

DIAGNOSTYKA PROCESU KRZEPNIĘCIA ODLEWÓW ZE STOPÓW METALI METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

Maria GOLEC

**Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej
Zakład Dynamiki i Wibroakustyki Systemów
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. (061) 665 2302, fax. (061) 665 2307
e-mail: Maria.Golec@put.poznan.pl**

1. Wprowadzenie

Proces krzepnięcia polega na przechodzeniu odlewu ze stanu ciekłego w stan stały. Składa się on z okresów wydzielania poszczególnych faz, które zależą od rodzaju stopu i szybkości odprowadzenia ciepła z krzepnącego obszaru. Podczas procesu krzepnięcia występuje wiele zjawisk, które często decydują o powstającej strukturze a tym samym o właściwościach użytkowych odlewu. Są to między innymi: zjawiska skurczowe i kompensujący je przepływ masowy lub kapilarny, zjawiska segregacji, zjawiska wydzieleniowe i osadzania zanieczyszczeń, zjawiska konwekcyjne wywołane nierównomiernością pola temperatury w strefie ciekłej lub stało ciekłej, zjawiska skurczowe w stanie stałym lub prawie stałym powodujące występowanie stanu naprężeń i będące w konsekwencji przyczyną powstawania mikro- i makro- pęknięć w odlewie. Dla danego stopu intensywność tych zjawisk i ich rozkład są związane z kierunkiem i szybkością odprowadzania ciepła [1]. Aby przeciwdziałać negatywnym skutkom występowania tych zjawisk studiuje się mechanizmy ich powstawania. Wśród stosowanych obecnie metod badań podstawową rolę spełniają bezpośrednio badania eksperymentalne, prowadzone w całym czasie krzepnięcia odlewu, z wykorzystaniem różnych technik pomiarowych i wielkości fizycznych.

Rozwój numerycznych metod rejestracji i przetwarzania dużej liczby danych uzyskanych z pomiarów umożliwił stosowanie emisji akustycznej w badaniach procesu krzepnięcia odlewów ze stopów metali.

Ogólnie, pojęciem emisja akustyczna określane jest zjawisko polegające na powstawaniu i generowaniu fal sprężystych wewnątrz lub na powierzchni ośrodka. Powszechnie termin emisja akustyczna (stosowany skrót EA lub AE od angielskiego terminu acoustic emission) używany jest od początku lat sześćdziesiątych [2]. Termin ten obejmuje również metody badań, w których wykorzystuje się zjawisko EA.

Metoda EA stwarza nowe możliwości obserwacji procesów występujących w czasie krzepnięcia odlewów będących potencjalnymi źródłami emisji aku-

stycznej takich jak np. zarodkowanie i wzrost kolejnych faz, tarcie kryształów zawieszonych w cieczy podczas ruchów konwekcyjnych, grawitacyjnych i przemieszczania się fazy stało-ciekłej (np. podczas tworzenia się jamy skurczowej), wydzielanie się gazów, powstawanie pęknięć w stanie stało-ciekłym i w stanie stałym. Rejestracja i analiza sygnału EA odbieranego z krzepnącego obszaru odlewu stosowana jest jednak jeszcze sporadycznie. Związane jest to z występującymi problemami natury pomiarowej EA i z trudnościami podczas jednoznacznej interpretacji wyników badań.

2. Przebieg badań procesu krzepnięcia odlewów ze stopów metali metodą EA

W 1993 roku, w ramach realizacji projektu badawczego [3], zapoczątkowano w Politechnice Poznańskiej i w kraju badania emisji akustycznej w zastosowaniu do identyfikacji procesu krzepnięcia odlewów ze stopów metali.

W całym cyklu badań krzepnięcia odlewów, prowadzonych do chwili obecnej, stosowano równocześnie metodę EA i jako odniesienie znaną i szeroko stosowaną analizę krzywych stygnięcia krzepnących odlewów z analizą ich pierwszych pochodnych.. W pomiarach temperatury stosowano zawsze po dwa termoelementy NiCr-Ni połączone z centralą akwizycji danych firmy Schlumberger i z komputerem. Do odbioru sygnału EA stosowano po dwa falowody o przekroju od 1.5 mm do 3 mm i o długości od 200 mm do 300 mm (umieszczone wewnątrz krzepnącego odlewu) wykonane kolejno z wolframu, molibdenu i stali połączone z przetwornikiem EA poprzez stożek ze stali, z duraluminium lub z mosiądzu. Zatem podczas badań rejestrowano zawsze, z różnych obszarów krzepnących odlewów, temperaturę oraz krótkotrwałe impulsy EA na oscyloskopie cyfrowym i obwiednię sygnału EA na cyfrowym rejestratorze magnetycznym. Na drodze obliczeń numerycznych wyznaczano pochodną krzywej stygnięcia oraz różne deskryptory EA tzn.. pochodne zmian w czasie krzepnięcia (tempo i sumę zliczeń EA), pochodne przebiegów czasowych (maksymalną i średnią amplitudę EA), pochodne energii (wartość skuteczną EA), pochodne rozkładu

