

Metody spektrometryczne do oceny wtrąceń niemetalicznych w stopach metali

Spectroscopic methods used for detection of non-metallic inclusions in metal alloys

DARIUSZ SOJKA
JAN SIENIAWSKI *

Spektrometria emisyjna ze wzbudzeniem iskrowym (OES) stosowana powszechnie do analizy składu chemicznego metali i ich stopów może być wykorzystana także do oceny i charakterystyki wtrąceń niemetalicznych. Główną zaletą tej metody jest szybkość wykonywania badań, która pozwala na jej użycie w trakcie procesu metalurgicznego. Opisano budowę spektrometru emisyjnego oraz metodę i sposób wykorzystania sygnałów pomiarowych do oceny wtrąceń niemetalicznych. Przedstawiono również przykład oceny siarczków w stali niskostopowej w porównaniu z klasyczną próbą Baumana uzyskaną w warunkach laboratorium przemysłowego.

SŁOWA KLUCZOWE: spektrometr, spektroskop, metoda OES, wtrącenia niemetaliczne, analiza metali

Optical Emission Spectroscopy (OES) method with spark trigger, as generally used for chemical analysis of metals and their alloys, can also be respectively employed for detection of non-metallic inclusions i.e. of their presence and characteristics. The main advantage of this method is short testing time which allows to use it during metallurgical process. Described in the article is design of the optical emission spectrometer, rules of use, and a method of how to use the obtained signal and to interpret it in terms of occurrence of non-metallic inclusions. Also provided is an example of inspection of the content of sulfides in low alloy steel compared with classical Bauman method obtained in the industrial laboratory environment.

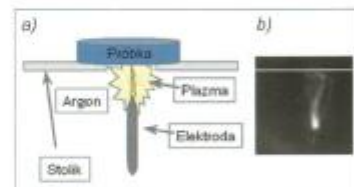
KEYWORDS: spectrometer, spectroscopy, OES method, non-metallic inclusions, metals analysis

Metoda spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym od kilkudziesięciu lat jest stosowana do analizy składu chemicznego stopów metali w procesach metalurgicznych. Pozwala na określanie stężenia większości pierwiastków stopowych i śladowych w krótkim czasie (25÷40 s). Wzbudzenie atomów bądź cząsteczek w materiale za pomocą ładunku elektrycznego i doprowadzenie tego materiału do stanu plazmy umożliwia przeprowadzenie analizy składu chemicznego. Pomiar intensywności emitowanego promieniowania elektromagnetycznego, charakterystycznego

dla składu chemicznego, wykonuje się za pomocą standardowego spektrometru wykorzystującego wzbudzenie iskrowe [1÷4]. Spektrometry (rys. 1) są wytwarzane przez wiele firm.

Głównymi podzespołami w spektrometrze iskrowym są: źródło wzbudzenia, układ optyczny odpowiedzialny za rozszczepienie światła ciągłego oraz detektory zamieniające wartości natężenia monochromatycznego promieniowania świetlnego na sygnał prądowy. Dodatkowymi elementami są układy elektroniczne oraz oprogramowanie komputerowe pozwalające na dalsze przetwarzanie uzyskanego sygnału prądowego [1].

Źródło wzbudzenia – wytwarza wyładowania elektryczne najczęściej w atmosferze argonu pomiędzy elektrodą a powierzchnią próbki stanowiącej drugą elektrodę (rys. 2). Każde wyładowanie powoduje odparowanie mikroobjętości materiału próbki i wytworzenie pomiędzy elektrodami stanu plazmy. Atomy plazmy wprowadzane są w stan wzbudzony, powodujący emisję promieniowania elektromagnetycznego charakterystycznego dla składu chemicznego odparowanej mikroobjętości materiału. Przeskok iskry elektrycznej pomiędzy elektrodami prowadzony jest w czasie kilku sekund i z częstotliwością 400÷1000 Hz. Czas ten pozwala na odparowanie materiału z małej powierzchni – zwykle o średnicy ok. 5 mm [1].



Rys. 2. Wzbudzenia materiału próbki za pomocą iskry: a) schemat, b) obraz wyładowania podczas przeskoku iskry

Układ optyczny – umożliwi rozdział sumarycznego promieniowania emitowanego przez atomy wzbudzonej próbki na charakterystyczne widmo złożone z monochromatycznych fal świetlnych. W spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym stosuje się różne układy optyczne [1, 5].

