

ODPORNOŚĆ NA KRUCHE PĘKANIE WSPÓŁCZESNYCH STALI NISKOWĘGLOWYCH Z BOREM

BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF MODERN LOW CARBON STEELS WITH BORON

Stanisław Frydman, Beata Łętkowska – Zakład Materiałoznawstwa, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Analizowane stale węglowe z borem zaliczane są przez producentów do grupy stali odpornych na ścieranie i przeznaczone do konstrukcji w wielu dziedzinach, również na konstrukcje w przemyśle górniczym. Stale te jednak dostarczane są w różnych stanach, z odmiennymi strukturami. Własności tych stali są zatem różne, zależnie od struktury. Dużym niebezpieczeństwem w konstrukcjach jest wystąpienie przelomu kruchego, które to niebezpieczeństwo wzrasta wraz z maksymalizacją parametrów wytrzymałościowych stali i jest inne dla różnych struktur. W prezentowanej pracy wykonano badania udarności oraz przeprowadzono analizę fraktograficzną dwóch gatunków stali dwóch uznanych producentów europejskich. Badaniom poddano stal gatunku B27 produkcji Rautaruukki Corporation oraz gatunek 28MCB5 produkcji Zeneri Acciai Company. Stale badano w trzech stanach: w stanie dostarczenia, po normalizowaniu oraz po hartowaniu i niskim odpuszczaniu. Przedstawiono zasadniczą różnicę w odporności na kruchy przelom między analizowanymi stanami. Wskazano na różnice w ocenie temperatury przejścia z plastyczności w kruchość przy stosowaniu odmiennych kryteriów.

The analyzed carbon steels with boron are classified by producers as abrasion resistant steels and designed for constructions in many areas, including constructions in mining industry. However, these steels are delivered in different states, with different structures. The properties of these steels are therefore different, depending on the structure. There is danger in the construction occurring of a brittle fracture. The danger increases with maximization of the strength parameters of steel and is different for different structures. In the present paper impact test and the fractographic analysis of two grades of steel two recognized European producers was performed. Steel grade B27 manufactured by Rautaruukki Corporation and steel 28MCB5 manufactured by Zeneri Acciai Company were examined. Steels were tested in three states: the state of delivery, after normalization, and after hardening and low tempering. An essential difference in the resistance to brittle fracture between the analyzed states is presented. It was indicated, that there is a difference in the evaluations of a ductile to brittle transition temperature using different criteria.

Wprowadzenie

W ostatnich latach zyskują coraz szersze zastosowanie stale o zwiększonej odporności na zużywanie ściernie. W wielu dziedzinach zastępują one starsze materiały, co przyczynia się do większej trwałości elementów z nich wykonanych i dłuższego użytkowania konstrukcji [1,2]. Wydłużenie czasu eksploatacji maszyn szczególnie jest ważne w przemyśle wydobywczym, w którym przestoje, modernizacja, a przede wszystkim wymiana dużych maszyn górniczych jest wyjątkowo kosztowna. Obok uznanych stali odpornych na ścieranie typu niskostopowych szwedzkich stali Hardox, do tej grupy należy zaliczyć niskowęglowe stale z dodatkiem boru, nazywane przez niektórych producentów stalami borowymi. Stalom Hardox i innym niskostopowym stalom poświęcone były poprzednie badania [3-5]. W prezentowanej pracy analizie poddano produkty innych znanych producentów europejskich stosujących zaawansowane technologie - fińskiej firmy Rautaruukki Corporation [6] oraz włoskiej Zeneri Acciai Company [7]. Stale borowe wymienionych firm osiągają wysokie parametry wytrzymałościowe przy stosunkowo niskiej cenie. Maksymalizacja takich parametrów, jak granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i twardość ogranicza własności plastyczne materiału. Występuje zatem niebezpieczeństwo zbyt małej udarności i nasilenie wystąpienia niebezpiecznego przelomu kruchego w materiale. Właśnie w dużych konstrukcjach maszyn górniczych narażonych na

obciążenia udarowe i pracujących w różnych warunkach pogodowych dostateczna udarność i bezpieczna temperatura przejścia z plastyczności w kruchość są właściwościami jednymi z kluczowych.

O własnościach stali decyduje jej struktura, która jest wynikiem określonej obróbki cieplnej czy cieplno-plastycznej. Analizowane stale z dodatkiem boru, zaliczane przez producentów do grupy stali odpornych na ścieranie, dostarczane są jednak przez wytwórców po różnych obróbkach i charakteryzują się różnymi strukturami. Na przykład badany gatunek B27 dostarczany jest po walcowaniu na gorąco z zaleceniem późniejszej obróbki cieplnej, w zależności od zastosowania. Różne struktury tych stali wywołujące ich różne właściwości nakazują ostrożne podejście do decyzji stosowania tych stali w różnych stanach. Na ten problem zwraca uwagę prezentowana praca. Szczególnie ważne jest zabezpieczenie elementów wykonanych z tych stali przed niekontrolowanym rozwojem przelomu kruchego, które to ryzyko znacząco wzrasta przy obciążeniach dynamicznych. Dlatego stale te poddano badaniom udarności, a przede wszystkim skupiono się na analizie fraktograficznej.

Badane materiały

Badania przeprowadzono na dwóch gatunkach stali: gatunku B27 produkcji Rautaruukki Corporation oraz na stali gatunku 28MCB5 produkcji Zeneri Acciai Company. Skład chemiczny

Tab. 1. Nominalny skład chemiczny badanych stali [9,10]
Tab. 1. Typical chemical composition of tested steels

Gatunek stali	Zawartość poszczególnych pierwiastków [%]						
	C	Mn	Si	Cr	P	S	B
B27	0,27	1,2	0,25	0,3	nu*	nu*	0.002
28MCB5	0,25-0,30	1,10-1,30	0,15-0,35	0,20-0,50	0,030	0,030	0,0015-40

W obu stalach dodawane są Al lub/ i Ti do związków azotu.
*-nie umieszczono w karcie informacyjnej producenta

Tab. 2. Wyznaczony skład chemiczny badanych stali
Tab.2. Defined chemical composition of tested steels

Gatunek stali	Zawartość poszczególnych pierwiastków [%]						
	C	Mn	Si	Cr	P	S	B
B27	0,23	1,33	0,27	0,37	0,009	0,009	0,001
28MCB5	0,24	1,20	0,29	0,46	0,012	0,011	0,003

badanych stali, wykazywany przez producentów oraz wyznaczony w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, przedstawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2. Składy chemiczne obu stali są zbliżone.

