

Uniwersytet
Ekonomiczny
w Krakowie

Zeszyty Naukowe

Cracow Review
of Economics
and Management

924

Towaroznawstwo

Kraków 2013

Rada Naukowa

Andrzej Antoszewski (Polska), *Slavko Arsovski* (Serbia), *Josef Arlt* (Czechy),
Daniel Baier (Niemcy), *Hans-Hermann Bock* (Niemcy), *Ryszard Borowiecki* (Polska),
Giovanni Lagioia (Włochy), *Tadeusz Markowski* (Polska), *Martin Mizla* (Słowacja),
David Ost (USA), *Józef Pociecha* (Polska)

Komitet Redakcyjny

Zofia Cichoń (redaktor naczelna), *Tadeusz Fijał*, *Ewa Marcinkowska*,
Lidia Ostasz (sekretarz), *Tadeusz Sikora*

Redaktor statystyczny

Michał Major

Redaktorzy Wydawnictwa

Agnieszka Penarska, *Monika Rusin*, *Seth Stevens* (streszczenia w j. angielskim)

Projekt okładki i układ graficzny tekstu

Marcin Sokołowski

Zdjęcie Profesora A. Gajewskiego

Krzysztof Włodek

Streszczenia artykułów są dostępne w międzynarodowej bazie danych
The Central European Journal of Social Sciences and Humanities
<http://cejsh.icm.edu.pl> oraz w Central and Eastern European Online Library
www.ceeol.com, a także w adnotowanej bibliografii zagadnień ekonomicznych
i pokrewnych BazEkon http://kangur.uek.krakow.pl/bazy_ae/bazekon/nowy/index.php

© Copyright by Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Kraków 2013

ISSN 1898-6447

Wersja pierwotna: publikacja drukowana
Publikacja jest dostępna w bazie CEEOL (www.ceeol.com)
oraz w czytelni on-line ibuk.pl (www.ibuk.pl)

Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie
31-510 Kraków, ul. Rakowicka 27, tel. 12 293 57 42, e-mail: wydaw@uek.krakow.pl
www.zeszyty-naukowe.uek.krakow.pl

Zakład Poligraficzny Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie
31-510 Kraków, ul. Rakowicka 27

Objętość 4,3 ark. wyd.
Zam. 99/2014

Spis treści

Działalność naukowa, dydaktyczna i organizacyjna Profesora Andrzeja Gajewskiego (Stanisław Hornik)	5
Andrzej Gajewski	
TRIZ – inwencyjna metoda rozwiązywania problemów	7
Andrzej Gajewski	
Integracja HCD i TRIZ w projektowaniu i ocenie wyrobów	21
Maciej Sarnek	
Szacowanie wielkości krystalitów i udziału faz w austenitycznej stali nierdzewnej 1.4307 po walcowaniu za pomocą dyfrakcji promieni X	33
Maciej Sarnek	
Zmiany udziału defektów sieci krystalicznej dla austenitycznej stali nierdzewnej	47
Przemysław Szopa, Jacek Czerniak, Anna Gacek	
Zastosowanie pomiarów dwuwidmowych barwy w towaroznawstwie ...	59
Lista recenzentów Zeszytów Naukowych Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie opublikowanych w 2013 roku	75



Heard

Działalność naukowa, dydaktyczna i organizacyjna Profesora Andrzeja Gajewskiego

Prof. dr hab. Andrzej Gajewski urodził się 29 listopada 1943 r. w Jarocinie. Studia wyższe ukończył na Uniwersytecie Jagiellońskim na kierunku fizyki. W 1977 r. na podstawie rozprawy pt. *Badania nad elektryzacją pyłów wytworzonych z monokryształów NaCl* uzyskał stopień doktora nauk fizycznych, a w 1992 r. uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w zakresie inżynierii chemicznej na podstawie pracy pt. *Zapobieganie ujemnym skutkom elektryzacji w transporcie pneumatycznym* (Seria specjalna: Monografie, nr 98, Akademia Ekonomiczna w Krakowie, Kraków 1990). W 2008 r. uzyskał tytuł profesora nauk ekonomicznych.

Dorobek naukowy Profesora Andrzeja Gajewskiego jest bardzo bogaty. Jest autorem lub współautorem ponad 150 prac naukowych i dydaktycznych. Do najważniejszych prac Profesora należą: *Elektryczność statyczna – poznanie, pomiar, zapobieganie, eliminowanie* (Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, Warszawa 1987), *Procesy i technologie elektrostatyczne* (Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Kraków 2000), *Technologie elektrostatyczne – aspekt ekologiczny i ekonomiczny* (Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków 2006), *Wstęp do zarządzania jakością* (Wydawnictwo Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie, Tarnów 2007).

Za pierwszą z wymienionych prac otrzymał w 1988 r. nagrodę Państwowej Inspekcji Pracy „za najlepszą książkę o tematyce ochrony człowieka w środowisku pracy”.

Profesor Andrzej Gajewski jest autorem wielu publikacji dydaktycznych przygotowanych głównie z myślą o studentach towaroznawstwa, w tym podręcznika *Wybrane zagadnienia z fizyki, Ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki z podstawami analizy instrumentalnej*, a także *Ćwiczeń laboratoryjnych z fizyki dla towaroznawców* (współautor: Przemysław Szopa).

Zainteresowania naukowe Profesora zmieniały się, co widoczne jest w publikowanych pracach. Początkowo dotyczyły zagadnień z dziedziny fizyki oraz inżynierii chemicznej i procesowej, a od ponad 15 lat głównie inwentyki, zarządzania jakością i niekonwencjonalnych źródeł energii. Do najważniejszych kwestii poruszanych w pracach Profesora zaliczyć trzeba zagrożenia elektryzacji w przemyśle i szkodliwość (także zdrowotna) elektryzacji wyrobów użytkowych oraz ekologiczne i ekonomiczne aspekty stosowania technologii elektrostatycznych (np. nanoszenia pestycydów, elektrostatycznego lub wspomaganego elektrostatycznie nanoszenia farb proszkowych itp.).

Na podkreślenie zasługują osiągnięcia organizacyjne Profesora. Od 1993 r. pełni funkcję kierownika najpierw Katedry Fizyki, a później po zmianie nazwy w 2002 r. – Katedry Metrologii i Analizy Instrumentalnej na Wydziale Towaroznawstwa Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie. Ponadto w latach 1993–1996 był zastępcą dyrektora Instytutu Towaroznawstwa na prawach wydziału, w latach 1996–1999 dziekanem, a w latach 1999–2002 prodziekanem Wydziału Towaroznawstwa.

Uczestniczył w wielu zagranicznych stażach naukowych, w tym w University College of North Wales (1979 r.), w Moskiewskim Instytucie Budowy Maszyn Chemicznych (1981 r. i 1983 r.) oraz w Grand Valley State University w USA (1995 r.).

Profesor Andrzej Gajewski jest cenionym nauczycielem akademickim. Był promotorem około 600 prac magisterskich i inżynierskich.

Wyrazem uznania dla osiągnięć w działalności naukowo-dydaktycznej i organizacyjnej Profesora są przyznane Mu odznaczenia państwowe, w tym Złoty Krzyż Zasługi (1995 r.), Medal Komisji Edukacji Narodowej (2000 r.) oraz Krzyż Kawalerski Orderu Odrodzenia Polski (2001 r.), oraz nagrody Rektora Uczelni.

Z okazji 70. urodzin Pana Profesora środowisko akademickie Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, doceniając zaangażowanie naukowe, organizacyjne i dydaktyczne Jubilata, życzy Panu Profesorowi dobrego zdrowia, radości, zadowolenia i realizacji planów życiowych oraz wyraża wielką nadzieję na dalszą owocną współpracę.

Stanisław Hornik
Dziekan Wydziału Towaroznawstwa

Andrzej Gajewski

Katedra Metrologii i Analizy Instrumentalnej
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

TRIZ – inwentyczna metoda rozwiązywania problemów

Streszczenie

TRIZ to teoria rozwiązywania problemów wynalazczych. Została opracowana w zespole kierowanym przez H.S. Altszullera, który z wykorzystaniem statystycznej analizy patentów (ponad 40 tys.) poszukiwał wzorów innowacyjnych rozwiązań. W przeciwieństwie do metody prób i błędów TRIZ pozwala na pominięcie błędnych koncepcji i dzięki temu szybciej prowadzi do znalezienia optymalnego rozwiązania. Istotą TRIZ jest pokonanie inercji psychicznej (wektor inercji) wynikającej z przyzwyczajenia, edukacji i doświadczeń. Ta z założenia inżynierska metoda znajduje obecnie coraz więcej zwolenników niemal w każdej dziedzinie, również wśród przedstawicieli nauk społecznych.

Słowa kluczowe: inwentyka, teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań, sprzeczności technologiczne, maszyna idealna, algorytm rozwiązywania problemów wynalazczych.

1. Wprowadzenie

Od ponad wieku, a zwłaszcza od początku lat 50. XX w., obserwuje się wzrastające zainteresowanie nauki i praktyki metodami twórczego rozwiązywania problemów. Na wiedzę o twórczym rozwiązywaniu problemów składają się: heurystyka, inwentyka i innowatyka. Są to pojęcia pokrewne, dlatego często zdarza się, że np. inwentyka jest nazywana heurystyką. Wdrażanie produktów twórczego myślenia do praktyki nazywane jest innowacją. Na wiedzę tę składają się też nauki macierzyste: nauki ścisłe i techniczne, nauki humanistyczne i przyrodnicze, nauki ekonomiczne i organizacyjne [Martyniak 1997]. Gdy mowa

o twórczości, bez względu na podmiot dociekań stawiane jest zwykle zagadnienie odniesienia twórczości do oryginalności. Według J. Rudniańskiego [1979] twórczość rozumiana jako działanie zmierzające do rozwiązania problemów może być natury psychologicznej lub/i socjologicznej. W monografii pt. *Homo cogitans* J. Rudniański rozszerzył i sprecyzował pojęcie twórczości, stwierdzając, że „wszędzie tam, gdzie nie są znane wszystkie elementy składające się na strukturę danej czynności oraz sposób powiązania tych elementów między sobą, będziemy mówili o działaniu twórczym w sensie psychologicznym” [1981, s. 16]. Przeciwnieństwem tak pojętego działania twórczego jest działanie rutynowe, algorytmiczne, kiedy skład i układ stadiów działania jest określony. J. Rudniański doprecyzowuje termin „działanie twórcze” [1981, s. 14], który w socjologii jest używany do określenia takiego działania w różnego rodzaju dziedzinach działalności ludzkiej, którego rezultaty odbiegają swoją oryginalnością od uzyskanych dotychczas, jak też zyskują aprobatę społeczną.

Metody twórczego rozwiązywania problemów stanowią liczną grupę, to setki wskazówek i metod postępowania użytecznych w rozwiązywaniu różnego rodzaju zadań, w przypadku których rutynowe metody są zawodne albo niezadowolające [Martyniak 1997]. Do znanych metod twórczych (inwencyjnych) należą: burza mózgów Osborna, metoda dyskusji 66 (znana również pod nazwą Philips 6/6), metoda Gordona, *just in time*, metoda 5S, benchmarking, metoda sytuacyjna, metoda nowego spojrzenia, metoda delficka, metoda morfologiczna Zwicky’ego, *six sigma* oraz metoda Altszullera. Tej ostatniej metodzie, znanej na całym świecie pod nazwą TRIZ, zostanie poświęcony niniejszy artykuł.

2. TRIZ – informacje podstawowe

Nazwa TRIZ – teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań, pochodzi z języka rosyjskiego (teoriâ rešencâ izobratatel’skih zadač). Tłumaczona jest również jako teoria rozwiązywania problemów wynalazczych. W literaturze anglosaskiej występuje zazwyczaj pod nazwą oryginalną (TRIZ), niekiedy jednak używa się nazwy TIPS (*theory of inventive problem solving*). Twórcą tej metody jest H.S. Altszuller. Jako motto swojej książki pt. *Algorytm wynalazku* [1972] zamieścił następujący cytat z dzieła D. Mendelejewa: „Jeden idzie przez ciemny labirynt po omacku – być może trafi mu się coś pożytecznego, ale być może rozbije sobie głowę. Inny bierze ze sobą mały kaganek i rozprasza nim ciemności. I w miarę, jak posuwa się on naprzód, kaganek rozżarza się, aż wreszcie, niby słońce, rozświetla i rozjaśnia wszystko dookoła. Więc pytam was: gdzie jest wasz kaganek?” (cyt. za: [Altszuller 1972, s. 11]). H.S. Altszuller podejmuje wyzwanie swego rodaka i próbuje skonstruować „kaganek”, który rozświetlałby

drogę twórców rozwiązujących problemy. TRIZ, metoda opracowana ponad 50 lat temu przez zespół kierowany przez H.S. Altszullera, znajduje coraz więcej zwolenników nie tylko wśród inżynierów i konstruktorów – chętnie korzystają z niej przedstawiciele nauk społecznych. Wprawdzie w swej pierwotnej postaci metodologia TRIZ była pomyślana do rozwiązywania problemów technicznych, wynalazczych, obecnie jednak stosuje się ją także do rozwiązywania problemów organizacyjnych, edukacyjnych, społecznych, a także biznesowych. Jak każda idea, tak i TRIZ rozwija się nieustannie, czego rezultatem jest m.in. powstanie pięciu podstawowych odmian: TRIZ-technika, TRIZ-menedżment, TRIZ-science, TRIZ-design, TRIZ-pedagogika.

Metodologia TRIZ (w porównaniu z pierwotną, inżynierską koncepcją) oparta jest na analizie dziesiątek tysięcy patentów i tak zaprojektowana, by pokonać inercję psychiczną wynikającą z przyzwyczajień i edukacji [Altszuller 1972 i 1983]. Dzięki redukcji metody prób i błędów eliminuje błędne rozwiązania i skuteczniej prowadzi do optymalnych w danych warunkach rozwiązań – daje do ręki „kaganek”.

Teoria TRIZ jest stosowana nie tylko w Rosji, ale również np. w USA, Japonii, Europie Zachodniej. Jako pierwsze po ZSRR metodą tą zainteresowały się kraje skandynawskie. W USA i Japonii powstają koła (stowarzyszenia) TRIZ, przypomina to nieco rozwój kół jakości w Japonii po II wojnie światowej. Wydawane jest czasopismo „The TRIZ Journal”. W Polsce teoria ta jest mało znana. Być może dlatego, że zainteresowanie TRIZ na świecie przypadło na początek lat 80., a w Polsce panowała wtedy niechęć do rozwiązań opracowanych w Związku Radzieckim. Wielkim entuzjastą i propagatorem metodologii TRIZ w Polsce jest mgr inż. J. Boratyński. Wraz z dr inż. A. Boratyńską-Salą prowadzi stronę internetową (<http://triz-innowacje.pl>), na której zawsze można znaleźć wiele interesujących informacji na temat TRIZ. J. Boratyński jako jedyny w Polsce posiada III stopień certyfikacji międzynarodowej TRIZ.

3. Sylwetka twórcy TRIZ

Omówienie TRIZ warto zacząć od krótkiego przedstawienia twórcy tej metodyki w zakresie teorii innowacji i wynalazczości – H.S. Altszullera. Urodził się 15 października 1926 r. w Taszkencie. Jego rodzice byli dziennikarzami, dorastał w atmosferze intelektualnej. W 1944 r., gdy był na pierwszym roku studiów na politechnice, zgłosił się ochotniczo do Armii Czerwonej. Skierowano go do 21 Szkoły Lotnictwa Wojskowego. Nie zdążył wziąć udziału w działaniach wojennych. Po zakończeniu wojny, w celu dokończenia okresu służby, został skierowany do Baku, do komórki wynalazczości w dowództwie Kaspijskiej Floty Wojennej.

Tam pełnił służbę jako dowódca oddziału wywiadu chemicznego [Boratyński 2008]. Zarówno praca w komórce wynalazczości, jak i własne próby działań w tym zakresie ukierunkowały zainteresowania H.S. Altszullera. Zadawał sobie pytanie: „Jak właściwie robi się wynalazki?”. Do jego komórki zgłaszały się osoby z nowymi pomysłami. W rozmowach z nimi pytanie to stawało się coraz natarczywiej powracającym problemem. W latach 1946–1948 głównym celem pracy H.S. Altszullera było opracowanie teorii rozwiązywania innowacyjnych zadań (TRIZ). Głównym postulatem TRIZ było twierdzenie: „skoro systemy techniczne rozwijają się według określonych prawideł i zasad, to zasady te można odkryć i wykorzystać do rozwiązywania problemów wynalazczych” [Altszuller 1979, Liskiewicz 2008].

Problematyce TRIZ H.S. Altszuller poświęcił 50 lat. Pasję życiową przypłacił zesłaniem do łagru, gdy w 1948 r. (wraz ze swym współpracownikiem R.B. Szapirem) skierował list do Stalina mocno krytykujący sytuację radzieckiej wynalazczości. Głównym motywem tej krytyki było to, że po zakończeniu II wojny światowej rząd radziecki zgodził się oddać Bibliotekę Patentów Niemieckich Stanom Zjednoczonym w zamian za pewne urządzenia przemysłowe¹. H.S. Altszuller twierdził, że te urządzenia będą nieużyteczne za kilka lat, a patenty pozostaną cenne. To było nie do przyjęcia w państwie Stalina – został aresztowany przez KGB i skazany na 25 lat za antysowiecką propagandę. Bez „zbędnych formalności”, bez sądu, skierowano go do Reczłagu, jednego z licznych łagrów w okręgu Workuty. W łagrze niepoprawny marzyciel dokonał kilku wynalazków. 22 października 1954 r., po śmierci Stalina, został zrehabilitowany i mógł powrócić do Baku. Niestety w Związku Radzieckim jako były łagiernik, chociaż zrehabilitowany przez oficjalne władze, nie miał szansy na znalezienie legalnej pracy. H.S. Altszuller rozwiązał swój życiowy problem w duchu TRIZ „trzeba pracować, żeby żyć”, a jednocześnie „nie można pracować”. Jest to przykład tzw. sprzeczności technologicznej, o której będzie jeszcze mowa w następnych częściach artykułu. Zaczął pisać opowiadania *science fiction*, podpisując je pseudonimem Henryk Altow². Równoległe jednak nadal zajmował się wynalazczością. Były to już czasy po słynnym XX Plenum KPZR, czasy odwilży, w których panowały zupełnie inne warunki pracy.

Zespół pod kierownictwem H.S. Altszullera w poszukiwaniu wzorów innowacyjnych opracował procedurę kreatywnego rozwiązywania problemów inży-

¹ Informację tę podaję za J. Boratyńskim (<http://triz-innowacje.pl>), chociaż nie znalazłem jej potwierdzenia.

² O ile mi wiadomo, nie były to książki *science fiction* na miarę S. Lema. W Polsce nie ukazało się ani jedno tłumaczenie książek H. Altowa.

nierskich. Teoria rozwiązywania problemów wynalazczych została opracowana na podstawie statystycznej analizy patentów ponad 40 tys. rozwiązań. Jej zarys powstał już w 1956 r., a w latach 1961–1965 powstało w Związku Radzieckim wiele prac poświęconych teorii wynalazczości inspirowanych pracami H. Altszullera.

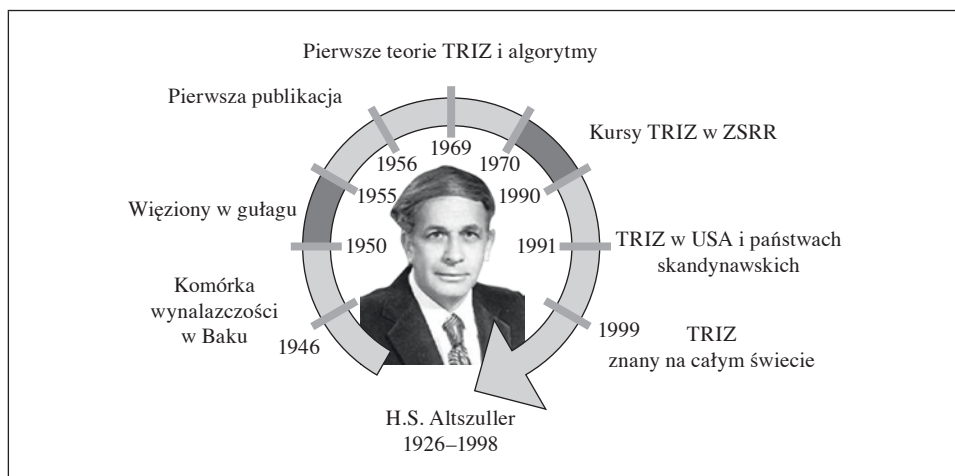
W 1958 r. H.S. Altszuller przeprowadził pierwszy kurs podstaw TRIZ, a już rok później pierwsze szkolenie wykładowców TRIZ. W 1971 r. w Baku założył Azerbejdżański Społeczny Instytut Twórczości Wynalazczej – pierwszy na świecie tego rodzaju ośrodek. Jednocześnie na terenie całego ZSRR organizował kursy, szkoły i punkty konsultacyjne TRIZ. W latach 80. ogólna liczba tych placówek (szkół, punktów konsultacyjnych i filii Instytutu) przekroczyła 500 [Barwicki 2009]. W 1973 r. H.S. Altszuller wprowadził do TRIZ tzw. analizę wepolową³, a w 1975 r. standardy rozwiązywania zadań wynalazczych. W 1974 r. w Centralnym Studiu Popularno-Naukowych i Szkoleniowych Filmów w Moskwie nakręcono film pt. *Algorytm wynalazku*, prezentujący zarówno sylwetkę twórcy TRIZ, jak i samą metodykę. Od 1989 r. do końca życia H.S. Altszuller pełnił obowiązki prezesa Asocjacji TRIZ, specjalnie powołanej do szerzenia idei wynalazczości i metodyki TRIZ. Zmarł 24 września 1998 r.

4. Rozwój TRIZ na świecie

Metoda TRIZ była ciągle modyfikowana, aby nadążyć za rozwojem nauki i techniki. Należy jednak podkreślić, że jej istota nie zmienia się, podstawowe jej założenia od jej powstania do chwili obecnej są te same. Przełomowe okazały się algorytmy rozwiązywania problemów wynalazczych ARIZ.

Pierwszy był algorytm ARIZ-56, sformułowany w 1956 r. (ponad 50 lat temu!). Później opracowywano kolejne jego wersje: ARIZ-64, ARIZ-68, ARIZ-77. Solidne podstawy teoretyczne TRIZ, jak i jego skuteczność sprawiły, że metoda początkowo rozwijana tylko w byłym ZSRR obecnie jest znana na całym świecie, a zainteresowanie nią nadal wzrasta (rys. 1).

³ Słowo „wepole” jest neologizmem; pochodzi od słów *vešestvo* i *pole*, czyli „substancja” i „pole”. A. Góralski w tłumaczeniu książki *Twórczość jako nauka ścisła* użył słowa „wepole”, uważając, że trudno znaleźć odpowiednie polskie słowo. Polscy specjaliści od TRIZ zgadzają się z jego argumentacją i używają tego terminu. Jest to analiza schematów rozważanych zagadnień w oderwaniu od ich technicznej treści. Wepolowe zapisy przypominają chemiczne wzory strukturalne, eliminują (a przynajmniej ograniczają) wpływ wektora inercji.



Rys. 1. Rozwój TRIZ

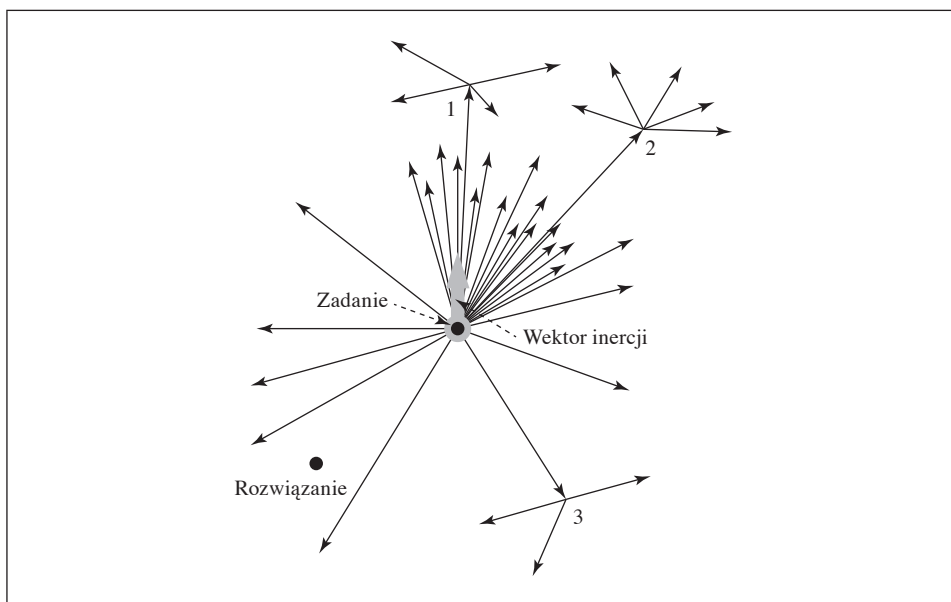
Źródło: [Liskiewicz 2008].