częstotliwościowego (widmo amplitudowo-częstotliwościowe EA).

Początkowo badano krzepnięcie odlewów ze stopów Pb-Sb (8%) i Al-Si (11.6%). Podczas badań wstępnych odlewy wykonywano w próbnikach z masy formierskiej na osnowie z piasku kwarcowego wiązanego spoiwem żywicznym. Podczas tych badań zaobserwowano wystąpienie zakłóceń EA występującej w procesie krzepnięcia odlewów. Naprężenia cieplne występujące w próbnikach powodowały powstawanie w nich mikro- i makro- pęknięć będących dodatkowym źródłem EA.

Aby uniknąć tej niedogodności, w dalszych badaniach odlewy wykonywano w stalowych próbnikach w kształcie walca oraz w formach w kształcie kuli (o średnicy 76 mm) z żeliwa szarego z układem doprowadzającym metal do formy.

Na podstawie analizy wyników badań krzepnięcia stopów Pb-Sb i Al-Si w cienkościennych (0.6 mm) próbnikach metalowych metodami analizy termicznej i EA stwierdzono, że proces krzepnięcia nie przebiegał równomiernie w poszczególnych obszarach objętości odlewu. Na krzywych przedstawiających sumę i tempo zdarzeń EA w czasie krzepnięcia odlewu ze stopu Pb-Sb nie można było zidentyfikować faz krzepnięcia:

- początek wydzielania fazy preeutektycznej,
- koniec przystanku temperaturowego w zakresie temperatury likwidus,
- początek przemiany eutektycznej,
- koniec przemiany eutektycznej.

W odlewie ze stopu Al-Si zaobserwowano dużą liczbę zliczeń zdarzeń EA w końcowej fazie przemiany eutektycznej.

Na podstawie analizy wyników badań testowych własności przenoszenia sygnału EA przez falowody wykonane z różnych materiałów, w dalszych eksperymentach (odlewy w kształcie kuli) stosowano już tylko falowody stalowe.

W wyniku badań krzepnięcia odlewów w grubościennych formach w kształcie kuli stwierdzono, że niektóre przemiany fazowe, zwłaszcza zachodzące w końcowym etapie krzepnięcia odlewu ze stopu Pb-Sb można zidentyfikować metodą EA. Początek krystalizacji odlewu tzn. wydzielanie się fazy przedeutektycznej stosunkowo łatwo zidentyfikować z krzywych temperaturowych a znacznie trudniej na podstawie analizy wartości deskryptorów EA. Natomiast jednoznaczna identyfikacja przemian fazowych w krzepnących odlewach ze stopu Al-Si była trudna z uwagi na odmienny charakter sygnału EA, aczkolwiek koniec przemiany eutektycznej w niektórych testach krzepnięcia był widoczny na krzywych przedstawiających sumę wartości skutecznej sygnału EA.

Rezultaty badań prowadzonych w ramach powyższego projektu badawczego prezentowane były w różnym zakresie na kilku konferencjach krajo-

wych [4 – 8] i konferencjach zagranicznych [9, 10]. Zostały również omówione w pracach [11 – 13].

Po zakończeniu realizacji projektu badawczego [3] kontynuowano badania krzepnięcia odlewów ze stopu Pb-Sb uwzględniając przede wszystkim zagadnienie akwizycji i przetwarzania sygnału EA [14] i rozszerzając badania impulsów EA i ciągłej EA o analizę w dziedzinie częstotliwości [15]. Stwierdzono, że zmianom struktury odlewu ze stopu Pb-Sb towarzyszą istotne zmiany składowych w widmie impulsów EA. Mniej wyraźne zmiany obserwowano w widmie ciągłej EA. Zbyt mała liczba zarejestrowanych impulsów EA generowanych w różnych fazach krzepnięcia nie pozwoliła dokonać pełnej identyfikacji faz krzepnięcia.

