

Ryszard MOLENDĄ, Roman KUZIĄK

Instytut Metalurgii Źelaza

ZMODYFIKOWANY TEST HOLE EXPANSION

W artykule przedstawiono propozycję modyfikacji testu Hole Expansion w ten sposób by możliwy był pomiar wskaźnika HE na taśmach stalowych o szerokości 50mm obrabianych cieplnie w symulatorze Gleeble 3800. Zaprojektowano i wykonano oprzyrządowanie, które współpracując z maszyną wytrzymałościową Zwick Z250 umożliwia wyznaczenie wskaźnika HE na zmodyfikowanych próbkach taśm stalowych. Pomiar wskaźnika HE przeprowadzone na taśmach ze stali DP potwierdziły przydatność opracowanego testu badawczego.

Słowa kluczowe: Test Hole Expansion, stal DP, ferryt, bainit, martenzyt, wskaźnik HE

MODIFIED HOLE EXPANSION TEST

This article presents the proposal for modification of the Hole Expansion test so that HE index measurements are possible on steel strips of 50mm in width after heat treatment with Gleeble 3800 simulator. The tooling which can operate with Zwick Z250 testing machine to allow the determination of HE index on modified steel strip test pieces was designed and made. The HE index measurements taken on DP steel strips have confirmed the suitability of the developed research test.

Keywords: Hole Expansion test, DP steel, ferrite, bainite, martensite, HE index

1. DOSTOSOWANIE PRÓBY HOLE EXPANSION DO BLACH OBRABIANYCH CIEPLNIE W SYMULATORZE GLEELE 3800

Próba technologiczna rozwierania otworu HE (z ang. *Hole Expansion*) jest powszechnie stosowana w badaniach blach cienkich ze stali typu AHSS (Zaawansowane stale o wysokiej wytrzymałości) [1–16]. Próbę HE wykonuje się za pomocą urządzeń skonstruowanych specjalnie do tego celu. Procedura przeprowadzenia badań jest opisana w normie ISO/DIS 16630 [17]. Zgodnie z warunkami tej normy próbka do badań ma postać krążka lub kwadratu o średnicy lub boku 100 mm z centralnym otworem o średnicy 10,00 mm. Próbka podczas próby umieszczona jest między dwoma połówkami matrycy dociśniętymi siłownikiem hydraulicznym siłą wywołującą naprężenie ściskające mieszczące się w przedziale 10÷30 MPa.

W otwór próbki wciskany jest cylindryczny stempel z zakończeniem stożkowym. W trakcie próby obserwuje się krawędź powiększanego otworu w celu zidentyfikowania momentu, w którym powstają pęknięcia. W chwili, kiedy wielkość pęknięcia jest porównywalna z grubością blachy, operator zatrzymuje ruch stempla i eksperyment uważa się za zakończony. Po zakończonym eksperymencie mierzy się średnicę powiększonego otworu i wyznacza wskaźnik HE ze wzoru (1):

$$HE = \frac{D_k - D_0}{D_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

D_0 – średnica początkowa otworu

D_k – średnica końcowa otworu

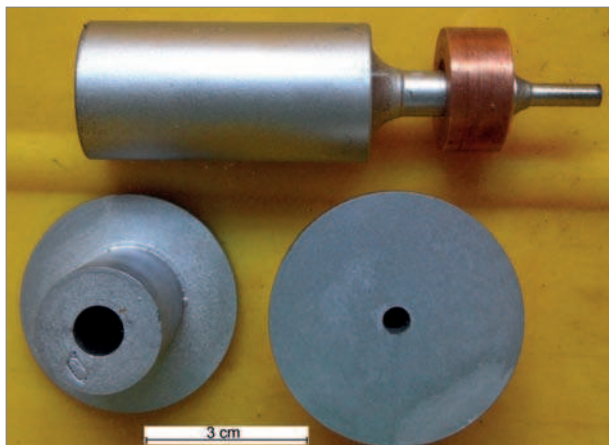
W Instytucie Metalurgii Źelaza prowadzone są badania dotyczące technologii ciągłego wyżarzania blach

cienkich ze stali typu AHSS, których najważniejszym celem jest opracowanie parametrów cykli temperaturowych powodujących uzyskanie optymalnych właściwości mechanicznych oraz technologicznych, do których zalicza się wskaźnik HE, ponieważ charakteryzuje on podatność pasma do wywijania krawędzi.