5. Metoda prób i błędów

Przeszkodą w oderwaniu się od znanych rozwiązań jest rutyna, do której opisania H.S. Altshuller użył pojęcia wektora inercji (rys. 2). Wychodząc od punktu zwanego „zadanie”, wynalazca winien trafić do punktu „rozwiązanie”. Gdzie znajduje się ten drugi punkt, oczywiście nie wiadomo. Niektóre pomysły wydają się perspektywiczne – powstają wtórne punkty poszukiwań (1, 2, 3); model jest budowany i ulepszany, prowadzone są próby z modelem i trzeba wracać do punktu wyjścia. Oznacza to, że większość fachowców postawiona wobec nowego zadania próbuje je rozwiązać w granicach obszaru posiadanych wiadomości teoretycznych i doświadczeń zawodowych. Powstaje pytanie, dlaczego mimo że działamy „na ślepo” metodą prób i błędów, strzałki gęściej układają się w kierunku przeciwnym do „rozwiązania” (rys. 2). Nie jest to przypadek. Próby nie są bowiem chaotyczne, tak jak mogłoby się wydawać. Eksperymentator, projektant, pracownik naukowy, wynalazca, każdy twórca opiera się na swoim dotychczasowym doświadczeniu i wiedzy wyniesionej ze szkoły. To wprowadzony przez H.S. Altshullera wektor inercji.

Dobłą ilustracją tego zjawiska jest historia rozwoju napędu samolotów. W dążeniu do wzrostu ich prędkości podnoszono moc silników, co zmuszało do powiększania średnicy śmigła, tak aby było zdolne tę moc wykorzystać. Obroty śmigła nie mogły przekraczać pewnej optymalnej wartości ze względu na warunki aerodynamiczne. Ponadto zwiększenie ciężaru silnika wymagało powiększenia

powierzchni płatów nośnych, a to z kolei powodowało powiększenie oporu czołowego i... błędne koło się zamykało [Boratyńska-Sala 2013]. Wystąpiło zjawisko, które H.S. Altszuller nazywa sprzecznością techniczną. Usunięcie tej sprzeczności stanowi istotę ogromnej większości wynalazków. Postępem było odejście od napędu śmigłowego i zastosowanie silnika odrzutowego, co radykalnie zmieniło sytuację. To typowa sytuacja wymagająca pokonania wektora inercji. Wiele przykładów praktycznych rozwiązań z wykorzystaniem metodologii TRIZ znaleźć można w pracy [Kuznecov 2003].



Rys. 2. Układ schematyczny metody prób i błędów

Źródło: [Boratyński 2008].

Bez „innego myślenia”, bez pokonania wektora inercji, nie da się rozwiązać znanego z psychologii zadania, polegającego na zbudowaniu z sześciu zapalek czterech trójkątów równobocznych. Konieczność myślenia „inaczej”, myślenia twórczego, nie jest zatem czymś nowym, ale dopiero H.S. Altszuller stworzył precyzyjne ramy, teorię inwencyjną. Twórcy inwentyki dobrze znali zjawisko inercji i do walki z nim stworzyli wiele różnych metod, np. wspomnianą już burzę mózgów (*brainstorming*) A. Osborna.

Metody inwencyjne próbują stępić ostrze wektora inercji, działając na płaszczyźnie psychologii. Nie można jednak powiedzieć, że metoda prób i błędów nie odnosiła sukcesów. Historia cywilizacji odnotowała wiele zadziwiających

osiągnięć dawnych mistrzów, którzy – biorąc pod uwagę poziom techniki w ich czasach – „nie mieli prawa” zrobić tego, co zrobili. Wystarczy wspomnieć japońską katana, legendarny miecz samurajów, ale także wiele, wiele innych rzeczy. Katana to arcydzieło XIII-wiecznych japońskich rzemieślników. Na szczególną uwagę zasługują dwa elementy tej technologii. Pierwszy to nawęglanie [Boratyński 2008]. Dopiero na początku XX w. ustalono, na czym polega istota nawęglania i jakie muszą być parametry obróbki cieplnej, aby proces przebiegał prawidłowo. Japończycy żyjący w XIII w. nie mogli mieć pojęcia o atomach węgla wnikających w strukturę żelaza. Do wykonania miecza nie można było użyć miękkiej stali niskowęglowej. Zastosowanie stali o podwyższonej zawartości węgla zapewniłoby wprawdzie odpowiednie własności wytrzymałościowe ostrza, ale pociągnęłoby za sobą wzrost kruchości, stwarzając tym samym możliwość pęknięcia klingi przy zadawaniu ciosu lub, co gorsza, parowaniu ciosu przeciwnika. Jedynym wyjściem wydaje się zatem przyjęcie rozwiązania kompromisowego polegającego na wyborze stali o takiej zawartości węgla, aby uzyskać wystarczającą wytrzymałość i twardość ostrza, zachowując odporność na pęknięcie przy uderzeniu. Tak narodziła się również słynna stal damasceńska. Drugi element tej technologii dotyczy kucia stali. Chodzi o składanie „na pół” sztaby surowego żelaza – przyszłej klingi – zgrzewanie, rozkuwanie do pierwotnej długości, znowu składanie na pół itd., w sumie 15 razy, co daje 32 768 warstewek w grubości miecza [Yumoto 2004].

Japońscy mistrzowie nie mogli oczywiście wiedzieć o zaletach drobnowłókniastej struktury. Prawdopodobnie podejmowanie prób przez setki lat doprowadziło ich do perfekcji. Przykłady zastosowania metody prób i błędów można mnożyć. Jeśli stosujący tę metodę natrafiają na trudny problem, to po prostu podejmują ciągle nowe próby. T. Edison, poszukując optymalnego włókna do swojej żarówki, wykonał ok. 1200 prób. Do wynalezienia akumulatora potrzebował kilku tysięcy eksperymentów. Regułą poszukiwań metodą prób i błędów jest poruszanie się w ciasnym obszarze niewielkiego wycinka wiedzy. Wektor inercji (umysłowej!) uparcie prowadzi badacza w dobrze znane rejony wiedzy i doświadczenia zawodowego. Dziś nie możemy sobie pozwolić na tysiące prób T. Edisona, obecnie są inne metody⁴, spośród których TRIZ zasługuje na szczególne uznanie.

⁴ Jak np. planowanie eksperymentu DOE (*design of experiments*) pozwalające na ograniczenie liczby powtórzeń i uzyskanie wyników na ustalonym poziomie ufności.

6. Istota TRIZ

6.1. Uwagi ogólne

Analizując dziesiątki, a później setki i tysiące opisów patentowych, H.S. Altzuller usiłował wykryć ogólne prawa tworzenia wynalazków. Na początku zaobserwował fakt istnienia logiki w rozwoju systemów technicznych. Wyprowadził z tego wniosek, że skoro systemy techniczne rozwijają się według określonych zasad, to znając te zasady, można przewidywać ich dalszy rozwój i wykorzystać do rozwiązywania nowych problemów.

Jedno z zasadniczych ustaleń H.S. Altszullera dotyczyło tego, że wynalazek niemal zawsze polega na usunięciu sprzeczności technicznej, pojawiającej się na drodze do ulepszenia czegokolwiek. Zakładał on ponadto że skuteczna metoda rozwiązywania problemów technicznych musi uwzględniać specyfikę mózgu człowieka, ponieważ nabyta wiedza i doświadczenie prowadzą go w jednym kierunku, zgodnym z wektorem inercji. Na podstawie analizy patentów stwierdził, że istnieje kilkadziesiąt (zaledwie) zasad leżących u podstaw bardzo różnych wynalazków. Nie można nie zauważyć analogii pomiędzy bogatą rzeczywistością przyrody i niewielkim stosunkowo zbiorem pierwiastków chemicznych. Problemy techniczne mogą być rozwiązywane z wykorzystaniem programu, a nie – jak było dotąd – za pomocą metody prób i błędów. Główną ideą TRIZ jest stwierdzenie, że sytuacje, w których występują technologiczne sprzeczności, powtarzają się, choć w zmodyfikowanej postaci, ale jeśli sprowadzimy je do zasad elementarnych, otrzymujemy niewielki zbiór metod usuwania tychże sprzeczności, liczący 40 pozycji.

6.2. Sprzeczności techniczne

Obiekty techniczne (maszyny) można charakteryzować za pomocą kilku podstawowych zależnych od siebie parametrów, które określają stopień ich doskonałości: wielkość, moc, niezawodność i in. Korzystna zmiana któregoś z parametrów często może prowadzić do pogorszenia innego parametru. Udoskonalenie pewnej właściwości obiektu jest w sprzeczności z inną jego właściwością. Należy poszukiwać najbardziej korzystnego połączenia tych cech, uwzględniając możliwość znalezienia kompromisu. Rozwiązanie uzależnione jest od odpowiedzi na pytanie, gdzie można osiągnąć zysk i kosztem czego. Twórczość wynalazcza wymaga znalezienia takiego rozwiązania, w którym zyski są maksymalne, a straty minimalne. Z tej perspektywy wynalazek można określić jako wyeliminowanie sprzeczności technologicznej. Należy odnaleźć w zadaniu sprzeczności, a potem

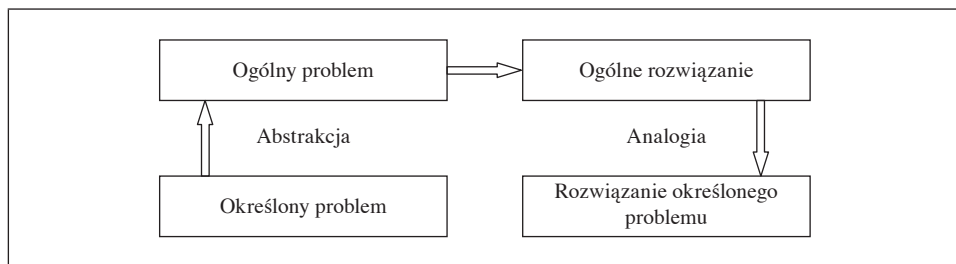
dostępnymi środkami dążyć do ich eliminacji dzięki zastosowaniu 40 zasad H.S. Altszullera.

6.3. Pojęcie maszyny idealnej

Obserwacja rozwoju konstrukcji maszyn skłoniła H.S. Altszullera do postawienia tezy, że konstruowanie określonych urządzeń zmierza do określonego ideału zgodnie z pewną linią rozwoju. „Maszyna idealna to umowny wzorzec” [Altszuller 1972]. Określenie idealnego obrazu maszyny w początkowej fazie wynalazczości pozwala obrać właściwy kierunek poszukiwań, zmniejsza czynnik przypadkowości oraz zawęża obszar poszukiwań. Planowe poszukiwanie ukierunkowuje proces myślenia i czyni go bardziej efektywnym, co sprawia, że wzrasta prawdopodobieństwo znalezienia rozwiązania, którego efektem będzie wynalazek. Idealna maszyna określana jest w tej teorii jako idealny wynik końcowy (*ideal final result* – IFR). Do najważniejszych cech IFR należą: eliminacja wad oryginalnego systemu, zachowanie zalet oryginalnego systemu, niekomplikowanie, niewprowadzanie nowych wad. Podejście takie przeciwdziała psychicznej inercji i zachęca do tworzenia z użyciem wyobraźni.

6.4. Algorytmy rozwiązywania problemów wynalazczych (ARIZ)

W algorytmach rozwiązywania innowacyjnych zadań w ogólności wykorzystuje się drogę abstrahowania rozwiązywanego problemu do pewnego problemu uogólnionego, a następnie eliminację sprzeczności na podstawie maczyc analogii (rys. 3).



Rys. 3. Ogólny schemat ARIZ

Źródło: [Andrzejewski i Jadkowski 2005].

Algorytmy były wielokrotnie modyfikowane, ale istota ich działania jest podobna. W artykule ograniczono się do ich prezentacji w bardzo skróconej

formie, tzn. wymienienia ich poszczególnych części (kroków), bez szczegółowej interpretacji. Kroki te są następujące [Altszuller 1983]:

- 1) wybór zadania,
- 2) budowa modelu zadania,
- 3) analiza modelu zadania,
- 4) przewyciężenie sprzeczności fizycznej,
- 5) wstępna ocena otrzymanego rozwiązania,
- 6) rozwinięcie otrzymanego rozwiązania,
- 7) analiza toku rozwiązywania.

ARIZ to elastyczne programy, planowo ukierunkowane czynności lub programy sekwencyjnego opracowywania zadania wynalazczego. Wykorzystują one osobowość twórcy, aktywizując jego wyobraźnię, a jednocześnie chronią przed błędami i małą efektywnością [Liskiewicz 2008]. Stosowanie ich wymaga jednak pewnej wiedzy i umiejętności, które powinny być uprzednio ćwiczone. Trzeba ponadto pamiętać, że TRIZ oferuje wiele metod i procedur, a samych algorytmów ARIZ są cztery odmiany. TRIZ, mimo że jego twórca nie żyje od wielu lat, ciągle się rozwija i zwiększa swoje możliwości twórczego oddziaływania w wielu dziedzinach. W 2009 r. opracowano nowy algorytm ARIP-2009 – algorytm rozwiązywania inżynierskich problemów.

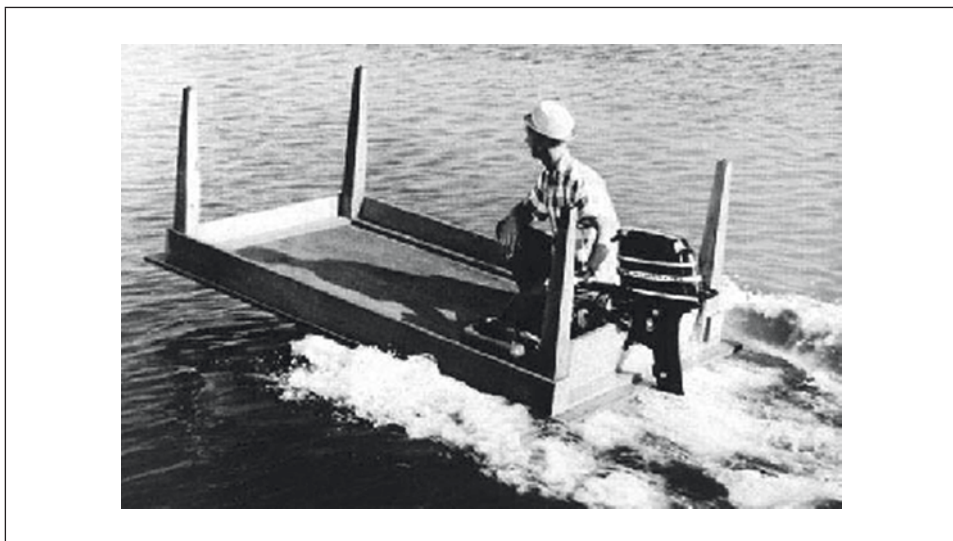
7. Zakończenie

TRIZ to teoria wynalazczości pozwalająca na maksymalną sprawność. Dzięki niej problemy są rozwiązywane metodycznie. Istnieje wprawdzie wiele metod zwiększania kreatywności, ale TRIZ w odróżnieniu od nich daje możliwość rozwiązywania problemów z wykorzystaniem stałego, powtarzalnego algorytmu. Pozwala na przełamanie starych form wynikających z intuicji, edukacji i doświadczenia oraz na pokonanie, a w każdym razie ograniczenie, wektora inercji. Eliminuje czasochłonne rozwiązywanie problemów metodą prób i błędów. Zwiększa liczbę trafnych rozwiązań, oszczędza czas i pieniądze oraz ogranicza ryzyko.

Coroczne, międzynarodowe konferencje oraz liczne publikacje naukowe poświęcone TRIZ uświadamiają coraz większe możliwości tej metody inwencyjnej. Niezależnie od naukowych ustaleń dotyczących tej metody pojawiają się żartobliwe rysunki i fotografie, które pokazują jej zalety. Szczególnie podoba mi się fotografia zamieszczona na rys. 4.

Na koniec pragnę podziękować za zainteresowanie mnie inwentyką, a w szczególności TRIZ, dwu osobom. Jedną jest, nieżyjący już prof. dr hab. Z. Martyniak, profesor Akademii Ekonomicznej w Krakowie (obecnie Uniwersytet Ekonomiczny), autor książki *Wstęp do inwentyki*, w której najwięcej miejsca poświęcił

TRIZ. W dziedzinie inwentyki prof. Z. Martyniak nie znalazł dotychczas kontynuatorów w Uniwersytecie Ekonomicznym. To wielka szkoda, ponieważ TRIZ jest przydatny również w naukach ekonomicznych. Przykładem niech będzie system TRIZ-szansa, który powstał w 1992 r. System ten służy do rozwiązywania niestandardowych problemów w zarządzaniu, marketingu, reklamie, public relations. Wykorzystywany jest w tworzeniu, wdrażaniu i prowadzeniu badań nad rozwojem zarówno małych, jak i dużych przedsiębiorstw gospodarczych.



Rys. 4. TRIZ rozwiąże każdy problem? Prawie!

Źródło: [Liskiewicz 2008].

Drugą osobą, której winien jestem wdzięczność, jest wspomniany już mgr inż. J. Boratyński, entuzjasta i propagator idei TRIZ, dzięki któremu mimo niezrozumiałej inercji ludzi nauki w Polsce daje się zauważyć wzrastające zainteresowanie tą metodą.

Wymienionym Panom jestem wdzięczny za zainteresowanie mnie tą problematyką, mimo że nie leżała ona w głównym nurcie moich badań naukowych.

Jeżeli kogokolwiek uda mi się zainteresować metodyką TRIZ, będę to traktował jako osobisty sukces i jestem przekonany, że podobnie pomyśleliby prof. dr hab. Z. Martyniak i mgr inż. J. Boratyński.

Literatura

- Altszuller G.S. [1972], *Algorytm wynalazku*, Wiedza Powszechna, Warszawa.
- Altszuller G.S. [1983], *Elementy teorii twórczości inżynierskiej*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Andrzejewski G., Jadcowski K. [2005], *TRIZ – metoda interdyscyplinarna*, II Konferencja Naukowa KNWS'05 „Informatyka – sztuka czy rzemiosło”, 15–18.06.2005, www.knws.uz.zgora.pl/history/pdf/knws_05_andrzejewski_g.pdf (dostęp: 30.11.2013).
- Barwicki A. [2009], http://www.mt.com.pl/num/07_01/katany.htm (dostęp: 1.07.2009).
- Boratyńska-Sala A. [2013], *Algorytm pracy z projektami wynalazczymi*, <http://triz-innowacje.pl> (dostęp: 30.11.2013).
- Boratyński J. [2008], *Z życia Henryka Altszullera*, <http://triz-innowacje.pl> (dostęp: 30.11.2013).
- Kuznecov Ū.M. [2003], *Teoriâ rozv'âzannâ tvorčih zadač*, Ministerstvo osviti i nauki Ukraïni, Kiïv.
- Liskiewicz T. [2008], *TRIZ. Method for Inventive Thinking Optimisation*, <http://triz.w.in-teria.pl/triz.pdf> (dostęp: 15.06.2008).
- Martyniak Z. [1997], *Wstęp do inwentyki*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie, Kraków.
- Rudniański J. [1979], *Fazy rozwiązywania problemów naukowych*, „Zagadnienia Naukoznawstwa”, nr 2.
- Rudniański J. [1981], *Homo cogitans*, Wiedza Powszechna, Warszawa.
- Yumoto J.M. [2004], *Miecz samurajski*, Diamond Books, Bydgoszcz.

TRIZ – the Theory of Inventive Problem Solving

TRIZ is the theory of inventive problem solving (TIPS). It was elaborated by a research team led by H. S. Altszuller after a statistical analysis of more than 40,000 patents that sought to identify patterns of innovative solutions. In contrast to the trial-and-error method, TRIZ, thanks to its ability to bypass faulty concepts, allows for the optimal solution to be found in a more effective way. TRIZ's main feature is that it overcomes psychological inertia (“inertia's vector”) resulting from habits, education and experience. Commonly considered an engineering method, TRIZ is becoming more and more popular among researchers in nearly all scientific fields, including representatives of the social sciences and economy.

Keywords: inventiveness, theory of inventive problem solving, technology contraction, ideal final result, algorithm of inventive problems solving.

Andrzej Gajewski

Katedra Metrologii i Analizy Instrumentalnej
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

Integracja HCD i TRIZ w projektowaniu i ocenie wyrobów

Streszczenie

HCD to dogłębne poznanie i zrozumienie potencjalnych klientów, ich określonych czynności, preferencji, emocji, motywacji, problemów i środowiska, w jakim przebywają. TRIZ zorientowane jest na rozwiązywanie problemów technicznych ze szczególnym uwzględnieniem innowacji technologicznych. TRIZ i HCD to zupełnie inne filozofie projektowania, wytwarzania i oceny wyrobów. Wydaje się jednak, że spojrzenie na wyrób z punktu widzenia metodologii zarówno TRIZ, jak i HCD jest szansą na właściwy, zgodny z oczekiwaniem konsumentów rozwój towarów, szczególnie towarów konsumpcyjnych. W artykule przedstawiono przykładowe obszary, w których główny nacisk położony jest na użyteczność danego wyrobu (tu zastosowanie znajdują metody TRIZ), oraz obszary, w których większe znaczenie mają metody zastosowane w HCD.

Słowa kluczowe: HCD, TRIZ, rozwój wyrobów, ocena wyrobów, struktura użycia, użyteczności i znaczenia.

1. Wprowadzenie

Wydawać się może, że potrzeby i oczekiwania klienta są w zgodzie z doskonałością techniczną wyrobów. Najczęściej tak bywa, nie jest to jednak regułą, co zostanie pokazane w dalszej części artykułu. Celem tej publikacji jest zaprezentowanie skuteczności integracji HCD i TRIZ w projektowaniu i ocenie wyrobów.

Human-centered design (HCD) to dogłębne poznanie i zrozumienie potencjalnych klientów, ich określonych czynności, preferencji, emocji, motywacji, problemów i środowiska, w jakim przebywają. HCD to zasady projektowania

ukierunkowanego na użytkownika i kładącego nacisk na dogłębne zrozumienie potrzeb konsumenta.

Teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań (TRIZ) jest metodą rozwiązywania problemów w oparciu o logikę i konkretne dane empiryczne, jest metodyką kreatywnego rozwiązywania problemów. TRIZ daje możliwość rozwiązywania problemów za pomocą stałego, powtarzalnego algorytmu. Łamie stare formy wynikające z intuicji, edukacji, doświadczenia, pozwala na pokonanie, a w każdym razie ograniczenie, wektora inercji. Eliminuje czasochłonne rozwiązywanie problemów metodą prób i błędów. Zwiększa liczbę trafnych rozwiązań, oszczędza czas i pieniądze oraz ogranicza ryzyko [Gajewski 2006 i 2007].

HCD i TRIZ to zupełnie inne filozofie projektowania, wytwarzania i oceny wyrobów. Wydaje się jednak, że spojrzenie na wyrób z punktu widzenia metodologii zarówno HCD, jak i TRIZ jest szansą na właściwy, zgodny z oczekiwaniami konsumentów rozwój towarów, szczególnie konsumpcyjnych. W artykule przedstawione zostaną obszary, w których główny nacisk położony jest na użyteczność danego wyrobu (tu zastosowanie znajdują metody TRIZ), oraz obszary, w których większe znaczenie mają metody zastosowane w HCD. Właściwe zrozumienie istoty HCD i TRIZ w rozwoju towarów umożliwi przedstawiona w artykule struktura użycia, użyteczności i znaczenia (*use, usability, meaning*). Zaprezentowano też przykłady obszarów, w których mogły bądź mogą być razem zastosowane obie metody.

