

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, Poland.

www.ifj.edu.pl/reports/2000.html
Kraków, grudzień 2000

Raport Nr 1846/AP

**Korekcja efektu matrycy w badaniach cienkich warstw
powierzchniowych wiązką naładowanych cząstek**

B. Rajchel i B. Porankiewicz¹

¹*Akademia Rolnicza, Katedra Obrabiarek i Podstaw Konstrukcji Maszyn,
60 – 627 Poznań, ul. Wojska Polskiego 38/42*

Abstrakt

Zastosowanie czułych i praktycznie nieniszczących technik jądrowych takich jak RBS, PIXE czy też NRA do określenia koncentracji pierwiastków w warstwach wierzchnich, lub w powłokach ciał stałych, może umożliwić badanie procesów prowadzących do zmiany własności fizycznych, chemicznych oraz mechanicznych warstwy w trakcie jej obróbki mechanicznej. Spośród wymienionych technik, metoda RBS stosowana do badania substancji zbudowanych zarówno z lekkich jak i ciężkich pierwiastków (np. C i W) niestety zawodzi w przypadku lekkich pierwiastków. Również wyniki uzyskiwane metodą PIXE mogą być obarczone dużym błędem, spowodowanym tzw. „efektem matrycy”, polegającym na absorpcji promieniowania charakterystycznego wewnątrz badanej substancji. Opracowanie więc metody analizy widm energetycznych promieniowania charakterystycznego, wzbudzonego wiązką naładowanych wysokoenergetycznych cząstek z uwzględnieniem „efektu matrycy” może np. pozwolić na badanie między innymi dyfuzji pierwiastków w warstwach wierzchnich przedmiotu obrabianego i obrabiającego narzędzia

Treścią prezentowanej pracy jest opis metody jednoczesnej analizy widm energetycznych promieniowania charakterystycznego oraz widm energetycznych wstecznie rozproszonych naładowanych cząstek. Metoda ta umożliwia częściowe uwzględnienie „efektu matrycy” i została sprawdzona dla stopu STELLIT o składzie 54%Co-30%Cr-16%W.

The set of nuclear techniques (RBS, PIXE, NRA, etc.) can be used for determination of the elemental composition of solid materials. Unfortunately, the “matrix effect” can modify experimental data obtained by the PIXE method (very sensitive for detection of elements with $Z > 14$). The “matrix effect” can cause big mistakes in determination of concentrations. In this paper, a simple technique (based on the RBS and PIXE) of elimination of the “matrix effect” is described. This technique was checked for the STELLIT alloy.

1. Wstęp

Obróbka mechaniczna warstwy wierzchniej ciał stałych wywołuje zmiany jej składu pierwiastkowego i struktury wewnętrznej. Zmiana składu pierwiastkowego może być spowodowana, między innymi, dyfuzją pierwiastków z warstw wierzchnich zarówno obrabianego przedmiotu jak i obrabiającego narzędzia. Zmiana ta może być szczególnie istotna podczas obróbki powierzchni drewna, laminatów lub elementów ceramicznych będących złymi przewodnikami ciepła. Również w trakcie obróbki mechanicznej tychże materiałów mogą zachodzić zmiany zarówno składu pierwiastkowego jak i struktury warstwy wierzchniej narzędzia. Konsekwencją zmiany składu pierwiastkowego warstwy wierzchniej może być modyfikacja jej własności fizycznych, chemicznych oraz mechanicznych. Określenie zmian koncentracji zarówno podstawowych pierwiastków, z których jest zbudowana warstwa wierzchnia, jak i pierwiastków śladowych, może wskazywać na procesy prowadzące do modyfikacji warstwy.

Do określenia zmiany składu i struktury warstwy wierzchniej nie mogą być stosowane metody chemiczne, gdyż niszczą bezpowrotnie analizowaną warstwę wierzchnią.

Do wyznaczenia koncentracji pierwiastków w warstwie wierzchniej natomiast mogą być stosowane czułe, praktycznie nieniszczące metody jądrowe takie jak RBS (Rutherford BackScattering Spectroscopy), PIXE (Particle Induced X-ray Emission), NRA (Nuclear Reaction Analysis) czy też ERDA (Elastic Reaction Detection Analysis). Metody RBS, NRA, ERDA zapewniają głębokościową zdolność rozdzielczą rzędu kilku nanometrów, z

możliwością detekcji pierwiastków o minimalnych koncentracjach od ułamka procenta do kilku procent. Najpopularniejsza z nich, metoda RBS, jednak zawodzi w pomiarach określających koncentracje lekkich pierwiastków, występujących w obecności ciężkich, np. w substancjach zbudowanych z C i W. Metoda PIXE umożliwiając detekcję pierwiastków o koncentracjach rzędu 1 ppm (10^{-6}) nie daje informacji o głębokościowych rozkładach poszczególnych pierwiastków. Metoda PIXE, może być stosowana do określania koncentracji pierwiastków cięższych na ogół od krzemu. Ograniczenie to jest spowodowane stosowaniem w pomiarach PIXE detektorów krzemowych. Dokładność metody PIXE jest także ograniczona „efektem matrycy”, polegającym na absorpcji promieniowania charakterystycznego wyemitowanego z wzbudzonych atomów pierwiastków śladowych przez atomy podstawowych pierwiastków tworzących tzw. „matrycę”. Jedynie połączenie obu metod: RBS i PIXE (lub też NRA oraz PIXE) umożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników pod warunkiem uwzględnienia „efektu matrycy”.