Własności mechaniczne stali zależne są od przeprowadzonej obróbki cieplnej. Głównie stale te proponuje się do zastosowania po hartowaniu i najczęściej po odpuszczaniu, ale w innych stanach, jak wspomniano we wstępie, też są dostarczane zalecając kupującemu przeprowadzenie odpowiedniej obróbki cieplnej zależnie od potrzeb. Dwa prezentowane gatunki stali zbadano zatem w trzech stanach: w stanie dostarczenia i po najbardziej typowych obróbkach cieplnych – normalizowaniu oraz hartowaniu i niskim odpuszczaniu w 200°C. Obróbkę cieplną stali (normalizowanie oraz hartowanie/odpuszczanie) wykonano w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Struktury badanych stali przedstawiono na rysunkach 1 – 6. Struktura w stanie dostarczenia gatunku B27 charakteryzuje się pasmowym rozłożeniem ferrytu i perlitu. W gatunku 28MCB5 kolonie perlitu otoczone są wydzieleniami ferrytu. Po normalizowaniu struktury stali są podobne, z pasmowymi wydzieleniami ferrytu i perlitu. Po hartowaniu i odpuszczaniu oba gatunki charakteryzują się drobno płytkowym martenzytem odpuszczania.

Przeprowadzone badania i ich analiza

Uzyskiwanie stali o wysokiej granicy plastyczności, wytrzymałości i odporności na ścieranie może powodować, jak wspomniano, niedostateczną jej ciągliwość. Stale te doznają również przejścia z plastyczności w kruchość, co powoduje dodatkowe niebezpieczeństwo stosowania tych stali po obróbkach cieplnych wywołujących niekorzystną strukturę, przesuwającą to przejście do temperatur wyższych. Obciążenia dynamiczne w konstrukcjach dodatkowo podnoszą temperaturę przejścia. Badano zatem odporność na wystąpienie przelomu kruchego przy obciążeniach uderowych. W związku ze stosowaniem tych stali na duże elementy konstrukcyjne, stanowiące często zespa-

wane ze sobą blachy, wystąpienie przelomu kruchego w tych blachach staje się niebezpieczniejsze. Badania przedstawione w artykule koncentrują się na analizie wyników próby udarności, a w szczególności analizie przelomów powstałych podczas tej próby. Chociaż pomiar udarności jest od dawna jedną z najpopularniejszych prób przeprowadzanych na najrozmaitszych materiałach i szczególnie wiele badań udarności poświęcono stalom, to nadal występuje wiele niejasności w przewidywaniu zachowania się materiału z daną strukturą w warunkach obciążeń dynamicznych. Dlatego badania nad konkretnymi materiałami do konkretnych zastosowań są nadal ważne. Jak już wspomniano kryterium ograniczające stosowanie danego materiału to temperatura przejścia w stan kruchy. Temperatura ta powinna być niższa niż temperatura pracy materiału. Najczęściej przyjmuje się za próg kruchości - temperaturę odpowiadającą pewnej arbitralnie ustalonej wartości udarności lub pracy łamania. Wartość ta jest jednak przyjmowana różnie przez różne unormowania. Ogólnie zakłada się, że przyjęta wartość odpowiada wystąpieniu przelomu podczas próby udarności o charakterze w połowie kruchym i w połowie ciągliwym. Założenie to jednak nie zawsze jest prawdziwe, stąd niezwykle pomocna jest analiza fraktograficzna pozwalająca wprost odnieść się do rodzaju przelomu. W prezentowanych badaniach analizie poddano zarówno wyniki próby udarności, jak i przeprowadzono szczegółową analizę charakteru przelomu w zakresie temperatury 20 ÷ -40°C, który odpowiada pracy większości urządzeń.

Analiza wyników próby udarności

Średnie wartości udarności uzyskane dla trzech stanów badanych gatunków stali, w czterech temperaturach badania, zestawiono w tabeli 3.

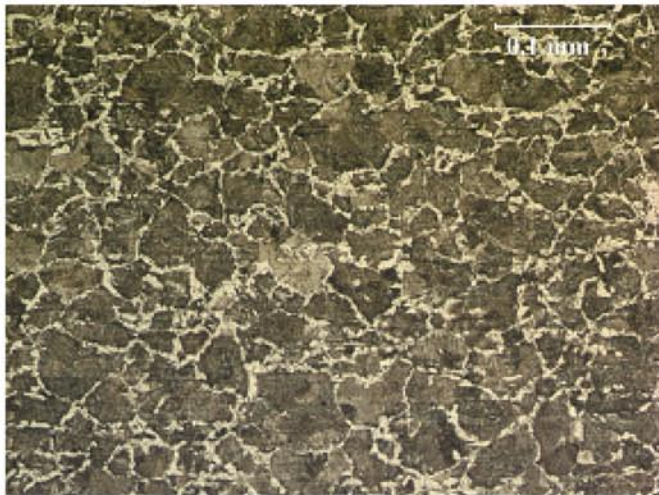
W stanie dostarczenia obie badane stale charakteryzują się strukturą ferrytyczno-perlityczną. Różne rozłożenie składników struktury wywołuje znaczące różnice w wartościach udarności na korzyść stali 28MCB5. Udarność obu stali gwałtownie spada w miarę obniżania temperatury. Przyjmując za kryterium prze-

Tab. 3. Średnie wartości udarności badanych stali
Tab. 3. Average values of steels impact tests

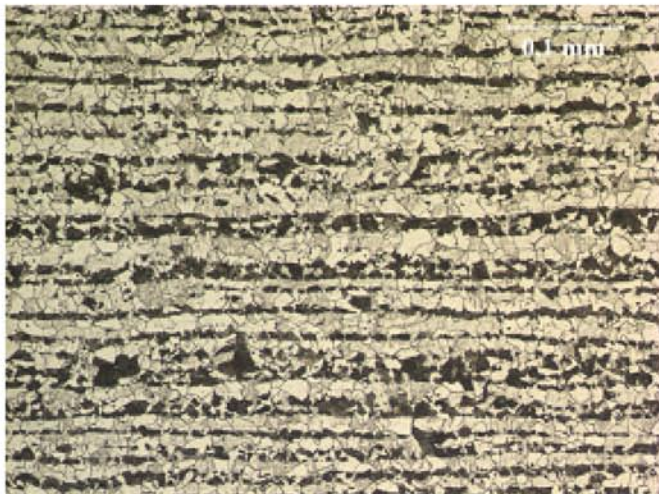
Gatunek	Stan dostarczenia				Stan ponormalizowaniu				Stan po hart. i odpuszcz.			
	Wartości udarności [J/cm ²], w danej temperaturze badania [°C]											
	20	0	-20	-40	20	0	-20	-40	20	0	-20	-40
B27	39	17	9	7	102	33	19	12	61	56	45	37
28MCB5	67	34	17	6	110	57	23	16	48	40	38	30



Rys. 1. Struktura stali gatunku B27 – stan dostarczenia
Fig. 1. Structure of steel grade B27- state of delivery

