

Uwarunkowania i perspektywy badań nieniszczących odlewów przed poddaniem ich eksploatacji, cz. I

Conditions and perspectives for non-destructive testing of castings before they service, part I

Streszczenie

W ostatnich kilkunastu latach postawiono na optymalizowanie rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych, stosując metody symulacji procesów odlewania i naprężeń w eksploatacji odlewów. Wyniki badań nieniszczących służyły do walidacji modeli użytych w systemach symulacyjnych. W niniejszym artykule porównano stan aktualny oczekiwań wobec badań nieniszczących odlewów surowych i po obróbce, z trendami jakie pojawiają się w odlewnictwie światowym i w optymalizowaniu warunków odbioru, zgodnie z wymaganiami eksploatacyjnymi. Jako przykład dla odlewu testowego belki o wymiarach 160x1600x1200 mm z nieciągłościami i bez nieciągłości, zasygnalizowano jak można wykorzystać wyniki tomografii UT-3D (*phased array*) do identyfikacji rzeczywistego rozkładu nieciągłości oraz jak można to uwzględnić podczas obliczeń symulacyjnych. Umożliwia to precyzyjniejsze szacowanie mapy naprężeń i wskazuje realną drogę do efektywnego zoptymalizowania konstrukcji odlewu i technologii odlewania.

Abstract

During over a dozen years the technological solutions to optimize the design using the method of casting process and stress simulation in the casting life were realized. The NDT results were used to validate models used in simulation systems. This article compares the current state expectations for non-destructive testing of raw castings and after machining with the trends emerging in the global foundry industry, and optimizing the conditions for acceptance in accordance with operational requirements. As example, for the test beam casting (dimensions – 160x1600x1200 mm), with discontinues and without discontinues occurrence, were signalized how it can be exploit the UT-3D tomography (*phased array*) results to determine the real discontinues distribution and how it can be consider in stress simulation during exploitation period. It enables more accurate estimation of stresses map and indicates real way to effective castings construction and technology optimization.

Wstęp

Kierujący zamawianym całym projektem PBZ-KBN-114/T08/2004 prof. J.Sobczak, dyrektor Instytutu Odlewnictwa w Krakowie, we wstępie do podsumowującej monografii [1] napisał: „Obecnie 90% wszystkich dóbr i artykułów przemysłowych w takiej czy innej formie zawiera w sobie odlewy, począwszy od aparatów latających, samochodów poprzez potężne urządzenia energetyczne, a skończywszy na telefonach komórkowych i komputerach” i dalej „... w ostatnim czasie następuje powrót do technologii tradycyjnych, w tym zwłaszcza odlewnictwa. Przejawia się to nie tylko boorem w wielkości produkcji odlewniczej i roz-

kwitem wielu tworzyw odlewniczych, ale również za uważalnym zwrotem ku kierunkom poznawczym”.

Mówiąc o nowoczesnych tworzywach i procesach technologicznych w odlewnictwie, ich projektowaniu, aplikacjach i sterowaniu jakością [2], nie sposób pominąć wykorzystania metod NDT do badania odlewów jako podstawowych komponentów niezliczonej ilości konstrukcji i obiektów technicznych. Należy przy tym wskazać na znaczenie tych metod nie jedynie jako sposobu arbitralnej oceny wybranych cech, świadczących o jakości odlewów, ale także w celu identyfikacji zjawisk odpowiedzialnych za wykryte anomalie przebiegu procesów wytwarzania, co służy ewidentnie optymalizacji i doskonaleniu stabilności parametrów procesu odlewania. Prowadzi to do rozwoju poszczególnych technologii odlewniczych. Takie stwierdzenie jest obowiązujące także w innych obszarach badań produkcyjnych, innych technologii i materiałów.

Zenon Ignaszak – Politechnika Poznańska, Joanna Ciesiółka – Jotez.

Cykl artykułów i prezentacji [3÷12] przedstawianych w latach 2001÷2010 na dziesięciu Ogólnopolskich Seminariach prof. J. Deputata oraz dwóch KKBN (2005 i 2009) [13÷16] były okazją nie tylko do podzielenia się wynikami realizowanych prac, ale również cennych wymian poglądów z uczestnikami tych wydarzeń. Czy można powiedzieć, że tworzenie lobby NDT wokół krajowej branży odlewniczej jest na właściwej drodze, jak to już się stało w niektórych krajach europejskich, w tym we Francji?