Szeroko rozpowszechniony jest układ optyczny oparty na kole Rowlanda (rys. 3). Głównym elementem tego układu jest wklęsła siatka dyfrakcyjna o promieniu krzywizny równym średnicy koła Rowlanda, styczna do niego w punkcie swojego wierzchołka. Szczelina wejściowa dla wiązki padającej oraz szczeliny wyjściowe monochromatycznych wiązek odbitych znajdują się na obwodzie koła Rowlanda. Użyteczny zakres widma pomiarowego znajduje się na części okręgu koła Rowlanda, pomiędzy szczeliną wejściową i punktem bezpośredniego odbicia wierzchołka siatki dyfrakcyjnej. Długość fali λ charakterystycznego promieniowania odbitego, które może zostać zarejestrowane, zwiększa się w kierunku szczeliny wejściowej spektrometru.

Równanie dyfrakcji promieniowania odbitego dla układu optycznego umieszczonego na kole Rowlanda ma postać:

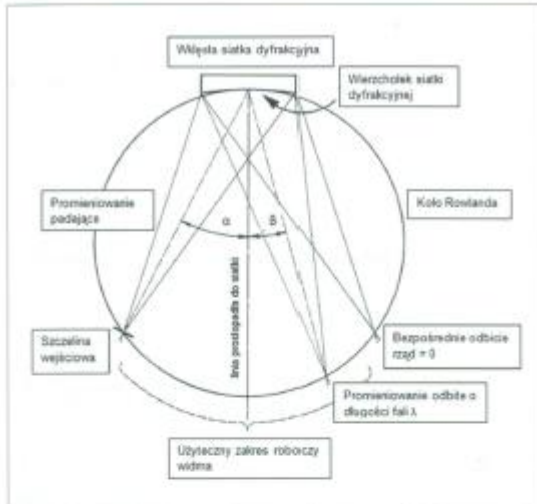
$$\lambda n = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (1)$$

gdzie: d – stała siatki dyfrakcyjnej, α – kąt padania promieniowania, β – kąt dyfrakcji danej długości fali o rzędzie dyfrakcji n , n – rząd dyfrakcji (liczba całkowita), λ – długość fali.



Rys. 1. Spektrometr ARL 4460 firmy Thermo Fisher Scientific

* Mgr inż. Dariusz Sojka (dariusz.sojka@spekom.pl), prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski (jansen@prz.edu.pl) – Katedra Metaloznawstwa, Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej

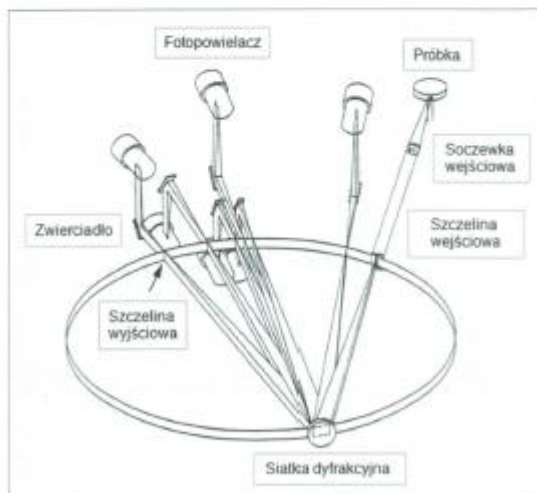


Rys. 3. Schemat budowy spektrometru iskrowego z układem optycznym umieszczonym na kole Rowlanda

Na obwodzie koła Rowlanda w spektrometrze jednoczesnym (rys. 4) umieszczone zostały szczeliny wyjściowe dla wszystkich linii analitycznych wskazanych do pomiaru intensywności. Odległości pomiędzy szczelinami wyjściowymi na obwodzie określa dyspersja liniowa D (mm/nm) lub jej odwrotność (nm/mm):

$$D = \frac{\Delta s}{\Delta \lambda} \quad (2)$$

gdzie: Δs – różnica odległości pomiędzy dwiema liniami widma, $\Delta \lambda$ – różnica długości fali pomiędzy dwiema liniami widma.



Rys. 4. Układ optyczny jednoczesnego spektrometru iskrowego

Zwierciadło toroidalne za szczeliną wyjściową kieruje wiązkę światła monochromatycznego do detektora – najczęściej fotopowielacza. Sygnał świetlny w detektorze jest zamieniany na sygnał prądowy.

Dodatkową zaletą tej metody jest prosta i szybka preparatyka próbek [1]. Stosowana podczas procesu metalurgicznego typowa próbka produkcyjna pobierana jest próbnikiem zanurzeniowym lub strumieniowym (rys. 5). Przed pomiarem powierzchnia próbek jest szlifowana lub frezowana.