Badania symulacyjne procesu ciągłego wyżarzania stali AHSS prowadzone są na taśmach stalowych o ustalonej szerokości 50 mm, wynikającej z możliwości symulatora Gleeble. Uniemożliwia to wykonanie standardowych próbek do testu *Hole Expansion*, jak również wykorzystania dostępnych urządzeń komercyjnych przystosowanych do tego testu.

Z tego powodu opracowano własną metodykę próby *Hole Expansion* na zmodyfikowanych próbkach o średnicy 50 mm i centralnie umieszczonym otworze o średnicy 5,00 mm. Modyfikacja stempla stożkowego służącego do rozwierania otworu polegała na zmniejszeniu jego średnicy w części cylindrycznej do 25,00 mm. Kąt rozwarcia stożka wynosi 60°. Stal NC11LV, z której wykonano stempel obrabiono cieplnie w celu uzyskania twardości 58HRC. W pierwszym etapie pracy zaprojektowano i wykonano niezbędne oprzyrządowanie służące do wybijania otworów w próbce. Wykonano cztery matryce pomocnicze, oraz stempel, którym wybijano otwory o średnicy 5,00 mm. W osi matrycy górnej znajdował się otwór o średnicy 5,01 mm, natomiast w dolnych matrycach pomocniczych średnice otworów były zróżnicowane i wynosiły odpowiednio: 5,10; 5,15 i 5,20 mm (Rys. 1).

Przygotowany w ten sposób zestaw matryc dolnych umożliwiał uzyskiwanie w procesie dziurowania różnych wartości współczynnika luzu w wybijanych otworach. Wartość współczynnika luzu C w procesie dziurowania otworów w próbkach obliczano posługując się wzorem (2):



Rys. 1. Oprzyrządowanie do wybijania otworów (stempel i stabilizator) oraz górna i dolna część matrycy pomocniczej

Fig. 1. Tooling for punching holes (stamp and stabiliser) and the upper and bottom part of auxiliary die block

$$C = \frac{D_d - D_g}{2t} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- C – współczynnik luzu
- D_d – średnica otworu w matrycy dolnej
- D_g – średnica otworu w matrycy górnej
- t – grubość blachy

2. OPERACJA WYBIJANIA OTWORÓW W PRÓBCE

Próbkę w postaci krążka o średnicy 50 mm umieszcza się pomiędzy matrycami pomocniczymi, a całość połączono specjalnym pierścieniem centrującym zapewniającym osiowe ustawienie obu otworów. Do otworu w górnej matrycy o średnicy 5,01 mm wprowadzono stempel o średnicy 5,00 mm. Komplet matryc pomocniczych wraz z próbką i stemplem umieszczano między górną a dolną częścią matrycy głównej (tzn. tej na której realizowany był test HE), które skręcono za pomocą sześciu śrub M16 klasy wytrzymałościowej 10.9 momentem siły wynoszącym 150 Nm. W próbce wybijano otwór metodą dynamiczną poprzez oddziaływanie na stempel stalowym walcem posiadającym energię potencjalną wynoszącą 500 J.

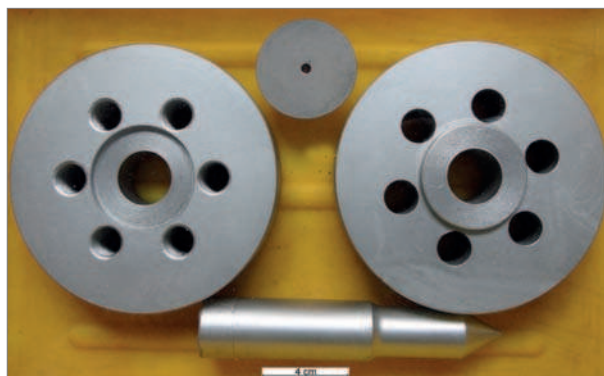
3. STANOWISKO DO PRZEPROWADZANIA PRÓBY *HOLE EXPANSION*

W skład podstawowych elementów stanowiska badawczego do realizacji próby HE wchodzi następujące elementy (rys. 1):

- Matryca dolna;
- Matryca górna;
- Stempel stożkowy.