Użyte w artykule sformułowania mogą być dla niektórych czytelników truizmami, ale doświadczenie autora współpracującego z odlewniami europejskimi pokazuje, że o synergii i sprzężeniach między parametrami produkcyjnymi i kontrolą jakości, a zwłaszcza wynikami badań NDT należy mówić w obu środowiskach: technologów w odlewni i specjalistów badających tam odlewy [8]. Także wśród znakomitych gremiów fachowców laboratoriów i firm specjalizujących się w badaniach nieniszczących, zgodnie z ich zakresem uprawnień i stawiających na uniwersalności oferowanych usług. Okazuje się niekiedy, że ten postulat tak oczywisty jest w pewnych przypadkach rozumiany dość powierzchownie [9].

Należy stymulować korelację obu tych zakresów wiedzy praktycznej, popartej solidnymi podstawami teoretycznymi. A uniwersalność specjalizacji wspomnianych laboratoriów powinna przynosić dodatkowe korzyści [14].

Przenoszenie wyników produkcyjnych badań nieniszczących (zachowanych w archiwach odlewni, z kopią dla klienta) na walory eksploatacyjne i degradację jakości odlewów z upływem czasu, a więc na wybór metod i częstotliwość badań nieniszczących w okresie eksploatacji wyrobu odlewanego [10], powinna być zdefiniowana a priori przez klienta (konstruktora).

Tendencje do uproszczeń i formalizmów odciskających się na kryteriach odbioru, daje się niestety odczuwać podczas negocjacji warunków odbioru odlewów, a pojawiające się jeszcze czasami w warunkach odbioru pojęcie „odlew bez wad”, świadczące o kulturze technicznej umawiających się stron (odlewnia lub/i odbiorca odlewów), nie nadążającej za światowymi trendami. Są to przypadki coraz rzadsze, ale jeszcze ilościowo znaczące (w jednej z odlewniczych grup europejskich oceniane na 20% przypadków klientów). W kraju jest to znacząco więcej i często dotyczy odlewów zamawianych przez odbiorców zagranicznych, gdyż odlewnie niechętnie podejmują negocjacje na temat dopuszczalnego poziomu wad w odlewach, obawiając się utraty zamówienia od klienta.

Specyfika struktur wyrobów powstałych ze stopu w stanie ciekłym

Jednorodność fizyko-chemiczna stopu w stanie ciekłym, wyjąwszy rzadki przypadek segregacji ciężarowej składnika stopowego, nie gwarantuje w żadnym

przypadku przeniesienia tej cechy na wlewki czy odlew uzyskany po krystalizacji (krzepnięciu). Nie wchodząc w szczegóły złożonych procesów towarzyszących tej transformacji, należy zdać sobie sprawę, że na końcową strukturę i właściwości konkretnego wyrobu odlewanego i dla konkretnego stopu wpływa:

- wsad metalowy, jego pochodzenie, scenariusz topienia, obróbki piecowej i pozapiecowej ciekłego stopu,
- czystość kadzi i sposób jej przygotowania do odlewania,
- wielkość odlewu i liczne parametry technologiczne dotyczące formy, w tym rodzaj formy odlewniczej (trwałe / nie trwałe), użyte materiały do budowy formy, wielkość nadlewów, typ układu wlewowego i parametry wypełniania wnęki formy,
- prace wykończeniowe odlewu, w tym sposób usuwania nadatków technologicznych i napraw, głównie metodami spawalniczymi,
- parametry obróbki cieplnej odlewu po naprawach.

Świadomość tego wpływu to także ilościowo określony zakres tolerancji dla poszczególnych parametrów produkcyjnych (z naciskiem na ich ilość w procesie i stabilność rozłożoną w czasie, stanowiącą o poziomie technicznym odlewni i jej załogi).

