



Charakterystyka stali na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodowego

M. Czaja, W. Borek

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie

email: email: malgorzata.czaja@polsl.pl, email: wojciech.borek@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono charakterystykę stali na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodowego i zestawiono ją z własnościami jakie posiadają nowo opracowywane wysokomanganowe stale austenityczne.

Abstract: The paper presents the characteristics of steel for car body components and summarizes them with the properties of which have new developed high-manganese austenitic steels.

Słowa kluczowe: stale dla motoryzacji, stal wysokomanganowa

1. WPROWADZENIE

Przemysł motoryzacyjny oparty o silniki spalinowe rozwija się od 1888 r. kiedy to austriacki mechanik i wynalazca Siegfried Marcus zbudował pierwszy pojazd spełniający wszystkie podstawowe cechy samochodu, jednak rozwój przemysłu samochodowego nabrał rozpędu dopiero w 1912 roku, kiedy to Henryk Ford uruchomił pierwszą wielkoseryjną produkcję Modelu T w swojej fabryce w Detroit. Przemysł motoryzacyjny od zawsze rozwijał się na kilku płaszczyznach: z jednej strony projektowano i udoskonalano systemy napędzające pojazd, z drugiej pracowano nad materiałami, z których wykonywane były nie tylko układy mechaniczne ale też karoserie i elementy wzmacniające konstrukcję samochodów. O ile na początku najważniejszym kryterium doboru materiałów na elementy konstrukcyjne nadwozia była jak największa odporność na korozję oraz niski koszt, o tyle w ostatnim trzydziestoleciu producenci samochodów zaczęli kłaść coraz większy nacisk na bezpieczeństwo pojazdów [1÷7]. Standardy, według których zmieniały się kryteria doboru materiałów na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodowego przedstawiono w tablicy 1 [8,9].

Systemy bezpieczeństwa stosowane w pojazdach samochodowych można podzielić na dwie kategorie: czynne i bierne. Za bezpieczeństwo czynne odpowiedzialne są różnego rodzaju czujniki mające na celu zmniejszenie do minimum prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku (układy wspomagające ABS, EBS, ASR, ESP itp.) natomiast za bezpieczeństwo

bierne odpowiadają wszystkie czynniki mające na celu zmniejszenie do minimum szkód powstających podczas już zaistniałego wypadku/kolizji. Do rozwiązań technologicznych mających wpływ na bezpieczeństwo bierne zaliczają się [8,10]:

- struktura nadwozia (sztywna klatka pasażerska, odpowiednie zderzaki, kontrolowane strefy zgniotu, wzmocnienia drzwi i ścian bocznych),
- kształt nadwozia (brak wystających elementów, zaokrąglone części poszycia nadwozia),
- pasy bezpieczeństwa,
- poduszki powietrzne,
- napinacze,
- regulowane zagłówki itp.

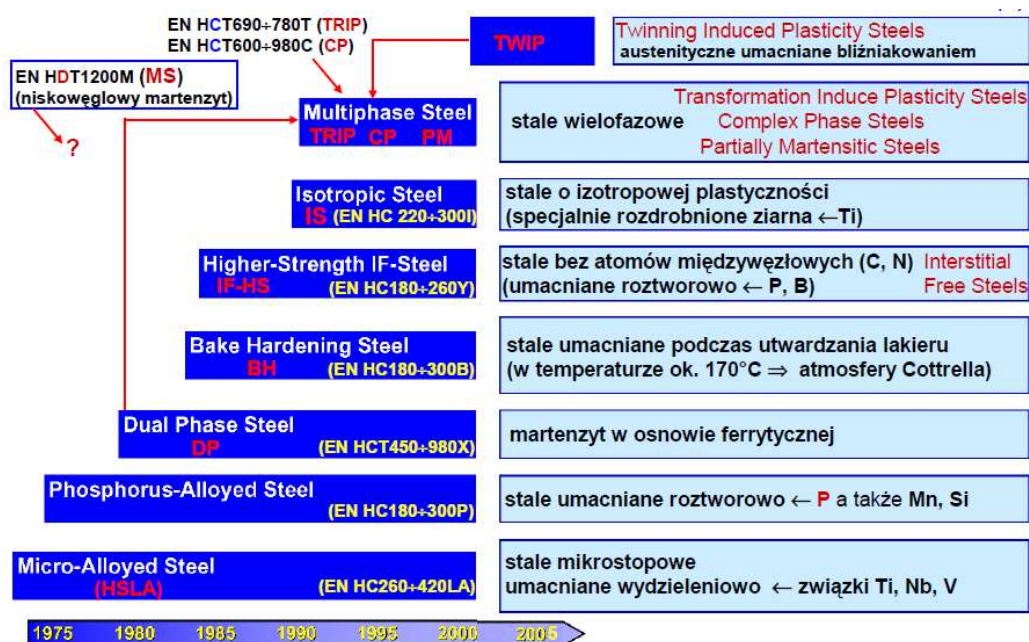
Tablica 1. Zmiany kryteriów doboru stali na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodowego w latach 1980÷2020 [6,9,11]