Do tej pory opisano w literaturze kilka metod analizy danych doświadczalnych, uzyskanych w eksperymentach PIXE, umożliwiających uwzględnienie (przynajmniej częściowe) efektu matrycy [1, 2, 3, 4]

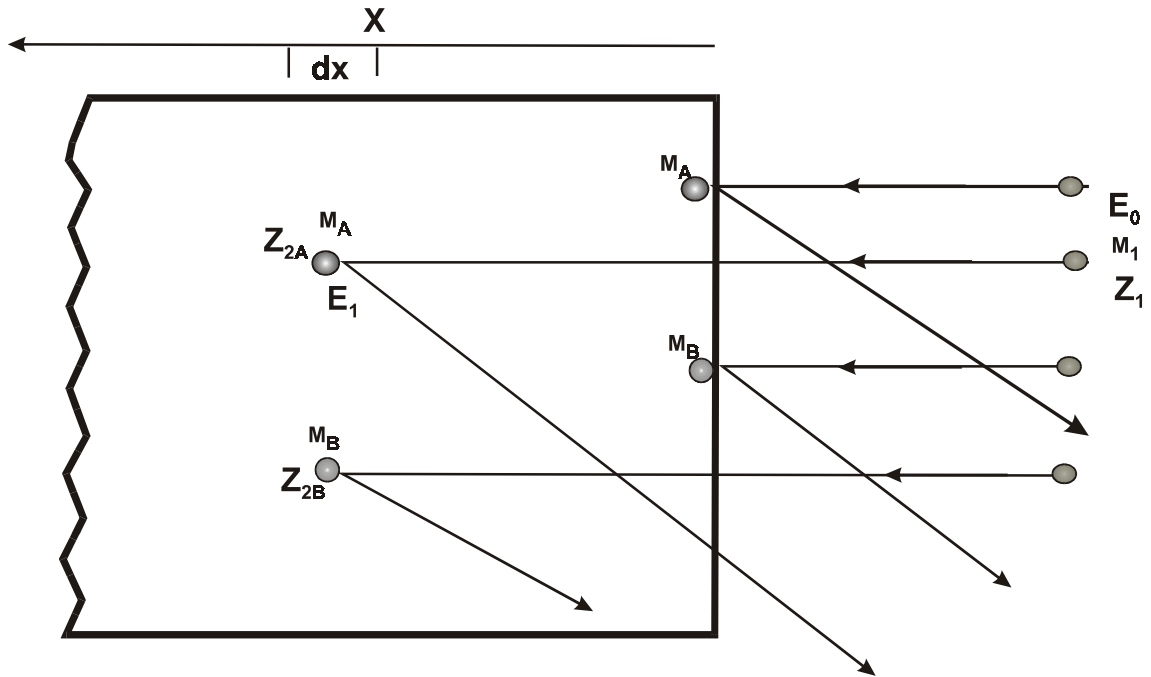
W prezentowanej pracy omówiona została próba uwzględnienia „efektu matrycy” poprzez jednoczesną analizę widm PIXE i RBS. Proponowaną metodę sprawdzono dla stopu STELLIT (54%Co-30%Cr-16%W). Stop ten jest zbudowany z pierwiastków będących (podobnie jak Ni oraz Fe) głównymi składnikami warstwy wierzchniej narzędzi.

Podstawowym celem prezentowanej pracy jest przedstawienie próby uwzględnienia „efektu matrycy” poprzez wzajemnie uzgadnianą analizę widm PIXE i RBS. Wyznaczone metodą RBS koncentracje głównych składników badanej substancji są następnie uwzględniane podczas wyznaczania współczynników absorpcji promieniowania charakterystycznego. Nie mniej ważnym celem pracy jest też zapoznanie środowiska technicznego zajmującego się badaniem warstwy wierzchniej z analitycznymi metodami jądrowymi.

2. Opis wybranych metod jądrowych stosowanych w badaniach materiałowych

Spośród wymienionych poprzednio technik jądrowych do badania składu pierwiastkowego oraz struktury warstwy wierzchniej ciał stałych najczęściej stosowane są dwie metody: metoda RBS oraz metoda PIXE. Ponieważ zarówno metody te jak i przykłady możliwego ich zastosowania były wielokrotnie opisywane [5, 6, 7] to w niniejszej pracy omówiono jedynie podstawy fizyczne obu wymienionych metod. Ponieważ jednak wyniki uzyskane metodą detekcji wstecznie rozproszonych naładowanych cząstek (RBS) umożliwiają określenie składu pierwiastkowego matrycy, to metoda RBS zostanie dokładniej omówiona.