Badana próbka jest umieszczona w zagłębieniu matrycy dolnej, a następnie dociskana cylindrycznym występem znajdującym się w matrycy górnej. Połówki matrycy skręcono sześcioma śrubami M16 klasy 10.9 momentem siły równym 80 Nm. Obie części matrycy połączone są ze sztywną metalową konstrukcją

w kształcie prostopadłościanu z umieszczoną w części centralnej cylindryczną komorą, w której możliwe jest zainstalowanie oświetlenia diodowego oraz umieszczenie kamery cyfrowej sprzężonej z komputerem, by na jego monitorze obserwować proces powstawania i rozwoju pęknięć na obrzeżu otworu, którego średnica jest powiększana w trakcie procesu wciskania stempla stożkowego. Na rys. 2 przedstawiono części składowe układu do wyznaczenia wskaźnika HE obejmujące: dwuczęściową matrycę oraz stempel stożkowy. W górnej części rysunku widoczna jest próbka z centralnie umieszczonym otworem, który jest rozwierany podczas wykonywania testu HE.



Rys. 2. Matryca do realizacji testu HE oraz stempel stożkowy

Fig. 2. Die block for HE test and conical stamp



Rys. 3. Widok układu pomiarowego do wyznaczenia współczynnika HE zainstalowanego na trawersie maszyny wytrzymałościowej Zwick Z250

Fig. 3. View of the measuring system for determination of HE index, installed on the connecting link of testing machine Zwick Z250

Matrycę wraz z próbką oraz oprzyrządowaniem pomocniczym umieszczono na trawersie maszyny wytrzymałościowej Zwick Z250 (rys. 3). W górnym nieruchomym uchwycie maszyny zamocowano stempel stożkowy, który był skierowany ostrzem w dół. Powierzchnia stożka przed rozpoczęciem testu pokryta była olejem klasy SAE 80W/90. W kolejnym etapie przygotowania do realizacji testu HE przeprowadzono centrowanie stożka stempla względem otworu znajdującego się w próbce. Próbka zainstalowana w matrycy przemieszczana jest w górę z prędkością wynoszącą 0,1 mm/s. Powoduje to wciskanie stempla w otwór i w następstwie wywijanie kołnierza otworu i powiększanie jego średnicy.

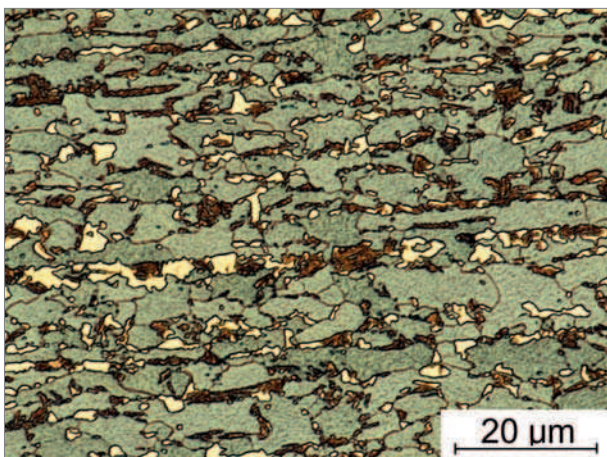
Prowadzone obserwacje rozwierzanego kołnierza w trakcie testu HE pozwoliły na stwierdzenie, że pęknięcia pojawiają się wówczas, gdy wartość przesunięcia płaszczyny próbki względem stożkowego stempla wynosi około 4 mm.

Występowanie pierwszych pęknięć na kołnierzu otworu stwierdzono po 40 sekundach testu, kolejne obserwacje prowadzono co 5 s.