Table 1. Changes in selection criteria for steel car body components for the years 1980-2020 [6,9,11]

Rok	Kluczowy aspekt projektu	Ograniczenia	Pojawiające się materiały do konstrukcji nadwozia
1980	Koszt, stylizacja, odporność na korozję	Sztywność	Stal IF do złożonych części, powłoki cynkowe
1990	Koszt, zachowanie podczas wypadku (napór drzwi przy zderzeniu bocznym, zmniejszenie kosztów naprawy)		KSLA, C-Mn, BH (martenzytyczne, UHS DP na zderzaki i belki drzwi)
2000	Koszt, zużycie paliwa (ciężar), zachowanie podczas kolizji (zderzenie boczne, zgodność dla samochodu i SUV, dachowanie)	Zachowanie nadwozia podczas kolizji (pochłanianie energii zderzenia, wgniecenie drzwi do wnętrza samochodu)	Stale wielofazowe, DP, martenzytyczne, TRIP
2020	35 mpg CAFE – USA 120 g/km – Europa		3 generacja AHSS, TWIP, L-IP

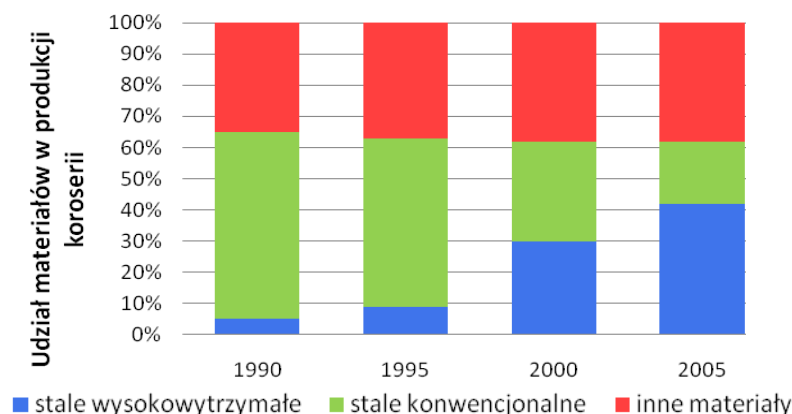
Współczesny przemysł samochodowy stawia bardzo wysokie wymagania zarówno technologii wytwarzania jak również stalom stosowanym na karoserię, elementy konstrukcyjne i inne elementy pojazdów drogowych. Wszystkie materiały stosowane na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodów muszą spełniać wymaganie odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie i sztywności przy jednoczesnych dobrych własnościach plastycznych odpowiadających za łatwość nadawania kształtu (dobrej tłoczności). Ważna jest też odpowiednia odporność na uderzenia, czyli pochłanianie energii uderzenia przy jak najmniejszych odkształceniach lub zniszczeniach, a dopiero na dalszym miejscu umieszcza się gęstość materiału ze względu na obniżenie zużycia paliwa i emisji CO₂ do atmosfery. Wybór materiału na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodu uzależniony jest też od zamożności odbiorcy i wielkości produkcji [12,13].