Choć jest to truizmem, powiedzmy to sobie jeszcze raz. Oczekiwanie od wyrobów odlewanych struktury o jednorodności rozłożenia i wielkości faz składowych, włączywszy w to niepożądane fazy i wtrącenia pochodzące z procesu przetwarzania, identycznie jak w przypadku wyrobów uzyskanych za pomocą przeróbki plastycznej (odkuwek, wyrobów walcowanych) nie wpisuje się w profesjonalizm stron negocjujących. Istnieje zatem granica ścisłości struktury i stopnia jej porowatości do której konkretny odlewny wyrób może się zbliżyć. Praktycznie nigdy nie osiągnie on tych cech dla typowego wyrobu handlowego (blachy, pręty, rury, kształtowniki itd.) jaki można zakupić w hurtowniach. Wykluczmy z tych rozważań wyroby odlewane uzyskiwane za pomocą technologii specjalnych, jak np. odlewanie tiksotropowe, odlewanie z kierunkową krystalizacją. Stanowią one mimo znakomitych właściwości mechanicznych, margines w technologiach odlewania dominujących w produkcji odlewów użytkowych i są przeznaczone do bardzo specjalnych detali, o dość prostym kształcie i ograniczonych wymiarach. Nigdy nie wyprą technologii klasycznych, także ze względu na cenę ich realizacji. Takie rozumowanie nie oznacza, że w każdej z tych technologii poziom granicznie osiągalnej doskonałości (jakości) jest jednakowy w danej odlewni. Jego zróżnicowanie zależy poziomu technicznego kadry odlewni i jej umiejętności oraz warunków realizacji zamówienia.

Ważność problemów niejednorodności struktury, jej ścisłości i lokalności właściwości mechanicznych zmienia się wraz z wielkością odlewu. Gradient tych właściwości jest trudny do oszacowania a priori, na etapie konstruowania wyrobu odlewanego. Stąd rola inżynierii wirtualnej [3÷5], dobrze osadzonej w realiach, tzn. stosującej systemy symulacyjne poddane uprzednio procesowi

walidacji eksperymentalnej i ocenione jako spełniające wystarczająco oczekiwania użytkowników. Najlepiej, jeżeli walidacja jest realizowana wewnętrznie w odlewni przez zespoły bezpośrednio związane z technologią odlewania, współpracujące z zespołami NDT w odlewniach i konstruktorami, i pod nadzorem lidera projektu.

Kryteria formalne/nieformalne jakości wyrobów odlewanych

Postawmy pytanie – co stanowiło podstawy, kiedy formułowano przed wielu laty kryteria wadliwości odlewów i kiedy tworzono wzorce, służące potem jako odniesienie do definiowania klas wadliwości RT i UT. Poza przypadkami wad oczywistych, szczególnie wad odkrywanych metodami wizualnymi przed lub po obróbce mechanicznej, należy podziwiać intuicję inżynierską naszych poprzedników, którzy tak jednoznacznie definiowali klasy jakości odnośnie wad wewnętrznych. Należy, bo w dalszym ciągu te kryteria są obowiązujące i służą definiowaniu stref jakości w odlewie, stanowiąc dla operatorów badań NDT rodzaj kanonu – kodeksu jakości. Szczególnie jeśli chodzi o nieciągłości wewnętrzne, niemożliwe do odkrycia w inny sposób jak przez badania niszczące lub po operacjach obróbki skrawaniem.

Normy stanowiące podstawy formułowania warunków odbioru są na dzień dzisiejszy takim obowiązującym kodeksem jakości w badaniach nieniszczących odlewów. Formułując wymagania wg klas przynajmniej jednej z tych norm, zamawiający (klient) intuicyjnie przyjmuje lepszą klasę dla stref poddawanych obróbce skrawaniem.

Na ile są one już na wstępie wykładnią nadjakości odlewu, czyli osiągnięcia klasy lepszych o 1-2 poziomy niż klasa wymagana?

Istnieją jako przeciwwaga kryteria nieformalne wychodzące poza te normy i te są przedmiotem osobnych ustaleń między zamawiającym a odlewnią. Obie strony są wtedy świadome oczekiwań konstruktora i możliwości technologii odlewniczych. Autor zna przypadki kiedy klient odlewni (często spoza kraju) bez uzasadnienia i z „ostrożności procesowej” celowo zawyża klasy jakości wyszczególnione w warunkach odbioru odlewów. Odlewnia oczekując na uzyskanie zamówienia rezygnuje z profesjonalnej negocjacji. Autor uczestniczył jako konsultant w spotkaniach renegocjacyjnych z takimi klientami jako pełnomocnik krajowych odlewni. Za każdym razem udawało się przekonać klienta do zracjonalizowania jego wymagań.