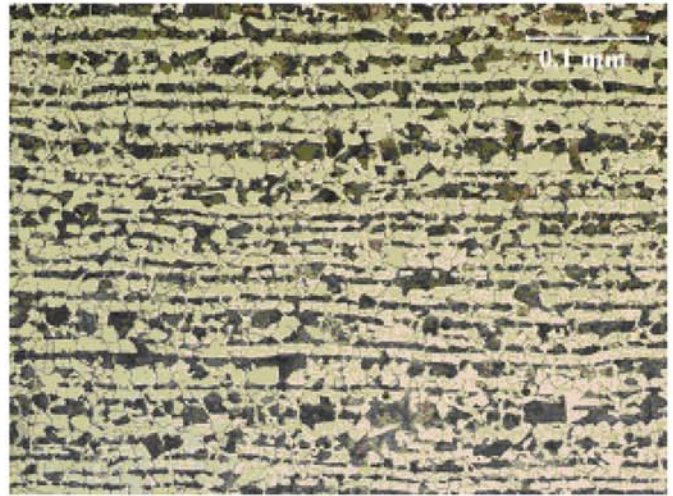


Rys. 2. Struktura stali gatunku 28MCB5 – stan dostarczenia
Fig. 2. Structure of steel grade 28MCB5- state of delivery

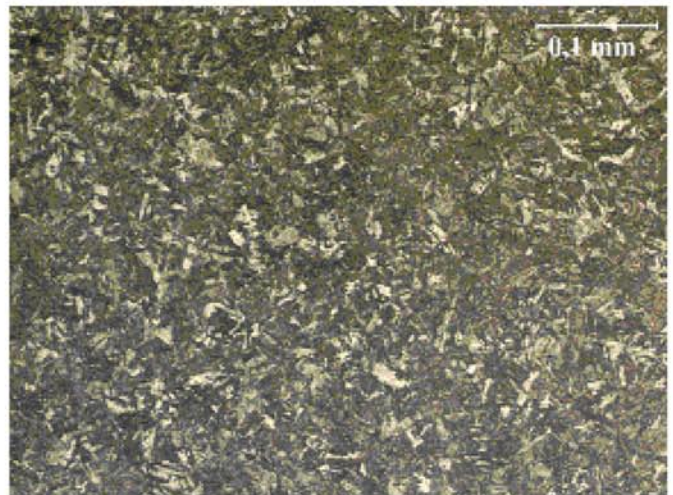


Rys.3. Struktura stali gatunku B27 – stan po normalizowaniu
Fig. 3. Structure of steel grade B27- state after normalization

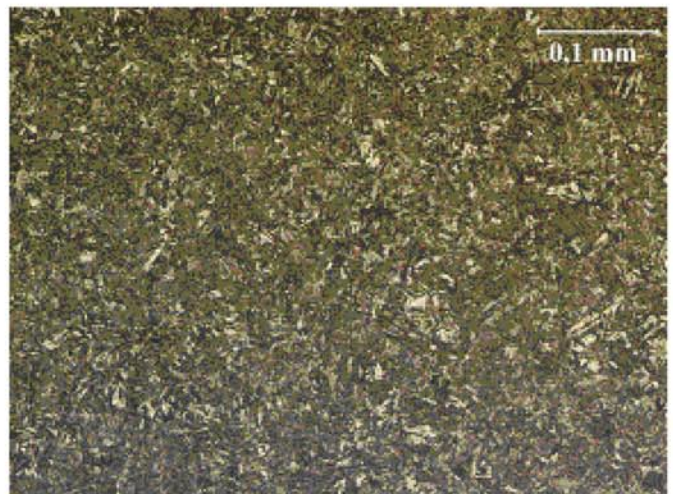
ścia w stan kruchy wartość udarności równą 35 J/cm^2 , często przyjmowaną dla stali konstrukcyjnych, stale te - w stanie dostarczenia - wykazują temperaturę przejścia z plastyczności w kruchość w stosunkowo wysokich temperaturach. Udarności obu gatunków już w temperaturze 0°C spadają do stosunkowo niskich wartości 17 i 34 J/cm^2 – niższych od przyjętego progu kruchości - i udarność ta spada do jeszcze mniejszych wartości w temperaturach ujemnych. Udarność zatem eliminuje bada-



Rys.4. Struktura stali gatunku 28MCB5 – stan po normalizowaniu
Fig. 4. Structure of steel grade 28MCB5- state after normalization



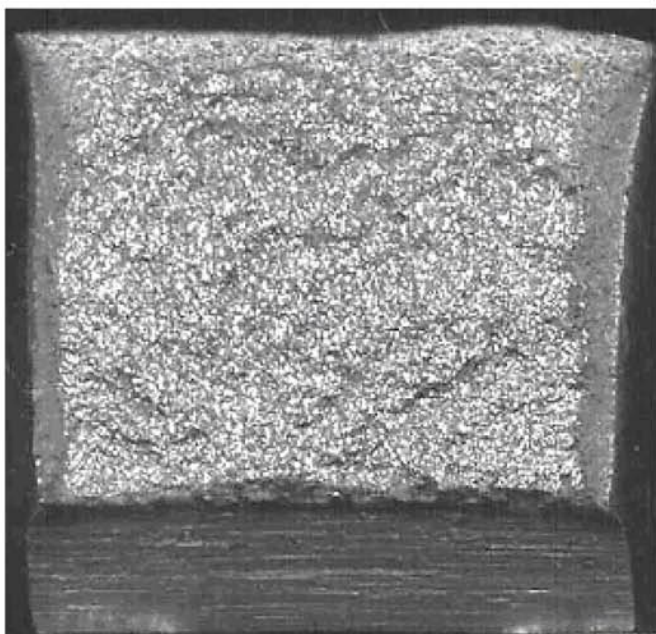
Rys. 5. Struktura stali gatunku B27 – stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 200°C
Fig. 5. Structure of steel grade B27- state after hardening and tempering in 200°C



Rys. 6. Struktura stali gatunku 28MCB5 – stan po hartowaniu i odpuszczaniu w 200°C
Fig. 6. Fig. 5 Structure of steel grade 28MCB5- state after hardening and tempering in 200°C

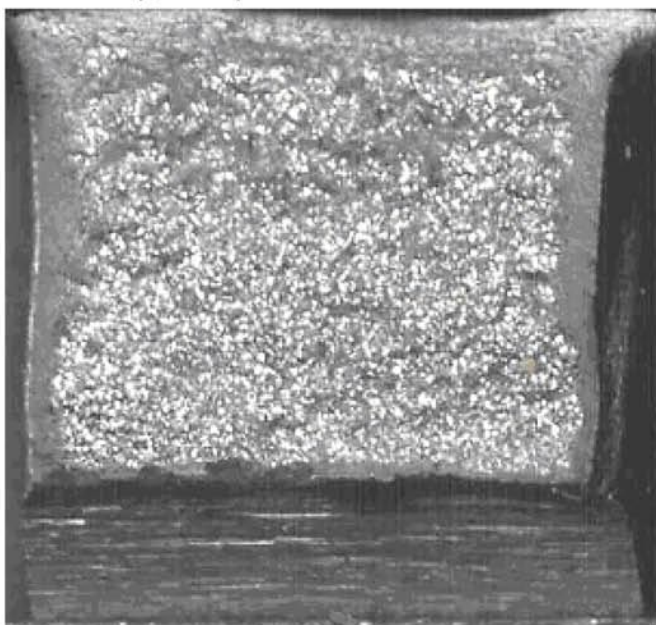
nestale w stanie dostarczenia do zastosowań w temperaturach bliskich i niższych od 0°C w elementach narażonych na obciążenia dynamiczne.