2. Istota HCD

Poznanie skomplikowanych i często trudnych do zrozumienia upodobań, preferencji i motywacji potencjalnych klientów związanych ze specyficznym środowiskiem, w jakim przebywają, zrozumienie owych motywacji, a także sposobów rozwiązywania problemów i pokonywania przeciwności pojawiających się w ich życiu to podstawowe zadania HCD. Celem jest poznanie indywidualnych potrzeb potencjalnych klientów i ich przywiązania do określonych produktów. Kiedy już producent ma pełny obraz konsumentów, może zacząć opracowywać strategię skierowaną do określonej grupy użytkowników, tak aby produkt spełniał ich oczekiwania.

Główną metodą badań HCD jest, jak to określają A.V. Pelt i J. Hey [2006] oraz D.L. Mann [2006], etnografia. Jest to antropologiczna technika używana do obserwacji ludzi w ich naturalnym środowisku. Może to być np. obserwowanie ich codziennego życia lub stanie się aktywnym uczestnikiem ich codziennych czynności. Chodzi o to, by zacząć patrzeć na świat dokładnie tak jak oni. Przeprowadzenie obserwacji konkretnej sytuacji jest bardzo ważne, gdyż konsumenci

często nieświadomie reagują na bodźce z zewnątrz. Przykładem może być sytuacja, w której tym samym napojem napełniono zwykłą butelkę i butelkę ekstrawagancką. Napój z ekstrawaganckiej butelki smakuje lepiej. Ponadto trzeba mieć świadomość, że często to, co rzeczywiście ludzie myślą lub czują, może bardzo się różnić od tego, co mówią, że czują, w zależności od kontekstu i sytuacji, w jakiej się znajdują. HCD jest metodologią podkreślającą znaczenie głębokiego zrozumienia konsumentów. Jest to swego rodzaju metoda prób i błędów. Jest ona przeciwieństwem metodologii TRIZ, której istotą jest analiza prowadząca do rozwiązania problemu. Może właśnie dlatego wielu naukowców próbuje łączyć te dwie metodologie. Coraz częstsze stosowanie TRIZ do rozwoju produktów konsumenckich i większy asortyment produktów sprawiają, że integracja tych dwóch metod staje się coraz ważniejsza.

3. Metodologia TRIZ

Nazwa TRIZ pochodzi z języka rosyjskiego (teoriâ rešencâ izobretatel'skikh zadač)¹. Twórcą tej metody jest H.S. Altszuller. TRIZ to teoria wynalazczości pozwalająca na maksymalną sprawność i metodyczne rozwiązywanie problemów. Zasadniczym postulatem TRIZ jest twierdzenie: „skoro techniczne systemy rozwijają się według określonych prawidłowości, to te prawidłowości można odkryć i wykorzystać do stworzenia algorytmów rozwiązywania zadań wynalazczych” [Gajewski 2007]. W swej pierwotnej postaci TRIZ był opracowany do rozwiązywania problemów technicznych, wynalazczych. Obecnie jest stosowany do rozwiązywania problemów organizacyjnych, edukacyjnych, społecznych, a także biznesowych [Gajewski 2006 i 2007]. Znaczenie TRIZ daje się zauważyć głównie w ostatnich dwóch dekadach. Przyczynił się m.in. do rozwoju produktów takich międzynarodowych korporacji, jak Samsung, Motorola, Xerox i in. [Pelt i Hey 2006]. Wielu menedżerów, np. w Motoroli, zapowiada, że TRIZ stanie się tak ważny w zarządzaniu i analizie innowacji jak *six sigma* w zapewnieniu jakości, zaznaczają oni ponadto, że metody te znakomicie się uzupełniają [Barney i McCarty 2005]. Rozwijający się trend stosowania TRIZ w procesie projektowania dóbr konsumpcyjnych oraz jego integracji z metodologią HCD podejmują np. J. Hipple [2006], R. Jana [2006] i D.L. Mann [2006]. Autorzy ci wyrażają przekonanie, że stosowanie obu rozwiązań może przynieść wiele korzyści. Proponują zintegrować „głos konsumenta” (*voice of consumer*) i TRIZ głównie w fazie definiowania problemu. Przykładem może być D.L. Mann [2006], próbujący integrować TRIZ z metodą *quality functional deployment* (QFD), znaną jako

¹ W literaturze światowej najczęściej stosowana jest oryginalna pisownia TRIZ, w literaturze anglosaskiej spotyka się jednak nazwę *theory of inventive problem solving* (TIPS).

house of quality. Godne uwagi są również prace J. Hipple'a [2006] oraz T. Runhui [2002]. Warto jednak zaznaczyć, że każda z tych metod wymaga wyczerpującego poznania i zrozumienia całego obszaru zagadnień wiążących się z produktem.

TRIZ nie został pomyślany jako narzędzie służące do dogłębnego zrozumienia potrzeb konsumenta. Skupia się on głównie na innowacyjności urządzeń technicznych, wychodzi naprzeciw klientom szukającym czegoś nowego. Jest to powszechna tendencja wynikająca z postępu technicznego i ludzkich oczekiwań. Przekładanie indywidualnych potrzeb na język funkcji TRIZ jest kluczowym, chociaż skomplikowanym zadaniem. Wiadomo bowiem, że doskonały rozwój produktu wymaga dogłębnego zrozumienia takich czynników, jak ludzkie potrzeby, wyznawane wartości, znaczenie wyrobów i niewypowiedziane (uśpione) potrzeby. Taką uśpioną potrzebą może być np. potrzeba bycia oryginalnym, zabieganym, bardzo zajętym.

4. Potrzeby konsumenta a doskonałość techniczna wyrobu

Warto zacząć od zaprezentowania studiów przypadków pokazujących jak kluczowe jest zrozumienie potrzeb użytkownika. Pierwszy przykład dotyczy NTT DoCoMo, największego operatora telefonii komórkowej w Japonii. Nazwa DoCoMo jest skrótem od słów *do communications over the mobile network*, jednocześnie w języku japońskim *doko-mo* oznacza „wszędzie”. Firma dostarcza usług mobilnych (telefonia, wideotelefon, internet, mail oraz SMS). Menedżerowie DoCoMo w ostatnich latach XX w. zapowiedzieli, że ze swoim wyrobem wyruszają na podbój świata. Sztandarowa funkcja ich sieci – mobilny dostęp do internetu (ponad 15 lat temu!) – była poza konkurencją i zyskała powszechne uznanie w Japonii. Menedżerowie niedosłęgo zdobywcy świata okazali się jednak głusi na potrzeby klientów spoza Japonii. Okazało się bowiem, że długie i skomplikowane menu, które przypadło do gustu Japończykom, zupełnie nie spodobało się obcokrajowcom, którzy wolą bardziej intuicyjne interfejsy. Czerpiąc być może z doświadczeń DoCoMo, firma Fujitsu, obecnie czołowy producent sprzętu IT, postanowiła produkować wyroby z uwzględnieniem zasad HCD. Głównym celem było łatwe użycie produkowanych urządzeń i systemów, bezproblemowe z punktu widzenia użytkownika. W swoich projektach firma Fujitsu wykorzystwała ponadto ideę ergonomii przez promowanie tworzenia systemów informatycznych uwzględniających fizyczne i poznawcze właściwości człowieka. Przyjęte zasady produkcji i perfekcja wyrobów sprawiają, że ta japońska korporacja produkująca komputery (i superkomputery), telefony komórkowe, serwery i wiele innych produktów IT zdobywa rynki światowe. Firma zatrudnia obecnie w 70 krajach ponad 175 tys. pracowników. Od 1999 r. produkuje w Europie sprzęt pod nazwą Fujitsu Siemens

Computers, a w 2008 r. przejęła wszystkie udziały Siemens (<http://fujitsu.com>, 30.11.2013).

Kolejny przypadek jest jeszcze bardziej przekonujący, a dotyczy również Japonii. Na początku 1975 r. firma Sony wypuściła na rynek pierwszy amatorski format kaset wideo do magnetowidów pozwalający użytkownikom na nagrywanie programów z telewizji i kamer (system Betamax). Był to system o dobrej jakości zapisu obrazu (rozdzielczość pozioma 270 linii) i dźwięku. Niecałe dwa lata później (koniec 1976 r.) firma JVC zaprezentowała konkurencyjny produkt znany jako VHS, o gorszych parametrach zapisu obrazu (rozdzielczość pozioma 240 linii) i gorszej jakości dźwięku. Zaletami VHS były tylko dłuższy czas nagrań (ponad 1 godz.) i mniejsze gabaryty kaset. Firma Sony konkurowała przez lata z gorszym technologicznie VHS. W latach 80. VHS wygrał walkę o prymat na rynku z bardziej zaawansowanymi technologicznie konkurencyjnymi formatami Betamax (Sony) oraz Video 2000 (Philips). O zwycięstwie zdecydowała niska cena VHS oraz brak promocji i błędy w polityce firmy Sony. Rynek niespodziewanie zwrócił się w stronę VHS, a klęska Sony była upokarzająca – pod koniec lat 80. firma została zmuszona do zakupu licencji VHS i zaczęła sprzedawać swoje własne wyroby systemu VHS, czyli systemu konkurenta.

Powstaje pytanie, jak to możliwe, że firma JVC zdołała pokonać Betamax. Wskazać można trzy główne przyczyny zaistniałej sytuacji [Pelt i Hey 2006]:

- 1) brak odpowiedniej promocji produktu Sony (w owym czasie zupełnie nieznanego na rynku),
- 2) niższe koszty VHS pod koniec lat 70. ubiegłego wieku,
- 3) niedocenienie przez Sony potrzeb konsumentów, którzy wybrali dłuższy czas nagrywania (przy gorszej jakości) oraz mniejsze kasety.

Sony nie zrozumiał potrzeb konsumentów, którzy wybrali dłuższy czas nagrywania oraz mniejsze kasety zamiast wyższej jakości. Gwoli sprawiedliwości należy jednak dodać, że wyższa jakość nagrań w formacie Betamax nie była wyraźnie zauważalna dla większości użytkowników. Niemniej błędy Sony były dość typowe dla producentów.

Opisane przypadki są jednymi z wielu. Wnioski, które się nasuwają, są następujące: 1) lepsze technologicznie rozwiązania nie zawsze znajdują uznanie klientów, 2) producenci tak naprawdę nie znają swoich potencjalnych klientów w stopniu pozwalającym im na dotarcie do nich ze swoimi produktami i z nowościami.

5. Porównanie TRIZ i HCD

W metodologii TRIZ najważniejsze są zdefiniowanie problemu i możliwie najlepsza technologia, w przypadku HCD to użytkownik i jego potrzeby mają

największe znaczenie. W praktyce HCD głównym celem jest obserwacja potrzeb wynikających ze sprzeczności ludzkiego zachowania. Wykorzystujący TRIZ w swoich badaniach na pierwszym planie stawiają cechy fizyczne i techniczne danego problemu lub badanego przedmiotu. Oba sposoby mają cechy wspólne: badania i analiza są przeprowadzane w celu znalezienia rozwiązania danego problemu, a nie jego oceny. D.L. Mann [2006] rozwinął proces badania przez wprowadzenie czterech kroków; są to: zdefiniowanie, wybór narzędzi, wypracowanie rozwiązania oraz ocena. Tymczasem narzędzia TRIZ służą przede wszystkim do zdefiniowania problemu. Z doświadczenia wynika, że często użytkownicy TRIZ definiują problem na podstawie niewystarczających informacji, np. pochodzących od zarządu, uwzględniają marketingowy punkt widzenia lub własne doświadczenie, rezygnują natomiast z rzeczywistego zbadania użytkownika. Jest to dość ryzykowne, jeśli wziąć pod uwagę przyszłość produktu na rynku.

Tabela 1. Podstawowe różnice pomiędzy TRIZ i HCD

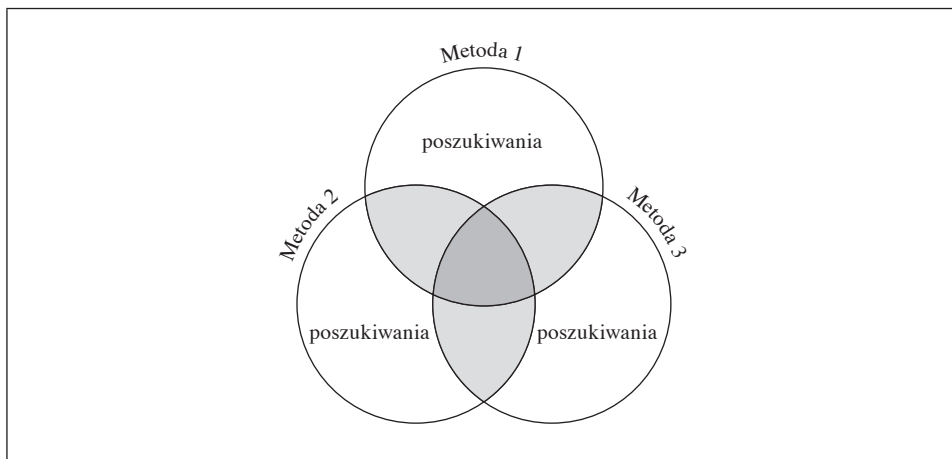
TRIZ	HCD
Nastawienie na funkcjonalność i technikę	Nastawienie na ludzkie potrzeby
Maksymalizacja technicznego sukcesu	Techniki antropologiczne
Podkreślanie twierdzeń nieopartych na faktach	Podkreślanie kontekstu
Podejście mocno zestrukturyzowane	Podejście mało zestrukturyzowane
Określa <i>co</i> i <i>jak</i>	Opisuje <i>dłaczego</i>

Źródło: [Pelt i Hey 2006].

Zbyt często metodolodzy HCD porzucają technologiczną innowacyjność i wykorzystują tradycyjną burzę mózgów oraz doświadczenie grupy przeprowadzającej badania.

6. Integracja TRIZ i HCD

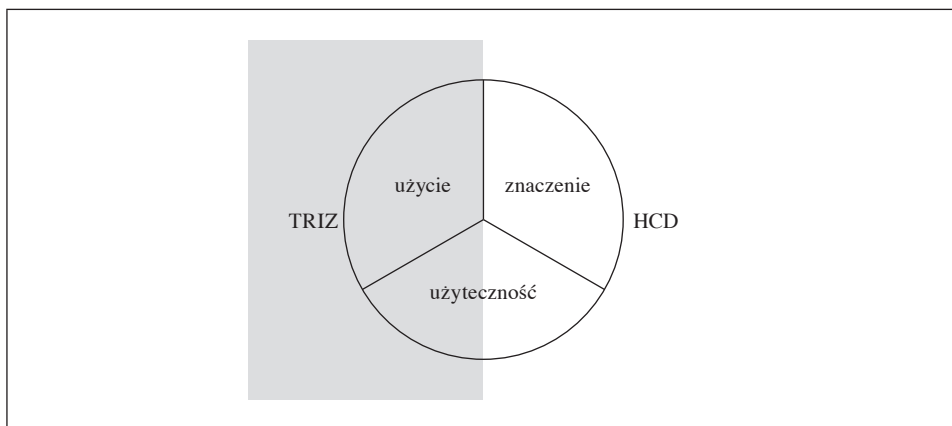
Zgodnie z propozycjami wielu teoretyków i praktyków zarządzania jakością tylko integracja kilku metod badawczych może doprowadzić do prawidłowych wniosków i właściwej decyzji. Rozważania takie prowadzi np. E. Sanders [1990], która stwierdza, że zwykle poszczególne metody mają wspólny element, który dzięki uwzględnieniu zaleceń poszczególnych metod i wyników poszukiwań tymi metodami (*findings*) daje uzasadnione powody do podjęcia właściwej decyzji (rys. 1).



Rys. 1. Integracja kilku metod badawczych pozwalająca na określenie elementów wspólnych

Źródło: [Sanders 1990].

Podobnie wypowiadają się A.V. Pelt i J. Hey [2006]. Aby zaprezentować możliwości, jakie daje integracja TRIZ i HCD, proponują teorię, którą nazywają: użycie, użyteczność i znaczenie (rys. 2).



Rys. 2. Diagram przedstawiający zakresy znaczeniowe preferowane przez TRIZ i HCD

Źródło: [Pelt i Hey 2006].

Użycie odnosi się do tego, co użytkownik może zrobić z danym produktem i jakie korzyści może z niego czerpać (w tym znaczeniu użycie jest w metodologii TRIZ synonimem funkcjonowania). Użyteczność odnosi się do sposobu, w jaki

użytkownik posługuje się danym produktem, i łatwości, z jaką się nim posługuje. Jest to coś więcej niż łatwość w obsłudze – to również przeznaczenie produktu i korzyści z niego. Znaczenie jest najbardziej złożoną z tych cech. Produkt dla konsumenta jest czymś więcej niż tylko sumą funkcji, jakie pełni. Znaczenie wynika nie tylko z użycia i użyteczności danego produktu, ale również z reklamy i marki. Znaczenie produktu zależy od związku pomiędzy nabytą rzeczą a osobistym doświadczeniem i potrzebami konsumenta.

Relatywna wartość każdej z trzech cech – użycia, użyteczności i znaczenia – zależy od rodzaju produktu i jego przeznaczenia. Techniczne zasady działania silnika kosiarki do trawy są zapewne nieistotne dla konsumentów, którzy dbają tylko o to, by mieć ładnie przycięty trawnik, natomiast brzmienie silnika motoru Harleya Davidsona jest bardzo istotne dla jego użytkowników – kojarzy się z przygodą, siłą, daje poczucie wolności, dowartościowuje [Runhua 2002].

7. Zastosowanie TRIZ i HCD

Wydaje się, że najlepszą propozycją jest badanie konsumentów uwzględniające intensywność i typ interakcji między konsumentem i technologią. Im bardziej bezpośrednia interakcja między klientem i produktem, tym większa potrzeba zastosowania HCD w celu zrozumienia klienta i częstego uzyskiwania od niego informacji zwrotnych.

Produkty można sklasyfikować według relatywnych preferencji użycia, użyteczności oraz znaczenia wynikających z przyjęcia danego produktu. Produkty, w przypadku których użycie jest czynnikiem podstawowym, a znaczenie i użyteczność odgrywają niewielką rolę, reprezentują technologie *under the hood* („to, co pod maską”), charakteryzują się niewielką bezpośrednią interakcją z użytkownikiem [Pelt i Hey 2006]. Dotyczy to np. technicznych problemów związanych z wnętrzem silnika lub mechaniką lodówki. Tego typu problemy mogą zostać skutecznie zbadane przy minimalnej wiedzy na temat użytkownika, a więc można w ich przypadku w wysokim stopniu, jeśli nie wyłącznie, polegać na metodologiach TRIZ.

Problemy związane z użytecznością wymagają wiedzy na temat użytkowników. Należy ustalić miejsce i czas, w których użytkownik natrafia na problemy, tymczasowe rozwiązania oraz dokładnie określić różnice pomiędzy oczekiwaniami konsumentów a tym, czego doświadczyli. W tym przypadku także TRIZ znajduje swoje zastosowanie, szczególnie wtedy gdy problemy użyteczności mają charakter fizyczny; np. w ergonomii trendy ewolucji technologicznej skutecznie wskazują projektantom możliwość ulepszenia rozwiązań. Prawidłowo określony system TRIZ okazuje się również skutecznym w rozwiązywaniu problemów typu

„coś za coś” (wyborów). Przykładem może być równowaga pomiędzy elastycznością i użytecznością w wielu systemach zdalnego sterowania (większej elastyczności systemu towarzyszy większa liczba przycisków na pilocie, co sprawia, że obsługa staje się bardziej skomplikowana) [Pelt i Hey 2006].

Produkty wymagające świadomego przyjęcia oraz interakcji użytkowników (np. telefony komórkowe i ubrania) muszą często pasować do systemu znaczeń użytkownika i wymagają szerszego zastosowania metod HCD niż metod TRIZ. Ważne jest dogłębne zrozumienie postaw, przekonań, wartości oraz oczekiwań konsumenta, podobnie jak wpływu zmian w użyciu i użyteczności na te czynniki. Trzy obszary są ze sobą ściśle powiązane i wzajemnie na siebie oddziałują. Przekazanie innowacyjnych rozwiązań technicznych marketingowi w celu określenia dla nich znaczenia rzadko prowadzi do powstania prawdziwie udanych produktów. Nawet produkty nastawione głównie na użycie mogą i powinny wykorzystywać techniki HCD.

Nie oznacza to, że metoda TRIZ nie może być skuteczna w rozwiązywaniu problemów związanych ze znaczeniem. Tak naprawdę w każdym z trzech wymiarów: w użyciu, użyteczności oraz znaczeniu TRIZ okazuje się skuteczny, określając strukturę pozwalającą na jasne zdefiniowanie relacji oraz celów końcowych. Pięć filarów TRIZ, tj. idealność, funkcjonalność/atributy, interfejs przestrzenny/czasowy, zasoby oraz eliminacja sprzeczności, stanowi – przynajmniej w wymiarze filozoficznym – skuteczne podejście do każdego wyrobu, a dalsze badania mogą być źródłem nowych korzyści [Sanders 1990]. Przykładowo w trakcie definiowania problemu można rozważyć następujące istotne pytania dotyczące idealności: jakie są idealne końcowe wyniki związane z każdym użyciem, użytecznością oraz znaczeniem? czy możliwe jest zaspokojenie potrzeby bez ponoszenia kosztów bądź innych strat? co powstrzymuje nas od osiągnięcia idealnego wyniku i dlaczego?

Filozofia TRIZ oparta na bezkompromisowej eliminacji sprzeczności jest również bardzo skuteczna w rozwiązywaniu problemów sprzecznych potrzeb użytkowników, niezależnie od tego, czy odnoszą się do użycia, użyteczności, czy też znaczenia (np. potrzeba wyższego poziomu adrenaliny, a z drugiej strony potrzeba bezpieczeństwa).

8. Wnioski

Należy podkreślić konieczność zachowania ostrożności w przypadku stosowania wyłącznie metod TRIZ w celu tworzenia produktów, gdyż TRIZ nie posiada narzędzi pozwalających na zrozumienie klientów, ci zaś mogą mieć skomplikowane i ukryte potrzeby wykraczające poza ramy prostej funkcjonalności,

szczególnie w odniesieniu do systemów znaczeń. Metody TRIZ i HCD skutecznie się uzupełniają i jest możliwość sprawdzenia każdej z nich pod względem użycia, użyteczności oraz znaczenia. Istnieje uzasadniona potrzeba dalszych badań w celu określenia narzędzi i procesów określających wzajemne powiązania stosowanych metod. W literaturze światowej dotyczącej zarządzania jakością coraz częściej pojawiają się próby łączenia TRIZ z HCD oraz *six sigma*. Wydaje się, że omówiona w tym artykule koncepcja integracji TRIZ i HCD w ocenie wyrobów może być z powodzeniem uzupełniona o metodologię *six sigma*. Te trzy narzędzia, mające ugruntowaną pozycję w teorii i praktyce dążenia do doskonałości, znakomicie się uzupełniają, a ponadto mają wspólne cele, jakimi są poprawa jakości, uzyskanie wymiernych korzyści finansowych wynikających z redukcji kosztów wytwarzania, kosztów eksploatacyjnych oraz oszczędności czasu.

Literatura

- Barney M., McCarty T. [2005], *Nowa Six Sigma*, Helion, Gliwice.
- Gajewski A. [2006], *Metoda TRIZ w towaroznawstwie*, „Towaroznawcze Problemy Jakości”, nr 4(9).
- Gajewski A. [2007], *Metoda TRIZ w towaroznawstwie (cz. 2)*, „Towaroznawcze Problemy Jakości”, nr 3(12).
- Hipple J. [2006], *The Use of TRIZ Principles in Consumer Product Design*, Proceedings: Papers presented at the Altshuller Institute for TRIZ Studies Symposia (TRIZ CONs) on TRIZ Methodology and Application, June.
- Jana R. [2006], *The World According to TRIZ*, Business Week Online, May.
- Mann D.L. [2006], *Unleashing the Voice of the Product and the Voice of the Process*, „TRIZ Journal”, June.
- Pelt A.V., Hey J. [2006], *Using TRIZ and Human-Centered Design for Consumer Product Development*, Proceedings of the ETRIA TRIZ Future Conference 2006, Held in Kortrijk, Belgium, October 9–11.
- Runhua T. [2002], *Voice of Customers Pushed by Directed Evolution*, „TRIZ Journal”, June.
- Sanders E. [1990], *Converging Perspectives: Product Development Research for the 1990s*, http://www.maketools.com/pdfs/ConvergingPerspectives_Sanders_92.pdf (dostęp: 31.12.2010).

