takie właściwości stali były możliwe do osiągnięcia dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod inżynierii materiałowej powiązanych z właściwym sterowaniem składem chemicznym oraz regulowaną obróbką cieplno-plastyczną. Atrakcyjne właściwości mechaniczne oraz technologiczne spowodowały, że tego rodzaju stale stanowią nowoczesną grupę materiałów na blachy grube.

Tematyka artykułu dotyczy badań fraktograficznych niskowęglowych stali bainitycznych określanych w literaturze amerykańskiej mianem stali ULCB (*Ultra-Low Carbon Bainitic Steels*) [1, 2]. Jeśli chodzi o techniczne zastosowanie blach grubych ze stali ULCB wytwarzanych metodami regularnej obróbki cieplno-plastycznej, ich głównym przeznaczeniem jest budowa ciężkich konstrukcji spawanych pracujących pod znacznym obciążeniem w obniżonej temperaturze.

2. Materiały do badań

Do badań zastosowano stale o składzie chemicznym podanym w tab. 1. Badania przeprowadzono na trzech wytopach odlewanych próżniowo o masie 250 kg każdy.

Tabela 1

Skład chemiczny stali (% wag.) i własności mechaniczne stali

Nr wytopu	C	Mo	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]	J_{IC} [kPa·m]	D_γ [µm]	Σb [µm/mm^2]
ULCB–1	.021	1.5	690	890	22,6	72,0	121	22,0	218
ULCB–2	.026	1.7	727	913	18,6	68,1	79	29,6	390
ULCB–3	.028	1.6	932	1125	15,7	62,5	52	56,0	430

Mn = 1.0, Ni = 3.5, Nb = 0.05, S = 0.003, P, N = 0.008

Wlewki walcowano na gorąco w dwóch etapach na końcową grubość blachy g = 25 mm.

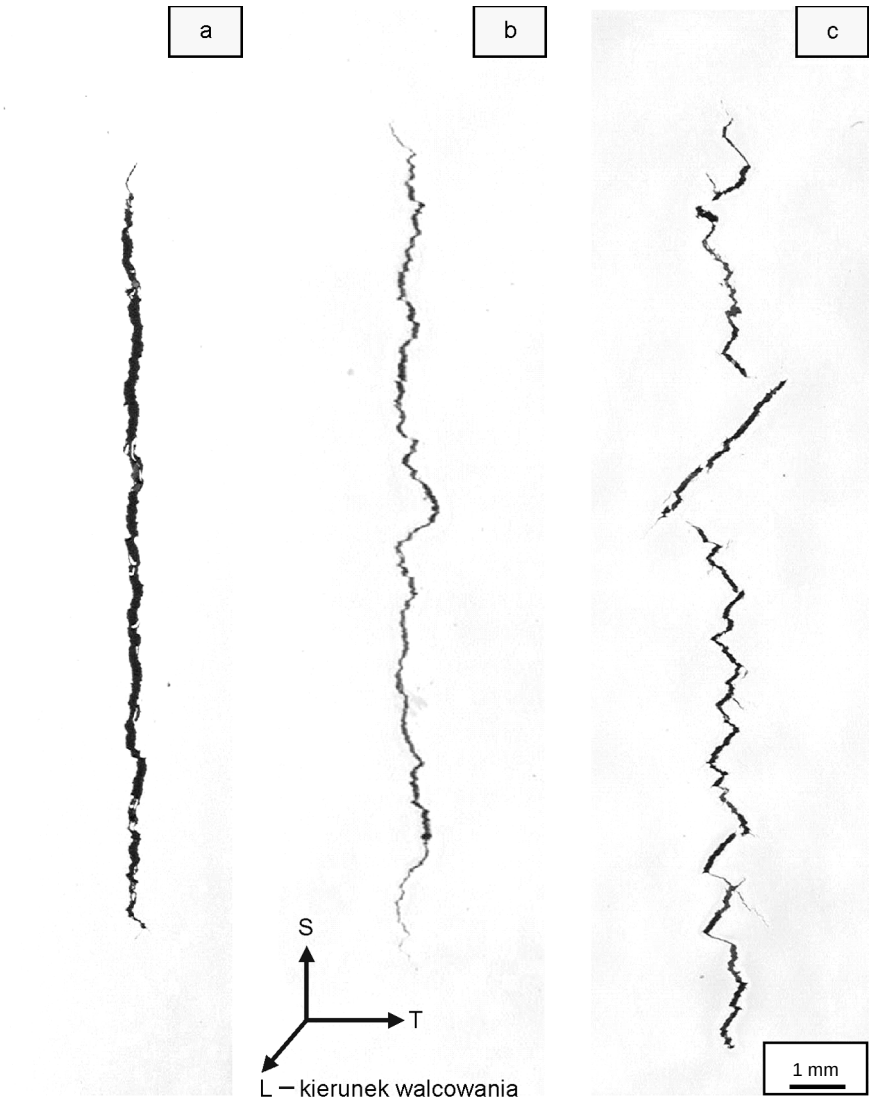
Pierwszy etap walcowania przeprowadzono w zakresie temperatur od 1150°C do 1100°C, stosując całkowity gniot ok. 50%. Drugi etap walcowania przeprowadzono w zakresie temperatur od 850°C do 775°C dla wytopów 1 i 2, zaś wytop 3 walcowano w zakresie od 1050°C do 950°C (całkowity gniot 75%). Wszystkie blachy chłodzono na powietrzu.