Próbki po normalizowaniu, przedstawiające w obu badanych stalach podobne struktury, wykazują również podobną udarność. Udarność w stanie normalizowanym jest wyższa od udarności w stanie dostarczenia, ale również obserwuje się jej silny spadek już w temperaturach dodatnich. W przypadku



Rys. 7. Obraz makroskopowy przełomu stali gatunku B27 – stan dostarczenia. Temp. badania 20°C

Fig. 7. Macroscopic image of steel grade B27 fracturing – state of delivery; tests temperature- 20 °C



Rys. 8. Obraz makroskopowy przełomu stali gatunku 28MCB5 – stan dostarczenia. Temp. badania 20°C

Fig. 8. Macroscopic image of steel grade 28MCB5 fracturing – state of delivery; tests temperature- 20 °C

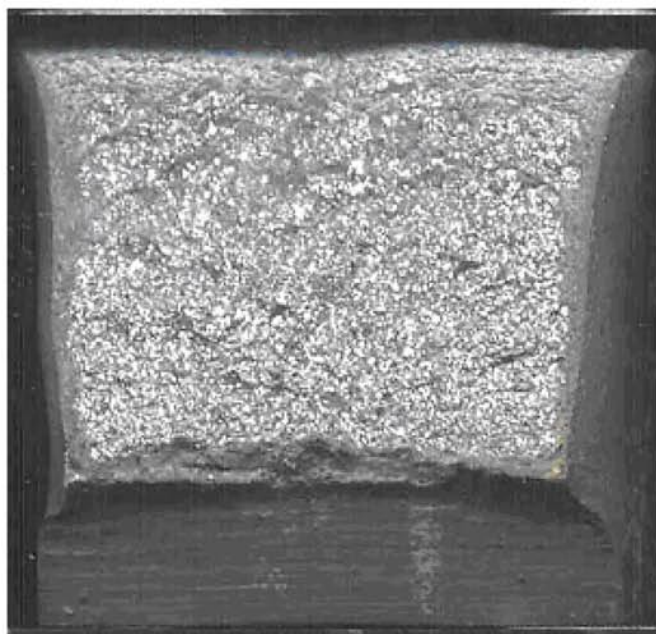
normalizowania przejście z plastyczności w kruchość, oparte na wartości 35 J/cm², występuje w gatunku B27 w temperaturze bliskiej 0°C, natomiast w gatunku 28MCB5 w temperaturze bliskiej -10°C.

Próbki po hartowaniu i niskim odpuszczaniu charakteryzują się niższą udurowością w temperaturze otoczenia od tych ze strukturami ferrytyczno-perlitycznymi, ale ich udurowość zmniejsza się wolno z obniżaniem temperatury, zachowując wartości zbliżone do przyjętego kryterium aż do -40°C.

Analiza badań fraktograficznych

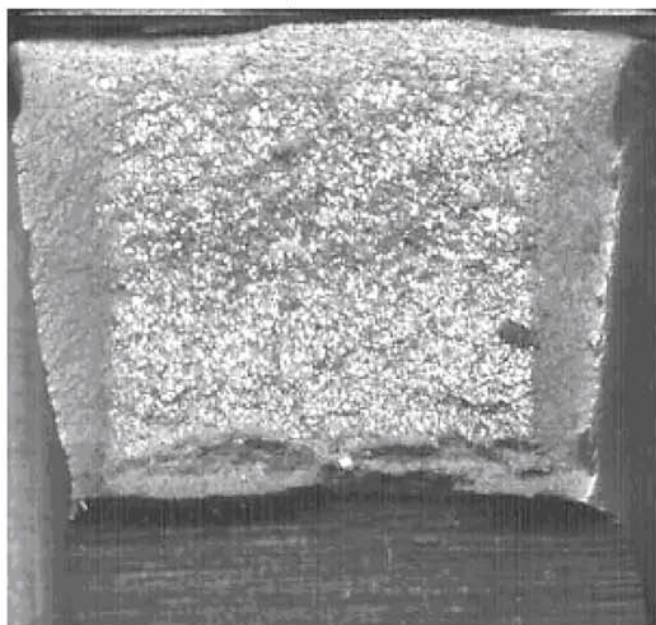
Stale w stanie dostarczenia i po normalizowaniu

Analiza fraktograficzna badanych próbek pokazuje znaczną rozbieżność w ocenie przęchułości opartej na wartości



Rys. 9. Obraz makroskopowy przełomu stali gatunku B27 – stan po normalizowaniu. Temp. badania 20°C

Fig. 9. Macroscopic image of steel grade B27 fracturing – state after normalization; tests temperature- 20 °C



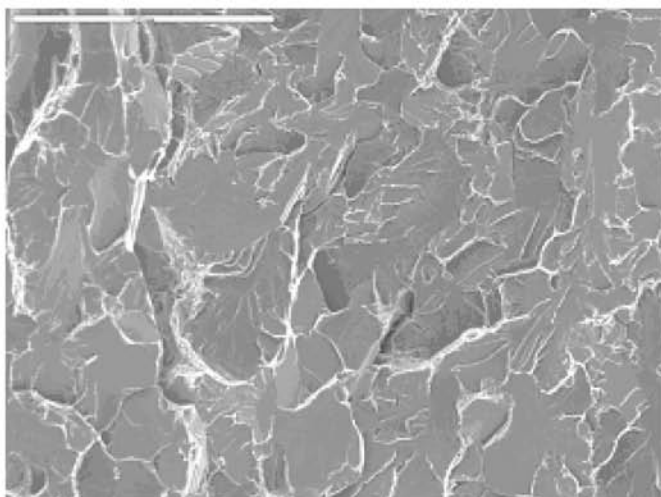
Rys. 10. Obraz makroskopowy przełomu stali gatunku 28MCB5 – stan po normalizowaniu. Temp. badania 20°C