W ramach projektu badawczego [16] kontynuowano badania w zakresie oceny możliwości zastosowania metody EA do badań procesu krzepnięcia odlewów ze stopów metali. W celu oceny zawartości informacyjnej w sygnale EA o zjawiskach zachodzących w czasie krzepnięcia próbek ze stopu technicznego Wooda, ze stopu aluminium AK9 i ze stopu cynku Z41 prowadzono równocześnie badania metodą analizy termicznej. Metoda analizy termicznej, stanowiła odniesienie do interpretacji wyników analizy EA. Badaniami metodą analizy termicznej zajmował się zespół w składzie Z. Ignaszak, A. Baranowski i M. Hajkowski z Instytutu Technologii Materiałów, Zakład Odlewnictwa Politechniki Poznańskiej.

Badania krzepnięcia odlewu ze stopu Wooda prowadzono w próbnikach metalowych – pojemnikach walcowych, o grubości ścianki ok. 0.7 mm, średnicy wewnętrznej ok. 40 mm i pojemności ok. 100 cm³. W celu określenia wpływu intensywności chłodzenia odlewów na proces krzepnięcia kolejno badano:

- krzepnięcie odlewu w pojemnikach metalowych chłodzonych na wolnym powietrzu,
- krzepnięcie odlewu w pojemnikach metalowych chłodzonych w kąpeli wodnej o temperaturze początkowej 20⁰ C,
- krzepnięcie odlewu po nagraniu próbniaka i jego chłodzeniu w kąpeli wodnej.

Stwierdzono, że

- proces krzepnięcia odlewu w próbniku metalowym jest mało stabilny tzn. przebieg krzywej stygnięcia zależy nie tylko od temperatury zalania stopu, ale także od temperatury początkowej formy i stosunku objętości stopu do objętości kąpeli wodnej,
- podczas krzepnięcia odlewu na wolnym powietrzu oraz podczas nagrzewania i studzenia w kąpeli wodnej proces krzepnięcia trwa długo i trudne jest określenie charakterystycznych temperatur stopu - temperatury likwidus i solidus oraz końca krzepnięcia stopu.

Zatem aby uniknąć niestabilności procesu krzepnięcia odlewu i zoptymalizować czas trwania krzepnięcia, w późniejszych eksperymentach postanowiono badać krzepnięcie odlewów w grubościennych formach metalowych (kokilach).

W dalszych badaniach, kształt odlewu przyjęto w postaci stożka ściętego, który krzepł w kokili wymuszającej krzepnięcie kierunkowe poprzez zróżnicowanie materiałów części składowych kokili. Poprzez zmianę kształtu kokili wymuszano stygnięcie odlewu – stygnięcie swobodne (odlew – stożek) lub stygnięcie ze skurczem hamowanym (odlew – stożek z pierścieniami). Badania procesu krzepnięcia odlewów przeprowadzono w różnych warunkach eksperymentu. Odlewy ze stopu AK9 badano:

- ze skurczem swobodnym podczas stygnięcia, dla różnych temperatur początkowych formy: (20 - 22) °C, 155 °C, 270 °C,
- ze skurczem swobodnym podczas stygnięcia, ze stopu zagazowanego poprzez wprowadzenie pary wodnej do stopu w tyglu za pomocą nawilżonej wodą bawełny, dla początkowej temperatury formy: (20 - 22) °C,
- ze skurczem hamowanym podczas stygnięcia, dla początkowej temperatury formy: (20 - 22) °C.

Odlewy ze stopu Z41 badano dla stałej temperatury formy: (20 - 22) °C, zmieniając sposób przebiegu skurczu: skurcz swobodny i hamowany.

Stosowane procedury analizy sygnału EA i ważniejsze wyniki badań krzepnięcia odlewów realizowanych w ramach projektu badawczego [16] referowano na kilku konferencjach.

W [17] przedstawiono problemy związane z przetwarzaniem sygnału EA w dziedzinie czasu, amplitud i częstotliwości.