Dzięki odpowiedniemu doborowi składu chemicznego oraz technologii wytwarzania, które gwarantują uzyskanie struktury pozwalającej na zapewnienie korzystnego połączenia własności wytrzymałościowych i plastycznych stali, w ostatnich czterdziestu latach zostały opracowane nowe grupy stali do zastosowania w przemyśle samochodowym. W celu porównania połączenia korzystnych własności wytrzymałościowych i plastycznych tych stali wyznaczono wskaźnik równy iloczynowi wytrzymałości na rozciąganie i maksymalnego wydłużenia, co przedstawiono na rysunku 1 [14].



Rysunek 1. Rozwój stali o wysokiej wytrzymałości (HSS oraz AHSS) [8,9]

Figure 1. The development of high strength steel (HSS and AHSS) [8,9]



Rysunek 2. Zmiana udziału konwencjonalnych i wysokowytrzymałych stali stosowanych w produkcji samonośnych nadwozi samochodów osobowych w latach 1995÷2005 [14]

Figure 2. Change in share of conventional and high-strength steel used in the production of self-supporting body of passenger cars in 1995-2005 [14]

Nowoczesne wysokomanganowe stale austenityczne spełniają wszystkie podane wyżej kryteria, ponieważ wykazują bardzo dobrą wytrzymałość na rozciąganie osiągającą wartości do 1100 MPa oraz wysokie własności plastyczne z wydłużeniem osiągającym wartości do 60%. Udział stali wysokowytrzymałych w produkcji samonośnych nadwozi samochodowych wzrósł w latach 1990÷2005 z 5% do 45% i przewiduje się, że ta tendencja wzrostowa utrzyma się lub nawet zwiększy. Zmianę udziału stali konwencjonalnych i wysokowytrzymałych w produkcji samonośnych nadwozi samochodów przedstawiono na rysunku 2 [8,14].

2. CHARAKTERYSTYKA NOWOCZESNYCH STALI DO PRZEMYSŁU MOTORYZACYJNEGO

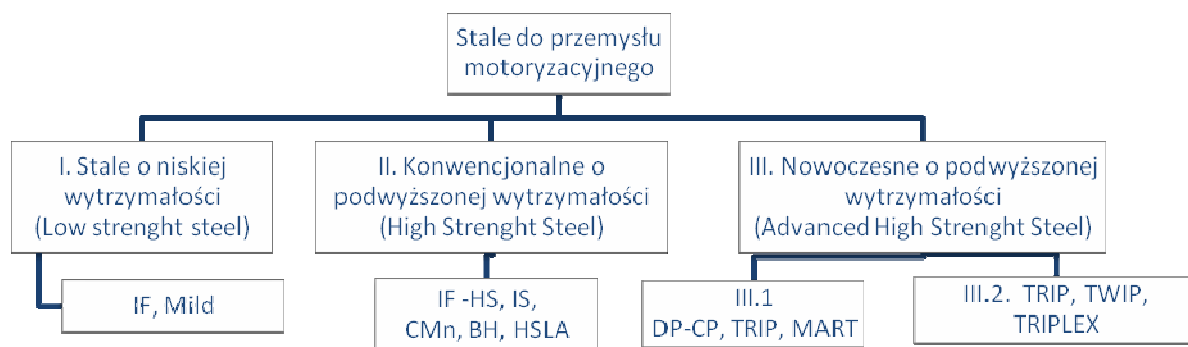
W dzisiejszych czasach przedsiębiorstwa produkcyjne muszą stale podnosić swoją konkurencyjność i stawiać sobie nowe wymagania rozwojowe w celu jak najlepszego sprostania wymaganiom konsumentów oraz produkować wyroby nowoczesne o wysokich parametrach jakościowych, a w przypadku przemysłu motoryzacyjnego spełniać wszystkie standardy bezpieczeństwa. Wszystkie te cechy spełniają niewątpliwie nowoczesne wysokomanganowe stale austenityczne typu TRIP (ang. *TRansformation Induced Plasticity*) TWIP (ang. *TWinning Induced Plasticity*) oraz TRIPLEX będące przedmiotem badań również na Politechnice Śląskiej.

Jeszcze do niedawna do budowy nadwozi samochodów stosowane były przede wszystkim konwencjonalne stale o niskiej zawartości węgla, przerabiane poprzez walcowanie na gorąco i na zimno. Obróbka cieplna tych stali tj. wyżarzanie po zgnioce oraz chłodzenie jest przeprowadzana w sposób pozwalający na otrzymanie struktury ferrytycznej. Nowe generacje stali wymagają natomiast stosowania takiej obróbki cieplej, która umożliwi uzyskanie struktury bardziej złożonej [12,15].