Próbę przerywano wówczas kiedy wielkość pęknięcia na kołnierzu była porównywalna z grubością blachy. Następnie mierzono średnicę powiększonego otworu i korzystając ze wzoru (1) obliczano wartość wskaźnika HE.

4. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzono osiem prób *Hole Expansion* na próbkach ze stali typu DP o drobnoziarnistej strukturze wielofazowej składającej się z osnowy ferrytycznej oraz wysp bainitu i martenzytu, rys. 4. Opis procesu ciągłego wyżarzania blach, który zastosowano do utworzenia tej struktury przedstawiono w pracy [18].

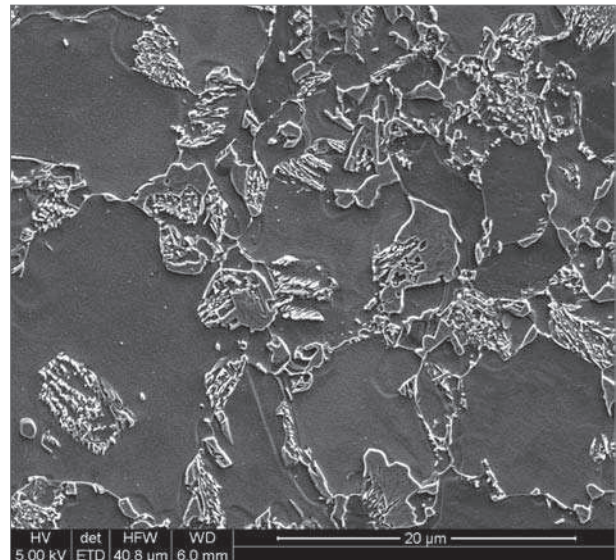


Rys. 4. Struktura wielofazowa stali typu DP. Mikroskopia świetlna. Trawienie odczynnikami LePera

Fig. 4. Multi-phase structure of DP steel. Light microscopy. Etching with LePera's reagent

Przedstawioną na rys. 4. strukturę badanej stali ujawniono w wyniku trawienia odczynnikami LePera. Ziarna ferrytu zabarwione są na kolor jasnozielony, wyspy martenzytyczne na kolor jasnożółty, zaś bainit na kolor brązowy. Duże rozdrobienie struktury badanej stali sprawia, że dokładna identyfikacja poszczególnych jej składników w oparciu o badania prowadzone

za pomocą mikroskopu świetlnego jest utrudniona. Badania struktury przeprowadzone za pomocą mikroskopu skaningowego pozwoliły na dokładną identyfikację wysp bainityczno-martenzytycznych w osnowie ferrytycznej, jak również pojedynczych ziaren bainitu i martenzytu (rys. 5). Właściwości mechaniczne blach z badanej stali były następujące: $R_{e0,2}$ – 324 MPa, R_m – 620 MPa, A_5 – 24%.



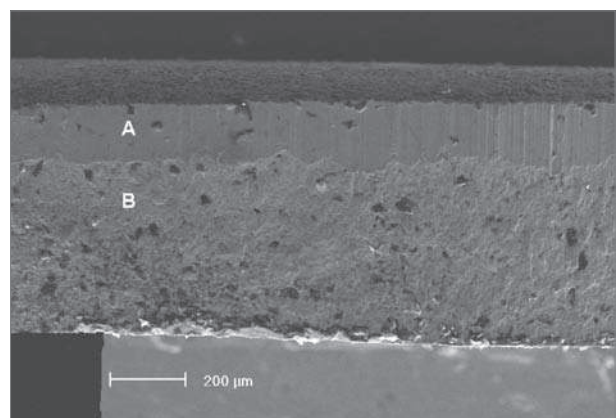
Rys. 5. Struktura wielofazowa stali DP. Mikroskop skaningowy

Fig. 5. Multi-phase structure of DP steel. Scanning microscope

Otwory w badanych próbkach, wykonanych z blachy o grubości 0,80 mm wybijano przy użyciu opisanego powyżej oprzyrządowania, stosując matrycę dolną z otworem o średnicy 5,20 mm. Obliczona ze wzoru (2) wartość współczynnika luzu C (wzór 2) wyniosła 12%.