Do pełnego zobrazowania zalet i ograniczeń metod RBS oraz PIXE koniecznym jest prześledzenie ruchu naładowanej wysokoenergetycznej cząstki (protonu, cząstki α czy też ciężkiego jonu) poruszającej się wewnątrz amorficznej próbki ciała stałego. Naładowana cząstka o ładunku Z_1e i energii E_0 , bombardująca pod kątem ϕ płaską próbkę amorficznej substancji, może rozproszyć się wstecznie pod kątem θ lub może kontynuować swój ruch wewnątrz bombardowanej substancji. Ruch naładowanej wysokoenergetycznej cząstki w amorficznej substancji przedstawiono na rys. 1.



Rys.1 Ruch naładowanej wysokoenergetycznej cząstki o ładunku Z_1e , masie M_1 i energii E_0 w amorficznej substancji zbudowanej z dwóch pierwiastków A i B o liczbach atomowych Z_A i Z_B , masach M_A i M_B .

- **Metoda RBS – Rutherford BackScattering Spectroscopy**

Z wiązki naładowanych cząstek część cząstek może rozproszyć się już na powierzchni bombardowanej substancji a część może wejść do jej wnętrza (rys.1).

Jeżeli na powierzchni bombardująca cząstka o ładunku Z_1e rozproszy się elastycznie pod kątem θ na jądrze o ładunku Z_2e i masie M_2 to po rozproszeniu posiada energię E_2 równą:

$$E_2 = k(M_1, M_2, \theta)E_0 \quad (1)$$

Występujący w równaniu (1) współczynnik k , nazywany kinematycznym współczynnikiem, jest równy:

$$k = \left[\frac{M_1 \cos \theta + \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta}}{M_1 + M_2} \right]^2 \quad (2)$$

Bombardująca cząstka, poruszając się wewnątrz amorficznej substancji, w wyniku oddziaływań z elektronami i jądrami atomów stopniowo traci energię. Po dojściu na głębokość x_1 jej energia E_1 jest równa:

$$E_1 = E_0 - \int_0^{x_1} \frac{dE(E(x))}{dx} dx \quad (3)$$

Jeżeli na głębokości x_1 cząstka ta (posiadając energię E_1) rozproszy się pod kątem θ , to jej energia po rozproszeniu będzie równa:

$$E_1^s = kE_1 \quad (4)$$

Jeżeli cząstka rozproszy się pod kątem $\theta \in (90^\circ, 180^\circ)$ to będzie poruszać się do powierzchni bombardowanej próbki i tracąc stopniowo energię może wyjść z próbki z energią E_2 równą:

$$E_2 = E_1^s - \int_{x/\cos\theta}^0 \frac{dE(E(x))}{dE} dE \quad (5)$$

Z tą energią E_2 cząstka ta zostanie zarejestrowana detektorem o kącie bryłowym $d\Omega$ i energetycznej zdolności rozdzielczej df_E .

Przekrój czynny na rozproszenie na jądrze o ładunku Z_2e cząstki o ładunku Z_1e oraz energii E_1 , pod kątem θ w kąt bryłowy $d\Omega$ w układzie środka masy (CM) można opisać wzorem podanym przez Rutherforda:

$$\frac{d\sigma(E_1, \theta)}{d\Omega} = \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{[4E_1 \sin^2(\theta/2)]^2} \quad (6)$$

Wzór ten jest słuszny gdy masa cząstki bombardującej M_1 jest znacznie mniejsza od masy cząstki rozpraszającej M_2 .

Liczbę cząstek o energii E_1 , rozproszonych na głębokości x_1 , w warstwie o grubości dx_1 pod kątem θ w kąt bryłowy $d\Omega$ można więc obliczyć jako:

$$dN = N_0 n_0 \frac{d\sigma(E_1, \theta)}{d\Omega} d\Omega dx_1 \quad (7)$$

We wzorze tym, n_0 jest koncentracją rozpraszających jąder o ładunku Z_2e w warstwie o grubości dx_1 na głębokości x_1 .

Natomiast liczbę cząstek zarejestrowanych detektorem cząstek z energią $E_2 \in \langle E_2, E_2 + dE_2 \rangle$ można wyznaczyć jako:

$$\frac{dN}{dE_2}(E_2(x_1)) = N_0 n_0 \frac{d\sigma(E_1, \theta)}{d\Omega} d\Omega \frac{dx_1}{dE_2} \quad (8)$$

- **Metoda PIXE – Particle Induced X-ray Emission**

Wysokoenergetyczna naładowana cząstka, poruszając się w ciele stałym stopniowo traci energię w wyniku bezpośrednich rozprośnień na jądrach lub w wyniku oddziaływania z elektronami. Naładowana cząstka przekazując energię elektronom może spowodować ich przejście do wyższych, nieobsadzonych stanów energetycznych w atomach w pobliżu których przelatuje. Następnie, w wyniku przechodzenia elektronów do dostępnych niższych stanów energetycznych emitowany jest kwant promieniowania elektromagnetycznego. Energia E_x emitowanego kwantu promieniowania jest równa różnicy energii stanu z którego wychodzi elektron oraz stanu do którego przechodzi elektron.