Klasy jakości wg norm mają sprecyzowane kryteria ilościowe (np. EN 12680 dla wskazań UT) czy pseudoilościowe (porównawczo wg ASTM dla badań RT, na zasadzie porównania obrazów, z dużą dozą dowolności w interpretacji). W [15,16] zaproponowano formalną komputerową kwantyfikację procedury identyfikacji i oceny dla metody RT.

Ewidentne błędy w sztuce odlewniczej są łatwe do wykrycia metodami NDT [9, 10]. Sztandarowy przykład

to duże wady wewnętrzne pochodzenia skurczowego (jamy i makroporowości skurczowe). Te są relatywnie łatwe do wyeliminowania na drodze zabiegów metalurgiczno-technologicznych. Znacznie trudniej dokonać tego w zakresie eliminacji mikroporowości i to zależy od rodzaju odlewanej stopy. Podobnie rzecz się ma np. ze strukturami żeliw. Struktury łatwo rozróżnialne, identyfikowalne na drodze badań UT np. różniące się struktury z grafitem płatkowym i sferoidalnym [17, 18]. Podobnie łatwe do zidentyfikowania i oceny są skupiska wtrąceń niemetalicznych w odlewach żeliwnych, np. typu „dross” [19]. Ale już znacznie trudniej, by nie powiedzieć wprost, że w praktyce przemysłowej niemożliwe, jest zlokalizowania za pomocą metod UT i RT rozmiarów stref struktury z grafitem zdegenerowanym („chunky”) w grubościennych, ciężkich odlewach z żeliwa sferoidalnego [9]. A jest to stawiane jest przez niektórych klientów odlewni jako warunek odbiorowy, trudny do uzyskania. Pozostają wtedy do wykonania badania niszczące (np. przez trepanację próbek ze stref grubościennych).

W [9] podjęto również istotne zagadnienie nieprawidłowości w szacowaniu nieciągłości („Przykłady i analiza błędów w identyfikacji rodzajów nieciągłości w odlewach”). W opracowanej tablicy zestawiono nazewnictwo z normy [20], z podręcznika [21] z propozycją autorów (propozycja uporządkowania nazewnictwa i obszaru interpretacji wad odlewniczych przekazana przez autorów do UDT Cert w lutym 2006).

W [22] umieszczony został cenny zapis dokonany przez autora, ponieważ dotyczy on związków badań produkcyjnych i eksploatacyjnych [23]. Amianowicie (cytat): „...Procesy technologiczne wytwarzania, ich projektowanie i przebieg oraz zastosowane urządzenia produkcyjne i oprzyrządowanie, a także ich stan, mają istotny wpływ na jakość wyrobów.

Istotne znaczenie ma również:

- rodzaj materiału zastosowanego do wytwarzania określonego wyrobu,
- właściwości materiału, które pozwolą wytworzyć z niego wyrób bez pogorszenia w istotny sposób jego cech użytkowych.

Wykrywanie wad w wyrobach i ocena ich jakości są możliwe tylko wtedy, gdy wykonujący badanie posiada informację o:

- rodzaju wyrobu,
- rodzaju materiału, z którego wyrób wykonano, a co za tym idzie o jego właściwościach,
- procesie technologicznym wytwarzania wyrobu,
- wymaganiach jakościowych wyrobu.

Znajomość tych elementów i zagrożeń dla jakości wyrobu z nich wynikających, pozwala na zaplanowanie odpowiednich badań w zależności od wyrobu i materiału, z którego został wytworzony oraz rodzaju spodziewanych wad. Dzięki temu możliwe jest wykrycie i identyfikacja wad, a w konsekwencji ustalenie przyczyn ich powstawania. ...” (koniec cytatu).

W opracowaniu „Elaboration du cahier des charges” stowarzyszenia Organisation Professionnelle des Industries de la Fonderie / Trade Organisation of the

Foundry Industry (92038 Paris La Défense Cédex) podano poniżej przedstawiony scenariusz, jakim powinien kierować się projektant-twórca koncepcji konstrukcyjnej wyrobu odlewanego [24]. Powinien on wstępnie wybrać stop (stopy) w funkcji kształtu i wymiarów wyrobu odlewanego, danych mechanicznych i innych uważanych przez niego jako ważne w eksploatacji, w odniesieniu do ceny stopów i wskazanej technologii. To wstępne studium powinno go doprowadzić do określenia materiałowego zarysu koncepcji, listy stopów, jednej lub kilku technologii. Ostatecznie, definitywny wybór sposobu formowania jest pozostawiony technologowi-odlewnikowi lub jest z nim uzgadniany (tabl.).