3. Przebieg i wyniki badań

Podstawowe właściwości mechaniczne oraz parametry odporności stali ULCB na pękanie, jak również wyniki badań mikrostruktury zostały szczegółowo opisane w pracy [3].

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

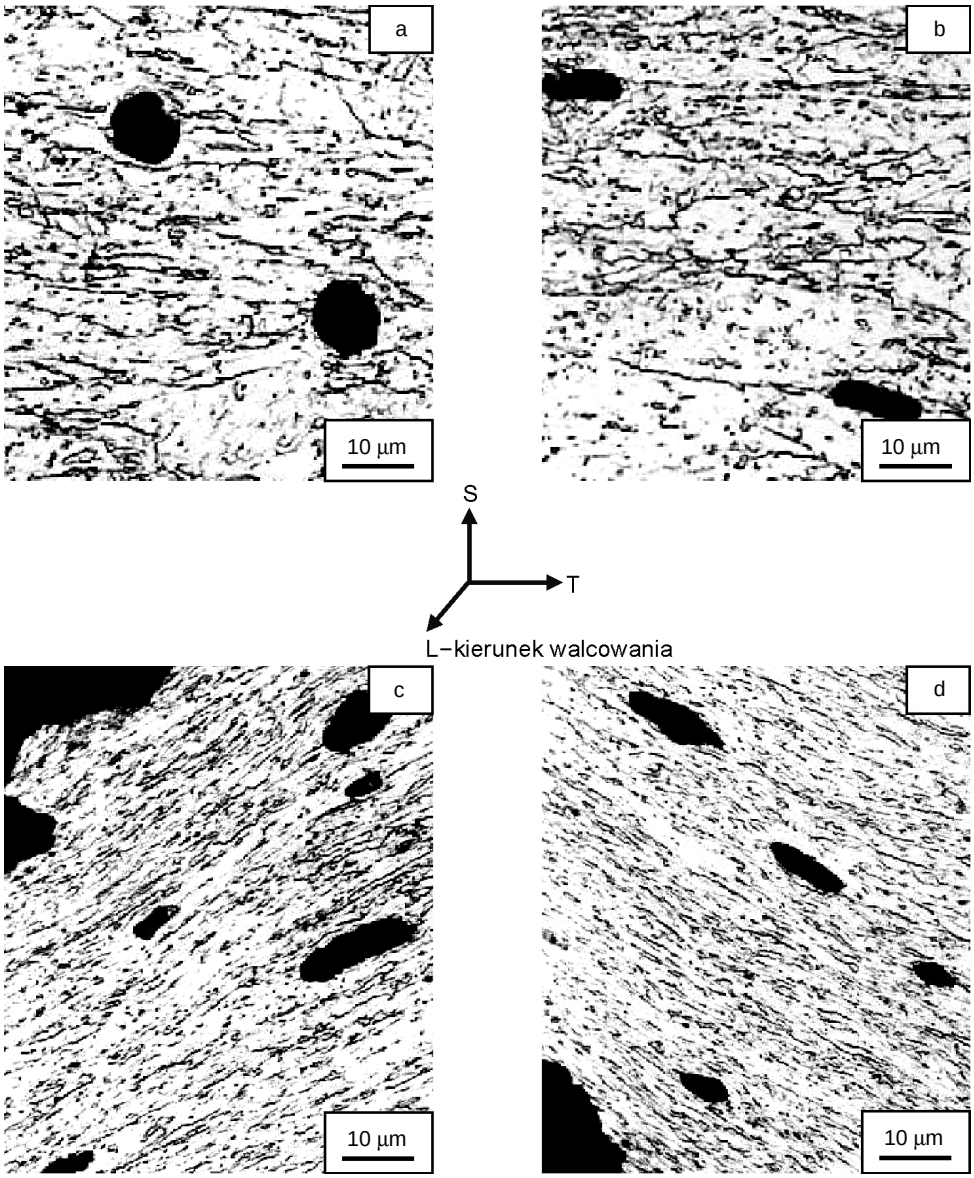
W niniejszym artykule wyniki dla trzech badanych stali przedstawiono w tab. 1, gdzie: $R_{p0.2}$ − umowna granica plastyczności, R_m − wytrzymałość na rozciąganie, A_5 − wydłużenie, Z − przewężenie, J_{IC} − całka Rice'a, D_γ − umowna średnica byłego ziarna austenitu, Σb − sumaryczna długość wtrąceń niemetalicznych na jednostkowej powierzchni L–S.