Jeżeli N_0 naładowanych cząstek o ładunku Z_1e oraz energii E_1 porusza się w warstwie o grubości dx_1 znajdującej się na głębokości x_1 zbudowanej z $n(x_1)$ atomów o liczbie atomowej Z_2 to liczba $N_x(E_x)$ wyemitowanych z tej warstwy kwantów promieniowania o energii E_x jest równa:

$$N_x(E_x) = N_0(E_1) \sigma(E_1) \omega \frac{dE}{dx} dx \quad (9)$$

We wzorze tym. $\sigma(E)$ jest przekrojem czynnym na jonizację [8] a ω jest wydajnością fluorescencji.

Wyemitowany kwant może być zaabsorbowany przez atomy w sąsiednich warstwach lub może wyjść z ośrodka, w którym porusza się cząstka. Kwant ten może następnie zostać zarejestrowany detektorem o kącie bryłowym $d\Omega_x$ umieszczonym pod kątem ψ_x względem bombardującej wiązki cząstek. Przy zaniedbaniu absorpcji wewnątrz ośrodka, w którym poruszają się naładowane cząstki, liczba zarejestrowanych kwantów o energii E_x może zostać opisana wzorem (9). Jeżeli ośrodek, w którym porusza się wiązka naładowanych cząstek, jest zbudowany z dwóch pierwiastków A i B, to z ośrodka zostaną wyemitowane kwanty o energiach E_{xA} oraz E_{xB} . Przy zaniedbaniu wewnętrznej absorpcji, detektor zarejestrowałby $N_A(E_{xA})$ oraz $N_B(E_{xB})$ kwantów promieniowania, przy czym stosunek N_A/N_B byłby równy stosunkowi koncentracji n_A/n_B obu pierwiastków.

W przypadku absorpcji wewnętrznej, kwant o energii E_{xA} wyemitowany przez atom pierwiastka A, może zostać zaabsorbowany przez atom pierwiastka B (o ile energia E_{xA} jest większa od energii E_{xB}). Wzbudzony atom może następnie wyemitować kwant promieniowania o energii E_{xB} . W wyniku absorpcji wewnętrznej zmniejszona zostaje liczba rejestrowanych kwantów o energii E_{xA} a zwiększona liczba kwantów o energii E_{xB} .

Jeżeli więc bombardowana wiązką naładowanych cząstek substancja jest zbudowana z co najmniej dwóch pierwiastków, to w wyniku wewnętrznej absorpcji wytworzonego promieniowania stosunek liczb zarejestrowanych kwantów $N_A(E_{xA})/N_B(E_{xB})$, nie jest równy stosunkowi n_A/n_B koncentracji obu pierwiastków. W złożonych substancjach, zbudowanych z kilku podstawowych pierwiastków (tworzących tzw. „matrycę”) oraz z pierwiastków będącymi małymi domieszkami absorpcja promieniowania charakterystycznego może w istotny sposób modyfikować widmo energetyczne promieniowania charakterystycznego X emitowanego przez wzbudzone atomy domieszek. Efekt ten nazywany „efektem matrycy” niekiedy może być zaniedbywany w substancjach zbudowanych z lekkich pierwiastków (np. H, C, N, O). Efekt matrycy jednak prawie zawsze musi być uwzględniany podczas badania składu pierwiastkowego materiałów zbudowanych z cięższych od poprzednio wymienionych pierwiastków a tak jest najczęściej przy badaniu stopów metali lub ich związków chemicznych.

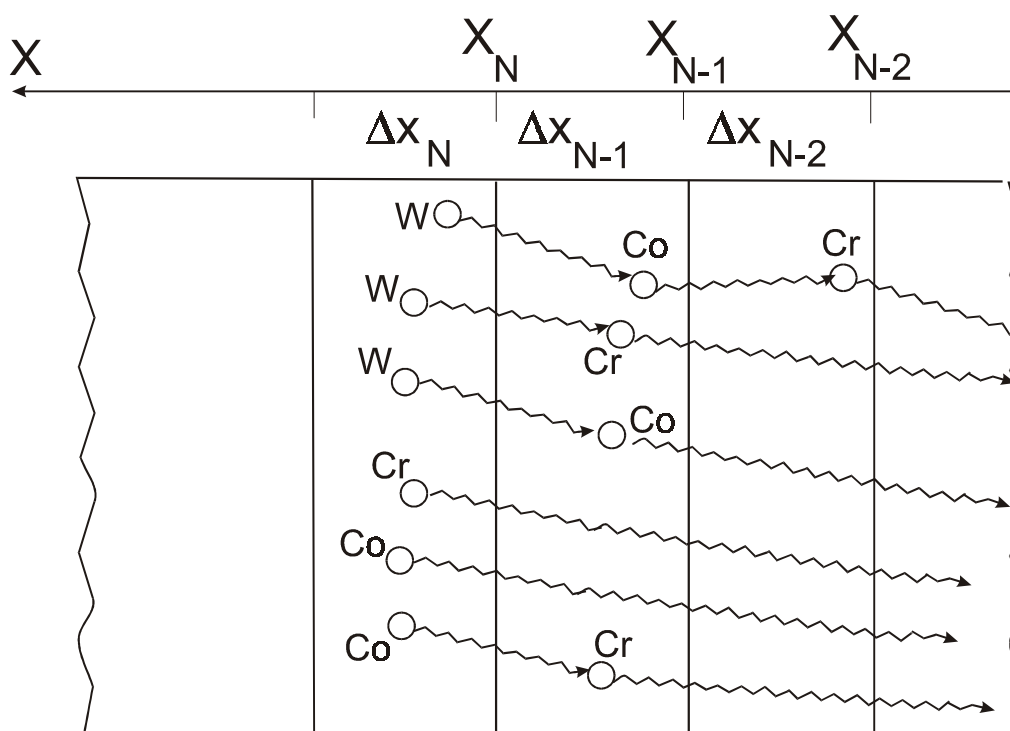
Efekt matrycy może więc zostać uwzględniony jeżeli podczas analizy widm promieniowania charakterystycznego zostaną uwzględnione widma energetyczne wstecznie rozproszonych naładowanych cząstek.