Integrating HCD and TRIZ in the Design and Evaluation of Products

Human-centered design (HCD) is a set of user-oriented principles focused on a thorough understanding of consumer needs. TRIZ focuses on the innovativeness of technical devices. TRIZ and HCD represent quite different “philosophies” of the design, manufacture and assessment of goods. It seems, however, that viewing a product from the perspective of both TRIZ and HCD methodologies provides an opportunity for consumer-focused

development of products, especially consumer goods. The paper presents the cases in which emphasis is placed on product usability (TRIZ methods are applicable) as well as those areas in which HCD methods play a more significant role.

Keywords: HCD (human-centered design), TRIZ, development of products, estimation of products, structure of use, meaning and usability.

Maciej Sarnek

Katedra Metrologii i Analizy Instrumentalnej
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

Szacowanie wielkości krystalitów i udziału faz w austenitycznej stali nierdzewnej 1.4307 po walcowaniu za pomocą dyfrakcji promieni X

Streszczenie

Materiał, który poddano badaniom, to austenityczna stal nierdzewna oznaczona według normy EN jako 1.4307. Próbki zostały odkształcone poprzez walcowanie, co dało redukcję 56%, 60% i 62% ich grubości. Badania miały na celu określenie udziału poszczególnych faz w zależności od temperatury, w której poddano próbki odkształceniu, oraz oszacowanie wielkości krystalitów i stwierdzenie naprężeń sieciowych powstałych w stali w wyniku walcowania. Wielkości te oszacowano na podstawie poszerzenia rentgenowskich linii dyfrakcyjnych, zakładając różną postać funkcji aproksymacyjnych.

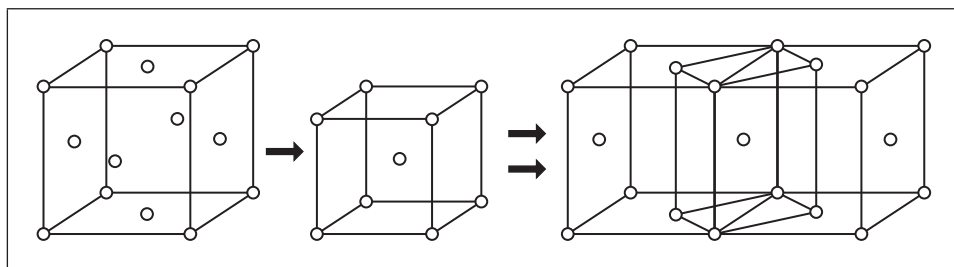
Słowa kluczowe: stal nierdzewna, austenit, dyfrakcja rentgenowska, wielkość krystalitów.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój nowoczesnych gałęzi przemysłu powoduje, że materiały konstrukcyjne muszą odznaczać się coraz lepszymi właściwościami. Austenityczna stal nierdzewna jest stałą wysoce odporną na korozję, odznacza się dobrą zdolnością do odkształceń plastycznych, ciągliwością i spawalnością. W wyniku deformacji plastycznej zmienia się wewnętrzna struktura stali oraz właściwości mechaniczne, takie jak twardość i udarność, co spowodowane jest zmianą wiel-

kości krystalitów i ziaren. Jest to niezwykle ważny aspekt towaroznawczy, który determinuje późniejsze zastosowanie tej stali w różnych gałęziach przemysłu. Stal austenityczna stosowana jest do produkcji wyrobów w przemyśle chemicznym, petrochemicznym, spożywczym, okrętowym, lotniczym, w budownictwie, do produkcji sprzętu AGD. Ze względu na wysoką odporność na korozję ma zastosowanie w środowisku wodnym o bardzo dużym stopniu agresywności. Wielkość krystalitów ma duże znaczenie. Na przykład ze stali, w której wielkość krystalitów jest rzędu od kilku do kilkunastu nanometrów, wytwarzane są tzw. gwoździe chirurgiczne, które znalazły zastosowanie w stomatologii i ortopedii. Wielkość krystalitów ma także wpływ na wartość namagnesowania, która ulega zmianie w zależności od temperatury odkształcania. Czysta stal austenityczna nie wykazuje żadnych właściwości magnetycznych, natomiast odkształcenie plastyczne powoduje, że następuje częściowe przekształcenie się fazy austenitycznej γ w nową fazę α' , tzw. martenzyt, który ma właściwości ferromagnetyczne [Riviére i in 2003, Ozgowicz i Kurc 2009, Qayyum i in. 2007]. Ogólnie ujmując, im wyższy stosunek pierwiastków austenitotwórczych (nikiel) do pierwiastków ferrytotwórczych (chrom), tym struktura austenityczna stali jest stabilniejsza (www.staleniardzewne.pl, dostęp: marzec 2013), co wpywa na jej inną odporno c na korozj , a tym samym dostarcza informacji, w jakich warunkach otoczenia może byc ona stosowana.

Ogólny proces przebudowy struktury austenitu w martenzyt (we fragmentach próbki) pokazany zosta  na rys. 1. Faza γ ma si c powierzchniowo centrowaną, a faza α' si c przestrzennie centrowaną.

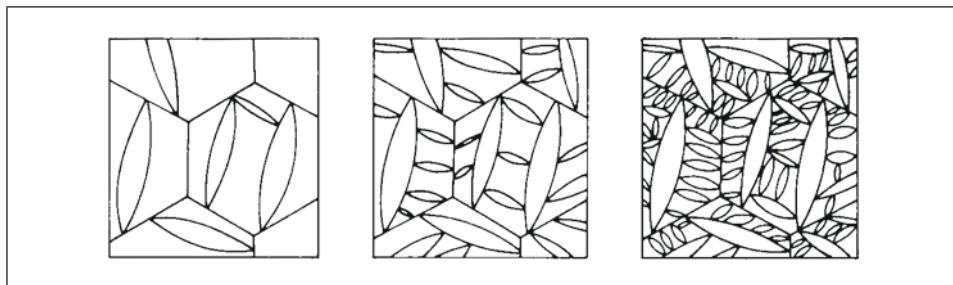


Rys. 1. Przekształcanie sieci austenitu w si c martenzytu

Źródło: opracowanie wlasne na podstawie: [Faryna 2013, s. 16].

Przemiana ta, czyli przej cie $\gamma \rightarrow \alpha'$, w stalach jest przemian  bezdyfuzyjną i polega tylko na przebudowie struktury krystalicznej z regularnej ściennie centrowanej austenitu do regularnej przestrzennie centrowanej martenzytu [Metaloznawstwo... 2005]. Przemiana martenzytyczna w stali następuje przez tworzenie się nowych zarodków martenzytu, nie zaś przez rozrost wcześniej powstałych.

„Igła” martenzytu jest w obrębie jednego ziarna ukierunkowana względem pozostałych pod kątem 60° lub 120° . Przemiana ta rozpoczyna się od utworzenia zarodków na granicach ziaren austenitu, które to zarodki wzrastają z prędkością dźwięku.



Rys. 2. Schemat powstawania igieł martenzytu w ziarnach austenitu

Źródło: [Pawłowski 2013, s. 6].

Wzrost komórek martenzytu zachodzi na drodze niewielkich przemieszczeń atomów żelaza w strefie reakcji na granicy rozdziału martenzyt–austenit. Wszystkie niepożądane skutki powstania martenzytu w strukturze stali można usunąć przez wyżarzanie w wysokiej temperaturze rzędu 1000°C i następnie szybkie chłodzenie, np. w wodzie. Powodować to będzie zmniejszenie się udziału fazy martenzytycznej w objętości próbki. Każdy atom w martenzycie zajmie z powrotem swoje pierwotne miejsce w sieci fazy wysokotemperaturowej. Jest to jedna z unikalnych cech przemian martenzytycznych, czyli ich strukturalna odwracalność. A zatem w wyniku działania temperatury na próbkę następować będzie stopniowy zanik fazy γ na rzecz fazy α' .

Celem badań było określenie udziału fazy martenzytycznej względem fazy austenitycznej w badanej stali w zależności od temperatury, w której poddano próbki odkształceniu, oraz oszacowanie wielkości krystalitów w austenitycznej stali nierdzewnej po jej walcowaniu i stwierdzenie występowania naprężeń wewnętrznych.

2. Przedmiot i metodyka badań

Badaniom poddano stal, która według europejskiej normy EN oznaczana jest jako 1.4307 [PN-EN 10020:2003]. Jest to stal austenityczna charakteryzująca się dużą zawartością chromu, tj. powyżej 18% udziału wagowego w składzie stali. Próbki stali wygrzewano w temperaturze 800°C przez 2 godziny. Pod wpływem

wygrzewania struktura krystaliczna została pozbawiona defektów, ponadto w całej swojej objętości mamy jednakową fazę austenitu γ . Następnie próbki zostały poddane walcowaniu. W wyniku walcowania pojawiła się faza α' [Tavares i in. 2002] uwidocznioma w postaci igieł na rys. 2.

Walcowaniu poddano trzy próbki, każda z nich była walcowana w innej temperaturze otoczenia. Ich liczebność wynosiła $n_1 = n_2 = n_3 = 1$. Przy walcowaniu zastosowano jednakowe prędkości obrotowe obu walców, niezmiennie podczas każdego z przepustów. Próbki walcowane były w obu kierunkach przez zmianę zwrotu kierunku walcowania pomiędzy kolejnymi przepustami przez kotłnię walcowniczą. Podczas każdego przepustu współczynnik l/h był utrzymywany w przedziale od 1,4 do 3, gdzie l oznacza długość rzutu łuku styku walca i materiału walcowanego na kierunek walcowania, a h oznacza średnią grubość próbki. Walcowanie w takich warunkach zapewnia minimalizację gradientu tekstury i rozkładu odkształceń na grubości próbki.

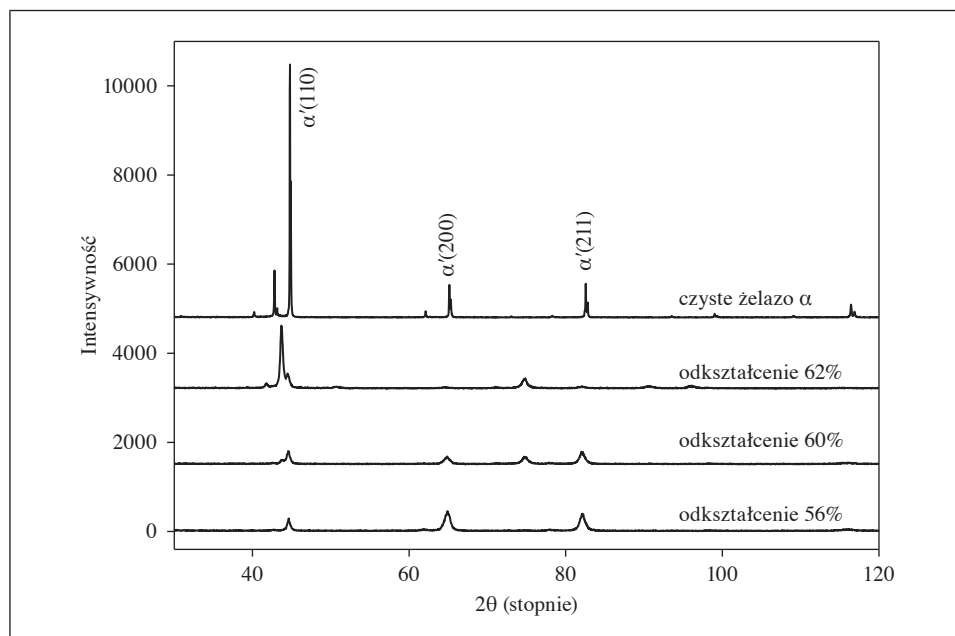
Pierwsza próbka była walcowana w temperaturze -10°C , redukcja jej grubości wyniosła 56%. Drugą próbkę walcowano w temperaturze pokojowej, redukcja jej grubości wyniosła 60%. Trzecia próbka poddana została walcowaniu w temperaturze 200°C , dało to redukcję 62% grubości. Czwarta próbka była próbką odniesienia w postaci wygrzanego czystego żelaza α o dużych krystalitach rzędu kilkuset mikrometrów.

Za metodę badań przyjęto dyfrakcję promieni Röntgena w geometrii Bragga-Brentano. Użyto aparatu X'Pert PRO Materials Research Diffractometers PANalytical's. Aparat posiadał anodę miedzianą o parametrach linii $K_{\alpha 1} = 1,540530 \text{ \AA}$ oraz linii $K_{\alpha 2} = 1,544310 \text{ \AA}$, a rejestracja widma rentgenowskiego odbywała się przy użyciu detektora paskowego. Zakres pomiaru obejmował kąt od 30° do 120° .

3. Wyniki badań

Na rys. 3 zaprezentowano dyfraktogram, który przedstawia widmo promieniowania X czystego żelaza α o dużych krystalitach (próbka referencyjna) oraz widma trzech stali poddanych walcowaniu. Pik o kącie 2θ 43° na widmie żelaza jest pikiem obcym i pochodzi najprawdopodobniej od domieszki zawartej w wygrzanym żelazie.

Analizując dyfraktogram przedstawiony na rys. 3, możemy stwierdzić, że w przypadku próbek odkształconych przez walcowanie wyraźnie widać, że mają one szersze piki w stosunku do żelaza o dużych krystalitach. Na tej podstawie możemy obliczyć dla kątów 44° , 64° oraz 82° szerokość pików w połowie ich wysokości, stosując aproksymację funkcji teoretycznej. Badane refleksy pochodzą od fazy α' ; ponieważ chcemy otrzymać jak najdokładniejszą wartość szerokości



Rys. 3. Zestawienie widm żelaza i walcowanej stali

Źródło: badania własne.

w połowie wysokości (FWHM), musimy pamiętać o obecnej w pikach i wpływającej na ich poszerzenie linii K_{α_2} , której źródłem jest również lampą rentgenowska. Dlatego do obliczenia wartości FWHM posłużono się funkcją pseudo-Voighta, która jest modyfikacją krzywej Gaussa i Lorentza. Uwzględniono również, że stosunek intensywności pochodzących od linii K_{α_2} do K_{α_1} wyniósł 0,5. W programie, który wykorzystano do obliczenia wartości szerokości pików, postać funkcyjna wyglądała następująco: $pV(x) = \eta L(x) + (1 - \eta) G(x)$, gdzie $L(x)$ ma postać funkcji dla krzywej Lorentza, $G(x)$ dotyczy krzywej Gaussa. Widzimy, że jeśli za η wstawimy zero, otrzymamy postać funkcyjną rozkładu Gaussa, natomiast gdy η będzie równa jeden, otrzymamy lorentzian. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1. W tabeli podano wartości kątów poddane pomiarom. Tylko dla trzech kątów walcowanej stali faza alfa pokrywała się z udziałem tej fazy dla żelaza. Wartość B_i jest wartością szerokości w połowie wysokości dla żelaza, natomiast B_0 jest wartością FWHM dla stali odkształconej odpowiednio 56%, 60% i 62%. Obliczona wartość B_i jest wartością poszerzenia aparaturowego. Szerokość refleksów dyfrakcyjnych zależy od czynników aparaturowych, takich jak szerokość i średnica szczeliny oraz kształt ogniska czy rozkład intensywności [Dul i Bażela 2010], dlatego też jako próbkę referencyjną wybrano czyste żelazo o dużych krystalitach.

Tabela 1. Wartości FWHM dla żelaza i walcowanej stali

2θ	Faza	hkl	B_i	B_{056}	B_{060}	B_{062}
44°	α'	110	0,086033	0,348431	0,270996	0,264885
64°	α'	200	0,100525	0,562599	0,580704	0,417709
82°	α'	211	0,090561	0,653732	0,427895	0,550148

Źródło: opracowanie własne.

Znając wartości FWHM podane w tabeli 1, jesteśmy w stanie określić wielkość krystalitów badanego materiału lub domenę koherentnego rozpraszania w kierunku prostopadłym do próbki. Możemy w tym celu skorzystać z równania Scherrera [Rechani i in. 2006], które wykorzystuje następującą zależność między wielkością ziaren a szerokością refleksu braggowskiego: im mniejsze rozmiary ziaren, tym większe poszerzenie refleksów:

$$B = \frac{K\lambda}{D \cos \theta}, \quad (1)$$

gdzie:

B – szerokość linii dyfrakcyjnej mierzona w połowie wysokości refleksu (w rad),

λ – długość fali promieniowania rentgenowskiego (w nm),

D – średnica krystalitu (w nm),

2θ – kąt ugięcia wiązki promieniowania odpowiadający położeniu maksimum braggowskiego,

K – współczynnik kształtu, zależny od symetrii (dla układu regularnego przyjmujemy $K = 1$).

Istotne jest prawidłowe obliczenie wartości B . W tym przypadku wartość tę obliczamy jako:

$$B = B_0 - B_i. \quad (2)$$

Po przekształceniu wzoru Scherrera i podstawieniu obliczonych wartości FWHM otrzymano wyniki podane w tabeli 2.

Tabela 2. Rozmiary krystalitów dla stali walcowanej obliczone za pomocą wzoru Scherrera (w nm)

2θ	D_{56}	D_{60}	D_{62}
44°	36,28	51,47	53,23
64°	22,52	21,68	32,81
82°	20,77	34,67	25,45

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki są rzędu kilkudziesięciu nanometrów. Wykonano też drugą próbę oszacowania wielkości krystalitów przy użyciu innej metody. Jest to metoda Halla-Williamsona, która wydaje się bardziej dokładna. Za pomocą tej metody w inny sposób obliczana jest wartość FWHM; uzyskaną tak wartość ponownie wstawiamy do wzoru Scherrera. Wykorzystując tę metodę, możemy nie tylko obliczyć wielkość krystalitów, ale także uzyskać informację, czy w wyniku odkształcenia plastycznego pojawiają się naprężenia wewnętrzne, ponieważ metoda Halla-Williamsona uwzględnia również poszerzenie wynikające z naprężenia sieci. Wartość B obliczono, korzystając z następującego wzoru:

$$B = \left((B_0 - B_i)(B_0^2 - B_i^2)^{1/2} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Obliczoną wartość poszerzenia linii widmowych uzyskanych za pomocą promieni X podstawiamy do wzoru (1) zastosowanego już przy wcześniejszym szacowaniu wielkości krystalitów. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Wielkości krystalitów dla stali walcowanej (w nm)

2θ	D_{56}	D_{60}	D_{62}
44°	31,98	43,67	44,97
64°	20,58	19,86	29,02
82°	19,37	31,14	23,42

Źródło: opracowanie własne.

Wartości obliczone metodą Halla-Williamsona w porównaniu z wartościami uzyskanymi z wykorzystaniem wzoru Scherrera różnią się od siebie, ale rząd wielkości jest zachowany. W obu przypadkach wartość ta wyniosła kilkadziesiąt nanometrów. Jak wspomniano, szacując wielkości krystalitów metodą Halla-Williamsona, jesteśmy w stanie określić występujące naprężenie wewnętrzne w odkształconych próbkach. Stosujemy następujący wzór:

$$B \cos \theta = \frac{K\lambda}{D} + \eta \sin \theta, \quad (4)$$

gdzie:

B – szerokość linii dyfrakcyjnej mierzona w połowie wysokości refleksu (w rad),

λ – długość fali promieniowania rentgenowskiego (w nm),

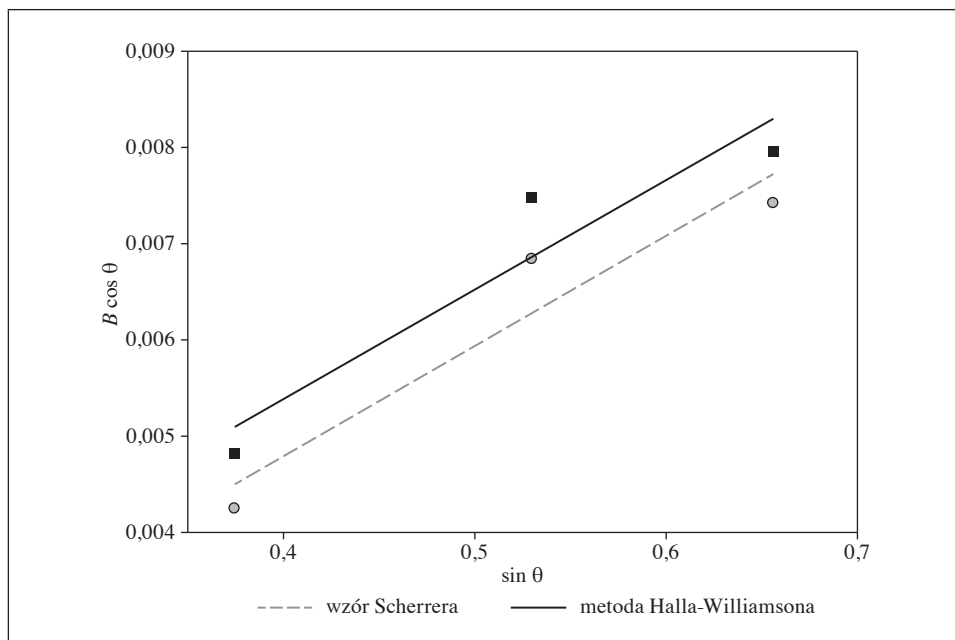
D – średnica krystalitu (w nm),

2θ – kąt ugięcia wiązki promieniowania odpowiadający położeniu maksimum braggowskiego,

K – współczynnik kształtu, zależny od symetrii (dla układu regularnego przyjmujemy $K = 1$),

η – współczynnik naprężenia sieci.

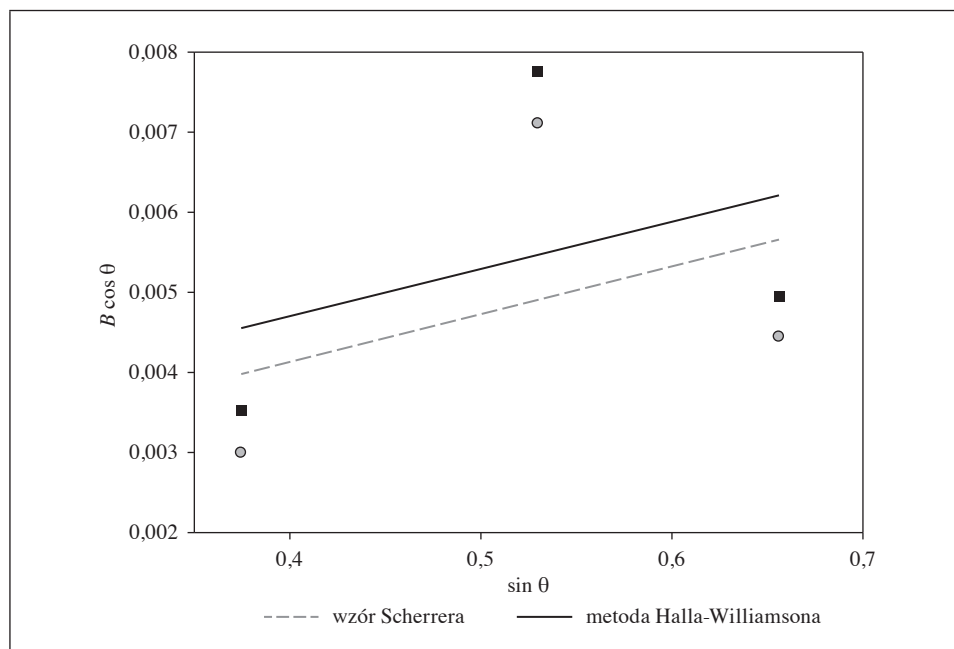
Zauważmy, że we wzorze tym występuje współczynnik η , który określa naprężenie sieci. Widać również, że wzór ten zapisany jest w postaci $y = b + ax$. A zatem współczynnikowi kierunkowemu odpowiada naprężenie sieci η [Rehani i in. 2006], a parametr b zawiera w sobie formułę $K\lambda/D$. Zmienne x i y w obu przypadkach są zależne od kątów padania wiązki θ . Jeśli wykreślimy wykres zależności i obliczymy wartość tego współczynnika, możemy określić wartość naprężenia wewnętrznego. W wypadku próbek nieznacznie odkształconych plastycznie wartość może wynieść zero; oznaczałoby to, że nie występują naprężenia wewnętrzne. Rysunki 4–6 przedstawiają wykresy zależności dla badanych trzech próbek stali. Do obliczenia wartości B zastosowano zarówno wzór (2), jak i (3). Przyjęto, że na rys. 4–6 „wzór Scherrera” oznacza, że za B podstawiono wartość otrzymaną z równania (2), a „metoda Halla-Williamsona” oznacza, że do wzoru Scherrera podstawiono wartość B otrzymaną z równania (3).