Duża energia wzbudzenia źródła iskrowego niszczy mikrostrukturę badanego materiału. Uniemożliwia więc scharakteryzowanie wydzieleni związków chemicznych i faz międzymetalicznych. Intensywny rozwój aparatury elektronicznej w ostatnich latach był podstawą do opracowania nowych, sterowanych prądowo źródeł wzbudzenia oraz odpowiednio szybkich przetworników analogowo-cyfrowych. Dzięki tym elementom programuje się kształt i częstotliwość rejestrowanych impulsów promieniowania elektromagnetycznego emitowanych z próbki. Jednocześnie możliwa stała się niezależna rejestracja pojedynczych impulsów emitowanych po każdym wyładowaniu [6+11]. Opracowane programy komputerowe do analizy statystycznej uzyskanych sygnałów pomiarowych pozwalają na identyfikację związków chemicznych, z których nastąpiła emisja sygnałów pomiarowych.

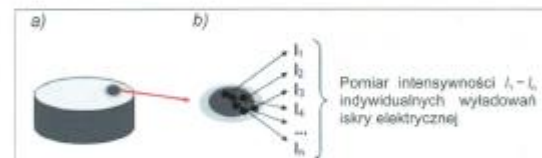
Przykładem takiego programu jest Spark-DAT firmy Thermo Fisher Scientific [12+16]. Jest on zintegrowany do pracy *on-line* ze standardowym oprogramowaniem do obsługi spektrometru. Oznacza to, że podczas wykonywania rutynowej analizy składu chemicznego pierwiastków prowadzona jest jednocześnie analiza składu wtrąceń niemetalicznych.

Metodyka badań

Analizę składu chemicznego wtrąceń niemetalicznych, m.in. dla stali, wykonuje się zwykle w ciągu 5 s z częstotliwością przeskoaku iskry pomiędzy materiałem próbki a elektrodą wynoszącą 400 Hz. W tym czasie uzyskuje się 2000 wyładowań [9, 11]. Dla każdego z nich prowadzi się pomiar intensywności ($I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$). Obrazy czarnych punktów na powiększonej powierzchni śladu po wyładowaniach (rys. 6) to mikroobszary, na które oddziałują poszczególne wyładowania (iskry).

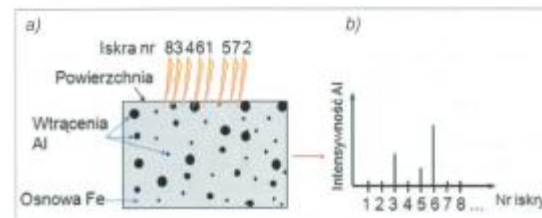


Rys. 5. Próbnik zanurzeniowy do pobierania próbek



Rys. 6. Schemat oddziaływania iskry elektrycznej z powierzchnią próbki (a) oraz obraz mikroobszarów kolejnych wyładowań iskry (b)

Podczas analizy składu chemicznego stali zawierającej wtrącenia niemetaliczne (np. Al_2O_3) metodą spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym (rys. 7) kolejne iskry oddziałują na obszar wolny od wtrąceń (np. iskra nr 8 i 7), natomiast inne na wtrącenia (np. iskry nr 3 i 6).

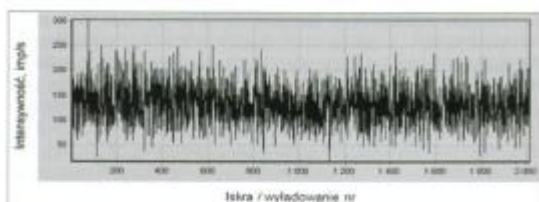


Rys. 7. Obraz powierzchni oddziaływania wyładowań (a) oraz wartości intensywności linii Al (b)

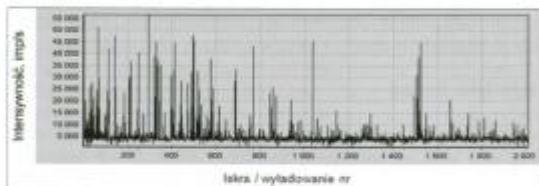
Detektor (fotopowielacz) do pomiaru intensywności sygnału dla pierwiastka Al rejestruje kolejne jej wartości wywołane wyładowaniami (rys. 7b). Wyraźnie największa intensywność

cechuje iskrę nr 6 (wtrącenie o największych rozmiarach) i następnie iskrę nr 3 (wtrącenie o mniejszych rozmiarach). Sygnału dla iskier nr 1, 2, 7 i 8 praktycznie się nie obserwuje.

Zawartość Al metalicznego – rozpuszczonego w osnowie – w typowych gatunkach stali niskostopowej wynosi od 0,02 do 0,08%. Odpowiada to małej intensywności impulsów ok. 50+250 jednostek cps (rys. 8). Natomiast gdy Al jest rozpuszczony w osnowie Fe oraz jednocześnie występuje w postaci wtrąceń, stwierdza się obecność impulsów o dużej intensywności (10 000+55 000 jednostek cps) – pochodzących głównie od wtrąceń prostych Al_2O_3 , AlN i bardziej złożonych (rys. 9).