Jeżeli specyfikacja jakościowa nie została zdefiniowana przez zamawiającego precyzyjnie, odlewnia powinna co najmniej zapewnić zgodny z zamówieniem gatunek stopu (właściwości określane na próbce przylanej lub osobno lanej) oraz zgodność wymiarową, a także co najmniej zachowanie najniższych klas jakości wg norm na podstawie badań wizualnych. Coraz rzadziej spotyka się takie nieprofesjonalne podejście klientów odlewni (wykluczmy tutaj cytowane wyżej wygórowane oczekiwania zapisywane w warunkach odbioru jako „odlew bez wad” – jako przypadek odosobniony i szczególnie nieuprawniony).

Jak jednak utworzyć funkcjonalną specyfikację jakości? Powinna ona zawierać:

- pełną dokumentację rysunkową i specyfikacje definiujące precyzyjnie czemu ma sprostać odlew produkcyjny w odniesieniu do istniejących norm, a także do warunków szczególnych eksploatacji,

Tablica. Wytyczne opracowania specyfikacji wyrobu (na podstawie [24])
Table. Guidelines for the development of product specification (based on [24])

Hasło	Opis, parametr
Funkcja eksploatacyjna spełniana przez odlew	Krótką definicją
Wyężenie mechaniczne	Średnia wytrzymałość Podwyższona lokalnie wytrzymałość Szczególne wyężenia statyczne i/lub dynamiczne (udary, obciążenia zmęczeniowe, itp) Tarcie i trybologia (na sucho, w warunkach smarowania), erozja, ścieranie
Oddziaływania fizyko-chemiczne	Temperatura eksploatacji (udary cieplne) Szczelność (ciśnienie płynu podczas prób szczelności) Korozyja (natężenia, inicjacja) Wibracje Szczególne właściwości fizyczne (siły magnetyczne, oporność elektryczna, dylatacja, przewodność cieplna, ...) Wygląd (malowanie, estetyka kształtu)
Eksploatacja – montaż/demontaż	Utrzymanie w eksploatacji, demontaż Stan powierzchni
Szczególne ograniczenia	Wymiary gabarytowe i ciężar Prace spawalnicze (montażowe, naprawcze) Obróbka mechaniczna (skrawaniem)
Uwarunkowania ekonomiczne	Odlew jednostkowy, prototyp, seria, powtarzalność serii, ilość, terminy

- zakres badań kontrolnych jakości wewnętrznej w celu wykrycia ewentualnych wad niewykrywalnych wizualnie; powinno być to zdefiniowane w okresie opracowywania koncepcji konstrukcyjnej i technologicznej odlewu.

Jest rzeczą zasadniczą, aby autor koncepcji konstrukcyjnej odlewu, składający zamówienie oraz technolog w odlewni znaleźli kompromis między ceną i użytecznością w warunkach eksploatacji, z zachowaniem świadomie wybranych współczynników bezpieczeństwa nie mierząc za wszelką cenę (także i tę sprzedaży) w najwyższą półkę jakości i oferując kosztowną nad jakość.

Należy umieć przy tym podkreślić, że w ten sposób zmniejszamy margines błędu odlewni i podnosimy poprzeczkę w dotrzymywaniu stabilności produkcji w odlewni. Tylko dobre odlewnie potrafią temu sprostać. A że jest to możliwe, dla przykładu za ostatnie pół roku jedna z odlewni francuskich osiągnęła poziom braków nienaprawialnych poniżej 1% (odlewy ciężkie). Przy tym poziom uzysku dla ciężkich odlewów z żeliwa sferoidalnego przekracza 80%.