3. Korekcja efektu matrycy w badaniu składu pierwiastkowego warstwy wierzchniej ciał stałych

W prezentowanej pracy, w celu uwzględnienia efektu matrycy, postanowiono określać koncentrację pierwiastków tworzących „matrycę” w oparciu o widma energetyczne wstecznie rozproszonych naładowanych cząstek (RBS). Dla testowania słuszności przyjętego modelu postanowiono wyznaczyć koncentracje podstawowych pierwiastków w znanej wieloskładnikowej substancji zbudowanej z pierwiastków, z których może być zbudowane narzędzie skrawające. Jako testową substancję przyjęto stop STELLIT, w skład którego wchodzi chrom, kobalt i wolfram. Przedstawiony poniżej model, pozwalający uwzględnić efekt matrycy w trakcie analizy widm energetycznych promieniowania charakterystycznego X, omówiono w odniesieniu do tego stopu jedynie dla większej przejrzystości.

W prezentowanej pracy do wyznaczenia liczb kwantów promieniowania o energiach $h\nu_{Co}$, $h\nu_{Cr}$ oraz $h\nu_W$ przyjęto, że:

- a) warstwa o grubości równej zasięgowi naładowanych cząstek o energii E_0 zbudowana jest z L podwarstw o grubościach dx_n ($n = 0, L$);
- b) do podwarstwy o szerokości dx_n leżącej na głębokości x_n dociera $N(x_n)$ cząstek o energii $E_I(x_n)$. Energię $E_I(x_n)$ określa wzór (3);
- c) podwarstwa ta jest zbudowana z pierwiastków Cr, Co i W o koncentracjach $n_{Cr}(x_n)$, $n_{Co}(x_n)$ oraz $n_W(x_n)$. Koncentracje $n_{Cr}(x_n)$, $n_{Co}(x_n)$ oraz $n_W(x_n)$ uzyskujemy z widm RBS. Koncentracje pierwiastków w podwarstwach o których składzie nie uzyskuje się informacji z widm RBS przyjmuje się za równe koncentracjom w ostatniej podwarstwie badanej metodą RBS;
- d) z warstwy tej jest emitowanych $N_{Cr}(x_n)$, $N_{Co}(x_n)$ oraz $N_W(x_n)$ kwantów. Wartości $N_{Cr}(x_n)$, $N_{Co}(x_n)$ oraz $N_W(x_n)$ można określić wyznaczyć przy użyciu wzoru (9);
- e) wyemitowane kwanty promieniowania charakterystycznego przechodzą przez podwarstwy leżące na głębokościach x_{n-1} , x_{n-2} , ... x_0 . W podwarstwach tych mogą być absorbowane. W wyniku absorpcji kwantu o energii $h\nu_W$ może zostać wzbudzony atom Cr lub Co który może wyemitować kwant $h\nu_{Co}$ lub $h\nu_{Cr}$. Sytuacja ta została przedstawiona na rys. 2. Koncentracje $n_{Cr}(x_{n-1})$, $n_{Co}(x_{n-1})$ oraz $n_W(x_{n-1})$ są znane z widma RBS;
- f) liczbę kwantów o energii $h\nu_i$ ($i = Cr, Co, W$) rejestrowanych detektorem należy obliczyć jako sumę kwantów wyemitowanych z poszczególnych podwarstw;
- g) uzyskane wartości teoretyczne należy porównać z wartościami uzyskanymi z widm doświadczalnych. Obliczone wartości porównuje się z polami powierzchni pików, uzyskanymi pop odjęciu tła w widmach energetycznych promieniowania charakterystycznego. W przypadku niezgodności koncentracje pierwiastków są modyfikowane i proces analizy rozpoczyna się ponownie od punktu (A).



Rys.2. Oddziaływanie promieniowania charakterystycznego wzbudzonego w warstwie Δx_n leżącej na głębokości x_n z atomami znajdującymi się w warstwach Δx_{n-1} , Δx_{n-2} , ...