Udział „warstwy błyszczącej” na przekroju wzdłużnym otworów oszacowano na 25%.

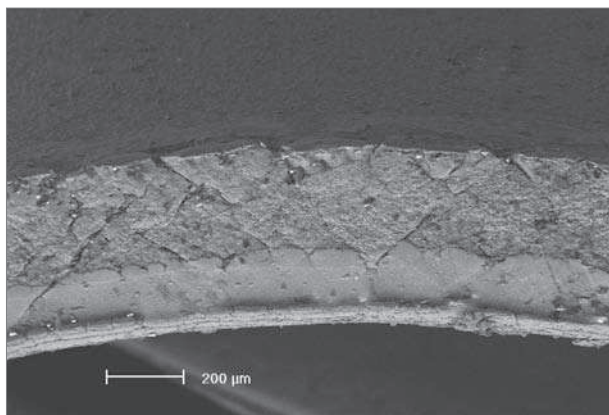
Analiza mikroskopowa powierzchni ścian otworów wybijanych w próbkach metodą dynamiczną wskazuje, że występują w nich dwa rodzaje warstw, tj. warstwa błyszcząca i warstwa krucha.



Rys. 6. Warstwa błyszcząca – (A) i warstwa krucha – (B) na przekroju ścianki otworu wybitego w próbce

Fig. 6. Glossy layer – (A) and brittle layer – (B) at cross-section of the wall of hole punched in test piece

Obserwacja kołnierza próbki po próbach prowadzących do powiększenia średnicy otworu o około 30% wskazują na powstawanie licznych mikropęknięć, których większość została zlokalizowana w warstwie kruchej rys. 7.



Rys. 7. Pęknięcia na kołnierzu próbki przy otworze powiększonym w teście HE o 28%

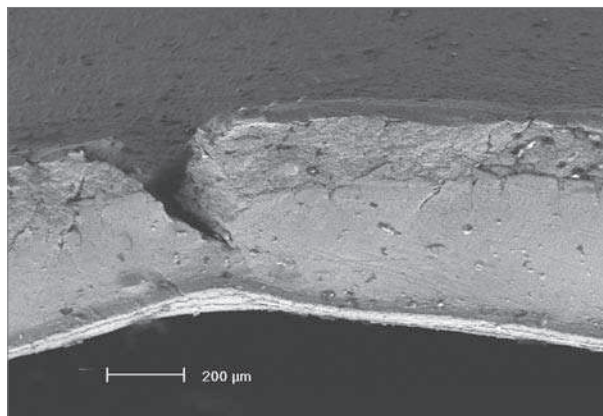
Fig. 7. Cracks on test piece's flange at the hole enlarged by 28% in HE test

Wyraźne pęknięcia na kołnierzu próbki obserwowano kiedy średnica otworu była powiększona powyżej 35% (rys. 8 i 9).

Na rys. 10 przedstawiono widok kołnierza próbki po teście *Hole Expansion*.

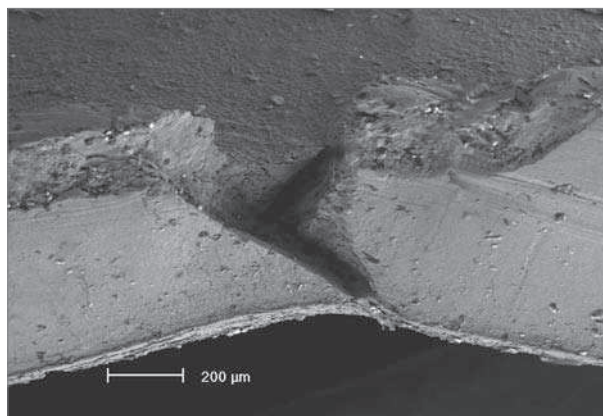
Po kilku próbach wstępnych wykonano osiem testów *Hole Expansion*. Zmierzona wartość średnia wskaźnika HE wyniosła 40,5%, przy odchyleniu standardowym 3,1%. Uzyskany wynik porównano z danymi literaturowymi dotyczącymi wartości współczynnika HE dla stali typu DP (tabela 1). Badania opisane w literaturze wykonywano na standardowych próbkach zgodnie z normą ISO/DIS 16630, tzn. próbka miała kształt koła o średnicy 100 mm z centralnie umieszczonym otworem o średnicy 10,00 mm.