Rys. 4. Regresja liniowa dla stali o odkształceniu 56%

Źródło: opracowanie własne.

Dla stali o redukcji grubości 56%, stosując wzór Scherrera otrzymano wartość współczynnika kierunkowego $\eta = 0,0115 \pm 0,0034$, a stosując metodę Halla-Williamsona, $\eta = 0,0114 \pm 0,0038$. Dla stali o odkształceniu 62% otrzymano

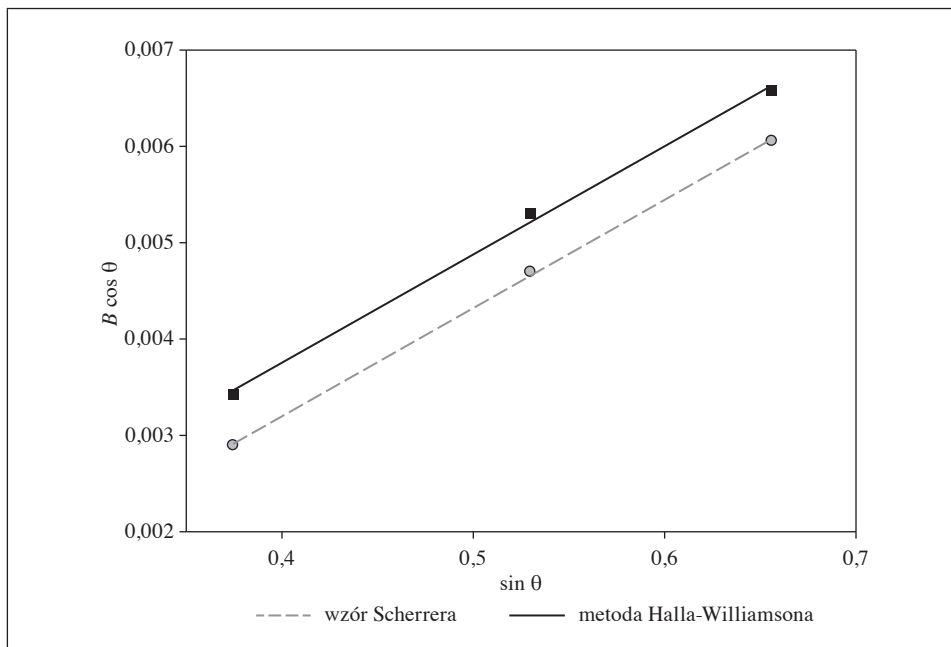


Rys. 5. Regresja liniowa dla stali o odkształceniu 60%

Źródło: opracowanie własne.

odpowiednio $\eta = 0,0112 \pm 0,0002$ oraz $\eta = 0,0112 \pm 0,0006$. Wartość współczynnika jest zbliżona, możemy zatem stwierdzić, że dla obu próbek istnieją wewnętrzne naprężenia i ich wartości są do siebie podobne. W przypadku stali o odkształceniu 60% nie udało się jednoznacznie określić, czy istnieje naprężenie wewnętrzne, ponieważ punkty pomiarowe są dość rozproszone, a co za tym idzie, otrzymujemy wysoki błąd względny przewyższający wartość współczynnika η . Posługując się obliczoną wartością współczynnika η , można obliczyć wartość procentową odkształcenia komórki elementarnej względem komórki wyjściowej, oszacowanie to wykracza jednak poza ramy niniejszego artykułu. Nie obliczono wyrazu wolnego b , ponieważ nie ma on wpływu na wartość naprężenia sieci.

Na podstawie uzyskanych widm badanych stali możemy oszacować udział fazy austenicznej w stosunku do fazy martenzytycznej. W tym celu musimy zebrać wszystkie widma pochodzące od badanych próbek na jednym rysunku. Widoczne są w ten sposób piki charakterystyczne pochodzące od obu faz [Baczmąński i in. 2008, Wang i in. 2005].



Rys. 6. Regresja liniowa dla stali o odkształceniu 62%

Źródło: opracowanie własne.

Analizując dyfraktogram przedstawiony na rys. 7, widzimy, że dla próbki o odkształceniu 56% walcowanej w niskiej temperaturze udział ferromagnetycznej fazy martenzytycznej α' jest największy dla wszystkich kątów. Im wyższa temperatura walcowania, tym udział fazy martenzytycznej jest mniejszy. W celu oszacowania udziału fazy austenitycznej γ w stosunku do fazy martenzytycznej α' bierzemy pod uwagę piki znajdujące się obok siebie, tj. pik pochodzący od fazy γ dla kąta 43° oraz pik pochodzący od fazy α' dla kąta 44° . Możemy obliczyć objętościowy udział fazy γ austenitu lub odwrotnie – wywnioskować objętościowy udział fazy α' , korzystając z następującego wzoru [Lee i in. 2003]:

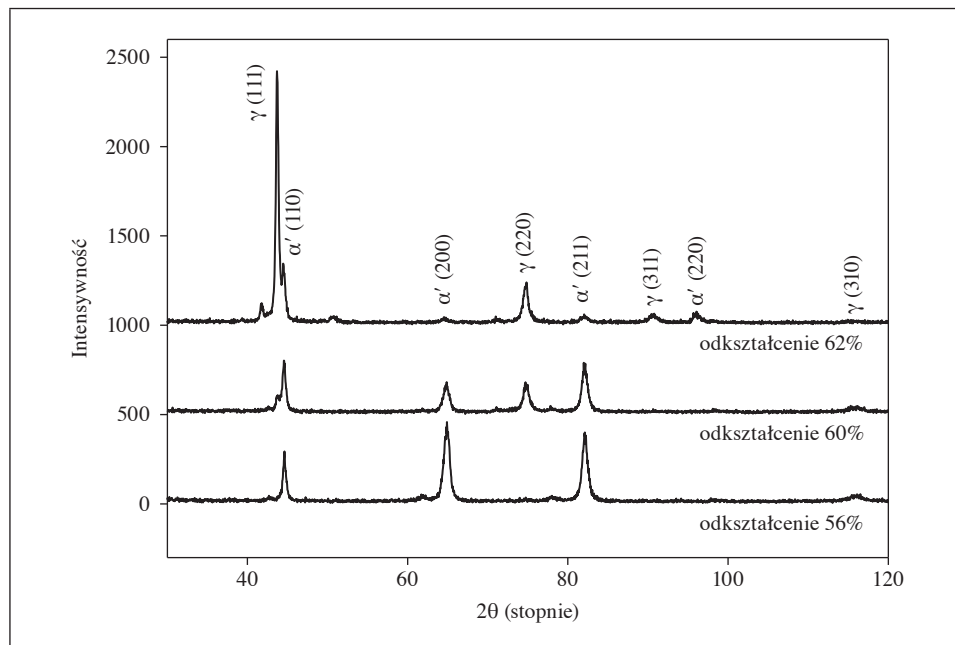
$$V_\gamma = \frac{1,4I_\gamma}{I_{\alpha'} + 1,4I_\gamma}, \quad (5)$$

gdzie:

V_γ – objętościowa część γ austenitu,

I_γ i $I_{\alpha'}$ – obliczone wartości pola powierzchni pod pikami $(111)_\gamma$ i $(110)_{\alpha'}$.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4.



Rys. 7. Dyfraktogram stali po walcowaniu

Źródło: badania własne.

Tabela 4. Oszacowanie zawartości fazy austenicznej dla stali 1.4307 po walcowaniu

Wskaźniki	Intensywność	Objętość fazy γ	Austenit szczątkowy
Wydłużenie 56% w niskiej temperaturze -10°C			
(111) γ	11,25	0,09	bardzo mały
(110) α'	166,11		
Wydłużenie 60% w temperaturze pokojowej 20°C			
(111) γ	48,51	0,25	mały
(110) α'	204,05		
Wydłużenie 62% w wysokiej temperaturze 200°C			
(111) γ	743,44	0,88	bardzo duży
(110) α'	137,81		

Źródło: opracowanie własne.

4. Wnioski

W zależności od temperatury, w której walcowana była stal, otrzymano inny udział martenzytu w stosunku do austenitu. Dla próbki odkształconej w wysokiej temperaturze uzyskano relatywnie mały udział fazy martenzytycznej, co potwierdziły zarówno obliczenia, jak i dyfraktogramy. Im niższa była temperatura, w której odkształcano materiał, tym udział martenzytu był wyższy, aż do zawartości niemal 90% objętości dla próbki walcowanej w temperaturze -10°C , co jest wartością zgodną z wynikami przedstawionymi w innych pracach [Surkialibed i in. 2013, Hedayati i in. 2010].

Obliczenia pokazały, że w wyniku odkształcenia pojawiają się niezerowe naprężenia wewnętrzne. Dla dwóch badanych próbek udało się oszacować wartość współczynnika kierunkowego. Dla trzeciej próbki nie oszacowano jego wartości, ponieważ niepewność uzyskanego wyniku nie pozwoliła na stwierdzenie, czy istnieją w niej naprężenia wewnętrzne.

Wielkości kryształitów dla walcowanej stali obliczono z zastosowaniem dwóch metod – wzoru Scherrera, który daje nam wartość ograniczoną z dołu, oraz metody Halla-Williamsona. W obu przypadkach otrzymano podobne wyniki rzędu kilkudziesięciu nanometrów. Przy pomiarach próbek proszkowych łatwiej jest określić wielkość kryształitów. Ponieważ badane próbki nie były w postaci proszków, otrzymane wyniki można interpretować nie tylko jako wielkość kryształitów, ale i wielkość domen rozpraszania koherentnego. Problem związany z oszacowaniem wielkości kryształitu może również wynikać z faktu, że badane próbki mogły mieć różną teksturę i nie były jednorodne chemicznie. Ponadto próbki były poddane dużemu odkształceniu plastycznemu, co mogło spowodować, że w obrębie ziarna lub kryształitu pojawiła się struktura dyslokacyjna, błędy ułożenia lub struktura granic ziaren.

Literatura

- Baczański A., Dakhlaoui R., Braham C., Wierzbowski K. [2008], *Examination of Mechanical Behavior of Aged Duplex Steel Using X-Ray and Neutron Diffraction Methods*, „Archives of Metallurgy and Materials”, vol. 53, iss. 1.
- Dul M., Bażela W. [2010], *Określenie struktury krystalicznej oraz wielkości ziaren nanokrystalicznych próbek związku $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{O}_3$* , Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, zeszyt 1, rok 107, Kraków.
- Faryna M. [2013], *Efekty strukturalne przemian fazowych*, wykład 5, http://www.imim.pl/files/Wykladyprof_MF/Efekty_strukturalne_Wyklad_5.pdf (dostęp: październik 2013).
- Hedayati A., Najafizadeh A., Kermanpur A., Forouzan F. [2010], *The Effect of Cold Rolling Regime on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 304L Stainless Steel*, „Journal of Materials Processing Technology”, vol. 210.

- Lee Y.K., Shin H.C., Leem D.S., Choi J.Y., Jin W., Choi C.S. [2003], *Reverse Transformation Mechanism of Martensite to Austenite and Amount of Retained Austenite after Reverse Transformation In Fe-3Si-13Cr-7Ni (wt-%) Martensitic Stainless Steel*, „Materials Science and Technology”, vol. 19, iss. 3.
- Metaloznawstwo – wybrane zagadnienia* [2005], red. J. Pacyna, Wydawnictwo AGH, Kraków.
- Ozgowicz W., Kurc A. [2009], *The Effect of the Cold Rolling on the Structure and Mechanical Properties in Austenitic Stainless Steels Type 18-8*, „Archives of Materials Science and Engineering”, vol. 38, nr 1.
- Pawłowski B. [2013], *Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna stali*, <http://www.kmimp.agh.edu.pl/pliki/oc.pdf> (dostęp: październik 2013).
- PN-EN 10020:2003. Definicje i klasyfikacja gatunków stali.
- Qayyum A., Naveed M.A., Zeb S., Murtaza G., Zakauallah M. [2007], *Glow Discharge Plasma Nitriding of AISI 304 Stainless Steel*, „Plasma Science and Technology”, vol. 9, nr 4.
- Rehani B.R., Joshi P.B., Lad K.N., Pratap A. [2006], *Crystallite Size Estimation of Elemental and Composite Silver Nano-powders Using XRD Principles*, „Indian Journal of Pure & Applied Physics”, vol. 44.
- Riviére J.P., Brin C., Villain J.P. [2003], *Structure and Topography Modifications of Austenitic Steel Surfaces after Friction in Sliding Contact*, „Applied Physics A Materials Science & Processing”, vol. 76.
- Surkialiabed R., Hedayati A., Saheb Alam A. [2013], *Monitoring of Martensitic Transformation in Cold-Rolled 304L Austenitic Stainless Steel by Eddy Current Method*, http://www.ndt.net/article/ndtnet/2013/58_Surkialiabad.pdf (dostęp: październik 2013).
- Tavares S.S.M., Lafuente A., Miraglia S., Fruchart S. [2002], *X-ray Diffraction and Magnetic Analysis of Deformation Induced Martensites in a Fe-17Mn-1.9Al-0.1C Steel*, „Journal of Materials Science”, vol. 37, iss. 8.
- Wang H.S., Yang J.R., Bhadeshia H.K.D.H. [2005], *Characterisation of Severely Deformed Austenitic Stainless Steel Wire*, „Materials Science and Technology”, vol. 21.

The Determination of Grain Size and Volume Fraction of Austenite in 1.4307 Stainless Steel after Cold Rolling

The material under investigation was a commercial austenitic stainless steel SS 1.4307 (EN) equivalent to AISI 304L. The samples of SS 1.4307 were rolled, achieving a 56, 60 and 62% reduction in thickness. The plastic deformation reduced austenite phase at the expense of the newly formed martensite phase. The volume fraction of austenite phase, crystallite size and lattice strain were calculated from X-ray line broadening. The X-ray diffraction measurements were carried out in a Philips X-Pert diffractometer using K_{α} Cu radiation.

Keywords: stainless steel, austenite, X-ray diffraction, crystallite size.

Maciej Sarnek

Katedra Metrologii i Analizy Instrumentalnej
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

Zmiany udziału defektów sieci krystalicznej dla austenitycznej stali nierdzewnej

Streszczenie

W artykule przedstawiono badanie obserwacji zmian udziału defektów sieci krystalicznej w austenitycznej stali nierdzewnej. Próbki zostały poddane naciskowi mechanicznemu o wartości od 12 MPa do 120 MPa, co dało odkształcenie w przedziale od 2% do 16% grubości. Badania były prowadzone procesem izochronicznym w zakresie temperatur od 25°C do 725°C. Pomiar wykonany został metodą anihilacji pozytonów uzyskanych w wyniku rozpadu izotopu germanu. Linia anihilacyjna od par $e^+ e^-$ została uzyskana za pomocą detektora germanowego o wysokiej czystości, w wyniku czego wyznaczono parametr S oraz parametr W_p , które odzwierciedlają w pewnym stopniu zmiany zachodzące w strukturze krystalograficznej. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono temperatury, w których następuje przebudowa struktury krystalicznej.

Słowa kluczowe: stal austenityczna, odkształcenie plastyczne, defekty struktury krystalicznej, anihilacja pozytonów.

1. Wprowadzenie

Austenityczna stal nierdzewna ze względu na swoje właściwości znalazła szerokie zastosowanie w licznych gałęziach inżynierii. Stosowana jest m.in. w elektrowniach jądrowych, podwodnych rurociągach, do wyrobu elementów turbin gazowych, w przemyśle chemicznym, papierniczym, przetwórstwie żywności, w aparaturze medycznej, wymiennikach ciepła. Jest wystarczająco

miękką, aby w łatwy sposób ją formować, ale może być również bardzo twarda dzięki obróbce plastycznej na zimno, do granicy plastyczności powyżej 2000 MPa. Austenityczna struktura tej grupy stali jest bardzo wytrzymała, ponadto stale te nie tracą tych właściwości w podwyższonych temperaturach tak szybko, jak ma to miejsce w przypadku ferrytycznych stopów żelaza [Sampark i Majhi 2013]. Kolejną zaletą omawianej stali są właściwości fizykochemiczne, które czynią ją odporną na korozję ze strony czynników atmosferycznych. Odporność tę uzyskuje się w wyniku dodatku chromu i niklu. Proces korozji jest dążeniem metali do przejścia w stan utleniony. Jednak już przy zawartości 12% chromu stal wykazuje zdolności pasywacyjne. Chrom zawarty w stali tworzy na powierzchni materiału cienką warstwę ochronną [Uhlig 1976]. Przez zastosowanie dodatków stopowych, takich jak nikiel, molibden, tytan czy niob, uzyskujemy zwiększoną odporność na korozję w środowiskach agresywnych. Molibden zabezpiecza stale austenityczne przed korozją wżerową, a zwiększenie zawartości niklu poprawia odporność na korozję naprężeniową. Przez dodatek tytanu lub niobu stabilizuje się węgiel, co wpływa na zwiększenie odporności na korozję międzykrystaliczną.

Według obecnie obowiązującej normy [PN-EN 10020:2003] stal definiuje się jako materiał zawierający masowo więcej żelaza niż jakiegokolwiek innego pierwiastka, o zawartości węgla mniejszej niż 2% i zawierający inne pierwiastki. Ograniczona liczba stali chromowych może zawierać więcej niż 2% C, jednak 2-procentowa zawartość tego pierwiastka jest ogólnie przyjętą wartością odróżniającą stal od żeliwa. Zatem stal to stop żelaza z węglem, plastycznie obrobiony i obrabialny cieplnie, o zawartości węgla nieprzekraczającej 2,11%, co odpowiada granicznej rozpuszczalności węgla w żelazie.

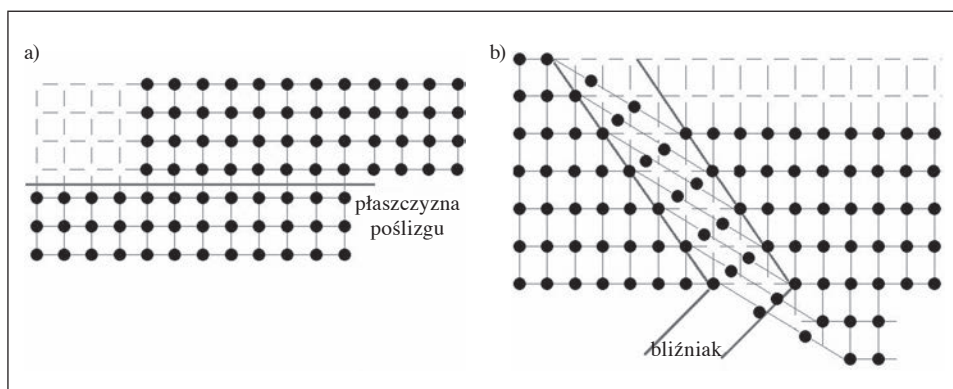
Celem przeprowadzonych badań była obserwacja zmian udziału defektów sieci krystalicznej dla austenitycznej stali nierdzewnej w funkcji temperatury po uprzednim odkształceniu plastycznym.

2. Odkształcenie plastyczne

Odkształceniem plastycznym nazywamy odkształcenie, które powstało w wyniku działania dostatecznie dużego naprężenia. Jeżeli na materiał działają naprężenia większe od granicy sprężystości, następuje odkształcenie plastyczne takiego materiału. Działaniu sił zewnętrznych powodujących zmiany objętości lub kształtu badanego ciała towarzyszy zakłócenie rozkładu sił międzycząsteczkowych, objawiające się pojawieniem się sił wewnętrznych, zwanych siłami sprężystości. W przypadku małych sił występuje równowaga sił zewnętrznych i wewnętrznych. Po usunięciu działania sił zewnętrznych ciało wraca do pierwotnego kształtu i objętości. W tym wypadku mówimy o odkształceniach spręży-

stych. Przy wzroście siły zewnętrznej aż do pewnej wartości granicznej rośnie też stopniowo odkształcenie badanego ciała, zachowuje ono jednak swój charakter sprężysty. Po przekroczeniu granicznej wartości siły zewnętrznej powstają odkształcenia niesprężyste. Po usunięciu sił zewnętrznych siły wewnętrzne nie sprowadzają ciała do pierwotnego kształtu i objętości. Pozostaje w ciele odkształcenie trwałe [Skorko 1976]. Te warunki ukazują już zakres plastyczności.

Zjawisko plastyczności polega na przemieszczaniu się części kryształu względem siebie za pośrednictwem poślizgu. Mogą również pojawić się płaszczyny bliźniacze. Przesunięcie części kryształu za pośrednictwem poślizgu oraz bliźniakowania przedstawiono na rys. 1. Odkształcenie to jest trwałe, co oznacza, że po usunięciu naprężeń kryształ nie wraca już do wyjściowego kształtu.



Rys. 1. Odkształcenie plastyczne za pośrednictwem: a) poślizgu, b) bliźniakowania

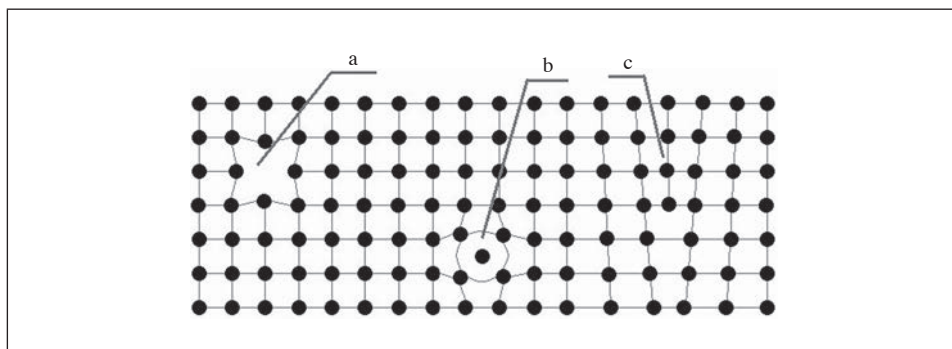
Źródło: opracowanie własne na podstawie: [Prowans 1977, s. 104].

Rozważając pod względem mikroskopowym takie odkształcenie, można stwierdzić, że poślizg nie zachodzi wskutek jednoczesnego przesuwania się atomów położonych po obu stronach płaszczyny poślizgu, a wskutek przesuwania się przez kryształ odkształceń ograniczonych do niewielkiego obszaru.

3. Defekty struktury krystalicznej

W wyniku zgniotu deformuje się struktura krystaliczna. Pojawiają się wówczas defekty sieci, takie jak luka, nazywana również wakancją, atom międzywęzłowy lub dyslokacja [Prowans 1977] – rys. 2. W kryształach rzeczywistych występują zawsze zakłócenia regularnej struktury sieci krystalicznej – defekty kryształów, związane z nieprawidłowym ułożeniem niektórych atomów ciała lub obecnością domieszek atomów innych substancji. Niektóre właściwości kryształów, takie jak

przewodnictwo elektryczne czy wytrzymałość mechaniczna, są w dominującym stopniu uwarunkowane defektami struktury krystalicznej.



Rys. 2. Defekty sieci krystalicznej: a) luka, b) atom międzywęzłowy, c) dyslokacja krawędziowa

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [Prowans 1977, s. 59].