Podsumowując, opracowane prawidłowo zapytania ofertowe i zamówienia winny zatem zawierać [24]:

- przeznaczenie odlewu, ciężar i wymiary, specyfikacje wymaganej jakości (wyężenie eksploatacyjne, strefy wyężenia i strefy jakości, poziom ponoszonego ryzyka, znaczenie odlewu w całości konstruowanego obiektu technicznego),
- zdefiniowanie materiału (stopu) i gatunek odniesiony do obowiązującej normy lub gatunku narzuconego przez klienta,
- ilość odlewów (długości serii, zamówienie bieżące i ewentualność powtórzenia zamówienia w przyszłości),
- terminy i sekwencje dostaw,
- zapisy wykonawcze, w tym dotyczące kontroli i odbioru odlewów
- warunki gwarancji i działań z zakresu assistance służb odlewni wobec klienta (w okresie eksploatacji).

W akcie organizacji CAEF [25], którego Polska jest członkiem, współbrzmia z powyższym, ogólne warunki umowy (Conditions Générales Contractuelles des Fonderies Européennes). Zostały one przygotowane zgodnie z obowiązującą praktyką procedur organizacji skupiającej kraje członkowskie z Europy (CAEF – Comité des Associations Européennes de Fonderie). Jako taki, każdy kraj członkowski uznaje atrybuty prawne CAEF i ustawodawstwa odniesionego do profesjonalnego jego stosowania w praktyce.

Celowe wydaje się przytoczenie brzmienia tej konwencji we fragmencie dotyczącym ofert i zamówień:

- zapytaniu ofertowemu lub zamówieniu od klienta powinna towarzyszyć specyfikacja techniczna odlewu, która jednoznacznie definiuje wymagania w każdym ich aspekcie dotyczącym zamawianego odlewu, jak i warunki nadzoru, kontroli i badań wymaganych przy ich odbiorze przez klienta; taka kompletna dokumentacja techniczna może być opracowana i dostarczona odlewni w postaci twardej (papierowej) lub w postaci pliku,

- oferta odlewni nie powinna być uważana za ostateczną (nie podlegającą negocjacji) jeżeli ona nie jest powiązana z terminem ważności, a także w sytuacjach, kiedy klient wprowadza zmiany w specyfikacji lub np. kiedy odlewnia dostarczyła mu odlewy próbne,
- odlewnia może być tylko obligowana do przestrzegania warunków będących odzwierciedleniem w sposób jednoznaczny i definitywny zamówienia klienta; powinien istnieć jasny i czytelny w tym względzie zapis w postaci dokumentu.

Przedstawione wyżej ujęcia są spójne i powinny być przestrzegane w układzie komunikacyjno-produkcyjnym klient (przyszły użytkownik) – odlewnia [24, 25]. W obszarze badań jakości rola badań NDT odlewów znajduje wystarczająco czytelne pole do działania. Zbiory kryteriów odbiorowych odlewów są jednak cały czas przedmiotem twórczego doskonalenia, o czym świadczą przykłady opisane m.in. w [11]. Coraz częściej mają one charakter nieformalny (poszerzający „ciasne” podejście zawarte w normach), wynikający z synergii wiedzy i negocjacji merytorycznych.