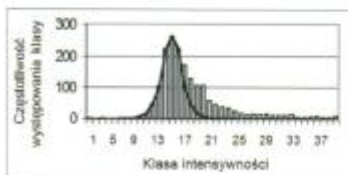


Rys. 8. Rozkład wartości intensywności sygnału charakterystycznego dla pierwiastka rozpuszczonego w osnowie i nietworzącego wtrąceń niemetalicznych



Rys. 9. Rozkład wartości intensywności sygnału charakterystycznego dla pierwiastka tworzącego wtrącenia niemetaliczne

Wartości intensywności impulsów od pierwiastków występujących w czystej postaci i równomiernie rozpuszczonych w osnowie stopu powinny spełniać parametry rozkładu normalnego Gaussa (rys. 10). Wartości te są zróżnicowane z uwagi na błąd systematyczny metody badań oraz rozkład pierwiastków w próbce. Wyładowanie iskry każdorazowo oddziałuje z innym mikroobszarem próbki i inaczej jest ustawione względem osi optycznej spektrometru.

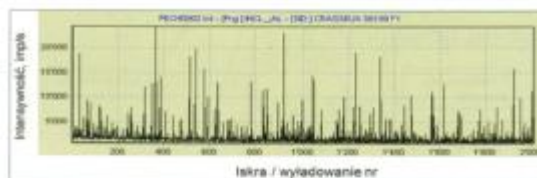


Rys. 10. Rozkład Gaussa dla wartości intensywności pojedynczych iskier z podziałem na klasy o różnej wartości impulsów

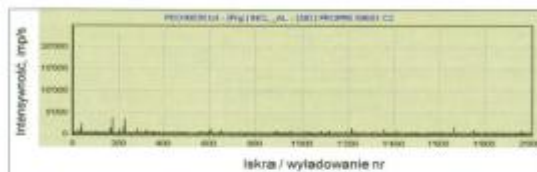
Pierwiastek występujący w postaci wtrącenia charakteryzuje większa liczba impulsów o dużej intensywności [9]. Zbiór impulsów uzyskany podczas jednej próby można podzielić na klasy ze względu na wartość intensywności. Klasy impulsów (10+20) zawarte pod krzywą rozkładu normalnego Gaussa (rys. 10) reprezentują intensywności uzyskane od pierwiastka rozpuszczonego w osnowie. Pierwiastek tworzący jednocześnie wtrącenia niemetaliczne będzie się charakteryzował obecnością całkowicie nowych klas impulsów (20+40) o dużej intensywności – typowych dla wtrąceń. Prawostronna asymetria krzywej Gaussa pozwala stwierdzić obecność wtrąceń niemetalicznych (rys. 10).

Interpretacja wartości intensywności pierwiastków przedstawionych w postaci rozkładu normalnego Gaussa umożliwia wykazanie, że dany pierwiastek nie jest całkowicie rozpuszczony w roztworze stałym – osnowie, występuje także w postaci wtrąceń niemetalicznych. Metoda ta stosowana jest do oceny czystości metali. Przykładem jest analiza skła-

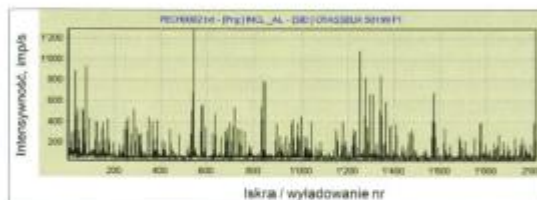
du chemicznego dwóch próbek stopu aluminium o różnym stopniu zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi [17]. Uzyskane rozkłady wartości intensywności dla Na, Cl, O i B w próbce zanieczyszczonej (B) i czystej (A) przedstawiono na rys. 11+18.



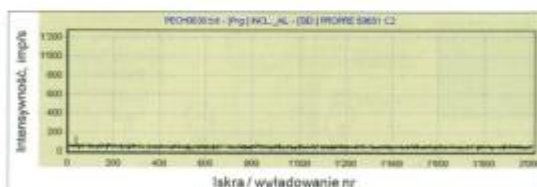
Rys. 11. Rozkład wartości intensywności Na dla stopu B – duża liczba wtrąceń w osnowie



Rys. 12. Rozkład wartości intensywności Na dla stopu A – mała liczba wtrąceń w osnowie



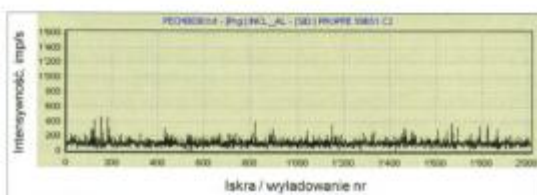
Rys. 13. Rozkład wartości intensywności Cl dla stopu B – duża liczba wtrąceń w osnowie