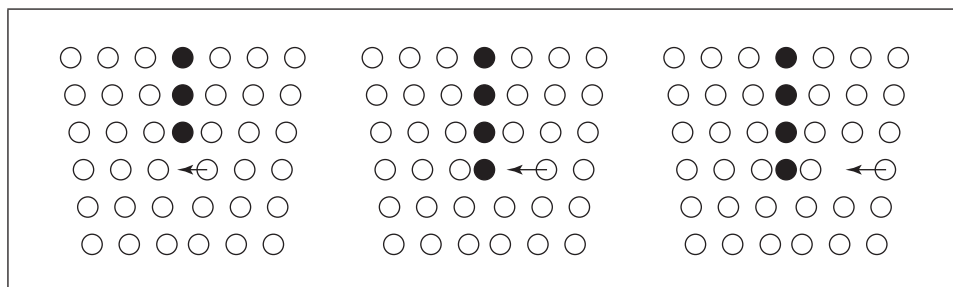
Defektami złożonymi są powierzchnie rozgraniczające poszczególne ziarna w obrębie metalu polikrystalicznego zwane granicami ziaren albo pewne obszary w obrębie pojedynczego kryształu lub ziarna zwane podgranicami. Granice ziarna oraz podgranicie stanowią obszary sieci o zaburzonym rozkładzie atomów, wynikającym z różnic orientacji krystalograficznej sąsiednich ziaren. W efekcie mamy do czynienia z wąską strefą materiału, w której atomy są ułożone w sposób chaotyczny. O charakterze tych zniekształceń decyduje wartość kąta dezorientacji między kierunkami głównych osi krystalograficznych. Przyjęło się, że o granicach wąskokątowych mówimy, gdy wartość kąta dezorientacji jest mniejsza niż 2–3 stopnie, natomiast o granicach szerokokątowych – dla kątów powyżej 15 stopni [Prowans 1977]. Przemieszczanie się granic szerokokątowych objawia się jako rozrost ziaren w podwyższonych temperaturach.

Na rys. 2 pokazano również liniową wadę polegającą na nierównomiernym rozmieszczeniu węzłów wzdłuż wybranej linii. Ten rodzaj defektu nazywamy dyslokacją. Pojawiające się dyslokacje krawędziowe polegają na zaniku jednej z płaszczyzn sieciowych, natomiast dyslokacje śrubowe – na przesunięciu jednej części kryształu względem drugiej o jedną odległość międzyatomową, ta krawędź przesunięcia nazywana jest linią dyslokacyjną. Mają one w dwóch prostopadłych kierunkach wymiar rzędu stałej sieciowej, a w trzecim – wymiar ziarna lub kryształu. Defekty złożone w jednym kierunku mają wymiar rzędu kilku odległości międzyatomowych, a w dwóch pozostałych kierunkach – wymiar ziarna lub kryształu. Podczas odkształcania, oprócz wzrostu gęstości dyslokacji, rozdrob-

nienia ziaren i powstania podziaren, dochodzi do powstania tekstury odkształcenia. Tekstura oznacza taką budowę materiału, dla której poszczególne ziarna mają zbliżoną orientację krystalograficzną. W miarę zwiększania się odkształcenia stopień stekstrowania staje się coraz większy (<http://www.metalplast.pwr.wroc.pl/pliki/lab1.pdf>).

4. Zdrowienie

Pierwszym zjawiskiem zachodzącym podczas wygrzewania odkształconego materiału jest zdrowienie statyczne. Powoduje ono zmianę jego właściwości mechanicznych wywołaną zmniejszeniem się gęstości dyslokacji oraz ich przegrupowaniem. Właściwości charakteryzujące opór plastyczny, takie jak granica plastyczności, wytrzymałość, twardość – maleją, natomiast właściwości charakteryzujące plastyczność materiału, czyli wydłużenie, przewężenie – wzrastają. Proces zdrowienia ulega bardzo szybkiej intensyfikacji wraz ze wzrostem temperatury i zachodzi w wyniku poślizgu poprzecznego, wspinania, kombinacji i anihilacji dyslokacji. Przykład wspinania się dyslokacji przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Graficzne przedstawienie zjawiska zdrowienia na przykładzie poślizgu poprzecznego

Źródło: <http://www.metalplast.pwr.wroc.pl/pliki/lab1.pdf>, dostęp: luty 2013.

Taki proces prowadzi do stopniowego zmniejszenia naprężenia uplastyczniającego. Charakteryzuje się on tym, że rozpoczyna się natychmiast i przebiega jednorodnie w całej masie materiału. Przekształcenie podstruktury zachodzi poprzez anihilację zbędnych dyslokacji w ścianach komórek i przegrupowanie dyslokacji w tych ścianach w bardziej uporządkowane układy.

5. Metoda badawcza

Przedmiotem badań była austenityczna stal nierdzewna o nieznanym składzie. Próbki stali otrzymano z materiału w kształcie walca poprzez cięcie na pile o tarczy diamentowej z niedużą prędkością cięcia. Uzyskano osiem próbek w formie pastylek o średnicy 1 cm i grubości 0,5 cm. Następnie pastylki te poddano działaniu prasy hydraulicznej w zakresie od 12 MPa do 120 MPa, co dało redukcję grubości od 2% do 16% względem wartości początkowej. Do badań wybrano dwie próbki o skrajnych wartościach odkształcenia, tj. 2% i 16%. Gotowe pastylki poddano jednostronnemu polerowaniu na specjalnym urządzeniu z tarczą obrotową w celu uzyskania gładkiej i równej powierzchni, a następnie trawiono w kwasie, by usunąć ewentualne zmiany powierzchniowe powstałe w wyniku procesu cięcia. Próbki polerowano przy użyciu papieru ściernego o odpowiedniej gradacji: 500, 1000, 1200 oraz tarczy płóciennej z dodatkiem pasty diamentowej. Następnie próbki zostały wygrzane w temperaturze 800°C. Jest to wystarczająca temperatura, dla której sygnał pozytonowy jest nasycony.

Badanie przeprowadzono procesem izochronicznym w zakresie temperatur od 25°C do 725°C. Materiał wygrzewano w różnych temperaturach, ale o stałym czasie wygrzewania, podnosząc po każdym pomiarze temperaturę o 25°C. Do tego celu wykorzystano piec sterowany mikrokomputerem FCD-13A wyprodukowany przez firmę ShinkoTechnos Co. Ltd. Overseasdivision z Japonii. Wygrzewanie było prowadzone w pięciostopniowym cyklu, a mianowicie: 34°C, 40°C, T_1 , T_2 , 40°C. Symbol T_2 w tej sekwencji znaków to konkretna temperatura z podanego wcześniej zakresu, o czasie wygrzewania wynoszącym 1 godzinę. W zakresie temperatur od 50°C do 150°C próbki były owijane w folię aluminiową, a w zakresie od 150°C do 350°C w folię tantalową, by uniknąć ich utleniania. W wyższych temperaturach do pieca wygrzewającego został podłączony ciekły azot, aby uniemożliwić utlenianie się próbek. Ponadto w celu uzyskania jak najlepszych rezultatów badań poprzez implantowanie do próbek pozytonów z rozpadu radioaktywnego badane próbki były trawione w kwasie po każdym wygrzewaniu.

Istotnym etapem badań było ustalenie składu stali. W celu uzyskania informacji o składzie chemicznym materiału wykonano trzy badania. Pierwsze z nich to atomowa spektrometria emisyjna (AES). Energia płomienia jednocześnie powoduje atomizację i wzbudzenie elektronów na wyższy poziom energetyczny. Podczas powrotu do stanu podstawowego emitowane jest promieniowanie charakterystyczne dla danego atomu lub jonu. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano następujący udział wagowy poszczególnych pierwiastków (podany w kolejności od największej zawartości do najmniejszej): Cr 18,00; Ni 8,10; Mn 1,46; Si 0,40; Cu 0,26; Mo 0,10; V 0,09; P 0,033; S 0,005. W przypadku stali nierdzewnej najważniejsza jest zawartość chromu i niklu. Należy zauważyć, że

metodą AES nie jesteśmy w stanie sprawdzić zawartości węgla. Ponieważ zawartość węgla jest bardzo istotna, wykonano również badanie pozwalające ustalić zawartość tego pierwiastka. Zastosowano metodę absorpcji w podczerwieni po spaleniu w piecu indukcyjnym. Uzyskany wynik to: C 0,023. Ponadto wykonano badanie na zawartość azotu. Zawartość tego pierwiastka w badanych próbkach jest istotna, ponieważ zwiększa on właściwości wytrzymałościowe stali. W tym celu zastosowano metodę przewodnictwa cieplnego. Otrzymano zawartość azotu na poziomie 0,05. Całkowity skład badanego materiału podano w tabeli 1. Analizując uzyskany skład chemiczny badanej stali, możemy stwierdzić, że poddany badaniom materiał odpowiada definicji stali nierdzewnej, możemy również wskazać, że według normy europejskiej jest to stal EN 1.4301, oznaczana także jako 304 według normy AISI.

Tabela 1. Udział wagowy poszczególnych pierwiastków w badanej stali

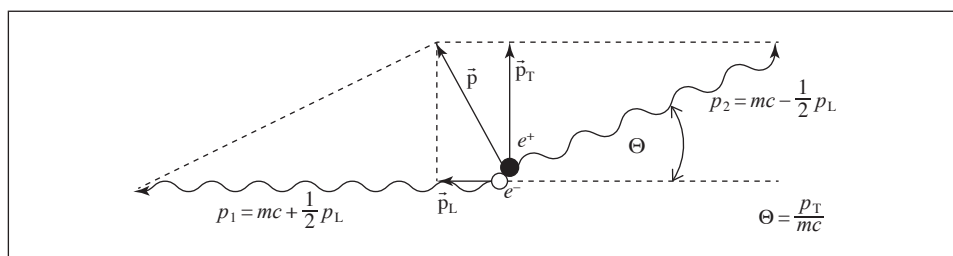
Cr	Ni	Mn	Si	Cu	Mo	V	N	P	C	S
18,00	8,10	1,46	0,40	0,26	0,10	0,09	0,05	0,033	0,023	0,005
±0,18	±0,20	±0,03	±0,02	±0,015	±0,01	±0,07	±0,002	±0,003	±0,007	±0,001

Źródło: badania własne.

Do badania struktury wewnętrznej pod względem ilości defektów użyto izotopu promieniotwórczego germanu o liczbie masowej 68 i aktywności 50 μCi ($^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$). Uzyskano w ten sposób emisję pozytonu w wyniku rozpadu radioaktywnego. Jest to proces beta plus i odgrywa on kluczową rolę, ponieważ za jego pośrednictwem zostały przeprowadzone badania na próbkach stali. Uzyskany pozyton zostaje implantowany do badanej próbki z dużą energią i oddziałując z elektronami, traci swoją energię, by po 10 ps uzyskać już tylko energię termiczną w granicach 40 meV. Proces błędzenia przypadkowego trwa około 100–500 ps. W tym czasie pozyton penetruje około 10^9 atomów zanim ulegnie anihilacji [Dryzek, Stegemann i Cleff 1996]. Anihilująca para e^+e^- jest ruchoma i prowadzi do zmiany energii kwantów gamma rejestrowanych w układzie laboratoryjnym (rys. 4).

Energję takiego kwantu wyrażamy w funkcji energii elektronu. Z prawdopodobieństwem wynoszącym niemal 100% możemy stwierdzić, że powstają dwa kwanty gamma o energii 511 keV każdy. Energia takiego kwantu jest równa $E = mc^2$, co jest zgodne z zasadą zachowania energii. W układzie środka masy anihilującej pary dwa kwanty gamma emitowane są dokładnie w przeciwnych kierunkach, a ponieważ para pozyton–elektron jest ruchoma, to w układzie laboratoryjnym mamy odchylenie od liniowości. Powoduje to, że mierzona energia ulega pewnej zmianie, co spowodowane jest efektem Dopplera. Uzyskuje się w ten sposób linię anihilacyjną; jej analiza sprowadza się do wyznaczenia parametrów

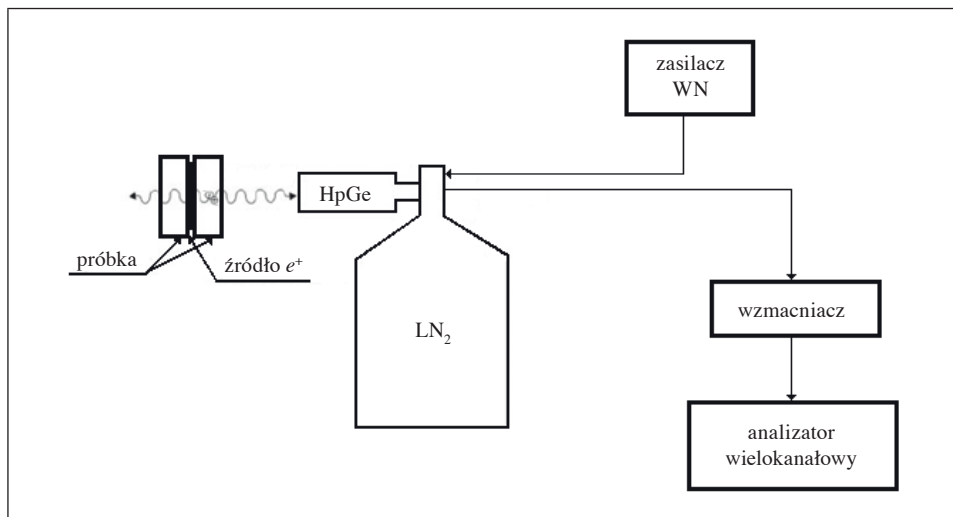
S i W oraz obserwacji zmian ich wartości. Precyzując, parametr S określa wkład w widmie powstałym w wyniku anihilacji elektronu o niskich pędach (elektrony na dalszych powłokach), a parametr W informuje nas o anihilacji elektronami o wysokich pędach oraz o chemicznym otoczeniu defektu. Parametr S obliczany jest jako stosunek centralnego pola powierzchni pod krzywą anihilacyjną do całkowitego pola powierzchni, parametr W zaś jako stosunek pola powierzchni pod bocznymi częściami linii i całkowitego pola powierzchni. Parametry te są czułe na obecność defektów w materiale, w szczególności parametr S jest czuły na obecność wakancji. Im więcej defektów w próbce, tym mniej poszerzona jest linia anihilacyjna. Śledząc wartość parametru W , bierzemy pod uwagę pole pod prawą częścią widma, co oznacza się jako W_r .



Rys. 4. Proces anihilacji pary pozyton–elektron, w wyniku którego powstają dwa kwanty gamma

Źródło: [Dryzek, Stegemann i Cleff 1996, s. 3].

Widmo anihilacyjne zostało uzyskane za pomocą detektora germanowego wysokiej czystości firmy Canberra. Detektor taki stanowi dioda półprzewodnikowa typu p-i-n, z regionem wewnętrznym, który jest obszarem zubożonym. Zatem detektor półprzewodnikowy to dioda półprzewodnikowa spolaryzowana przez zewnętrzne napięcie w taki sposób, by nośniki większościowe odciążane były od warstwy przejściowej. W konsekwencji, w normalnym stanie dioda jest zatkana. Przejście fotonu gamma powoduje powstanie ładunków elektrycznych, które są odciążane przez elektrody. Efektem mierzalnym jest pojawienie się impulsu elektrycznego, proporcjonalnego do liczby ładunków, które zostały wytworzone. German jest materiałem używanym głównie do budowy detektorów promieniowania gamma i z takim też promieniowaniem mamy do czynienia ze względu na jego dużą liczbę atomową. Przekrój czynny na efekt fotoelektryczny jest około 60 razy większy w przypadku germanu niż krzemu. Jednak ze względu na mniejszą przerwę energetyczną pomiędzy pasmami germanu detektory germanowe mogą pracować jedynie w niskich temperaturach około 77 K, co zapewnia podłączony do detektora ciekły azot. W przypadku pomiarów promieniowania



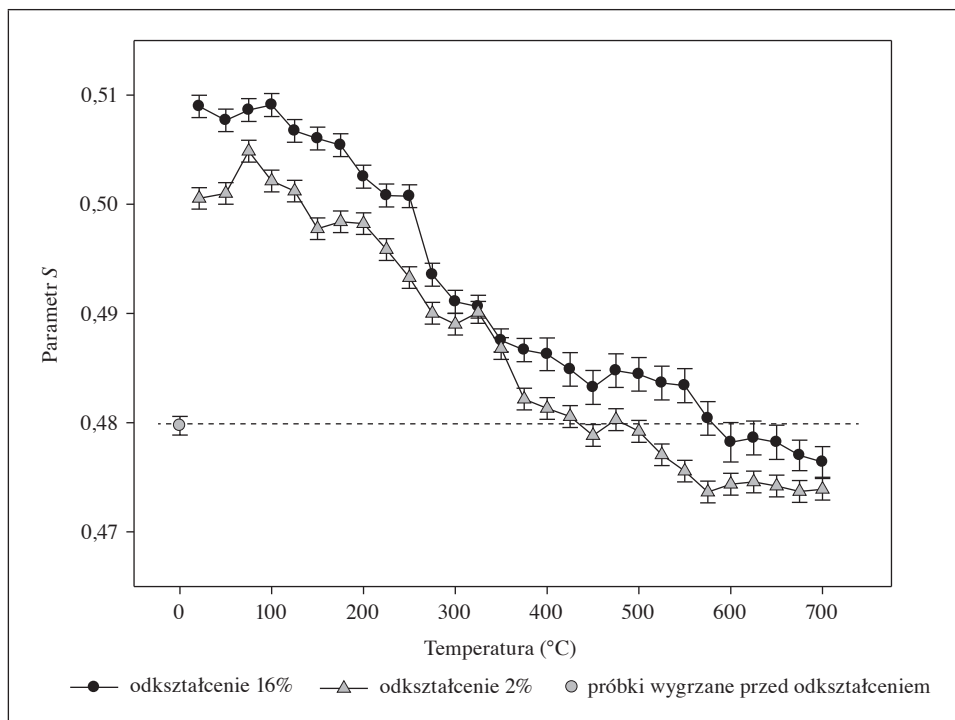
Rys. 5. Schemat aparatury do pomiaru poszerzenia dopplerowskiego linii anihilacyjnej
 Źródło: [Dryzek 1997, s. 36].

kwantów o wyższych energiach konieczne jest chłodzenie detektora, zwykle ciekłym azotem. Przykład opisanej aparatury wraz z urządzeniami przetwarzającymi przedstawia rys. 5.

6. Analiza wyników

Badania były prowadzone w celu wyznaczenia parametrów S i W_r . Zmiana ich wartości pozwala na odpowiedź, czy nastąpiła zmiana ilości defektów. Jeżeli parametry te zestawimy z wartościami temperatury, wówczas będziemy mogli odpowiedzieć na pytanie, jak zachowuje się materiał pod względem ilości defektów w poszczególnych wartościach temperatur. Zależność parametru S od temperatury przedstawia rys. 6. Analizując wykres przedstawiony na rysunku możemy zauważyć, że parametr S w całym zakresie temperatur zarówno dla próbki o odkształceniu 2%, jak i 16% powrócił do wartości zmierzonej dla próbek wygrzanych, oznaczonych na wykresie jako linia przerywana. Z całą pewnością ukazuje on, że w zakresie temperatur od $25^\circ C$ do $725^\circ C$ przebudowywała się struktura, co świadczy o zajściu procesu zdrowienia. Spadek wartości parametru S informuje nas o zmniejszonej liczbie wakancji w badanym materiale. Jednak zmiana tego parametru nie jest jednostajna i jesteśmy w stanie wyróżnić pewne etapy. Można zauważyć, że do temperatury $450^\circ C$ wartość parametru S ma

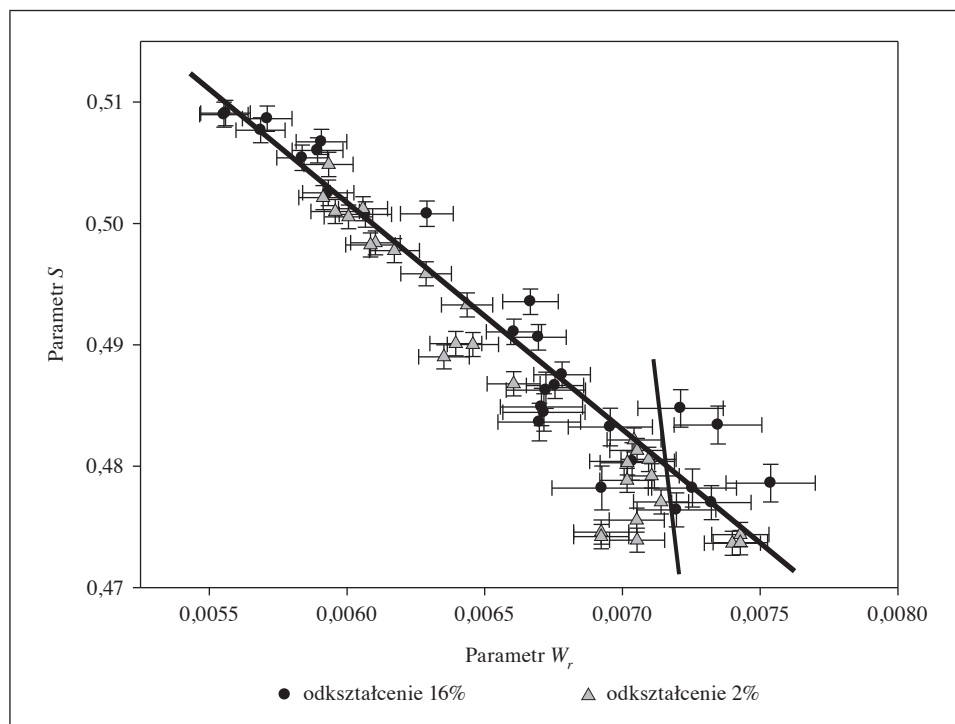
tendencję spadkową dla obydwu próbek. Dla próbki o odkształceniu 16% powyżej tej temperatury wzrasta wartość tego parametru, by powyżej 550°C powrócić do poprzedniej wartości, co nie jest tak wyraźnie widoczne w przypadku próbki o odkształceniu 2%. Na rys. 7 przedstawiono zależność parametru W_r od parametru S .



Rys. 6. Wykres zależności parametru S od temperatury

Źródło: badania własne.

Jeśli w materiale mamy do czynienia tylko z jednym rodzajem defektów, wówczas zależność parametru W_r od parametru S powinna się układać na jednej prostej. Jest to związane z tym, że parametr ten informuje nas o anihilacji z elektronami o wysokich pędach. Zauważamy, że w wyższych temperaturach występuje odchylenie od linearności i do powstających punktów można dopasować prostą, która biegnie pod innym kątem względem pierwotnej prostej. W takim przypadku wnioskujemy, że w wyższych temperaturach pojawiają się inne defekty struktury niż wakancje.

Rys. 7. Wykres zależności parametru W_r od parametru S

Źródło: badania własne.

7. Wnioski

Gdy austenityczną stal nierdzewną poddamy odkształceniu, wówczas wprowadzamy bardzo dużą ilość defektów. Gdy taką stal poddamy wygrzewaniu, wtedy zauważamy, że ilość defektów zaczyna maleć. Oznacza to, że materiał przejawia zjawisko zdrowienia. Można to tłumaczyć jako migrację wakancji do granic ziaren i tym samym ich zanik. Ponadto w wyniku odkształcenia plastycznego w stali austenitycznej pojawia się nowa faza [Santos i Andrade 2010]. Im większe odkształcenie, tym większy jest udział nowej fazy, tj. fazy martenzytycznej. W temperaturze powyżej 450°C następuje wzrost wartości parametru S . Związane jest to z cofaniem się fazy martenzytycznej i powrotem materiału do fazy austenitycznej. Zjawisko to nosi nazwę odwrotnej przemiany martenzytycznej [Tavares, Fruchart i Miraglia 2000; Di Schino, Barteri i Kenny 2002]. Odpuszczanie tej fazy może generować dodatkowe defekty, gdyż ruch dyslokacji jest inicjatorem nowych defektów punktowych [Suszyńska 1990]. Jeśli mamy do czynienia z przemieszcza-

niem się dwu dyslokacji krawędziowych wzajemnie prostopadłych, to w wyniku tego pojawiają się stopnie. Ruch takiej dyslokacji powoduje powstawanie rzędu defektów punktowych.