Literatura

- [1] Sobczak J.: Nowoczesne tworzywa i procesy technologiczne w odlewnictwie. Materiały i monografia II Sympozjum Naukowego „Innowacje w odlewnictwie”, Projekt PBZ-KBN-114/T08/2004, pt „Nowoczesne tworzywa i procesy technologiczne w odlewnictwie”, <http://www.iod.krakow.pl>.
- [2] Ignaszak Z., Mikołajczak P., Popielarski P.: Specyfika i przykłady metod walidacji on-line dla potrzeb systemów prognozujących jakość odlewów przemysłowych. Materiały III Sympozjum Naukowego PBZ „Innowacje w Odlewnictwie”, Instytut Odlewnictwa Kraków, Kocierz, 26-29.10 2008 (także w monografii „Nowoczesne tworzywa i procesy technologiczne w odlewnictwie”, cz.III . Instytut Odlewnictwa, Kraków 2009).
- [3] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Wirtualne prognozowanie jakości odlewów w aspekcie kontroli metodą ultradźwiękową. Proceedings – VII Seminarium Nieniszczące badania materiałów”, 14-16 marzec 2001, Zakopane, s. 8.1-8.30.
- [4] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Wybrane aspekty powiązań problematyki jakości odlewów w inżynierii wirtualnej i w kontroli ultradźwiękowej. Proceedings – VIII Seminarium Badania Nieniszczące. Zakopane 2002 , s. 99-115.
- [5] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Walidacja modelu powstawania wad skurczowych w odlewach za pomocą metod NDT. Proceedings – IX Seminarium Badania Nieniszczące. Zakopane 11-14.03.2003.
- [6] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Identyfikacja wad nieciągłości w odlewach żeliwnych w aspekcie warunków odbioru i kryteriów jakości. Materiały X Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 16-19 marca 2004.
- [7] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Problemy identyfikacji jednorodności i ciągłości struktur w odlewach, za pomocą metod NDT w aspekcie wybranych właściwości mechanicznych. Materiały XI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 8-11 marca 2005.
- [8] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Znaczenie synergii wiedzy w identyfikacji i interpretacji wybranych wad odlewniczych na przykładzie odlewów z żeliwa sferoidalnego. Proceedings – XII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 14-17 marca 2006.
- [9] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Przykłady i analiza błędów w identyfikacji rodzajów nieciągłości w odlewach. Proceedings – XIII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 13-16 marca 2007.
- [10] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Lokalność właściwości w odlewach i dopuszczalności wad nieciągłości w aspekcie obciążeń użytkowych. Proceedings – XIV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 4-7 marca 2008.
- [11] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Specyfika badań nieniszczących i oceny dopuszczalności wad w odlewach. Proceedings – XV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [12] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiółka J.: Phased array w odlewnictwie nowe możliwości identyfikacji nieciągłości. Proceedings – XVI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 9-12 marca 2010.
- [13] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiółka J., Kopeć A.: Porównanie badań radiograficznych i ultradźwiękowych phased array próbki odlewu z porowatością rozproszoną. Proceedings – 38 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, „Synergia Teorii i Praktyki w Służbie Jakości”, Poznań-Licheń, 20-22.X.2009.
- [14] Ignaszak Z., Ciesiółka J., Wojas M.: Warsztaty doskonalące w zakresie badań produkcyjnych i eksploatacyjnych UT wyrobów odlewanych. Proceedings 38 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, „Synergia Teorii i Praktyki w Służbie Jakości”, Poznań-Licheń, 20-22.X.2009.
- [15] Ignaszak Z., Popielarski P., Krawiec K.: Contribute to quantitative identification of casting defects based on computer analysis of X-ray images. Arch.of Foundry Eng, Volume 7 Issue 4/2007, s. 89-94.
- [16] Ignaszak Z., Popielarski P., Krawiec K.: Zastosowanie metod komputerowej analizy obrazu radiograficznego do ilościowej identyfikacji wad typu shrinkage. Proceedings 38 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, „Synergia Teorii i Praktyki w Służbie Jakości”, Poznań-Licheń, 20-22.X.2009.
- [17] Orłowicz W., Opiekun Z.: Ultrasonic Detection of Microstructure Changes in Cast Iron, Theoretical and Appl. Fracture Mech., Vol. 22, s. 9-16, 1995.
- [18] Belan J.: Identification of cast iron type with using of NDT methods. Arch.of Foundry Eng, Volume 10, Issue Special1/2010, s.103-106.
- [19] Ignaszak Z., Ciesiółka J.: Badania nieniszczące w technologiach materiałowych i ich synergia w sterowaniu jakością produkcji. Sesja panelowa. 33 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Poznań – Licheń 26-28.10.2004.
- [20] Norma PN-85/H-83105 Odlewy Podział i terminologia wad. Wyd.Normalizacyjne, 1986.
- [21] Henon G., Mascré C., Blanc G.: Recherche de la qualité des pièces de fonderie, CIATF, Edition Technique des Industries de la Fonderie, Paris, 1986.
- [22] Wojas M.: Wady wyrobów wykrywane metodami nieniszczącymi. Cz.I Wady produkcyjne, Biuro Gamma, Warszawa 2004.
- [23] Wojas M.: Wady wyrobów wykrywane metodami nieniszczącymi. Cz. 2 Wady eksploatacyjne, Biuro Gamma, Warszawa 2006.
- [24] http://www.fondeursdefrance.org/fiches/11L_elaboration_du_cahier_des_charges.pdf.
- [25] CAEF – The European Foundry Association Steel castings group: Conditions générales contractuelles des fonderies européennes ©. Édition 2006.