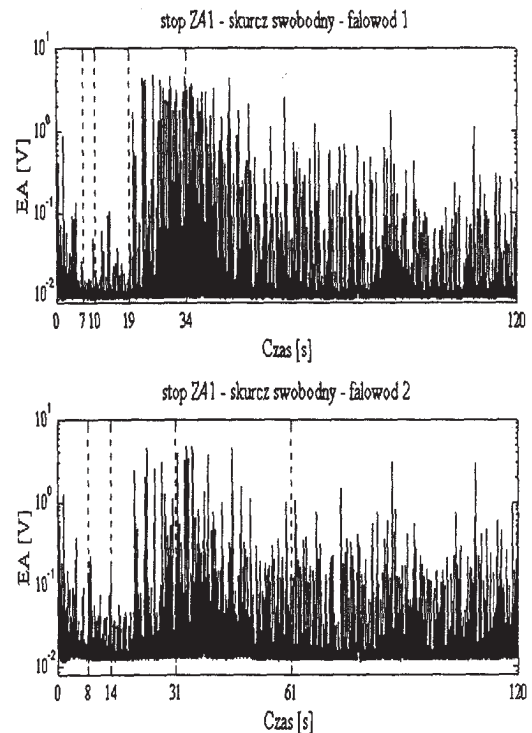
Omówiono możliwości wnioskowania o procesie krzepnięcia odlewów na podstawie kilku descriptorów obwiedni sygnału EA takich jak: przebiegi czasowe, suma wartości skutecznej i suma zdarzeń obwiedni sygnału EA oraz na podstawie analizy amplitudowych widm sygnału EA. Przedstawiono specjalnie opracowane procedury wyznaczania w środowisku MATLAB® zastosowanych descriptorów EA.

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań krzepnięcia odlewów metodą EA stwierdzono, że poszczególne deskryptory EA zawierają różne informacje o charakterystycznych momentach procesu krzepnięcia odlewów.

Na przebiegach czasowych obwiedni EA krzepnących odlewów ze stopu Z41 (rys. 1): można było obserwować kinetykę krzepnięcia odlewu, a zwłaszcza czas zakończenia krzepnięcia w dolnym i górnym obszarze odlewu. Jednak było to możliwe tylko do momentu, gdy nie wystąpiło źródło EA zakłócające obserwowany proces. I tak, emisja akustyczna od odkształcenia plastycznego warstwy już

zakrzepłej zakłóca obserwację końca krzepnięcia w górnym obszarze odlewu.

W większości przypadków czas uzyskania przez dany stop temperatury likwidus oraz przemian fazowych pokrywał się z czasem wystąpienia przegięć na krzywych sum wartości skutecznej obwiedni i sum zdarzeń emisji akustycznej. Na podstawie analizy kształtu tych krzywych można było określić charakterystyczne momenty procesu krzepnięcia



Rys. 1. Obwiednie sygnałów EA odlewu ze stopu Z41

W [18] podjęto próbę pokazania możliwości wykorzystania metody EA do obserwacji tworzenia się struktury pierwotnej w odlewach (struktury metalograficznej powstającej podczas krzepnięcia i zachowującej swoją postać do przemiany alotropowej – eutokoidalnej).

Stwierdzono, że w poszczególnych fazach krzepnięcia odlewów ze stopów AK9 i Z41 zjawiska emisji akustycznej występują z różną intensywnością. Jednoznaczna identyfikacja faz krzepnięcia nie była jednak możliwa. Jedynie koniec procesu krzepnięcia w badanych obszarach odlewów został wyraźnie odzwierciedlony wzrostem intensywności EA.

W pracy [19] pokazano, że naprężenia cieplne i towarzyszące im odkształcenia plastyczne powstające podczas krzepnięcia i stygnięcia odlewów ze stopów metali są źródłem EA. Dla stopów, których faza α odkształca się przez poślizg istnieje możliwość określenia początkowej temperatury

formy odlewniczej zapewniającą minimalizację naprężeń cieplnych w odlewie wykorzystując analizę EA (np. w odlewie ze stopu AK9). W warunkach przeprowadzonego eksperymentu, w celu minimalizacji skokowego odkształcenia plastycznego materiału i wynikających stąd mikro- i makropęknięć, początkowa temperatura formy powinna być wyższa od 155°C a niższa niż 270°C.