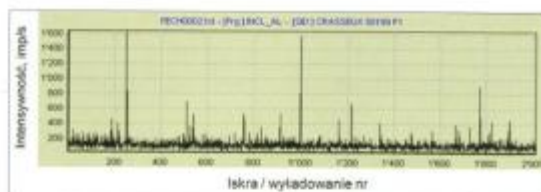
Rys. 14. Rozkład wartości intensywności Cl dla stopu A – mała liczba wtrąceń w osnowie



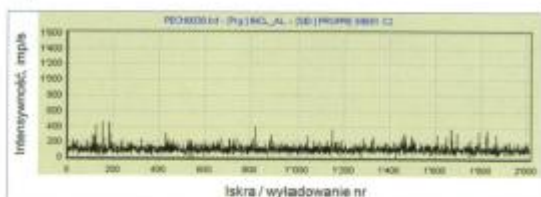
Rys. 15. Rozkład wartości intensywności O dla stopu B – duża liczba wtrąceń w osnowie



Rys. 16. Rozkład wartości intensywności O dla stopu A – mała liczba wtrąceń w osnowie



Rys. 17. Rozkład wartości intensywności B dla stopu B – duża liczba wtrąceń w osnowie



Rys. 18. Rozkład wartości intensywności B dla stopu A – mała liczba wtrąceń w osnowie

Brak impulsów o dużej wartości intensywności (rys. 12, 14, 16, 18), znacznie większej od wartości intensywności tła, świadczy o braku wtrąceń niemetalicznych w osnowie próbki A. Impulsy o dużej intensywności (rys. 11, 13, 15, 17) potwierdziły natomiast obecność wtrąceń niemetalicznych w osnowie próbki B. Uzyskane wyniki przedstawiono także w postaci liczby impulsów o dużej wartości intensywności pochodzącej od wtrąceń niemetalicznych (tabl. I).

Analiza wartości i liczby impulsów od poszczególnych pierwiastków potwierdza przyjęte założenia, że w próbce A brak jest wtrąceń niemetalicznych. Próbka B natomiast zawiera wtrącenia i jest w dużo większym stopniu zanieczyszczona.

Metoda spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym z zastosowaniem źródła wzbudzenia z rejestracją pojedynczych wylądowań i oprogramowania do pomiaru intensywności impulsów umożliwia także wykonanie analizy jakościowej wtrąceń niemetalicznych obecnych w mikrostrukturze stopów [6+17]. Spektrometry, np. typu

TABLICA I. Liczba impulsów dla próbki czystej (A) i zanieczyszczonej (B) wtrąceniami niemetalicznymi

Próbka	Liczba impulsów – program Spark-DAT			
	Na	Cl	O	B
A – czysta	7	4	9	39
B – zanieczyszczona (wtrącenia niemetaliczne)	144	141	111	48

ARL 4460, zastosowane do takich pomiarów wyposażone są w oprogramowanie do analizy chemicznej wtrąceń niemetalicznych. Wprowadzony układ pomiarowy umożliwia jednocześnie prowadzenie pomiarów i ich analizę za pomocą wielu kanałów analitycznych. Analiza intensywności impulsów dla wytypowanych linii pozwala na ustalenie, jakie pierwiastki tworzą w badanym stopie wtrącenia niemetaliczne.

Badania własne

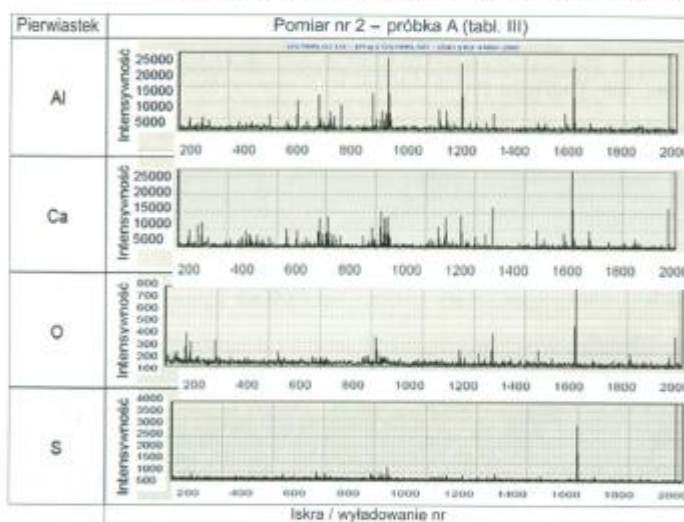
Analizę składu chemicznego stali niskostopowej prowadzono za pomocą spektrometru ARL 4460. Program Spark-DAT skonfigurowano w celu ustalenia intensywności linii analitycznych dla: Ca, O, Al, S i Ti. W tabl. II przedstawiono liczbę impulsów o intensywności świadczącej o występowaniu wtrą-

TABLICA II. Liczba impulsów charakterystycznych dla występowania wtrąceń niemetalicznych w badanej próbce stali niskostopowej

Pomiar	Pierwiastek – liczba impulsów, cps				
	Ca	O	Al	S	Ti
1	124	57	40	22	2
2	116	72	47	43	0
3	104	63	43	19	1
4	102	51	57	30	1
5	112	36	44	22	0
Wartość średnia	112	56	46	27	1
Odchylenie standardowe	9	14	7	10	1

ceń. Przyjęto wartość średnią z pięciu pomiarów oraz określono odchylenie standardowe.