Fig. 10. Macroscopic image of steel grade 28MCB5 fracturing – state after normalization; tests temperature- 20 °C

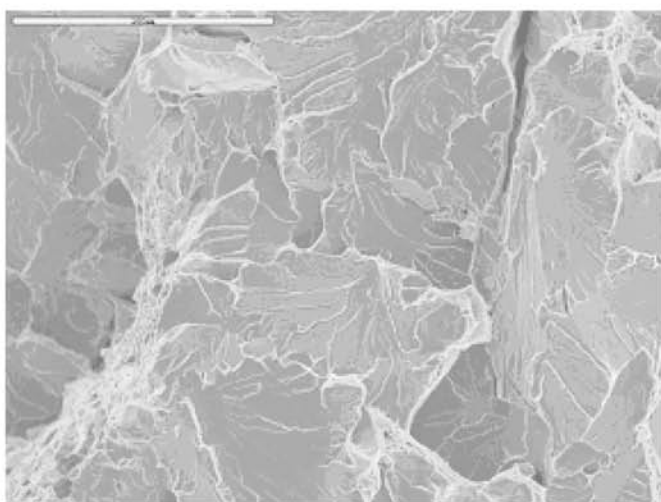
udarności i na charakterze zaistniałego przełomu. Obserwacje makroskopowe przełomów stali w temperaturze 20°C w stanie dostarczenia i po normalizowaniu wskazują na znaczny udział środkowej strefy przełomu, w której występuje przełom kruchy (rysunki 7-10).

Kruchy charakter tego przełomu w analizowanych próbkach potwierdzają badania tej strefy przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (EMS). Mikroskopowy obraz przełomów w strefie środkowej przedstawiono na rysunkach 11 – 14.

Udziały powierzchni przełomu kruchego już w temperaturze 20°C przewyższają 50% w stali B27 w stanie dostarczenia i po normalizacji (wynoszą odpowiednio: 72% i 58%), nato-



Rys. 11. Stal gatunku B27 w stanie dostarczenia
- przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania 20°C
Fig. 11. Steel grade B27 at state of delivery- fracturing in central zone
(SEM - Scanning Electron Microscope). Tests temperature- 20 °C



Rys. 12. Stal gatunku 28MCB5 w stanie dostarczenia
- przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania 20°C
Fig. 12. Steel grade 28MCB5 at state of delivery- fracturing in central zone
(SEM). Tests temperature- 20 °C

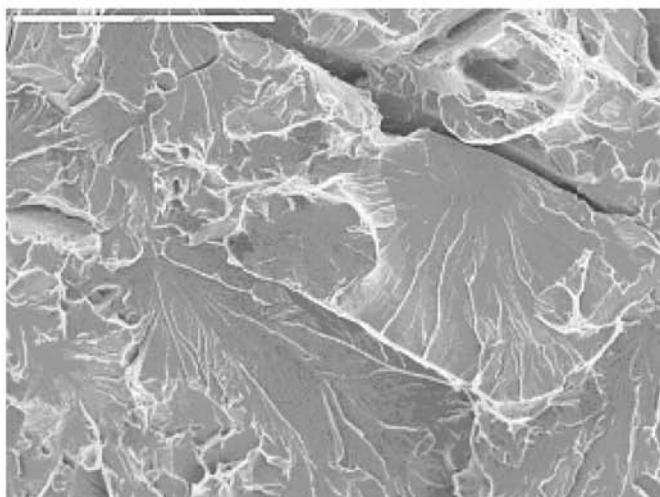
miast w stali 28MCB5 wynoszą: w stanie dostarczenia 61 %, a po normalizacji 42%. Przełomy uzyskane w temperaturze 0°C w obydwu stalach, widoczne na rysunkach 15 – 18, zarówno w stanie dostarczenia, jak i po normalizowaniu charakteryzują się już ponad 75 % udziałem strefy kruchej.

Opierając się zatem na kryterium udziału przełomów - przejście plastyczno kruche badanych stali, w tych dwóch stanach, występuje w temperaturach jeszcze wyższych niż uzyskane na podstawie wartości udarności i ma miejsce powyżej 20°C w stali B27 i w temperaturach bliskich 0°C w stali 28MCB5.

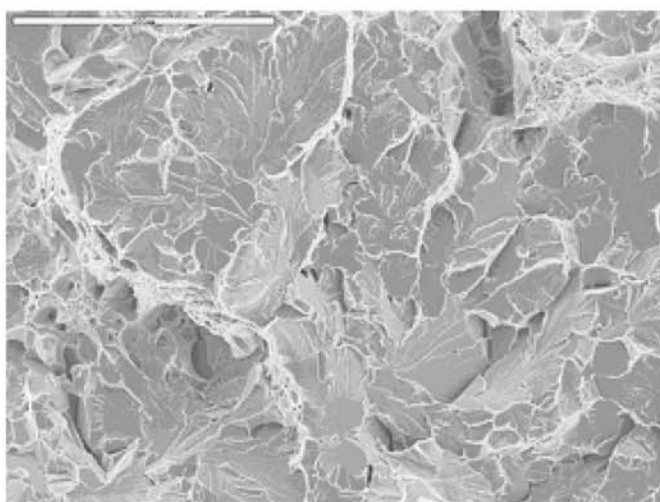
Stale w stanie po hartowaniu i odpuszczaniu w 200°C

Przełomy próbek w stanie po hartowaniu i odpuszczaniu różnią się od przełomów próbek dwóch stanów opisanych wyżej. Obraz makroskopowy przełomów w temperaturze 20°C obu stali po hartowaniu i odpuszczaniu przedstawiono na rysunkach 19 i 20.

Widoczne są szerokie boczne strefy przełomów plastycznych. Strefa środkowa też różni się w tych przełomach. Na rysunkach 21 i 22 przedstawiony jest ich skaningowy obraz. Przełom w tej strefie ma charakter w przeważającej mierze ciągliwy z częścią obszarów przełomu fasetkowego.