3. Literatura

- Leda H.: Wprowadzenie do inżynierii materiałowej. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993.
- Malecki I Ranachowski J.: (red) Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania . IPPT PAN, Warszawa 1994.
- Praca zbiorowa.: Zjawiska emisji akustycznej (EA) w identyfikowaniu i badaniu krzepnięcia i krystalizacji stopów metali, Sprawozdanie końcowe z badań PB 1244/S2/93/04, Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, Poznań 1994.
- Z. Ignaszak, A. Baranowski, M. Golec: Consideration Concerning the Correlation of Solidification Mechanisms and Their Acoustic Emission (AE). XVIIth Symposium Vibrations in Physical Systems, Poznań-Błażejewko, May 26-28 1994, 155-156.
- M. Golec, Z. Ignaszak, A. Baranowski: Application of Acoustic Emission to the Investigations of Solidification of Casted Metals and Alloys. XVIth Symposium Vibrations in Physical Systems, Poznań-Błażejewko, May 26-28 1994, 137-138.
- M. Golec, C. Cempel, Z. Golec: Emisja akustyczna w procesach krzepnięcia stopów Pb-Sb i Al-Si. XLII Otwarte Seminarium z Akustyki, Warszawa-Białowieża, 1995, 547-552
- M. Golec, C. Cempel, Z. Golec.: Miary sygnału emisji akustycznej przydatne w identyfikacji krzepnięcia stopów metali. III Krajowa Konferencja „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”. Szczyrk 10 – 13 października 1995. Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa 1995, 97-104.
- M. Golec, Z. Golec, C. Cempel, Z. Ignaszak, A. Baranowski: Emisja akustyczna w badaniach krzepnięcia stopów metali. XXIV Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących Poznań-Kiekrz 24-26.10.1995, 49-58.
- Z. Ignaszak, M. Golec, A. Baranowski, Z. Golec: Study on Identification of Phenomena in Solidifying Alloys with the Use of Complex Methods Including Thermal Analysis and Consideration of the AE Signals. 1994 IEEE International Ultrasonics Symposium, Cannes, France, November 1-4, 1994, 1121-1124.
- M. Golec, Z. Golec, Z. Ignaszak, A. Baranowski: Application of Acoustic Emission for Purposes of Identification of Pb-Sb(8%) Alloy Solidification. Ultrasonics World Congress 1995. Proceedings of the World on Ultrasonics, Berlin, Germany September 3-7. 1995, 527-530.
- M. Golec: Zjawiska emisji akustycznej w identyfikacji i badaniu krzepnięcia i krystalizacji stopów metali. Akustyka w Technice, Medycynie i Kulturze. Seminarium, Kraków, 7-9. 11.1995. Granty KBN realizowane w latach 1993-1995, 189-192.
- Z. Ignaszak, M. Golec, A. Baranowski, Z. Golec: Identification of Phenomena in Solidifying Alloys using Thermal Analysis and Acoustic Emission. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyki, Vol. 15 nr 1 1995, 41-49.
- Z. Ignaszak, M. Golec, Z. Golec: The Comparison of Methods Non-Ferrous Alloys Solidification Testing by Means of Thermal Analysis and Acoustic Emission. Archives of Metallurgy, Vol. 43, 1998, Issue 4, 329-340.
- M. Golec Acquisition and Processing of Acoustic Emission Signal for Purposes of Investigation of Solidification of Alloys. XVIIth Symposium Vibrations in Physical Systems, Poznań-Błażejewko, May 22-25 1996, 136-137.
- M. Golec, Z. Golec: Analiza częstotliwościowa emisji akustycznej w zastosowaniu do badania krzepnięcia stopów metali. w: Nowe kierunki technologii i badań materiałowych. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Politechnika Warszawska Wydział Technologii Chemicznej, Warszawa 1999, 65-72.
- Praca zbiorowa.: Emisja akustyczna jako narzędzie badania procesów krzepnięcia i krystalizacji stopów metali, Sprawozdanie końcowe z badań PB Nr 7 T07B 005 09, Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej, Poznań 1998.
- Z. Golec, M. Golec: Deskryptory sygnałów emisji akustycznej generowanej w czasie krzepnięcia odlewów ze stopów metali, II Krajowa Konferencja „Metody i systemy komputerowe w badaniach naukowych i projektowaniu inżynierskim, Kraków 25-27.1999.
- M. Golec, Z. Golec, M. Hajkowski, A. Baranowski: Emisja akustyczna podczas tworzenia się struktury pierwotnej w odlewach ze stopów metali. Vol. VII – Structural Acoustics & Vibrations for Technology. Kraków – Zakopane, April 19 – 20, 1999, 77-80.
- M. Golec, Z. Golec, M. Hajkowski: Zastosowanie emisji akustycznej do określenia początkowej temperatury formy odlewniczej. XLVI Otwarte Seminarium z Akustyki OSA'99 Kraków – Zakopane 14 – 17 września 1999, str. 225 – 228.