Analiza uzyskanych wyników (tabl. II) wskazuje na obecność w stali wtrąceń cechujących się zawartością następujących pierwiastków: Ca, O, Al i S. Nie stwierdzono w badanej stali wtrąceń z zawartością Ti. Wykonanie kilku dodatkowych pomiarów umożliwia ustalenie położenia wtrąceń niemeta-



Rys. 19. Rozkład wartości intensywności impulsów pierwiastków Al, Ca, O i S, tworzących wtrącenia niemetaliczne w badanej stali

licznych na powierzchni badanej próbki. Próbę identyfikowania wtrąceń niemetalicznych podjęto na podstawie jednoczesnej analizy wykresów dla badanych pierwiastków i rozkładu wartości intensywności impulsów (rys. 19).

Na podstawie analizy uzyskanych rozkładów intensywności impulsów można stwierdzić, że jednocześnie występują intensywności o dużej wartości dla dwóch lub większej liczby pierwiastków (tabl. III). Stwierdzono także rozpad związku

TABLICA III. Liczba impulsów o wartości intensywności charakterystycznej dla wtrąceń niemetalicznych dla tego samego wylądowania w wybranych kanałach pomiarowych (rys. 19)

Pomiar nr	Rodzaj wtrącenia – liczba impulsów						
	CaO	CeS	AlO	AlCaO	CaO-Al	AlO-Ce	TiO
1	27	20	10	10	17	0	2
2	32	38	19	19	13	0	0
3	21	15	11	11	10	0	1
4	22	25	15	15	7	0	0
5	14	20	4	4	11	1	0
Wartość średnia	23	24	12	12	12	0	1
Odchylenie standardowe	7	9	6	6	4	0	1

chemicznego tworzącego wtrącenie niemetaliczne złożone z pierwiastków, dla których obserwowano duże wartości intensywności impulsów. Analiza prowadzona jednocześnie dla 32 kanałów analitycznych umożliwia ustalenie wzajemnej zależności pomiędzy nimi i pozwala na określenie rodzaju wtrąceń niemetalicznych obecnych w stopie.

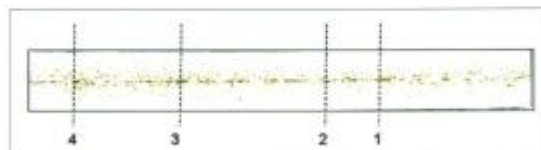
Analiza wyników (tabl. III, pomiar nr 2) wskazuje m.in. dużą intensywność impulsów dla linii Ca i O – 32 oddzielne wyładowania iskry. Jednocześnie obserwuje się dużą intensywność impulsów linii Al (19 wyładowań). Można więc stwierdzić, że wtrącenie złożone z pierwiastków Al, Ca i O (np. Al_2O_3 -CaO) występuje w 19 przypadkach wyładowań. Natomiast wtrącenie typu CaO – w 13 przypadkach. Nie stwierdzono natomiast dla żadnego wyładowania obecności impulsu o dużej intensywności tylko dla Al i O, z jednoczesnym brakiem dużej intensywności impulsu dla Ca. Brak jest więc wtrąceń typu tlenkowego Al_2O_3 . Występują także wtrącenia typu CaS – stwierdzono dużą intensywność impulsów Ca i S – dla 38 wyładowań. Zaobserwowano także obecność wtrącenia TiO (pomiar 1 i 3).

Możliwość oceny wtrąceń niemetalicznych w stopach metali metodą spektrometryczną zweryfikowano metodą klasyczną Baumana identyfikującą siarczki w stali. Do badań przyjęto próbki blach walcowanych na gorąco o grubości 30 mm ze stali niskostopowej S355J2+N. Analizę składu chemicznego wlewka wykonano metodą spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym z zastosowaniem spektrometru ARL 3460 (tabl. IV).