Literatura

- Di Schino A., Barteri M., Kenny J.M. [2002], *Development of Ultra Fine Grain Structure by Martensitic Reversion in Stainless Steel*, „Journal of Materials Science Letters”, vol. 21.
- Dryzek J. [1997], *Wstęp do spektroskopii anihilacji pozytonów w ciele stałym*, wyd. 1, Wydawnictwo UJ, Kraków.
- Dryzek J., Stegemann T., Cleff B. [1996], *Badania warstwy wierzchniej metodą anihilacji pozytonów*, Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego, Kraków.
- PN-EN 10020:2003. Definicje i klasyfikacja gatunków stali.
- Prowans S. [1977], *Materiałoznawstwo*, wyd. 1, PWN, Warszawa–Poznań.
- Sampark P., Majhi G.K. [2013], *Deformation Induced Phase Transformation of 304L Stainless Steel and its Structural Characterization*, under the guidance of dr. K Dutta, India.
- Santos T.F., Andrade M.S. [2010], *Internal Friction on AISI 304 Stainless Steels with Low Tensile Deformations at Temperatures between –50 and 20°C*, „Advances in Materials Science and Engineering”, vol. 2010.
- Skorko M. [1976], *Fizyka*, PWN, Warszawa.
- Suszyńska M. [1990], *Wybrane zagadnienia z fizyki defektów sieciowych*, PAN–Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław–Warszawa–Kraków.
- Tavares S.S.M., Fruchart D., Mirgalia S. [2000], *A Magnetic Study of the Reversion of Martensite α in a 304 Stainless Steel*, „Journal of Alloys and Compounds”, vol. 307.
- Uhlig H.H. [1976], *Korozja i jej zapobieganie*, WNT, Warszawa.

Changes Observed in the Amount of Defects for Austenitic Stainless Steel

Samples were plastically deformed using a hydraulic press, achieving a reduced thickness of from 2 to 16%. Isochronal cumulative annealing for 1 h at a temperature range from room temperature to 725°C was then performed. After each annealing, the positron measurement was performed using a Doppler broadening spectrometer with a coaxial high purity germanium detector. The $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ positron source was used for Doppler broadening measurements. The aim of the presented investigations is to study the annealing behaviour of deformed stainless steel 1.4301 (EN) in terms of defects detected by positron annihilation methods while closely observing the influence of the reverse transformation of deformation induced martensite on the obtained dependencies.

Keywords: stainless steel, plastic deformation, crystallographic defects, positron annihilation.

Przemysław Szopa

Jacek Czerniak

Anna Gacek

Katedra Metrologii i Analizy Instrumentalnej
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

Zastosowanie pomiarów dwuwidmowych barwy w towaroznawstwie

Streszczenie

Wraz z odkryciem zjawiska fluorescencji, a przede wszystkim obniżeniem kosztów produkcji farb fluorescencyjnych, powszechne stało się wytwarzanie oznaczeń fluorescencyjnych. Plakietki oraz znaki drogowe fluorescencyjne stosowane są w miejscach strategicznych, jeśli chodzi o bezpieczeństwo ludzi. Tego typu znaki stosuje się również do oznaczania dróg ewakuacyjnych. Bardzo ważne jest, aby produkty te cechowały się wysoką jakością ze względu na funkcję, jaką mają pełnić w sytuacjach zagrożenia życia. Aby móc ocenić w sposób rzetelny ich jakość, należy zastosować pomiary dwuwidmowe, ponieważ bezpośredni pomiar próbek fosforyzujących obarczony jest błędami wynikającymi z emisji promieni światła rozpraszanych przez próbkę. Niniejszy artykuł przedstawia przykłady badania jakości znaków ewakuacyjnych z wykorzystaniem pomiarów dwuwidmowych w geometrii $0-45^\circ$, pozwalających na znaczne ograniczenie błędów wynikających z klasycznych metod pomiarów barw.

Słowa kluczowe: fluorescencja, pomiary dwuwidmowe, znaki fluorescencyjne, rozproszenie światła.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach wzrosło znaczenie dokładnych pomiarów kolorymetrycznych w różnych gałęziach przemysłu. Jedną z szeroko stosowanych technik doboru, jak również pomiaru barwy jest technika oparta na pomiarach spektrofotometrycznych [Sato i Ikeuchi 1994, Kawski 1992]. Dotychczas opracowano wiele modeli kolorymetrycznych, które w swym założeniu miały interpretować jednoznacznie konkretną barwę, co umożliwiłoby powtarzalność i standaryzację otrzymywanych barwników. Kilkuletnie badania wykazały jednak, że wrażenia psychofizyczne człowieka związane z odbiorem barw nie są w pełni skorelowane z wartościami wyliczonymi w danym układzie kolorymetrycznym.

Wiele powierzchni barwnych stosowanych w przemyśle zawiera komponenty wykazujące zjawisko fluorescencji lub fosforescencji.

Fluorescencję wykazują jednoatomowe pary niektórych metali potasowców, gazy dwuatomowe i gazy wieloatomowe organiczne i nieorganiczne. Wiele związków organicznych fluoryzuje tylko w roztworach. Niektóre związki lumineszują w stanie krystalicznym. Przykładem tego typu związków są węglowodory aromatyczne.

Luminoforescencje fosforyzujące nazywane są fosforami. Fosforyzują wyłącznie roztwory stałe niektórych związków organicznych i nieorganicznych [*Encyklopedia fizyki* 1972, Kawski 1992].

Fotoluminescencja ciał stałych w istotny sposób zależy od ich budowy. Najczęściej wiąże się to z występowaniem domieszek (tzw. aktywatorów) lub defektów struktury. Nieorganiczne kryształy zdolne do luminescencji dzięki niewielkim domieszkom obcych jonów lub atomów, z których udziałem powstają w nich centra luminescencyjne, nazywane są fosforami krystalicznymi. Najbardziej typowym tego typu fotoluminoforem jest siarczek cynku aktywowany jonami miedzi. Dobrymi luminoforescencjami o dużej wydajności świecenia są kombinacje dwu lub więcej materiałów podstawowych odpowiednio aktywowanych. Do luminoforescencji krystalicznych należą minerały, które zawierają zanieczyszczenia spełniające funkcję aktywatorów.

Widmo emisji fotoluminoforu zależy do aktywatora. Przez dobór odpowiednich stosunków wagowych materiałów podstawowych oraz odpowiednich stężeń określonych aktywatorów można otrzymać luminoforescencje o różnej barwie świecenia.

W zależności od złożoności procesu emisji światła można wyróżnić dwa typy fotoluminescencji – fluorescencję i fosforescencję. Fosforescencja polega na emisji promieniowania w wyniku przejść elektronowych pomiędzy stanami o różnej krotkości i jest związana z istnieniem metastabilnych trypletowych stanów wzbudzonych, z których bezpośrednie przejście do stanu podstawowego jest utrudnione, gdyż emisja promieniowania występuje jeszcze przez pewien czas

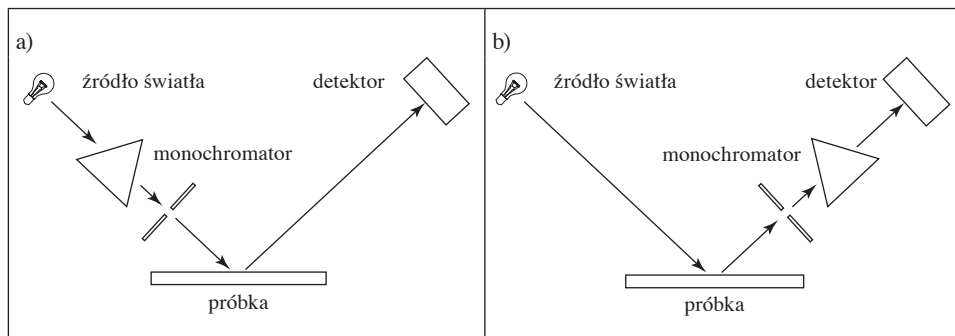
po zakończeniu wzbudzania. Fotoluminescencja natomiast jest ogólną właściwością atomów i cząstek stanów elektronowo wzbudzonych. Fotoluminescencja teoretycznie powinna występować we wszystkich substancjach, o ile ich układ nie ulega fotojonizacji.

Pigmenty fluorescencyjne dodawane do towarów przemysłowych użytku codziennego, pomimo swego niezaprzeczalnego znaczenia polegającego na wydobyciu głębi danej barwy oddziałującej na konsumenta, wprowadzają istotne zaburzenia w percepcji wzrokowej, co oznacza trudności w dopasowaniu konkretnych współrzędnych barwy towaru (farby, lakiery itd.) przez producentów, tak by była ona możliwie najlepiej opisana matematycznie.

Pomimo że pigmenty fluorescencyjne znane są od wielu lat, to właściwe odwzorowanie, formułowanie oraz kontrola jakości barwnych materiałów je zawierających są do dziś trudne i stanowią wyzwanie dla nowych przyrządów pomiarowych. Pomiar barwy materiałów niefluoryzujących obecnie nie stanowią problemu dla standardowych spektrokolorymetrów. Postrzegana barwa w tym przypadku jest złożeniem odbicia dyfuzyjnego światła odbitego od badanej powierzchni. Przyrządy tego typu nie sprawdzają się w kontroli jakości barwy materiałów wykazujących fluorescencję lub fosforescencję. Nierzadko problem ten obecny jest w przemyśle farbiarskim, papierniczym, tworzyw sztucznych oraz odzieżowym. Klienci często bowiem mają problem z oceną barwy produktu oglądanego w warunkach sztucznego oraz naturalnego oświetlenia.

Najczęściej w przemyśle wykorzystywane są pigmenty fluorescencyjne na bazie siarczku cynku lub kadmu. Większość z tych związków aktywuje fluorescencję bądź fosforescencję w wyniku absorpcji promieniowania w zakresie 300–420 nm.

Pomiary barwy zawierającej pigmenty fluorescencyjne obecnie wykonuje się z wykorzystaniem dwóch typów standardowych spektrokolorymetrów. Pierwszy typ spektrokolorymetru oparty jest na monochromatycznym oświetleniu badanej próbki (rys. 1a), fotodetektor natomiast rejestruje wszystkie długości fali odbite od powierzchni wraz z długościami fali widma fluorescencji, wprowadzając istotne różnice w ocenie konkretnej barwy. Drugi typ stosowanych kolorymetrów (rys. 1b) działa na odwrotnej zasadzie. Monochromator ustawiony jest przed detektorem, co pozwala na selektywny pomiar emitowanej długości fali świetlnej i znacznie zwiększa dokładność pomiaru światła odbitego od powierzchni zawierającej pigmenty fluoryzujące. Niemniej jednak brak monochromatyzacji światła padającego na próbkę prowadzi do otrzymania wyników pomiarów silnie uzależnionych od zmian oświetlenia źródłowego.



Rys. 1. Monochromatyczny (a) i polichromatyczny (b) pomiar barw

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [Gonzales 2000].

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie różnic w ocenie i pomiarze barwy powierzchni zawierających pigmenty fosforescencyjne. Przedstawione różnice barw obliczone zostały za pomocą standardowych metod pomiaru spektrokolorymetrem, co pokazuje jednoznacznie niedoskonałość obecnie stosowanych technik pomiarowych. Aby zwiększyć precyzję opisu barw powierzchni wykazujących własności fosforyzujące, autorzy przeprowadzili modernizację, której celem było wyposażenie spektrokolorymetru w dodatkowe monochromatory oraz odmienne geometrie pomiaru. Pozwoliło to na wykonanie przestrzennych matryc emisji fluorescencji oraz rozpraszania dyfuzyjnego badanych próbek fosforescencyjnych.

2. Aparatura i przedmiot badań

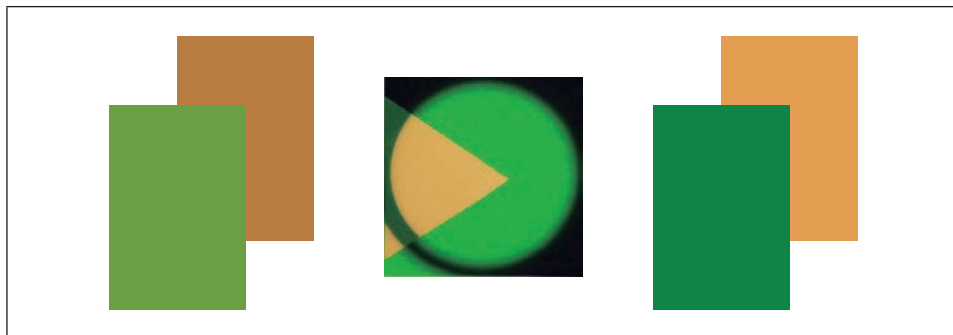
Przedmiotem badań opisanych w tym artykule były plakietki fluorescencyjne stosowane jako oznaczenia dróg ewakuacyjnych. Wybrano trzy rodzaje plakietek różnych producentów. W pierwszej kolejności wybrane próbki zostały przebadane za pomocą kuli Ulbrichta D°8. Mierzono całkowite promieniowanie odbite będące złożeniem promieniowania fluorescencyjnego i dyfuzyjnego. Podczas pomiarów zastosowano wzorzec bieli z siarczanu baru BaSO_4 o wysokim współczynniku odbicia dla całego widma światła. Próbki poddane badaniom przedstawione zostały na rys. 2.

Całkowite widmo promieniowania I_c dla powierzchni wykazującej własności fluorescencyjne składa się z dwóch składowych: dyfuzyjnej I_d i fluorescencyjnej I_f :

$$I_c = I_d + I_f. \quad (1)$$

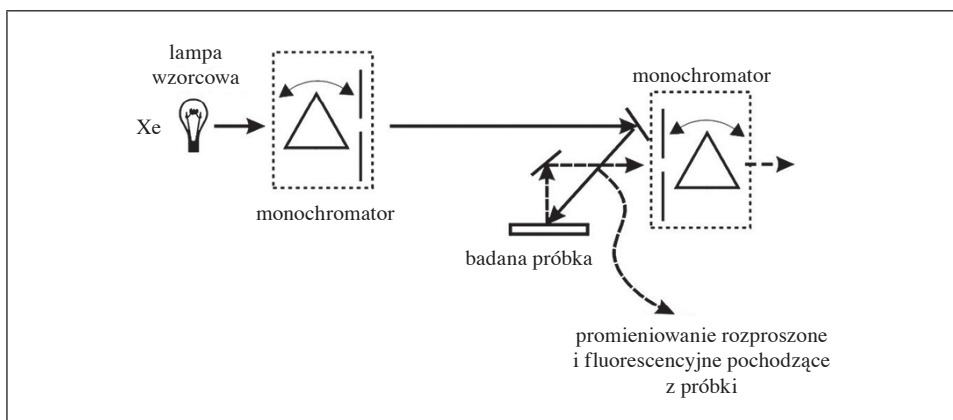
Pomiar składowej dyfuzyjnej i fluorescencyjnej możliwy jest jedynie dzięki zastosowaniu dwóch monochromatorów pryzmatycznych lub siatkowych, między

którymi znajduje się układ optyczny $45^{\circ}/0^{\circ}$. Schemat takiego zmodernizowanego toru optycznego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Zestawienie badanych powierzchni z wypukleniem różnic fluorescencji i odbicia dyfuzyjnego

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Schemat toru optycznego do badań dwuwidmowych

Źródło: opracowanie własne.

Funkcją pierwszego monochromatora jest rozdzielenie widma źródła światła, jakim jest lampa ksenonowa, na poszczególne długości fali, zanim konkretna długość fali zostanie zaabsorbowana przez mierzoną powierzchnię.

Drugi z monochromatorów jest umieszczony pomiędzy mierzoną próbką a detektorem (fotopowielaczem o dużej czułości). Jego zadaniem jest rozdzielenie promieniowania odbitego od powierzchni i promieniowania pochodzącego od fluorescencji. Dzięki zastosowaniu takiego układu pomiarowego możliwe jest

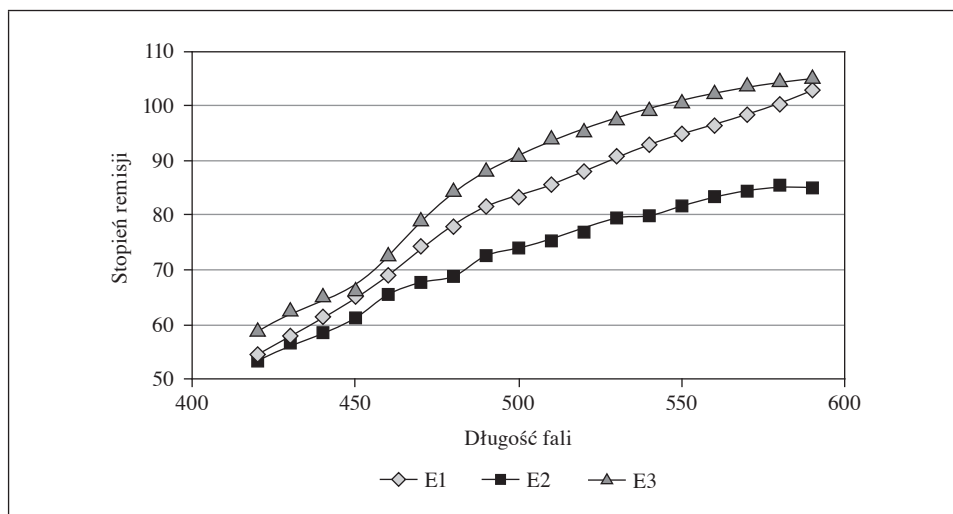
wygenerowanie matrycy obrazującej rozkład światła wzbudzenia i emisji dla mierzonej powierzchni.

3. Opis przeprowadzonych badań

Przeprowadzono pomiary za pomocą kuli Ulbrichta trzech próbek fosforyzujących, które pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk całkowitego odbicia z uwzględnieniem składowej rozproszonej oraz składowej fosforescencyjnej. Pomiary jednoznacznie wykazały istotny wpływ dodatków fosforescencyjnych na zarejestrowane widmo za pomocą fotopowielacza. Wszystkie trzy próbki silnie pochłaniały promieniowanie z zakresu długości fal 400–450 nm, odpowiadające widmu wzbudzenia komponentów fosforyzujących zawartych w badanych znakach ostrzegawczych. Znaczny współczynnik emisji dla próbek E1 i E3 wskazuje na silny wpływ składowej fosforescencyjnej w zakresie długości fal 560–590 nm. Składowa fosforescencyjna wpłynęła istotnie na widmo rozpraszania dyfuzyjnego, przewyższając natężenie promieniowania odbitego od wzorca dla tych samych długości fal świetlnych. Znacznie mniejszy wpływ na widmo światła odbitego od badanej powierzchni ma próbka nr E2. Wyraźnie widać znacznie mniejszy wpływ promieniowania fosforescencyjnego na sumaryczne widmo światła zarejestrowanego przez fotodetektor. Wyniki pomiaru stopnia emisji próbek w zakresie 400–600 nm wskazały istotny wpływ fosforescencji na pomiar emisji przez wprowadzenie dodatkowej składowej emitowanego promieniowania z próbki przez domieszki fosforyzujące, które istotnie wpływają na jednoznaczną ocenę barwy badanej fluoryzującej powierzchni. Widma emisji badanych próbek fosforescencyjnych E1–E3 przedstawione zostały na rys. 4.

Następnym etapem badań, mającym na celu uwypuklenie różnic w ocenie barwy, było przeprowadzenie pomiarów kolorymetrycznych za pomocą standardowego kolorimetru. W celu dokładniejszej weryfikacji błędów powodowanych promieniowaniem fosforescencyjnym w ocenie percepcji barwnej badanych próbek przeprowadzono pomiary współrzędnych kolorymetrycznych z wykorzystaniem systemu L^*a^*b (CIELAB-1976). Pomiary współrzędnych barwy przeprowadzone zostały za pomocą kolorimetru Pantone Color Cue dla powierzchni próbek oświetlonych światłem illuminantu D65 oraz dla światła emitowanego z powierzchni po odjęciu rozpraszania dyfuzyjnego. Wyniki przedstawione zostały w tabeli 1.

Otrzymane wyniki wskazały na różnice wartości wyznaczonych współrzędnych barwy powierzchni i barwy fosforescencji. Najsilniejsze zmiany współrzędnych barwy zaobserwowano dla próbek E1 i E2 w zakresie składowej a systemu CIELab, opisującej zmiany barwy w zakresie od zielonej do magenty (barwa



Rys. 4. Widma emisji dla badanych próbek E1–E3

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Współrzędne barw Lab dla badanych próbek

Wyszczególnienie	Współrzędne barwy próbek powierzchni fosforyzujących			Współrzędne barwy emisji fosforescencji			Różnica współrzędnych barwy		
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	ΔL	Δa	Δb
Próbka E2	88,70	-3,18	19,98	77,08	-6,21	19,30	11,62	3,03	0,68
Próbka E1	92,47	-1,02	18,50	79,98	-9,87	19,45	12,48	8,85	0,95
Próbka E3	91,23	-4,71	25,55	75,67	-0,05	21,05	15,56	4,66	4,50

Źródło: opracowanie własne.

purpurowa). Zmiana wartości współrzędnej *a* wskazuje na potrzebę zdefiniowania barwy (z wpływem fluorescencji lub bez) w procesie produkcji fosforescencyjnych znaków ostrzegawczych. Znacznie mniejsze zmiany barwy zaobserwowano w osi współrzędnej *b* systemu CIELab, opisującej przejście barwy od niebieskiej do żółtej dla próbek E1 oraz E2, co dowodzi braku składników fosforyzujących w przedziale długości fal powyżej 580 nm odpowiadającym wrażeniu barwy żółtej. Wyniki trzeciej przebadanej próbki powierzchni fosforyzującej wskazują na silniejsze różnice współrzędnych barw *a* oraz *b*, które istotnie uwypukliły różnicę barw powierzchni fosforyzującej. Wykorzystując wyznaczone wartości współrzędnych Lab, przeprowadzono obliczenia różnicy percepcyjnej barw ΔE (tabela 2) za pomocą równań zaproponowanych przez Międzynarodową Komisję

Oświetleniową w latach 1976–2000 oraz CMC zaproponowanych przez Colour Measuring Committee of the Society of Dyers and Colourists w Wielkiej Brytanii.

Tabela 2. Wartości różnicy percepcyjnej barw ΔE badanych próbek fosforyzujących

Wyszczególnienie	$\Delta E(76)$	$\Delta E(94)$	$\Delta E(2000)$	CMC	Percepcja barwy próbki (nm)	Percepcja barwy fluorescencji próbki (nm)
Próbka E2	12,02	11,86	8,40	8,70	574	570
Próbka E1	15,30	14,17	9,21	12,32	575	568
Próbka E3	16,80	16,19	11,41	11,70	573,5	576

Źródło: opracowanie własne.

Zależności matematyczne różnicy percepcyjnej barw ΔE zaproponowane w latach 1976–2000 przedstawione zostały w tabeli 3.

Tabela 3. Modele różnicy percepcyjnej ΔE

Model	Różnica percepcyjna barwy
$\Delta E 76$	$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$
$\Delta E 94$	$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)^2}$ $\Delta L = L_1 - L_2$ $\Delta C = C_1 - C_2$ $\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 - \Delta C^2}$ $C_1 = \sqrt{\Delta a_1^2 + \Delta b_1^2}$ $C_2 = \sqrt{\Delta a_2^2 + \Delta b_2^2}$
$\Delta E 2000$	$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2} + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)$ $\bar{L}' = \frac{(L_1 + L_2)}{2}$ $R_T = -R_C \sin(2\Delta\theta)$ $R_C = 2\sqrt{\frac{C^7}{C^7 + 25}}$ $\Delta\theta = 30e^{-\left[\left(\frac{H-27^\circ}{25}\right)^2\right]}$

cd. tabeli 3

Model	Różnica percepcyjna barwy
ΔE CMC	$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{1S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}$ $S_L = \begin{cases} 0,511 & L_1 < 16 \\ \frac{0,040975L_1}{1+0,01765L_1} & L_1 \geq 16 \end{cases}$ $S_C = \frac{0,0638C_1}{1+0,0131C_1} + 0,638$ $S_H = S_C(FT + 1 - F)$

Źródło: [Danger 1987, Sharma 2003, Sharma, Wu i Dalal 2005].