Rys. 1. Tory pękania próbek CT (0,5 mm od wierzchołka szczeliny zmęczeniowej): a) ULCB–1 ($R_{p0,2}$ = 690 N/mm^2), b) ULCB–2 ($R_{p0,2}$ = 727 N/mm^2), c) ULCB–3 ($R_{p0,2}$ = 932 N/mm^2)

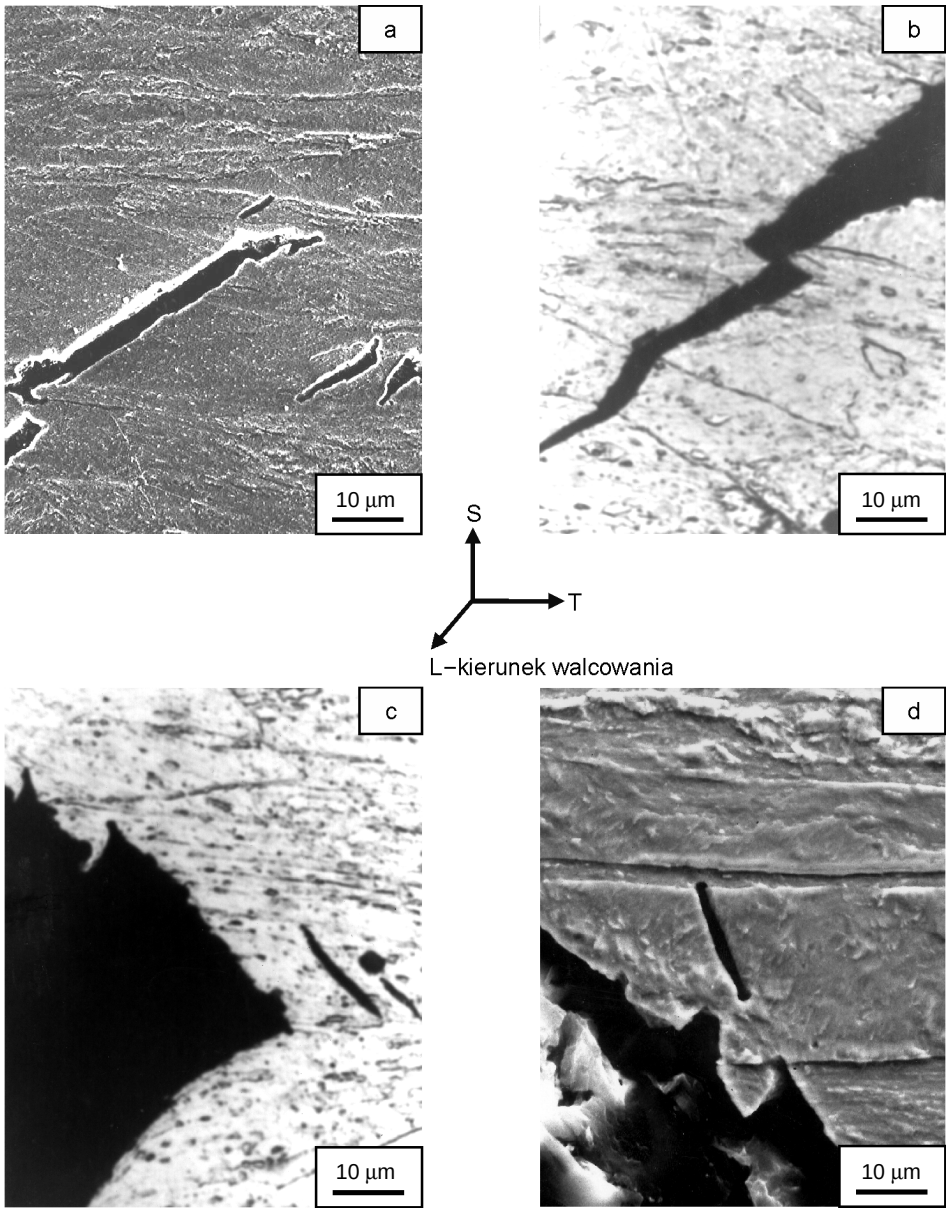
Fig. 1. Fracture paths of CT samples (0.5 mm from fatigue crack tip): a) ULCB–1 (YS = 690 N/mm^2), b) ULCB–2 (YS = 727 N/mm^2), c) ULCB–3 (YS = 932 N/mm^2)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