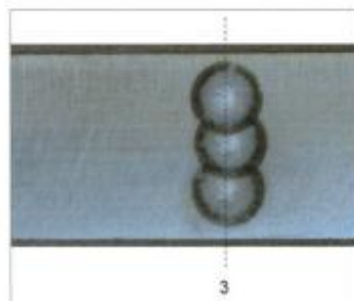
TABLICA IV. Skład chemiczny wlewka do walcowania na gorąco ze stali S355J2+N

Zawartość pierwiastków, %							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Mo
0,16	1,39	0,24	0,015	0,0047	0,035	0,14	0,018
Ni	Nb	V	Al	N	As	Sn	Ti
0,05	0,023	0,005	0,026	0,0081	0,005	0,008	0,002

Próbę Baumana wykonano dla próbek wyciętych z blach na przekroju poprzecznym do kierunku walcowania (rys. 20). Wykazała ona wyraźną obecność siarczków w środku przekroju blachy. Ustalono cztery przekroje blachy o największej zawartości siarczków. Wykonano trzy pomiary całkowitej zawartości siarki za pomocą spektrometru iskrowego ARL 2460 – dwa pomiary w pobliżu krawędzi i jeden pomiar w środku przekroju próbki (rys. 21 i tabl. V).



Rys. 20. Próba Baumana – widoczne siarczki w środku przekroju blachy



Rys. 21. Obraz próbki – widoczne obszary pomiaru zawartości siarki

Wyniki pomiarów zawartości siarki wskazują na większe jej stężenie w środku blachy w porównaniu z jej stężeniem przy krawędziach. Dla przekrojów blachy 1, 2, 3 i 4 wykonano

TABLICA V. Zawartość siarki na przekrojach próbki stali S355J2+N

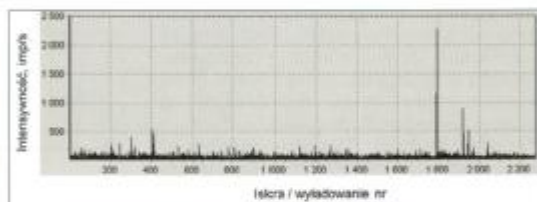
Przekrój	Zawartość siarki, %		
	Krawędź 1	Środek	Krawędź 2
1	0,005	0,007	0,005
2	0,004	0,006	0,005
3	0,005	0,010	0,006
4	0,006	0,009	0,006

TABLICA VI. Liczba impulsów od siarczków na przekroju blachy

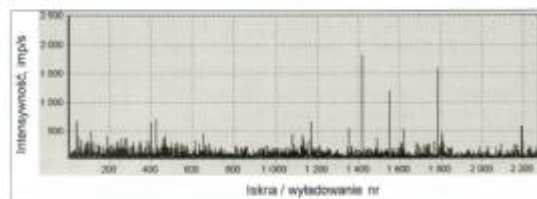
Przekrój	Liczba impulsów		
	Krawędź 1	Środek	Krawędź 2
3	138	323	122
4	136	345	100

pomiar zawartości siarki z zastosowaniem spektrometru ARL 4460 i oprogramowania Spark-DAT w laboratorium aplikacyjnym firmy Thermo Fisher Scientific. Ustalono liczbę impulsów (w przekrojach 3 i 4) pochodzących od siarczków (tabl. VI).

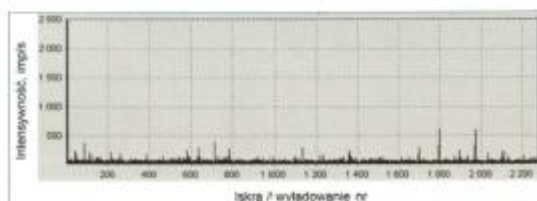
Analiza wyników badań (tabl. VI, rys. 22+27) potwierdza dwukrotnie większą koncentrację siarczków w środku blachy w porównaniu z krawędzią. Jednocześnie można stwierdzić, że analiza siarczków metodą spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym jest w pełni zgodna z rozkładem siarczków uzyskanym klasyczną metodą Baumana.



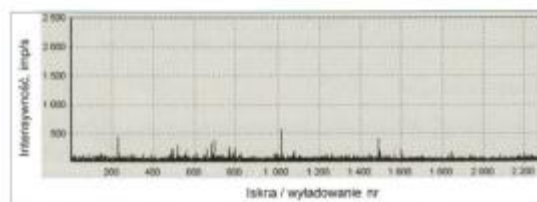
Rys. 22. Rozkład wartości intensywności dla S (przekrój 3, krawędź 1)



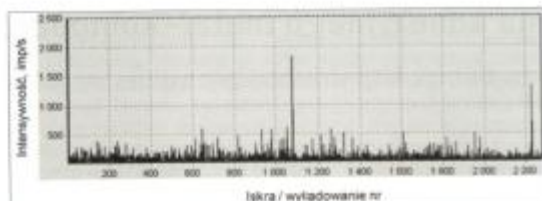
Rys. 23. Rozkład wartości intensywności dla S (przekrój 3, środek)