Duży wkład w rozwój nowoczesnych stali oraz opracowanie metod wytwarzania z nich podzespołów o bardzo wysokiej wytrzymałości, wniosły projekty, w które zaangażowane były liczne firmy przemysłu stalowniczego i motoryzacyjnego. Rezultatem pierwszego, rozpoczętego w 1994 projektu ULSAB (ang. *Ultra Light Steel Auto Body*), było zmniejszenie masy karoserii samochodu o około 25%. Kolejne projekty, tj. ULSAC (ang. *Ultra Light Steel Auto Closure*) oraz ULSAS (ang. *Ultra Light Steel Auto Suspension*) doprowadziły do poprawy jakości takich elementów jak np. drzwi, klapy oraz zawieszenie samochodu. Obecnie realizowany jest projekt ULSAB-AVC (ang. *Ultra Light Steel Auto Body – Advance Vehicle Concept*), który przewiduje zastosowanie w konstrukcji nowoczesnego samochodu stali AHSS, które zapewnią bezprecedensowy wysoki poziom bezpieczeństwa podczas zderzenia bez podnoszenia kosztów eksploatacji i recyklingu. Samochody wyprodukowane przy użyciu tych stali mają mieć w założeniu znikomy wpływ na środowisko przez zmniejszenie zużycia paliwa, a tym samym emisji dwutlenku węgla, oraz przez wykorzystanie mniejszych nakładów pracy i energii z uwagi na łatwy recykling [9,11,12].

Podczas trwania tych projektów opracowano nowe i usystematyzowano już istniejące stale do przemysłu motoryzacyjnego, które podzielono na trzy grupy (rys. 3) [11,12]:

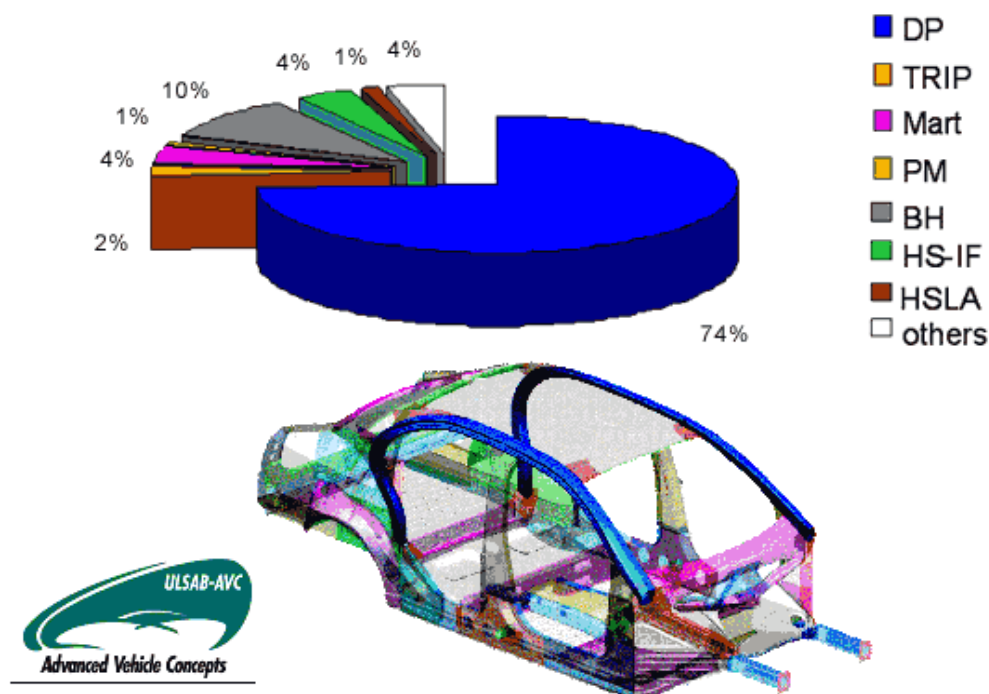
- LSS (ang. *Low Strenght Steel*) – stale o niskiej wytrzymałości,
- HSS (ang. *High Strenght Steel*) – stale o wysokiej wytrzymałości,
- AHSS (ang. *Advanced High Strenght Steel*) – nowoczesne o bardzo wysokiej wytrzymałości.