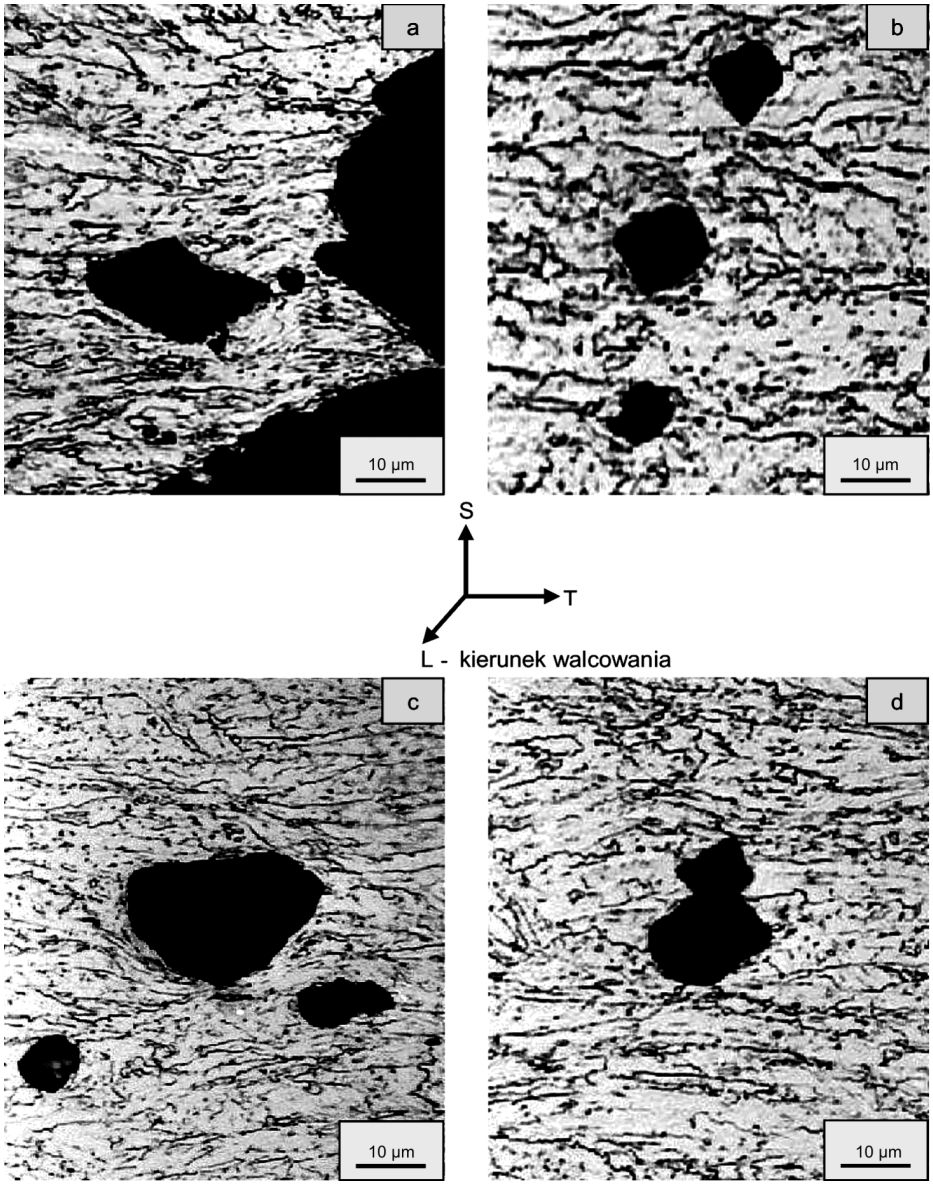
Fot. 1. Lokalne pustki w otoczeniu WN (mechanizm M_1)
Photo 1. Local voids in vicinity of nonmetallic inclusions (mechanism M_1)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Fot. 2. Zarodkowanie i propagacja mikroszczelin w bainitycznej osnowie, stal gruboziarnista ULCB–3; mechanizm (M_2)
Photo 2. Nucleation and propagation of microcracks in bainite, ULCB steel with coarse grains; mechanism M_2