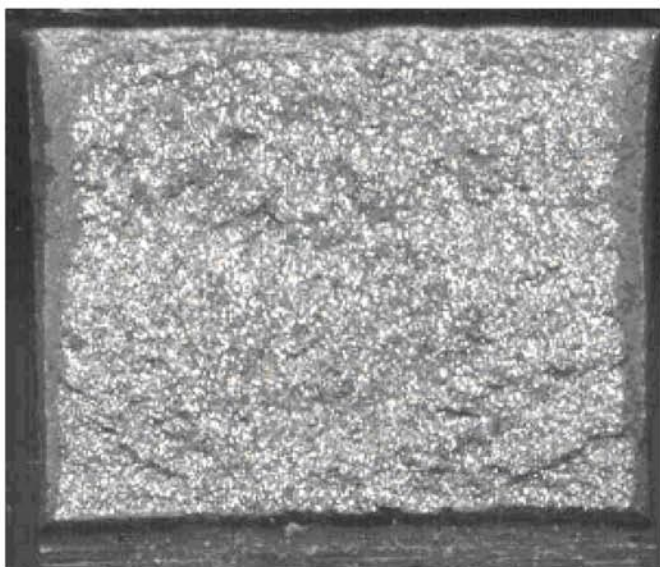
Rys. 13. Stal gatunku B27 w stanie po normalizowaniu
- przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania 20°C
Fig. 13. Steel grade B27 at state after normalization - fracturing in central zone
(SEM). Tests temperature- 20 °C



Rys. 14. Stal gatunku 28MCB5 w stanie po normalizowaniu
- przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania 20°C
Fig. 14. Steel grade 28MCB5 at state after normalization - fracturing in central zone
(SEM). Tests temperature- 20 °C

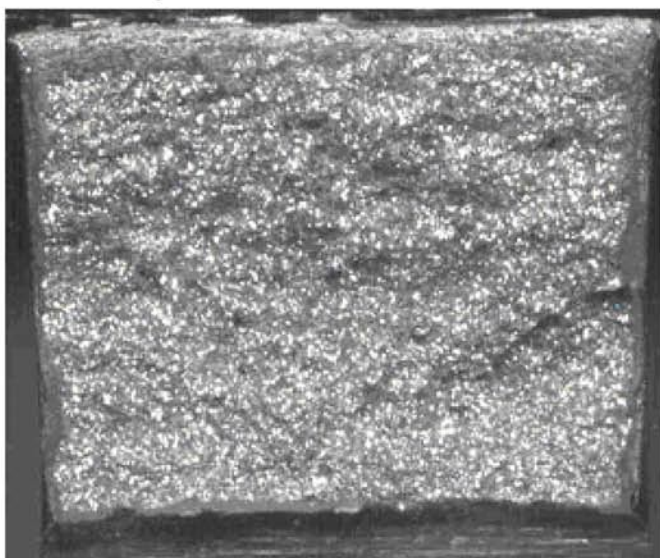
Przełomy stali powstałe w temperaturze -40°C też są inne niż te uzyskane w stanach dostarczenia i po normalizowaniu w tej temperaturze. Makroskopowe obrazy tych przełomów widoczne są na rysunkach 23 i 24, natomiast obrazy z mikroskopu skaningowego stref środkowych na rysunkach 25 i 26.

W tej najniższej temperaturze badania przełomy w próbkach po hartowaniu i odpuszczaniu zachowują jeszcze względnie szerokie boczne strefy przełomów plastycznych oraz wyraźnie zaznaczoną strefę przełomu ciągliwego pod karbem mechanicznym. Centralna strefa, w której występował przełom typowo kruchy w próbkach w stanie dostarczenia i po normalizowaniu, w próbkach po hartowaniu i odpuszczaniu zawiera znaczący udział fragmentów przełomu plastycznego, a pozostała część przełomu łupliwego charakteryzuje się częściowo odkształconymi fasetkami, charakterystycznymi dla przełomu rozdzielczego. Taki rodzaj dekohezji pozwolił zachować średnią wartość udarności równą 45 J/cm² w temperaturze -20°C i 37 J/cm² w temperaturze -40°C dla stali B27, oraz odpowiednio 38 J/cm² i 30 J/cm² dla stali 28MCB5. Zatem w przypadku tych próbek, biorąc pod uwagę kryterium charakteru przełomu, należy uznać, że próg kruchości nie wystąpił w tym stanie do temperatury -40°C.



Rys. 15. Obraz makroskopowy przelomu stali gatunku B27 – stan dostarczenia. Temp. badania 0°C

Fig. 15. Macroscopic image of steel grade B27 fracturing – state of delivery; tests temperature-0 °C



Rys. 16. Obraz makroskopowy przelomu stali gatunku 28MCB5 – stan dostarczenia. Temp. badania 0°C

Fig. 16. Macroscopic image of steel grade 28MCB5 fracturing – state of delivery; tests temperature- 0 °C



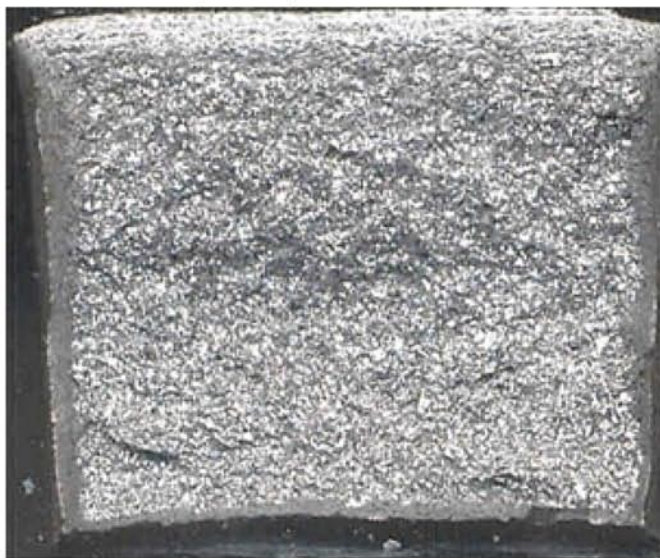
Rys. 19. Obraz makroskopowy przelomu stali gatunku B27 – stan po hart/odp. Temp. badania 20°C

Fig. 19. Macroscopic image of steel grade B27 fracturing – state after hardening and tempering; tests temperature- 20 °C



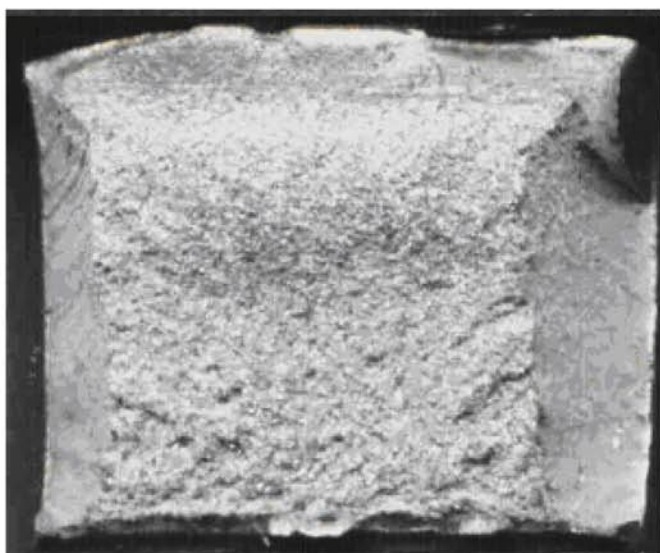
Rys. 17. Obraz makroskopowy przelomu stali gatunku B27 – stan po normalizowaniu. Temp. badania 0°C