Rysunek 3. Podział stali do przemysłu motoryzacyjnego [12,14]

Figure 3. Distribution of steel for the automotive industry [12,14]

Stale z grup I, II oraz III.1 są to stale znane, opisane w literaturze oraz obecnie już stosowane na części karoserii i elementów wzmacniających samochodów osobowych i ciężarowych (rys. 4) [9,11,12,16]. Druga generacja stali AHSS są to nowo opracowywane wysokomanganowe stale austenityczne o unikalnych właściwościach, na które składa się bardzo wysoka wytrzymałość dochodząca do 1200 MPa oraz równoczesna bardzo wysoka plastyczność. Do stali wysokomanganowych zalicza się stale z efektem TWIP, TRIP oraz stale TRIPLEX.



Rysunek 4. Udział poszczególnych typów stali na elementy konstrukcyjne nadwozia samochodowego [9,11]

Figure 4. The share of individual types of steel for automobile body components [9,11]

Stal z efektem TRIP (ang. *TRansformation Induced Plasticity steel* – umocnienie wywołane przez przemianę martenzytyczną) jest to stal, w której w wyniku odkształcenia plastycznego na zimno indukowana jest przemiana martenzytyczna, a tym samym elementy wykonane z tej stali pochłaniają energię i dodatkowo umacniają materiał. Stal ta zawiera 0,1÷0,6% C oraz 15÷22% Mn, 2÷4% Si oraz 2÷4% Al. W stalach tych występuje efekt TRIP, czyli przemiana martenzytyczna w wyniku odkształcenia plastycznego [14].

Stale z efektem TWIP (ang. *TWinning Induced Plasticity steel* – umocnienie wywołane bliźniakowaniem) są to stale, w których zachodzi bliźniakowanie mechaniczne indukowane odkształceniem plastycznym na zimno. Efekt TWIP polega na tworzeniu się bliźniaków mechanicznych podczas odkształcenia materiału. Stale te podobnie jak stale z efektem TRIP posiadają strukturę austenityczną. Stal z efektem TWIP jest obecna na rynku od 2004 roku. Jej cechą charakterystyczną jest wyjątkowo wysoki stopień odkształcenia (nawet do 60%) przy równoczesnym zachowaniu wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (nawet do 800÷900 MPa). Charakterystyczną cechą stali z efektem TWIP jest wysoka zawartość manganu (15÷35%), który stabilizuje austenit do temperatury pokojowej, oraz 2÷4% krzemu i/lub aluminium, dzięki czemu stal ta wykazuje strukturę austenityczną, bez martenzytu czy też innych faz (potencjalnych zarodków pęknięcia), przez co posiada wysoką ciągliwość i podatność na obróbkę plastyczną [14,17,188].

Stale z efektem TRIPLEX są to stale Fe-C-Mn-Al, które zawierają 0,7÷1,2% C, 18÷28% Mn oraz 8,5÷12% Al. Stale te posiadają strukturę trójfazową, składającą się z ziarn austenitu γ -Fe(Mn,Al,C), dyspersyjnych wydzieleni węgliku κ -(Fe,Mn)₃AlC_{1-x} oraz ferrytu α -Fe(Mn,Al). Podczas odkształcania plastycznego tych stali zachodzą w austenicie: poślizg dyslokacji, bliźniakowanie mechaniczne oraz wydzielają się węglicki κ [6,17,188]. Porównanie własności wysokomanganowych stali austenitycznych typu TRIP, TWIP i TRIPLEX z przeznaczeniem do przemysłu samochodowego przedstawia tablica 2 [9,11].