Dla stali AHSS o zróżnicowanym poziomie wytrzymałości na rozciąganie zawierającym się w przedzia-



Rys. 8. Pęknięcia na kołnierzu próbki przy otworze powiększonym w teście *Hole Expansion* o 40%

Fig. 8. Cracks on test piece's flange at the hole enlarged by 40% in *Hole Expansion* test



Rys. 9. Pęknięcia na całej szerokości kołnierza próbki. Średnica otworu powiększona o 44%

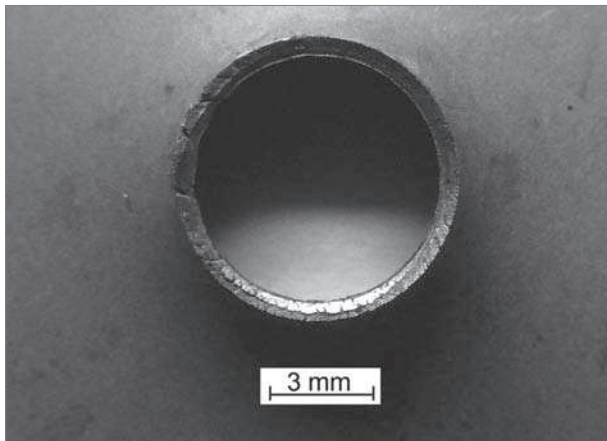
Fig. 9. Cracks over the entire width of test piece's flange. Hole diameter enlarged by 44%

le 530÷1100 MPa, wartości współczynnika HE mięści się się w przedziale 27÷103%. Dla blach ze stali DP o wytrzymałości zawartej w przedziale 620÷680 MPa,

Tabela 1. Wartości wskaźników HE dla stali typu AHSS wyznaczonych w próbie *Hole Expansion* zgodnie z normą ISO/DIS 16630 przez autorów prac [5, 9, 14–16]

Table 1. Values of HE indices for AHSS steels determined in *Hole Expansion* test in accordance with ISO/DIS 16630 by the authors of [5, 9, 14–16]

Lp.	Materiał badań	R_m [MPa]	Wskaźnik HE [%]	Pozycja literaturowa
1	stal DP	650	35	9
2	stal DP	820	27	9
3	stal DP	530	52	14
4	stal DP	630	34	14
5	stal DP	650	43	14
6	stal DP	1020	56	14
7	stal DP	815	75	5
8	stal DP	890	62	5
9	stal DP	1100	34	5
10	Stal DP	870	52	15
11	Stal DP	830	85	15
12	Stal DP	570	97	16
13	Stal DP	620	103	16
14	TRIP600	680	40	14



Rys. 10 Widok kołnierza próbki po teście *Hole Expansion*. Wartość obliczonego wskaźnika *HE* wyniosła 42%

Fig. 10 View of test piece's flange after *Hole Expansion* test. The calculated *HE* index was 42%

stwierdza się także duży rozrzut wartości wskaźnika *HE*, którego wartość mieści się w przedziale 34±103%. Zmierzona w niniejszych badaniach wartość wskaźnika *HE* dla stali DP wyniosła 40,5%. Pomimo, że test *Hole Expansion* przeprowadzony został na próbkach innych niż narzuca to norma ISO/DIS 16630, to zmie-

rzona jego wartość jest zbliżona do wskaźników wyznaczonych na stalach DP o zbliżonym poziomie wytrzymałości przez autorów prac [9] i [14]. Brak możliwości bezpośredniej obserwacji kołnierza próbki w trakcie przeprowadzania testu *Hole Expansion* jest poważnym mankamentem opracowanej metodyki badawczej. Powoduje to wydłużenie czasu trwania eksperymentu oraz wymagana jest większa ilość prób do przeprowadzenia testu. Zbudowane stanowisko badawcze zostało wyposażone w dwie kamery cyfrowe i wówczas stanie się ono w pełni profesjonalnym urządzeniem pozwalającym wyznaczać wskaźnik *HE* na próbkach kołowych o średnicy 50 mm.