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Fot. 3. Lokalny rozwój pustek w bainicie wewnątrz granic byłego ziarna austenitu
Photo 3. Local increase of voids in bainite inside primary austenitic grains boundaries

Badania fraktograficzne przeprowadzono na próbkach CT [4] o grubości B = 20 mm zorientowanych poprzecznie do kierunku walcowania. Do analizy profili torów pękania w bezpośredniej strefie wierzchołka szczeliny zmęczeniowej próbki CT przecinano w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni blachy (w płaszczyźnie S–T) w odległości

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

ok. 0,5 mm od wierzchołka szczeliny. W ten sposób otrzymano przekroje z widocznymi zarysami torów pękania, co zilustrowano na rys. 1. Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że w badanych stalach ULCB w rejonie szczeliny zmęczeniowej występują dwa podstawowe mechanizmy zarodkowania mikropęknięć. Są to mianowicie:

– **Pierwszy mechanizm zarodkowania (M_1)**, który jest wynikiem zjawisk strukturalnych pojawiających się w otoczeniu wtrąceń niemetalicznych podczas odkształcenia metalowej osnowy. Istota tego mechanizmu polega na stopniowym rozwoju pustek na granicy fazowej wtrącenie–osnowa. Pojawienie się tego mechanizmu jest związane z bardzo niską spójnością pomiędzy tlenkowymi oraz siarczkowymi wtrąceniami niemetalicznymi, a bainityczną osnową stali ULCB. Jak widać na fot. 1a–d, kształt i orientacja tych nieciągłości mogą być zróżnicowane, co wynika z lokalnego stanu naprężenia i odkształcenia osnowy. Brak wtrąceń wewnątrz pustek można wyjaśnić ich wykruszaniem się w trakcie przygotowania zgładów metalograficznych.
– **Drugi mechanizm zarodkowania (M_2)**, który powstaje w wyniku zjawisk strukturalnych występujących bezpośrednio w bainitycznej osnowie. Ten mechanizm polega na zarodkowaniu wewnątrz bainitu łupliwych mikroszczelin blokowanych przez granice byłego ziarna austenitu, co pokazano na fot. 2a. Jak wynika z badań fraktograficznych, te mikropęknięcia leżą w płaszczyźnie S–T i są zorientowane w stosunku do kierunku obciążenia próbki (kierunek T) w szerokim zakresie kątów, od 90° do 45°, przy czym zakres orientacji 60°−45° jest dominujący. Zarodkowanie tego rodzaju mikropęknięć zaobserwowano we wszystkich badanych stalach. W wypadku stali drobnoziarnistych (ULCB–1 i ULCB–2) utworzone mikropęknięcia podczas odkształcenia stopniowo powiększają się i przyjmują owalny kształt, jak pokazano na fot. 3b–d. W stali o gruboziarnistej strukturze (wytop ULCB–3) i $R_{p0,2}$ = 932 N/mm^2 na skutek szybkiej i niestabilnej propagacji mikroszczelin utworzonych w wyniku mechanizmu (M_2) we wczenym etapie odkształcania dochodzi do rozdzielenia osnowy (fot. 3a–d).