Tablica 2. Porównanie własności wysokomanganowych stali austenitycznych do przemysłu motoryzacyjnego [9]

Table 2. Comparison of properties of high-manganese austenitic steels for the automotive industry [9]

Własność	TRIP	TWIP	TRIPLEX
Zawartość węgla	Do 0,2%	ok.0,1÷0,6%	0,7÷1,2% C
Zawartość manganu	12-20%	15÷35%	18÷28% Mn
Zawartość Al i/lub Si	2÷4%	2÷4%	8,5÷12% Al
Struktura	Austenityczna	Austenityczna	Austenityczno-ferrytyczna
Zachodzące przemiany	Przemiana austenitu w martenzyt	Bliźniakowanie mechaniczne	Poślizg dyslokacji, bliźniakowanie mechaniczne
Odształcenie	40-60%	40-90%	45-75%
Wytrzymałość na rozciąganie	1100 MPa	700-1000 MPa	900 MPa

Szczególną cechą nowo opracowanych stali jest gwarantowany zapas plastyczności w strefach kontrolowanego pochłaniania energii w trakcie eksploatacji, zwłaszcza w trakcie nagłego działania nieprzewidzianych wcześniej obciążeń, występujących w samochodach w trakcie wypadku. Ta szczególna własność jest niezwykle ważna w przypadku kolizji pojazdu, podczas której materiał elementów konstrukcyjnych nadwozia powinien wykazywać dwie całkowicie przeciwstawne sobie cechy [2,10,13,14]:

- wysoką ciągliwość, dzięki której możliwe jest pochłonięcie przy odkształceniu materiału maksymalnej ilości energii uderzenia,
- zachowanie maksymalnej stabilności elementu, który chroni kabinę pasażerską.

Stale wysokomanganowe mogą zrewolucjonizować sektor przemysłu samochodowego zajmującego się produkcją elementów konstrukcyjnych nadwozia samochodowego, gdyż stale stosowane dotąd na te elementy posiadały tylko jedną z tych cech.

LITERATURA

1. L.A. Dobrzański, W. Borek, M. Ondrula, Thermo-mechanical processing and microstructure evolution of highmanganese austenitic TRIP-type steels, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 53/2 (2012) 59-66.
2. B. Van Hecke, The susceptibility of stainless steel to plastic working, *Materials and Applications* 8, Euro Inox, 2008.
3. P. Kafka, The Automotive Standard ISO 26262, the innovative driver for enhanced safety assessment & technology for motor cars, *Procedia Engineering* 45 (2012) 2-10.
4. A. Jambor, M. Beyer, New cars – new materials, *Materials & Design* 18/4-6 (1997) 203-209.
5. C.J. Price, N.A. Snooke, S.D. Lewis, A layered approach to automated electrical safety analysis in automotive environments, *Computers in Industry* 57 (2006) 451-461.
6. D. Anderson, Application and Repairability of Advanced High-Strength Steels, Use, growth and repair for AHSS, American Iron and Steel Institute, July, 2008.
7. M. Idzior, Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii, *MOTROL* 9 (2007) 72-87.
8. SafetyNet (2009) Vehicle Safety, retrieved 21.06.2013 r.
9. ULSAB-AVC - Executive Summary, Automotive Applications committee of American Iron and Steel Institute, 2002.
10. K. McClafferty, A. German, High-Tech Motor Vehicle Safety Systems, University of Western Ontario, Road Safety Research.
11. Strona internetowa: www.worldautosteel.org, Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, International Iron and Steel Institute, 2013.
12. J. Senkara, Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego, *Przegląd Spawalnictwa* 11 (2009) 3-7.
13. J. Adameczyk, A. Grajcar, Obróbka cieplno-mechaniczna blach ze stali konstrukcyjnej mikroskopowej o strukturze ferrytyczno-martenzytycznej, *Materiały 11th Międzynarodowej Konferencji Naukowej "Achievements in Mechanical & Materials Engineering" AMME'2002*, Gliwice-Zakopane, 2002, 1-6.
14. L.A. Dobrzański, *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe*, WNT, Warszawa, 2006.

15. A. Grajcar, Cechy materiału kompozytowego w odniesieniu do stali wielofazowych dla motoryzacji, *Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne*, Monografia, Gliwice, 2011, 174-192.
16. A. Döner, R. Solmaz, M. Özcan, G. Kardaş Experimental and theoretical studies of thiazoles as corrosion inhibitors for mild steel in sulphuric acid solution, *Corrosion Science* 53/9 (2011) 2902-2913.
17. E. Hadasik, *Badania plastyczności metali*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
18. J. Adamczyk, *Inżynieria materiałów metalowych cz. 1*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.