Jeżeli przyjęty model jest słuszny to stosunki koncentracji Cr/Co/W wyznaczonych dla stopu STELLIT według przedstawionej metody powinny być równe stosunkom zarejestrowanych doświadczalnie liczb kwantów o odpowiednich energiach.

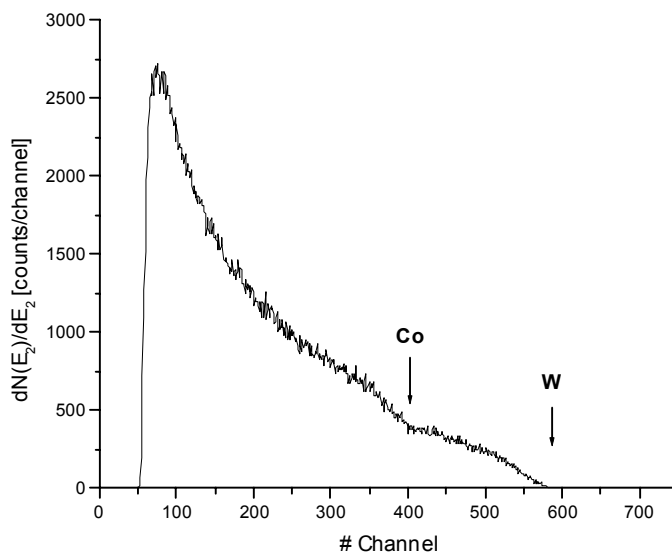
Chociaż model ten został przedstawiony dla stopu STELLIT to łatwo może zostać uogólniony dla substancji zbudowanej z pewnej liczby pierwiastków tworzących matrycę i pewnej liczby pierwiastków śladowych. Koncentracje pierwiastków tworzących matrycę mogą zostać określone w oparciu o widma RBS ale koncentracje pierwiastków śladowych muszą być wyznaczone w z widm PIXE z uwzględnieniem efektu matrycy.

4. Eksperyment

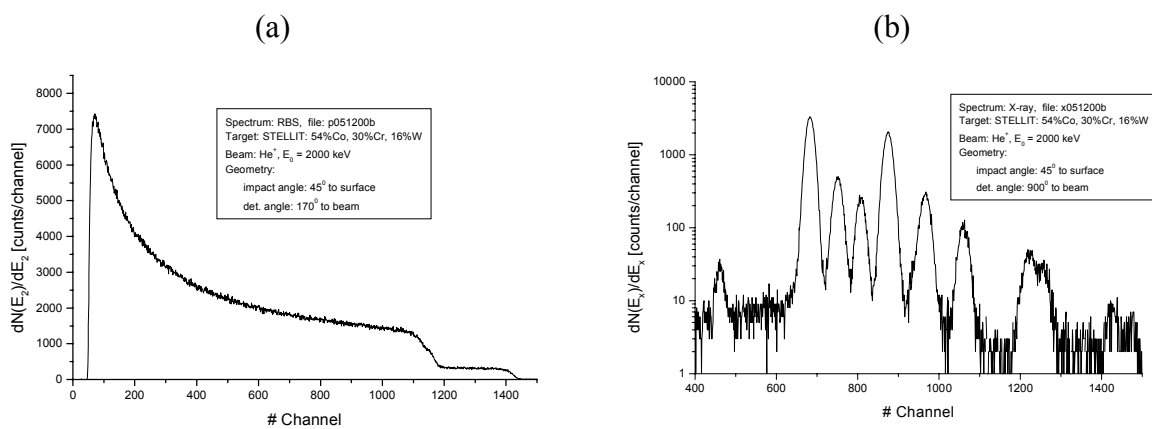
W celu opracowania metody uwzględniania efektu matrycy w pomiarach koncentracji opartych o detekcję promieniowania charakterystycznego X, wzbudzonego wiązką naładowanych, wysokoenergetycznych cząstek, rejestrowano widma energetyczne promieniowania charakterystycznego oraz widma energetyczne wstecznie rozproszonych naładowanych cząstek na tarczy wielopierwiastkowej o znanym składzie pierwiastkowym. Tarczą tą była próbka stopu STELLIT wykonana w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 5 x 5 x 1 mm. STELLIT jest stopem o składzie: 54%Co-30%Cr-16%W. Próbkę STELLITu bombardowano wiązką protonów o energii 2300 keV lub wiązką jonów He^+ . W eksperymentach z użyciem wiązki jonów He^+ , energie jonów wynosiły 1100 keV lub 2000 keV. Widma wstecznie rozproszonych naładowanych cząstek rejestrowano detektorem (o energetycznej zdolności rozdzielczej 15 keV) umieszczonym pod kątem 170° względem wiązki bombardujących cząstek. Detektor Si(Li), o energetycznej zdolności rozdzielczej 180 eV, rejestrujący promieniowanie charakterystyczne X, umieszczono pod kątem 90° względem wiązki. Badaną próbkę bombardowano natomiast pod kątem: 0° , 45° oraz 75° (mierzonym

względem normalnej do powierzchni próbki). Kąty dobrano tak ze względu na zasięgi protonów i jonów He^+ w stopie STELLIT odpowiednio równych: 22.6 μm oraz 1.78 μm (dla jonów He^+ o energii 2000 keV). Ze względów aparaturowych nie można było ustawić kąta bombardowania większego od 75° . Wzmocnienie traktu detekcji promieniowania charakterystycznego dobrano tak, by zapewnić jednoczesną detekcję linii K_α i K_β dla Cr i Co oraz linii L_α , L_β i L_γ dla W. W trakcie eksperymentu zapewniano w komorze pomiarowej próżnię rzędu 10^{-6} mbara. Dla kontroli użyto również próbek Fe (99.999%), Ni (99.999%) oraz W (99.999%).