Fig. 17. Macroscopic image of steel grade B27 fracturing – state after normalization; tests temperature- 0 °C



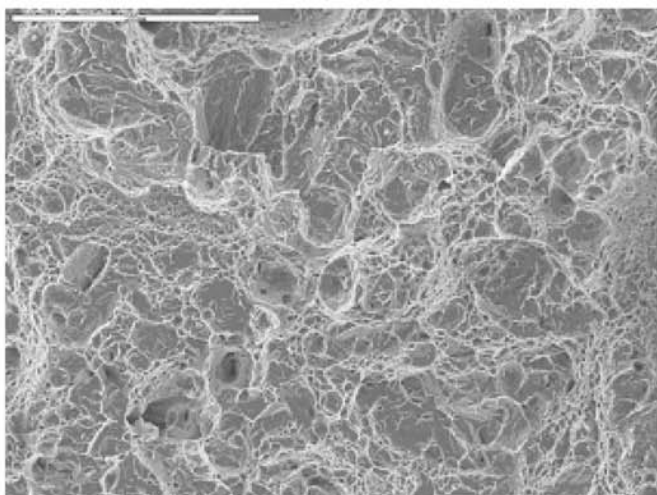
Rys. 18. Obraz makroskopowy przelomu stali gatunku 28MCB5 – stan po normalizowaniu. Temp. badania 0°C

Fig. 18. Macroscopic image of steel grade 28MCB5 fracturing – state after normalization; tests temperature- 0 °C



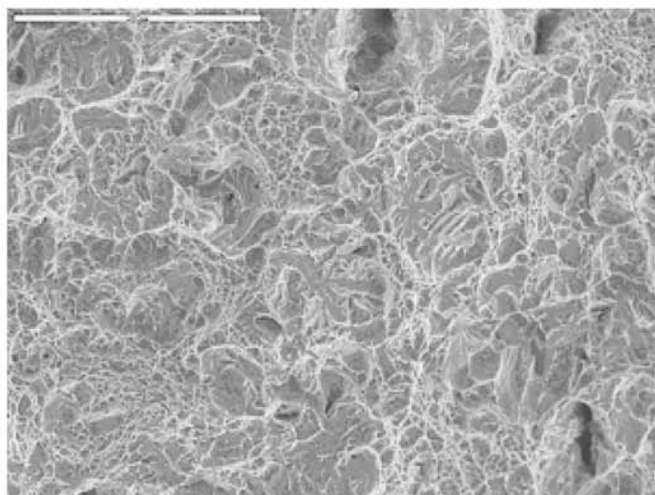
Rys. 20. Obraz makroskopowy przelomu stali gatunku 28MCB5 – stan po hart/odp. Temp. badania 20°C

Fig. 20. Macroscopic image of steel grade 28MCB5 fracturing – state after hardening and tempering; tests temperature- 20 °C



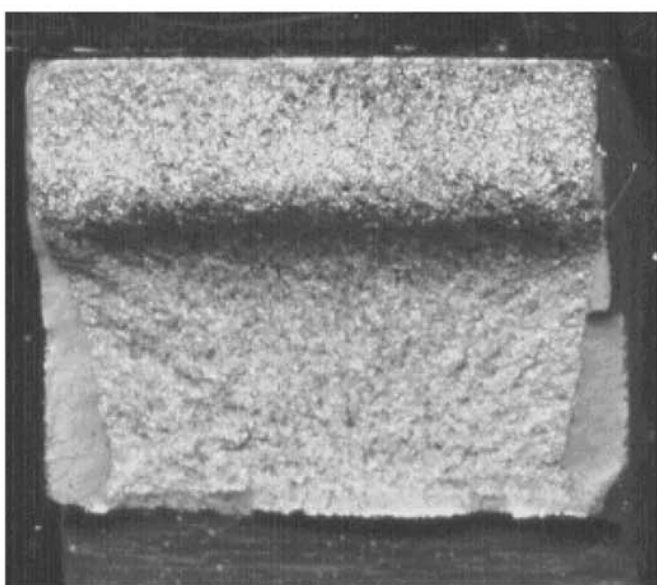
Rys. 21. Stal gatunku B27 w stanie po hart/odp. - przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania 20°C

Fig. 21. Steel grade B27- state after hardening and tempering, fracturing in central part (SEM); tests temperature- 20 °C



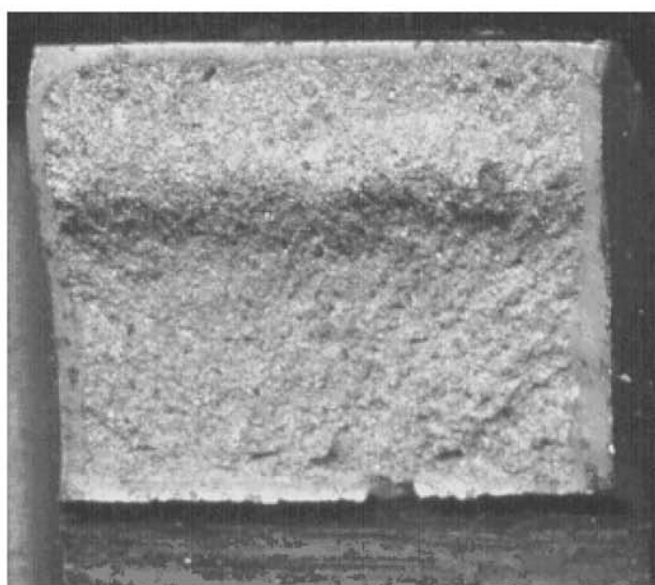
Rys. 22. Stal gatunku 28MCB5 w stanie po hart/odp. - przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania 20°C

Fig. 22. Steel grade 28MCB5- state after hardening and tempering, fracturing in central part (SEM); tests temperature- 20 °C



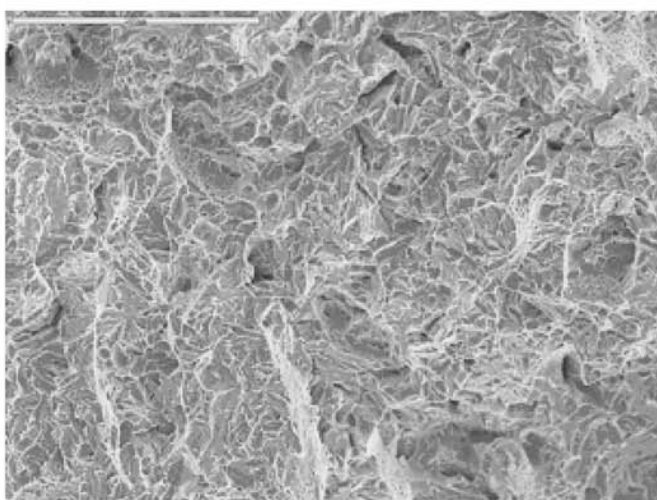
Rys. 23. Obraz makroskopowy przełomu stali gatunku B27 – stan po hart/odp. Temp. badania -40°C