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowano modyfikację testu *Hole Expansion* w taki sposób, by możliwy był pomiar wskaźnika *HE* na taśmach stalowych o szerokości 50mm obrabianych cieplnie w symulatorze Gleeble 3800. Zaprojektowano i wykonano oprzyrządowanie, które po zainstalowaniu na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z250 umożliwia wyznaczenie wskaźnika *HE* na zmodyfikowanych próbkach. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników z danymi literaturowymi.

LITERATURA

- Comstock R.J., Scherrer Jr. D.K., Adamczyk R.D.; Hole Expansion in variety of sheet steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 15(6); 2006, s. 675-683
- Dunckelmeyer M., Karelova A., Kremaszky C., Werner E.: *Proceedings of International Doctoral Seminar 2009*, Smolenice Castle Slovakia; 17-19 May 2009, s. 1-8
- Ishimaru E., Ono N., Takahashi A.: Effect of Material Properties and forming on formability of high-purity ferritic stainless steel, *Nippon Steel Technical Report No. 99*; September 2010, s. 26-32
- Killmore C.R., Kaul H.R. i inni: Development of plain carbon and niobium microalloyed ultra-thin cast strip products produced by the castrip process, <http://www.castrip.com>, Technical Paper Dev. Plain Carbon Niobium Ultra thin cast strip/
- Pushkareva I. – praca doktorska: Evolution microstructurale d'un acier Dual Phase. Optimisation de la resistance a l'endommagement, *Institute National Polytechnique de Lorraine*; 2009
- Uthaisangsuk V., Prahl U., Bleck W.: Stretch flangeability characterisation of multiphase based failure modeling; *Computational Materials Science* 45 (2009); s. 617-623
- Watanabe K., Tachibana M.: Simple prediction method for the edge fracture of steel sheet during vehicle collision; *LS-DYNA Anwenderforum, Ulm 2006* ; s.B-I-9 – B-I-14
- Fang X., Fan Z., Ralph B., Evans P., Underhill R.: Effects of tempering temperature on tensile and hole expansion properties of a C-Mn steel; *Journal of Materials Processing Technology* 132 (2003); s. 215-218
- Tsipouridis P., Werner E., Kremaszky Ch., Tragl E.: Formability of high strength dual-phase steels; *Steel Research International* vol.77(2006), s. 654-667
- Sartkulvanich P., Altan T.: Examination edge cracking in hole flanging of AHSS; *Stamping Journal*, November 2008; www.stampingjournal.com
- Cooman B.C.: Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite; *Courrent Opinion in Solide State and Materials Science* 8(2004), s. 285-303
- Wagoner R. H.: (DRAFT) *Advanced High Strength Steel Workshop*; October 22-23, 2006; Virginia, USA
- Chen L., Hansoo Kim, Cooman B.C. De i inni: *Stretch Flaming Behavior of High Mn TWIP Steel*; Pohang University of Science & Technology POSTECH; 2012, Korea
- Sadagopan S., Urban D.: Formability characterization of new generation of high strength steels; Report No. DE-FC07-97ID13554: prepared for U.S. Department of Energy, May 2003
- Karelova A., Hairer F. i inni: Influence of the overageing temperature on microstructure and mechanical properties of complex-phase bainitic steel.(s.129-135); http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2009/2/karel.pdf
- Cai M., Ding H. i inni: Effects of Si on microstructural evolution and mechanical properties of hot – rolled ferrite and bainite dual – phase steels; *ISIJ International*, Vol.51(2011), No. 3, s. 476-481
- Norma ISO/DIS 16630 – *Metallic materials – Method of hole expanding test*.
- Molenda R., Kuziak R.: Badanie wpływu parametrów profile temperaturowego dla procesu wyżarzania ciągłego na właściwości mechaniczne blach cienkich ze stali DP; *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, t. 63,2 (2011), s. 42-59