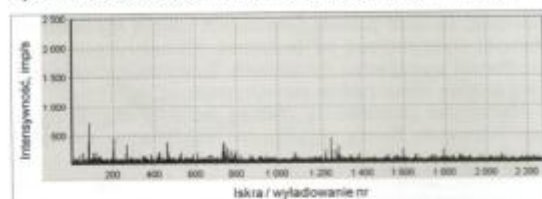
Rys. 24. Rozkład wartości intensywności dla S (przekrój 3, krawędź 2)



Rys. 25. Rozkład wartości intensywności dla S (przekrój 4, krawędź 1)



Rys. 26. Rozkład wartości intensywności dla S (przekrój 4, środek)



Rys. 27. Rozkład wartości intensywności dla S (przekrój 4, krawędź 2)

Podsumowanie

Metoda spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym, stosowana powszechnie do analizy składu chemicznego metali, po zastosowaniu specjalnego wyposażenia i oprogramowania pozwala na rozszerzenie swoich standardowych możliwości o charakterystykę wtrąceń niemetalicznych zarówno w stali, jak i w innych stopach metali. Metoda ta pozwala na szybką analizę i kontrolę wtrąceń niemetalicznych podczas prowadzenia procesu metalurgicznego. Podstawową zaletą zastosowania spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem iskrowym jest krótki czas uzyskania wyników, a także możliwość użycia standardowej próbki oraz standardowej metody jej przygotowania do pomiarów.

LITERATURA

1. Slickers K. "Automatic Emission Spectroscopy", Lausanne 1980.
2. Witkowska S., Muller E. „Poradnik chemika analityka”, t. 2. Warszawa: WNT, 1998.
3. Volker T. „Modern Spectrochemical Analysis of Metals”. ASM, 1996.
4. Cygański A. „Metody spektroskopowe w chemii analitycznej”. Warszawa: WNT, 2009.
5. „Series 3500 OES Optical Emission Spectrometer System”. Opracowanie firmy Baush & Lomb/ARL, Lausanne 1982.
6. Böhlen J.-M., Yellepedi R. „Improved spectrometry provides fast analysis for the steel industry”. *Steel Times International* (2010), April.
7. Böhlen J.-M., Yellepedi R. „Combined quantitative analysis and ultra fast analysis of non metallic inclusions by optical emission spectrometry”. *Millenium Steel* (2009).
8. Böhlen J.-M. „Optical emission spectrometry for control of cleanliness during steelmaking”. *Millenium Steel* (2005).
9. Eggiman P. „A new analysis tool for research and process control”. *Millenium Steel* (2000).
10. Li K., Halasz E., Böhlen J.-M. „Improved analysis of inclusion in aluminium with the ARL 4460 Spark-DAT”. *Aluminium* 7-2, (2011).
11. Li K., Halasz E., Böhlen J.-M. „Ultra fast quantitative analysis of non metallic inclusions in steel”. *Millenium Steel* (2011).
12. „Application Note 41232: Ultra fast analysis of inclusions in steel”. Materiały firmy Thermo Fisher Scientific, Lausanne 2011.
13. „Application Report: AR-OE-06-02. Ultra fast cleanliness assessment of aluminum samples with the ARL 4460 Spark-DAT”. Materiały firmy Thermo Electron, Lausanne 2006.
14. „Application Report: AR-OE-06-01. Ultra fast evaluation of non-metallic inclusions in low alloy steel samples with the ARL 4460 Spark-DAT”. Materiały firmy Thermo Electron, Lausanne 2006.
15. „Advanced ultra fast analysis of inclusion in steel. ARL 4460 Metals Analyzer with Spark-DAT advanced option”. Materiały firmy Thermo Fisher Scientific, Lausanne 2011.
16. „Ultra fast analysis of inclusions in aluminium and its alloys. ARL 4460 Metals Analyzer with Spark-DAT standard option”. Materiały firmy Thermo Fisher Scientific, Lausanne 2011.
17. „Application Report: AR-OE-06-02. Ultra fast cleanliness assessment of aluminum samples with the ARL 4460 Spark-DAT”. Materiały firmy Thermo Electron, Lausanne 2006.



kompozyt-expo

5. Targi Kompozytów, Technologii i Maszyn do Produkcji Materiałów Kompozytowych

20-21

listopada

2014

Kraków

- premiery, nowości i rewolucyjne technologie
- bogata kampania promocyjna Wystawców
- czołowi producenci i dystrybutorzy
- 2 dni intensywnych kontaktów B2B
- nowa lokalizacja – EXPO Kraków

jedyne
w Polsce
spotkanie
branży
kompozytów



Targi
w Krakowie

www.targi.krakow.pl

Biuro i tereny targowe:
Targi w Krakowie Sp. z o.o. EXPO Kraków
ul. Galicyjska 9, 31-586 Kraków
tel. 12 6445932, 6448345
biuro@targi.krakow.pl



www.expo.krakow.pl

www.kompozyty.krakow.pl