Najprostszy model różnicy percepcyjnej $\Delta E(76)$ liczony jest bezpośrednio z wyznaczonych współrzędnych Lab i jest obarczony największym błędem oceny różnicy barw wynikającej z nierównomierności percepcyjnej przestrzeni kolorymetrycznej Lab. Uzupełnione równanie $\Delta E(76)$ przedstawione zostało w 1994 r. $\Delta E(94)$, do obliczeń wprowadzono poprawkę na jaskrawość wynikającą z zastosowania systemu kolorymetrycznego LCH, który jest znacznie bardziej równomierny jako przestrzeń kolorymetryczna niż przestrzeń Lab. Modele różnicy percepcyjnej barwy opracowane w następnych latach skupiały się na udoskonalaniu modelu równomierności przestrzeni barw, dodając współczynniki kompensujące i parametryczne wielkości LCH (jasności, nasycenia i odcienia) zmniejszające błędy oceny subiektywnej barwy przez obserwatora. Wyznaczenie różnicy percepcyjnej barw nie jest jednoznaczne ze względu na różny odbiór barwy przez każdego obserwatora. Można przyjąć, że typowy obserwator odbiera różnicę barw następująco:

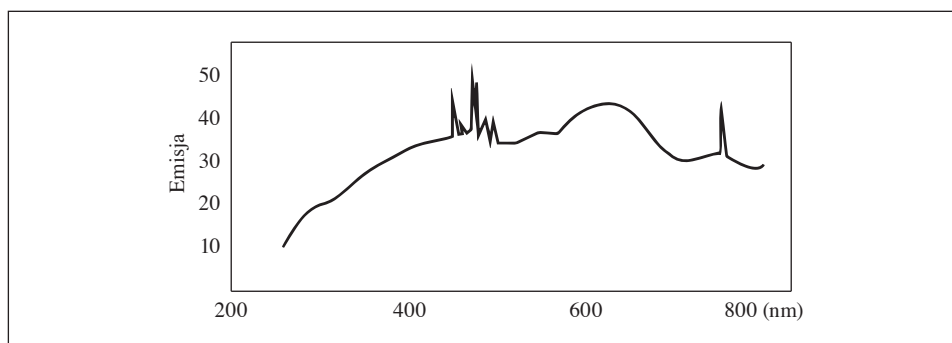
- $0 < \Delta E < 1$ – obserwator nie zauważa różnicy,
- $1 < \Delta E < 2$ – różnicę zauważa jedynie doświadczony obserwator,
- $2 < \Delta E < 3,5$ – różnicę zauważa również niedoświadczony obserwator,
- $3,5 < \Delta E < 5$ – obserwator zauważa wyraźną różnicę barw,
- $5 < \Delta E$ – obserwator odnosi wrażenie, że są dwie różne barwy.

Powyższe przedziały są umowne i zostały wyznaczone doświadczalnie przez Międzynarodową Organizację Standaryzacyjną. Przeprowadzone przez autorów pomiary wykazały jednoznacznie, że różnica percepcji barwy ΔE jest większa niż 5 dla wszystkich rodzajów próbek, przy porównywalnej luminancji fosforescencji próbek, opisaną przez składową „L” systemu CIELab. Wysoka wartość współczynnika percepcji barwy obliczonego za pomocą równań standardów $\Delta E(76)$, $\Delta E(94)$, $\Delta E(2000)$ oraz CMC dowodzą braku możliwości opisu barwy powierzchni fluoryzującej z wykorzystaniem standardowych metod pomiaru.

4. Badania dwuwidmowe próbek fluoryzujących

W celu przeprowadzenia dokładnych badań kolorymetrycznych próbek luminescencyjnych wykonano specjalny adapter do fluorymetru, który pozwolił na dołączenie dodatkowych przystawek firmy Carl Zeiss i stworzenie swoistego spektrokolorymetru. Dzięki temu w istotny sposób zwiększono jego możliwości pomiarowe. Przykładowe badania dwuwidmowe pokazujące możliwości spektrofluorymetru wyposażonego w nową przystawkę przeprowadzono na znakach fluorescencyjnych, które mają oznaczać drogi ewakuacyjne lub miejsca składowania np. gaśnic. Do wykonania przykładowych matryc dwuwidmowych wybrano trzy etykiety fosforescencyjne do oznaczania dróg ewakuacyjnych wyprodukowane przez dwóch różnych producentów. Etykiety zakodowano symbolami E1, E2 i E3. Wybrano również farbę fluorescencyjną niskiej jakości, aby sprawdzić czułość urządzenia i kalibrację. Po przeprowadzeniu pomiarów wykonano trójwymiarowe charakterystyki, na podstawie których możliwe jest określenie jakości badanych produktów.

Spektrokolorymetr dwuwidmowy pozwala na bardzo dokładne pomiary barwy, która powstaje addytywnie (ze złożenia promieniowania rozproszonego i fluorescencyjnego). Pomiary dwuwidmowe silnie zależą od źródła użytego światła, dlatego podając konkretne wartości, należy zamieścić informację o typie illuminantu. Autorzy przedstawiają badania dwuwidmowe próbek luminescencyjnych przeprowadzonych przy oświetleniu ich światłem lampy ksenonowej Xe o mocy 150 W. Widmo przykładowej lampy ksenonowej przedstawia rys. 5.

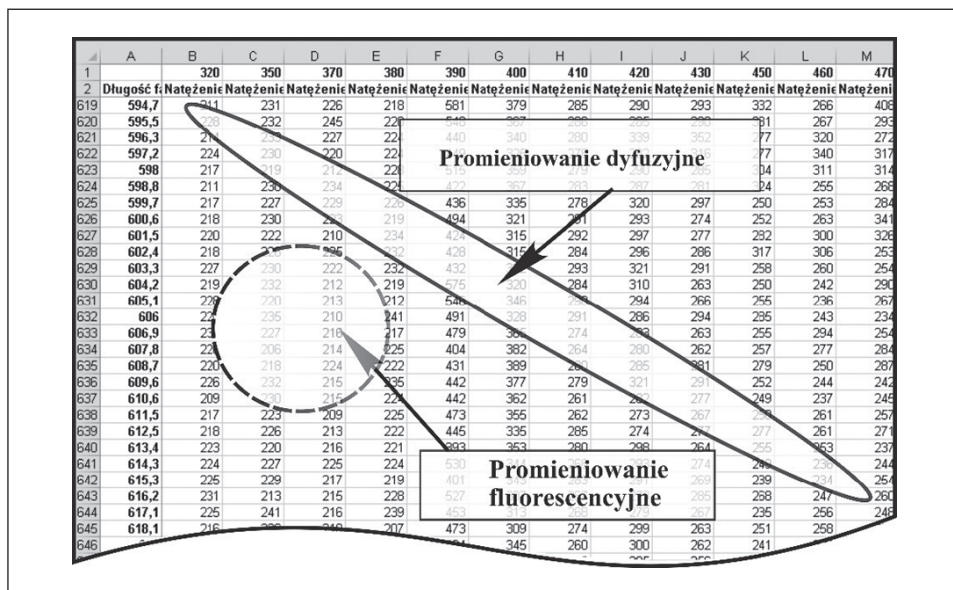


Rys. 5. Widmo lampy ksenonowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie: http://www.optel.opole.pl/lampy_lukowe.php.

Na rys. 6 przedstawiono przykładową matrycę dwuwidmową otrzymaną dla badanej powierzchni luminescencyjnej; pierwszy wiersz przedstawia oś długości fali wzbudzenia próbki, natomiast pierwsza kolumna przedstawia oś długości fali

emisji próbki. Wartości odczytane po przekątnej macierzy opisują rozproszenie dyfuzyjne pochodzące od powierzchni, natomiast wszystkie wartości poza przekątnymi odpowiadają rozkładowi emisji fluorescencji.



Rys. 6. Fragment macierzy wyników pomiarów dwuwidmowych

Źródło: opracowanie własne.

Po wygenerowaniu tego typu macierzy widać, że całkowite promieniowanie pochodzące od powierzchni wykazującej własności luminescencyjne jest funkcją zarówno długości fali wzbudzenia, jak i długości fali emisji. Wobec tego można zapisać równanie (1) w postaci:

$$I_c(w, e) = I_d(w, e) + I_f(w, e), \quad (2)$$

gdzie:

w – długości fali odpowiadające za wzbudzenie próbki,

e – długości fali emisji próbki.

W celu jednoznacznego wyznaczenia konkretnych parametrów kolorymetrycznych za pomocą spektrofluorymetru dwuwidmowego należy określić trójchromatyczne wartości δ_c , δ_d i δ_f , zależne od konkretnego źródła promieniowania $\theta_\lambda(w)$, które określone są zależnościami [Moćko i Żagań 2006]:

$$\delta_c(e) = \sum_w \theta_\lambda(w) I_c(w, e), \quad (3)$$

$$\delta_d(e) = \sum_w \theta_\lambda(w) I_d(w, e), \quad (4)$$

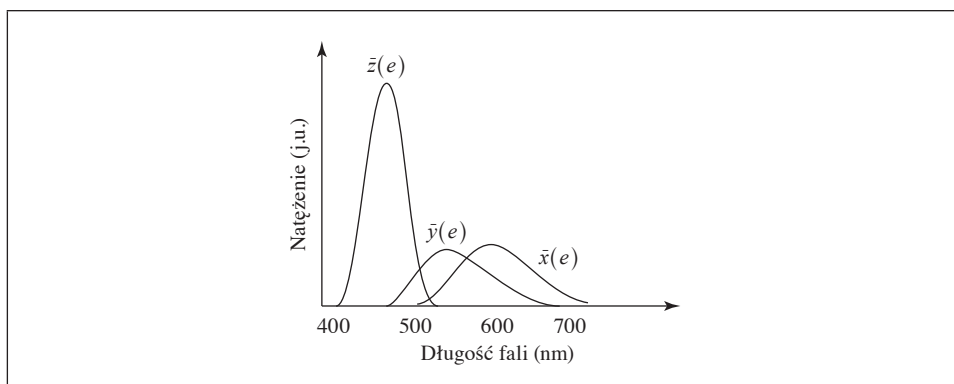
$$\delta_f(e) = \sum_w \theta_\lambda(w) I_f(w, e). \quad (5)$$

Funkcja $\delta_c(e)$ wykorzystywana jest do otrzymania wartości XYZ (układ kolorymetryczny XYZ) w tradycyjnym układzie kolorymetrycznym, który stanowi podstawę do otrzymania przestrzeni barw LAB zgodnie z następującymi formułami:

$$\begin{aligned} X &= k \sum_e \delta_c(e) \bar{x}(e) \\ Y &= k \sum_e \delta_c(e) \bar{y}(e), \\ Z &= k \sum_e \delta_c(e) \bar{z}(e) \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie: $k = \frac{100}{\sum_e \theta_\lambda(e) \bar{y}(e)}$.

Funkcje $\bar{x}(e)$, $\bar{y}(e)$ i $\bar{z}(e)$ przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Trójchromatyczne funkcje $\bar{x}(e)$, $\bar{y}(e)$ i $\bar{z}(e)$ widma równoenergetycznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [„Insight on Color” 2000].

Wartości XYZ mogą być bezpośrednio przeliczone na wartości systemu CIELAB, który jest coraz częściej wykorzystywany w ocenie jakości np. produktów spożywczych (barwa skórki jabłek). Przeliczenie na system barw CIELAB następuje zgodnie z równaniami:

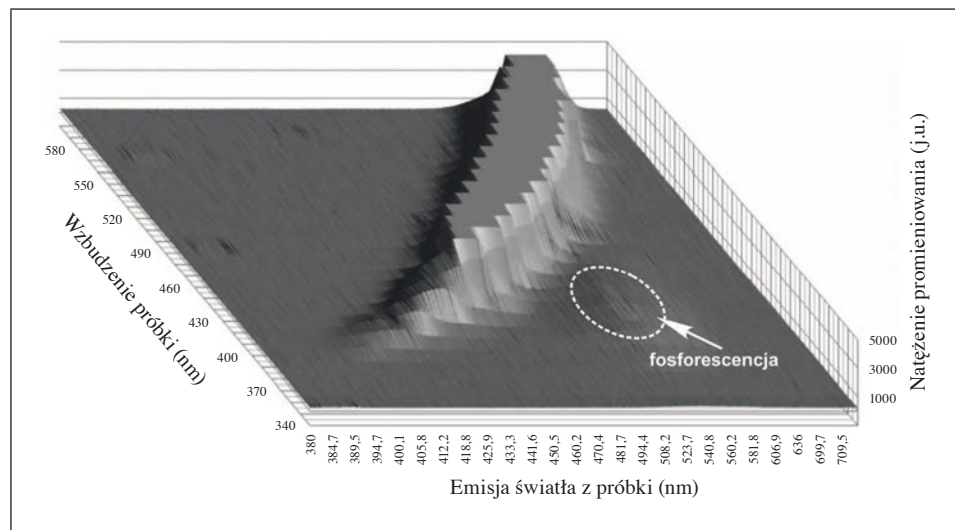
$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, \quad (7)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (8)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (9)$$

gdzie: $X_n = 94,81$, $Y_n = 100,0$ i $Z_n = 107,3$ są współrzędnymi barwy ciała nominalnie białego [Hemka i Rafałowski 2012].

Przeprowadzone pomiary dwuwidmowe dla próbki E3 wykazały dominujący udział światła rozproszonego w porównaniu z fosforescencją. Wykres trójwymiarowy z odseparowaną częścią widma fosforescencji przedstawiony został na rys. 8.



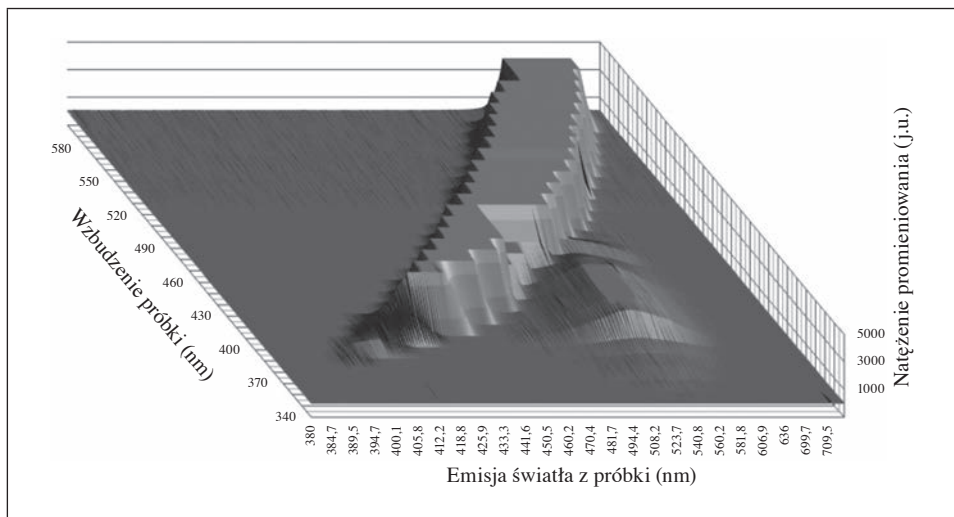
Rys. 8. Wykres trójwymiarowy emisji i promieniowania fluorescencyjnego próbki E3

Źródło: opracowanie własne.

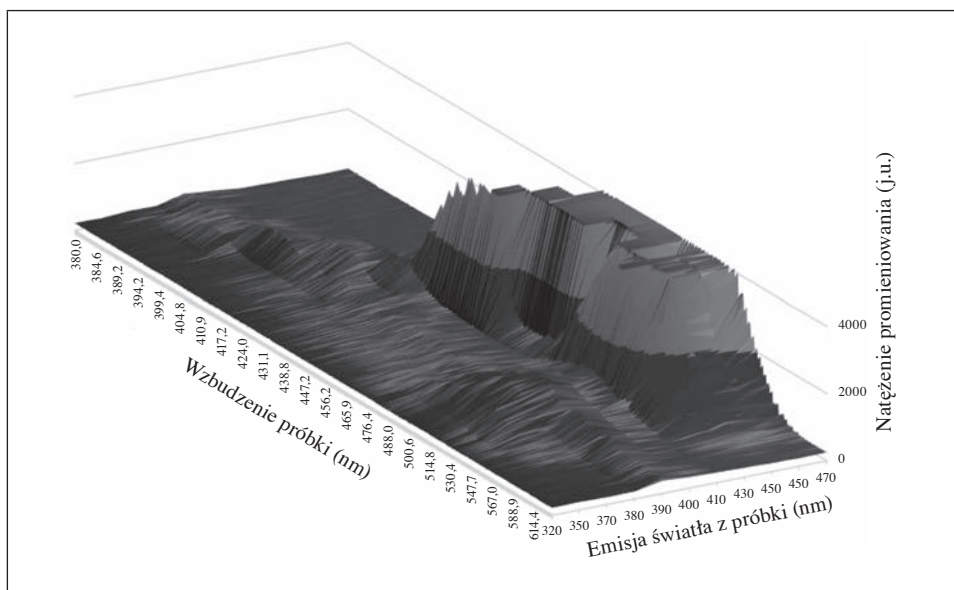
Większy wpływ promieniowania fosforescencji wykazywała próbka E1. Zmierzone bispektralnie natężenie fosforescencji próbki E1 było większe niż dla pozostałych próbek, co podkreśla, jak istotny wpływ na ocenę barwy w tym przypadku ma czynnik promieniowania fosforescencyjnego. Wykres trójwymiarowy dla próbki E1 przedstawiony został na rys. 9.

Zmierzone widmo bispektralne trzeciej próbki E2 wykazało mniejszą zawartość pigmentów fosforescencyjnych niż w pozostałych próbkach, co zostało uwidocznione na wykresie trójwymiarowym (rys. 10). Dominujący udział promieniowania rozproszonego będzie miał decydujący wpływ na wrażenie wzrokowe w obecności światła dziennego.

Trójwymiarowe wykresy bispektralne uwidocznily etykiety o gorszych (rys. 8 i 10) i lepszych (rys. 9) parametrach fosforescencji. Zestawienie wyników pomiarów za pomocą zmodernizowanego spektrokolorymetru dla trzech wybranych próbek zaprezentowano w tabeli 4.



Rys. 9. Wykres trójwymiarowy emisji i promieniowania fluorescencyjnego próbki E1
 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Wykres trójwymiarowy emisji i promieniowania fluorescencyjnego próbki E2
 Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Zestawienie stopnia remisji i fluorescencji próbek

Nr próbki	Maksymalny stopień remisji (j.u.)	Maksymalny stopień fluorescencji (j.u.)
E1	3935	1821
E2	4095	1071
E3	4090	1103

Źródło: opracowanie własne.

Jak pokazały przeprowadzone pomiary, próbka E1 charakteryzuje się wyraźnie lepszymi parametrami fosforescencji w stosunku do całkowitego światła rozproszonego w porównaniu z próbkami E2 i E3.

5. Wnioski

Otrzymane wyniki wskazują jednoznacznie, że pomiar barwy fluoryzujących powierzchni nastręcza problemów dotyczących natury odbioru psychofizycznego obserwatora. Niezbędne jest więc wykorzystanie przedstawionej metody bispektralnej w ocenie jakości barwy powierzchni fluoryzujących w zakresie długości fal światła widzialnego.

Autorzy zaprezentowali w artykule sposób wykorzystania spektrokolorymetru do pomiarów dwuwidmowych w ocenie jakości produktów barwnych, jakim są etykiety oraz farby fluorescencyjne do zastosowań przemysłowych. Uwidoczniono również niedokładność standardowych pomiarów barwy powierzchni fosforyzującej za pomocą konwencjonalnych przyrządów pomiarowych. Pomiar bispektralny fluoryzującej lub fosforyzującej powierzchni jest procesem żmudnym, wymaga znacznych nakładów czasowych ze względu na metodykę pomiarową. Wykonanie pojedynczego wykresu trójwymiarowego dla badanej próbki zajmuje w zależności od założonej dokładności od dwóch do trzech godzin. Pomiar bispektralny są jednak dzięki temu bardzo dokładne.

Przedstawione przykładowe wyniki badań etykiet wyjść ewakuacyjnych zostały wybrane ze zbioru wielu wyników, które pozyskano podczas przeprowadzonej modernizacji i kalibracji spektrokolorymetru. Modernizacja podjęta przez autorów przyniosła zadowalający efekt w postaci zwiększenia możliwości pomiarowych urządzenia.

Ustalenie charakterystyki promieniowania fosforescencyjnego i remisji próbki za pomocą pomiarów bispektralnych pozwala na precyzyjne dobranie natężenia fosforescencji w procesie produkcji znaków ostrzegawczych oraz farb fosforescencyjnych.

Przedstawione przykłady zastosowań nie wyczerpują możliwości tego uniwersalnego przyrządu. Jego uniwersalność bierze się z blokowej budowy, która umożliwia dostosowanie go do indywidualnych konkretnych potrzeb. Właśnie ta blokowa budowa prezentowanej aparatury daje mu przewagę nad wieloma nowoczesnymi urządzeniami dostępnymi na rynku.

Literatura

- Danger E.P. [1987], *The Color Handbook: How to Use Color in Commerce and Industry*, Gower, Hampshire.
- Encyklopedia fizyki* [1972], red. B. Pierzchalska, PWN, Warszawa.
- Gonzalez S. [2003], *Evaluation of Bispectral Spectrophotometry for Accurate Colorimetry of Printing Materials*, USA.
- Hemka L., Rafałowski M. [2012], *Wpływ polaryzacji światła na sposób i jakość pomiaru jego parametrów spektrometrycznych*, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 256, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- „Insight on Color” [2000], vol. 12, nr 5, HunterLab, Reston.
- Kawski A. [1992], *Fotoluminescencja roztworów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Moćko W., Żagań W. [2006], *Analiza możliwości normalizacji wartości składowych trójchromatycznych z wykorzystaniem przekształcenia nieliniowego*, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 228, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Sato Y., Ikeuchi K. [1994], *Temporal-Color Space Analysis of Reflection*, „Journal of the Optical Society of America A”, vol. 11, nr 11, November.
- Sharma G. [2003], *Digital Color Imaging Handbook*, CRC Press, USA.
- Sharma G., Wu W., Dalal E.N. [2005], *The CIEDE2000 Color-difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations*, „Color Research and Application”, vol. 30, nr 1.

The Use of Colour Bispectral Measurement in Commodity Science

Since fluorescence was discovered it has been more commonly used than other forms of marking, especially as production prices of such products have fallen. Fluorescence plaques are used in areas of utmost importance for public safety. These are most often road signs, car and evacuation route markers. The quality of such signs is crucial, since they are used in life-threatening situations. Reliably testing the quality of such products requires the use of bispectral measurements. Direct measurement of phosphorescing samples is burdened with errors resulting from the emission of light rays scattered by the sample. This article presents examples of quality tests for evacuation sign fluorescence, using bispectral measurements in 0–45° geometry. These measurements significantly reduce errors in comparison to classic methods for measuring colour.

Keywords: fluorescence, bispectral, fluorescence plate, scatter light.

**Lista recenzentów Zeszytów Naukowych
Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie
opublikowanych w 2013 roku**

Jacek Batóg
Jan L. Bednarczyk
Henryk Bieniok
Andrzej Buszko
Bożena Borycka
Szymon Cyfert
Janina Czapska
Bolesław Domański
Ewa Drabik
Marek Drwięga
Dorota Dąbek
Joanna Ejdys
Teresa Famulska
Beata Zofia Filipiak
Piotr Fiszeder
Stanisław Flejterski
Eugeniusz Gatnar
Józef Garczarczyk
Krzysztof Gawroński
Robert Geisler
Zygmunt Górka
Wacław Jarmołowicz
Teresa Kamińska
Jacek Klich
Danuta Kołożyn-Krajewska
Witold Kazimierz Krajewski
Anna Kostur
Marianna Księżyk
Miroslaw Krzyśko

Hieronim Kubera
Elżbieta Kucka
Joanna Lach
Ján Lisý
Elżbieta Lorek
Grzegorz Maciejewski
Alicja Maleszka
Małgorzata Markowska
Teresa Mróz
Wiesław Musiał
Joanicjusz Nazarko
Janina Pach
Krystyna Rajzer
Wojciech Rybicki
Małgorzata Rószkiewicz
Grażyna Skąpska
Elżbieta Sobczak
Łukasz Tomasz Sroka
Danuta Stawasz
Janusz Sztumski
Ryszard Szewczyk
Maria Śmiechowska
Andrzej Świątkowski
Anna Walaszek-Pyziół
Tadeusz Wawak
Dorota Witkowska
Tadeusz Włudyka
Michał Woźniak
Feliks Wysocki
Urszula Zagóra-Jonszta
Jan Zawadzki
Zofia Żakowska
Janusz Żmija
Jerzy Żuchowski