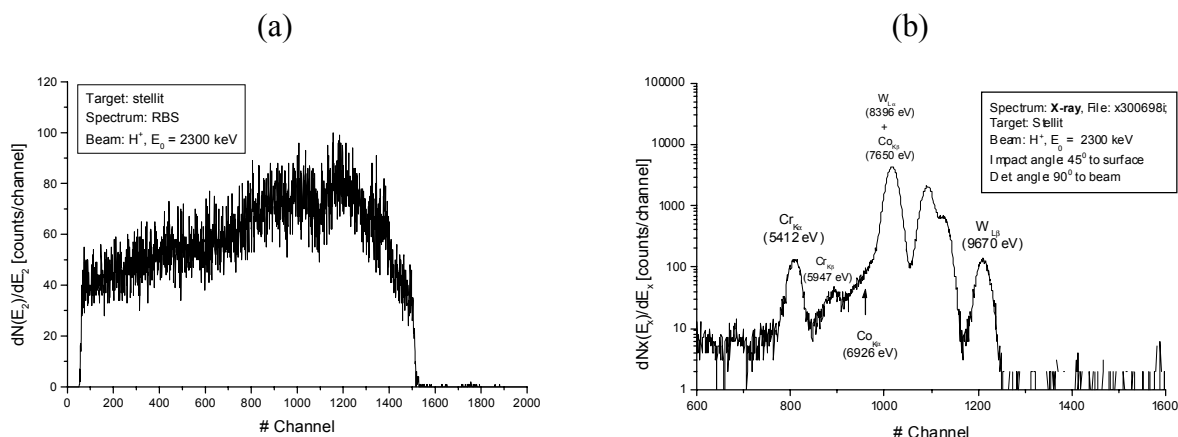
Widm eksperymentalne RBS uzyskane dla stopu STELLIT, bombardowanego wiązką jonów He^+ , przedstawiono na rys.3 oraz rys 4a i 4b. Natomiast widma eksperymentalne uzyskane dla próbki stopu STELLIT bombardowanej wiązką protonów, przedstawiono na rys. 5a (RBS) i rys. 5b (PIXE). Jako przykład kontrolnych widm RBS i PIXE przedstawiono na rys. 6a (RBS) i rys. 6b (PIXE) widma zarejestrowane dla tarczy wolframowej bombardowanej wiązką protonów.



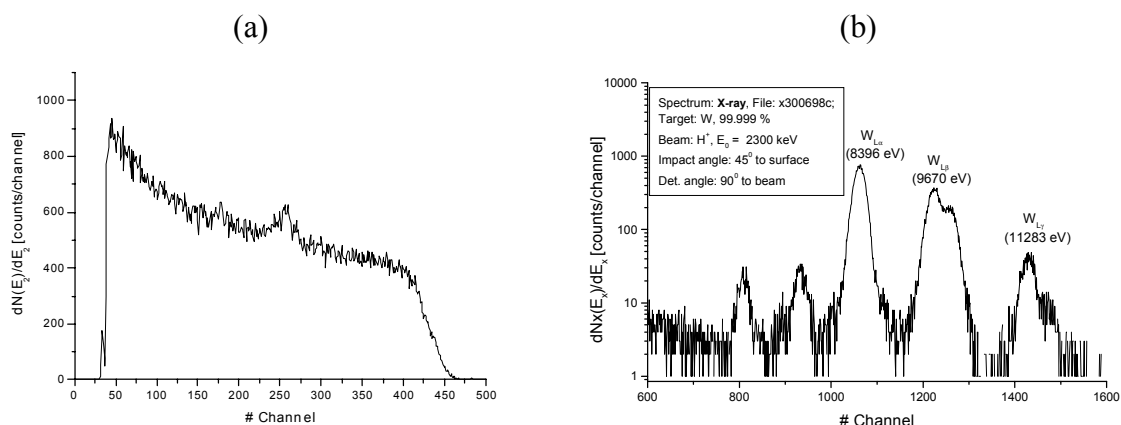
Rys.3 Widmo RBS uzyskane podczas bombardowania próbki stopu STELLIT wiązką jonów He^+ o energii 1100 keV. Tarcza bombardowana pod kątem 90° względem normalnej do powierzchni.



Rys.4 Widmo RBS (a) i promieniowania charakterystycznego X (b) uzyskane podczas bombardowania próbki stopu STELLIT wiązką jonów He^+ o energii 2000 keV. Tarcza bombardowana pod kątem 90° względem normalnej do powierzchni.