Fig. 23. Macroscopic image of steel grade B27 fracturing – state after hardening and tempering; tests temperature- -40 °C



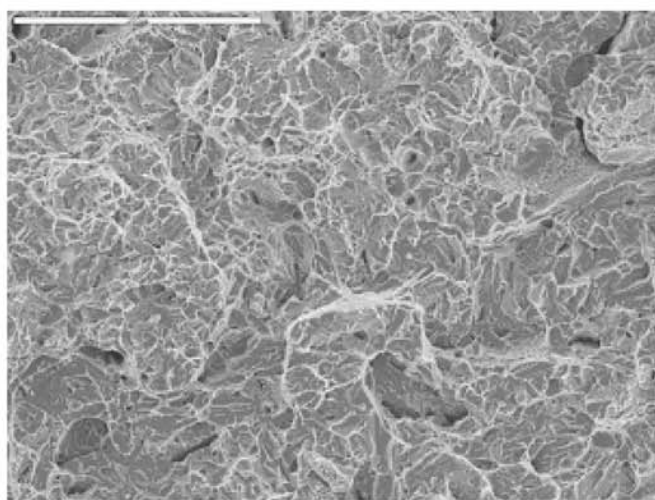
Rys. 24. Obraz makroskopowy przełomu stali gatunku 28MCB5 – stan po hart/odp. Temp. badania -40°C

Fig. 24. Macroscopic image of steel grade 28MCB5 fracturing – state after hardening and tempering; tests temperature- -40 °C



Rys. 25. Stal gatunku B27 w stanie po hart/odp. - przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania -40°C

Fig. 25. Steel grade B27- state after hardening and tempering, fracturing in central part (SEM); tests temperature- -40 °C



Rys. 26. Stal gatunku 28MCB5 w stanie po hart/odp. - przełom w strefie środkowej (EMS). Temp. badania -40°C

Fig. 26. Steel grade 28MCB5- state after hardening and tempering, fracturing in central part (SEM); tests temperature- -40 °C

Podsumowanie

Analizowane stale niskowęglowe z borem zaliczane są do grupy stali odpornych na ścieranie, jednak producenci udostępniają je w różnych stanach, po różnych obróbkach. Stale te, zawierające odmienne struktury, charakteryzują się nie tylko różną odpornością na ścieranie, ale również inną odpornością na kruche pękanie, co w wielu ich zastosowaniach ma znaczenie zasadnicze. Przyjmowane są różne kryteria do wyznaczania progu kruchości materiału. Często kryterium jest arbitralnie przyjmowanie pewnej wartości pracy łamania lub uderności. Dla stali konstrukcyjnych przyjmuje się często wartość równą lub bliską uderności 35 J/cm². Odwołując się do tego kryterium, zarówno w gatunku B27, jak i gatunku 28MCB5 - w stanie dostarczenia - temperatura przejścia w stan kruchy ma miejsce już w temperaturach dodatnich. Normalizowanie przesuwa ten próg do temperatur niewiele niższych od 0°C. Dopiero stan po hartowaniu i odpuszczaniu wykazuje, według tego kryterium, bezpieczne wartości uderności do temperatury około -40°C.

Uważa się, że przyjęta arbitralnie progowa wartość uderności odpowiada innemu kryterium, bezpośrednio odwołującego się do charakteru przełomu, mianowicie za temperaturę przejścia z plastyczności w kruchość przyjmuje się temperaturę,

w której występuje przełom w połowie ciągliwy i w połowie kruchy. Analiza fraktograficzna badanych stali wykazała, że zgodnie z tym kryterium próg kruchości dla stanów dostarczenia i po normalizowaniu przesunięta jest do jeszcze wyższych temperatur. Badane gatunki stali w tych stanach, posiadające strukturę ferrytyczno-perlityczną, charakteryzowały się ponad 50% udziałem przełomu kruchego już w temperaturach dodatnich. Następowo to już w temperaturze 20°C dla stali gatunku B27 i w temperaturze bliskiej 0°C dla stali gatunku 28MCB5, pomimo uzyskiwania stosunkowo wysokich wartości uderności Charpy'ego. Analizowane stale w stanie po hartowaniu i niskim odpuszczaniu natomiast, wykazuje znaczący udział przełomu plastycznego zapewniający względnie bezpieczną odporność na przełom kruchy w całym zakresie temperatury, w którym przeprowadzono badania.

Należy zatem przykładać szczególną uwagę do stanu stosowanego gatunku stali, szczególnie jeżeli konstrukcja, w której ma być zastosowana ta stal narażona jest na obciążenia dynamiczne, mogące doprowadzić do wystąpienia niebezpiecznego kruchego przełomu w temperaturach pracy.

Praca wykonana w ramach Projektu Rozwojowego nr 03 0039 06.

Literatura

- [1] Pękalski G., *Wybrane zagadnienia materiałowe elementów maszyn górnictwa odkrywkowego narażonych na zużywanie ścierne a możliwości zastosowania stali Hardox*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 4-5, 2005
- [2] Frydman S., Konat Ł., Łętkowska B., Pękalski G., *Impact resistance and fractography of low-alloy martensitic steels*, Arch. of Foundry Eng., spec. iss. 1, vol. 8, 2008, 89-94
- [3] Dudziński W., Konat Ł., Pękalska L., Pękalski G., *Struktury i własności stali Hardox400 i Hardox500*, Inżynieria Materiałowa, nr 3, 2006
- [4] Frydman S., Konat Ł., Pękalski G., *Analiza fraktograficzna stali Hardox 400 i Hardox 500 w badaniach udernościowych*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 3-4, 2007
- [5] Frydman S., Pękalski G., *Struktura a własności współczesnych stali spawalnych o zwiększonej odporności na ścieranie*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 4/5, 2009
- [6] Rautaruukki Corporation, P.O. Box 138, FI-00811 Helsinki, Finland
- [7] ZeneriAcciai S.P.A., Via J. Gutenberg, 11/13, 25020 Poncarale (Brescia), Italy
- [8] <http://www.ruukki.com/Products-and-solutions/Steel-products/>
- [9] <http://www.zeneri.com/english/abotab.htm>

Artykuł recenzowali doc. dr inż. Grzegorz Pękalski

dr inż. Jerzy Alenowicz

Rękopis otrzymano 26.07.2011 r. *2218



Cykl: prolog do konstrukcji...