4. Podsumowanie

Pojawienie się mechanizmu (M_2) w stali ULCB–3 charakteryzującej się gruboziarnistą budową powoduje lawinowe zarodkowanie mikropęknięć w sąsiadujących ziarnach. Wówczas strefy plastycznego ścinania są bardzo wąskie i nie mogą odgrywać większej roli w dyssypacji energii. Jedynym dodatkowym źródłem akumulacji energii jest zwiększona powierzchnia przełomu wynikająca z zygzakowatego profilu pękania. Ten mechanizm nie wpływa jednak istotnie na polepszanie odporności stali ULCB na pękanie, gdyż niemal całość pochłanianej energii jest energią powierzchniową γ (dla metali mieści się w zakresie od 1 do 2 J/m^2) [5]. W związku z tym podstawowym zagadnieniem związanym z podwyższaniem odporności stali ULCB na kruche pękanie staje się, obok jakości metalurgicznej materiału, problem rozdrabniania ziarna austenitu podczas obróbki cieplno-plastycznej blach grubych.

W stalach ULCB o niższej granicy plastyczności i drobnoziarnistej budowie (wytopy 1 oraz 2) zaobserwowano zarodkowanie mikropęknięć w otoczeniu wtrąceń niemetalicznych (mechanizm M_1) oraz w bainitycznej osnowie (mechanizm M_2). Porównując te zjawiska strukturalne ze zjawiskami omówionymi wcześniej dla stali o wysokiej wytrzymałości, można dostrzec fundamentalną różnicę polegającą na podatności tych zarodków do stabil-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

nego wzrostu w miarę plastycznego odkształcenia bainitycznej osnowy. Ilościowe opisanie tego procesu jest bardzo złożone. Jednak nawet jakościowe badania fraktograficzne dają cenny materiał badawczy. Przede wszystkim stwierdzono, że skośnie zorientowane zarodki mikroszczelin w miarę wzrostu mają skłonność do rotacji w obrębie granic ziaren austenitu. Ponadto zauważono, że lokalna stabilność tego rodzaju pustek zależy od ich kąta orientacji oraz ich początkowej długości, co jest bezpośrednio związane z wielkością ziaren austenitu w strefie powstania pęknięć. W wyniku tego mechanizmu ciągliwość stali bainitycznych o drobnoziarnistej budowie jest znacznie wyższa w porównaniu ze stalą gruboziarnistą.

Literatura

[1] Blicharski M., Garcia C.I., Pytel S.M., *Structure and properties of ULCB steels for heavy section applications*, Proceedings of International Symposium on Processing, Microstructure and Properties of HSLA Steels, October 1987, Pittsburgh, PA, USA.

[2] Garcia C.I. et al., *Ultra-low carbon bainitic plate steels*: *Processing*, *Microstructure and Properties*, Transactions of the ISS, October 1991, 97-106.

[3] Tomaszewska-Górecka W., *Odporność na pękanie niskowęglowych stali bainitycznych o wysokich właściwościach mechanicznych*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2001.

[4] Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J., *Odkształcanie i pękanie metali*, WNT, Warszawa 1999.

[5] Dieter G.E., *Mechanical Metallurgy*, 3rd ed., McGraw-Hill series in Materials Science and Engineering, New York 1986, 246-264.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