Rys.5 Widma eksperymentalne uzyskane podczas bombardowania tarczy stopu STELLIT wiązką protonów o energii 2300 keV. Tarcza bombardowana pod kątem 45° względem normalnej do powierzchni.



Rys.6 Widma eksperymentalne uzyskane podczas bombardowania tarczy wolframowej o czystości 99.999% wiązką protonów o energii 2300 keV. Tarcza bombardowana pod kątem 45° względem normalnej do powierzchni.

5. Dyskusja i wnioski

W oparciu o widma eksperymentalne uzyskane z użyciem wiązki jonów He^+ określono wstępne koncentracje Cr, Co i W, które są równe odpowiednio: 31%, 56% oraz 13%. Stosując zaprezentowany powyżej model uzyskano następujące wartości koncentracji : 29%, 54% oraz 17% odpowiednio dla Cr, Co i W. Są to wartości znacznie bardziej zbliżone do wartości oczekiwanych (30%, 54% i 16%) niż pierwotnie wyznaczone koncentracje.

Przekroje czynne oraz współczynniki ω niezbędne do obliczenia liczb kwantów promieniowania X wyznaczono w oparciu o dane tablicowe [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Do obliczenia strat energetycznych posłużono się stratami energetycznymi podanymi dla protonów przez J.Janniego [15] oraz J.F.Zieglera [16].

Współczynniki absorpcji wyznaczono z danych tablicowych [17, 18].

Opracowując prezentowaną metodę nie uwzględniano niektórych procesów powodujących dodatkowe zmiany rejestrowanego promieniowania charakterystycznego. Dla testów ograniczono do 3 liczbę

pierwiastków występujących w warstwie wierzchniej. Ograniczenie to było spowodowane wymogami czasowymi oraz składem materiału wybranego do testu.

Omówiony model będzie podstawą do opracowania właściwego oprogramowania przewidywanego do stosowania w analizach składu pierwiastkowego warstwy wierzchniej lub powłoki ciał stałych.

6. Podziękowania

Praca była częściowo finansowana przez Fundację Marii Curie Skłodowskiej, Projekt¹ nr. MR/USDA – 98 – 322 oraz z grantu KBN no 7T08C 019 15.

Autorzy pragną podziękować panu prof dr hab. Janowi Styczniovi za pomocne dyskusje i rady stymulujące wykonanie eksperymentów oraz analiz oraz pani mgr. inż Marzenie Miturze za pomoc w wykonaniu niektórych eksperymentów RBS/PIXE.

7. Literatura

1. M.A.Reis, L.C.Alves, A.P.Jesus, Nucl. Instr. and Meth. **B 109/110** (1996) 134
2. J.M.Delbrouck-Habaru, I.Roelandts, D.Strivay, G.Weber, Nucl. Instr. and Meth. **B 129** (1997) 92
3. E.Jallot, J.L.Irigaray, H.Oudadesse, V.Brun, G.Weber, P.Frayssinet, Nucl. Instr. and Meth. **B 142** (1998) 156
4. G.Demortier, Nucl. Instr. and Meth. **B 190** (1999) 520
5. W.K.Chu, J.W.Mayer and M.A.Nicolet, Backscattering Spectrometry, Academic Press, New York, (1978)
6. L.C.Feldman, J.W.Mayer, Fundamentals of Surface and Thin Films Analysis, ed. Elsevier Science Publishers, (1986)
7. M.Uda, T.Yamamoto, Nucl. Instr. and Meth. **B 150** (1999) 1
8. I.Orlic, C.H.Sow, S.M.Tang, At. Data and Nucl. Data Tables **56** (1994) 59
9. H.Paul, J.Sachert, At. Data and Nuclear Data Tables **42** (1989)
10. V.J.Kennedy, A.Augusthy, K.M.Varier, P.Magudpathy, K.G.M.Nair, B.B.Dhal, H.C.Padhi, Nucl. Instr. and Meth. **B 161-163** (2000) 196
11. D.D.Cohen, M.Harrigan, At. Data and Nucl. Data Tables **33** (1985) 255
12. D.E.Johanson, G.Basbas, F.D.McDaniel, At. Data and Nucl. Data Tables **24** (1979) 1
13. J.D.Garcia, Phys.Rev. **A1** (1970) 280
14. O.Benka, A.Kropff, At. Data and Nucl. Data Tables **72, no 3** (1978) 219
15. J. Janni, At. Data and Nucl. Data Tables **27, no 2/3** (1982) 150, At. Data and Nucl. Data Tables **27, no 4/5** (1982) 341
16. J.F. Ziegler, "The Stopping and ranges of ions in matter", Pergamon Press, 1977
17. E.B.Saloman, J.H.Hubbell, J.H.Scofield, At. Data and Nucl. Data Tables **38**, (1988) 1
18. E.C. Montenegro, G.B.Baptista, P.W.E.P.Duarte, At. Data and Nucl. Data Tables **38**, (1978) 131

¹: Tytuł projektu: The Investigation of Chemical Wear of The Cutting Edge While Processing Wood And Wood Based Products