

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

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

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 – 160x160x1200 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

Opisane w części I artykułu [1] uwarunkowania produkcyjnych badań odlewów z zastosowaniem metod NDT przybliżyły wytyczne relacji klient – odlewnia i platformę negocjacji racjonalnych warunków odbioru odlewów. Wskazano na specyfikę tych relacji w zestawieniu z koniecznym synergicznym podejściem obu negocjujących stron do tych zagadnień. Jako aplikację

tych zasad odniesionych do badań NDT w [2] zostały przedstawione doświadczenia autorów w obszarze identyfikacji nieciągłości odlewów, dotyczące jakości odlewów z żeliwa, w odniesieniu m.in. do normy EN 583-5, dedykowanej ręcznym badaniom ultradźwiękowym połączeń spawanych [3, 4], zinterpretowanych i omówionych w [5]. Porównano tam również wyniki prognozowania za pomocą *Virtual prototyping* (komputerowa symulacja procesu odlewania [6]) z wynikami badań odlewu różnymi metodami NDT.

Specyfikę wewnętrznych nieciągłości w odlewach należy odnieść do trzech umownych poziomów (wymiar i położenie), spowodowanych procesami

skurczowymi, powiązаныmi z wydzielaniem rozpuszczonych w ciekłym metalu gazów, np. wodoru. Mechanizmy i morfologia frontu krystalizacji decydują o pierwotnych strukturach odlewu, a także o strukturach stref szwów spawalniczych, powstałych ze stanu ciekłego. Należy wymienić:

- poziom I – rozproszone mikroporowatości międzydendrytyczne, wyizolowane, nie tworzące łańcucha ciągłego, o rozmiarach rzędu mikronów, spowodowane istnieniem oporów względem zasilającego przepływu kapilarnego między ramionami tego samego dendrytu (poziom ścisłości traktowany jako akceptowalny, właściwy odlewaniu grawitacyjnemu, przekładający się na standardowe właściwości mechaniczne wykonywanych wyrobów odlewanych za pomocą tej technologii) – odlew jest „zdrowy” (*acceptable soundness*),
 - poziom II – mikroporowatości między blokami dendrytów (ziaren), widoczne niekiedy okiem nieuzbrojonym, nakładające się na mikroporowatości poziomu I, wynikające z dużego oporu przepływu kapilarnego między dendrytami, powodujące lokalny dalszy spadek charakterystyk mechanicznych, w odniesieniu do wartości normatywnych,
 - poziom III – makroporowatości (ewidentne pustki i skrajnie – jamy skurczowe), powstające w miejscach izolowanych tzw. węzłach cieplnych, w skali makro, wynikające z odcięcia zasilania zwanego masowym (to zasilanie istnieje do momentu osiągnięcia przez gęstwę strefy ciekło–krystalicznej wartości tzw. krytycznego ułamka fazy stałej – f_s^{cr}).
- Powyższe sformułowania dotyczące przyczyn porowatości, w których wyeksponowano zjawiska skurczowe, należy poszerzyć o porowatości wywołane desorpcją rozpuszczonych w ciekłym metalu gazów. Zdarza się, że określenie zjawiska wiodącego napotyka na trudności (odlewy Al).

W [6, 7] rozważano temat identyfikacji wad w odlewach żeliwnych, starając się wykazać, że pewne zawarte w odbitym sygnale ultradźwiękowym informacje, jako formie „odpowiedzi” materiału odlewu, nie są wystarczająco eksploatowane i wykorzystane.

Podstawową normą stosowaną w praktyce odlewów ze stopów żelaza do definiowania kryteriów jakości na podstawie wyników badań nieniszczących UT jest EN 12680. Często odbiorca nie jest przygotowany nawet na uzasadnienie tam istniejącego, uproszczonego definiowania wymaganej jakości. Znane są przypadki, kiedy „odkrycie” podczas obróbki skrawaniem wady „dopuszczalnej” na wynegocjowanym poziomie jakości pod względem kryteriów „ultradźwiękowych” wg normy EN 12680, powoduje odmowę akceptacji odlewu i stanowi podstawę do renegecji warunków odbioru, najczęściej ze stratą finansową dla odlewni.

Do oceny stanu wad wewnętrznych w odlewach żeliwnych stosuje się także metodę porównawczą RT – ASTM E802. Wygląd wad na radiogramie odlewu rzeczywistego z żeliwa odbiega zdecydowanie od wad

na wzorcowym radiogramie ASTM E802 (inne rozłożenie i intensywność nieciągłości). Fakt ten powoduje, że odlewnie żeliwa zmuszone są do korzystania z normy (i atlasu) wad dla odlewów staliwnych (np. ASTM E280), i do niego odnoszą rodzaje i klasy wad. Praktycznie wszyscy klienci odlewni żeliwa, którzy jako metodę NDT obrali badania radiograficzne powołują się na tę normę, przechodząc do porządku dziennego nad tym faktem.

Proponowana w [8, 9] procedura polega na uściśleniu kwantyfikacji metody RT wg ASTM i wykorzystaniu programu do analizy obrazu do porównawczej oceny stopni szarości poszczególnych miejsc na radiogramach (rozłożenie na dwuwymiarowym obrazie RT z wadami nieciągłości – porównanie zaciemnień na radiogramie wzorca ASTM i radiogramie ocenianego odlewu). Jednocześnie trzeba się zgodzić, że jest to tylko formalna próba kwantyfikacji (por. dyskusja podczas 38 KKBN, [10]), która musi być poparta wiedzą technologiczną operatora RT lub/i specjalisty technologa.

Nowe kierunki obserwowane w produkcyjnych badaniach nieniszczących odlewów

Odnosząc się do metod NDT (wizualnych, ultradźwiękowych, radiologicznych, magnetyczno-proszkowych, prądów wirowych, termograficznych, akustycznych, ciśnieniowych prób szczelności) jakie były i pozostają najbardziej rozpowszechnione w odlewnictwie, należy zauważyć, że pod względem metodycznym kierunki rozwoju wiążą się ściśle z dostępnością do nowych rozwiązań aparaturowych. Istota i podstawy fizyczne badań pozostają niezmiennie. Rozwój idzie w kierunku nowych nośników informacji (sygnałów), ich akwizycji i rejestracji, szybkości przeprowadzania operacji kontrolnych, rozdzielczości i czytelności obrazu, budowaniu baz danych o wyrobie, skojarzonych w ramach systemów *Data Mining* [11]). Przykładem może być wyposażenie służące do realizacji badań za pomocą aparatu *Phased Array* (PhA). Metoda ta zaliczana do tomografii ultradźwiękowej rozwinęła się w obszarze badań eksploatacyjnych i sprawdza się m.in. w wykrywaniu pęknięć wałów turbin i innych nieciągłości wynikłych z warunków eksploatacji wyrobów technicznych [12, 13]. Zastosowania są widoczne także w badaniach eksploatacyjnych tak odpowiedzialnych konstrukcjach jak obiekty w lotnictwie [14]. W odlewnictwie PhA daje nowe możliwości i jest symptomem nowoczesności w tej aplikacji. Szerzej omówiono te zagadnienia w [15÷17]. Ostatnio otrzymane wyniki PhA określenia wymiarów przestrzeni nieciągłości pochodzenia skurczowego [18] wykorzystano w badaniach zasygnalizowanych w kolejnym rozdziale.

Przykładem zastosowań nowoczesnej techniki do badań odlewów jest bezsprzecznie tomografia RT.

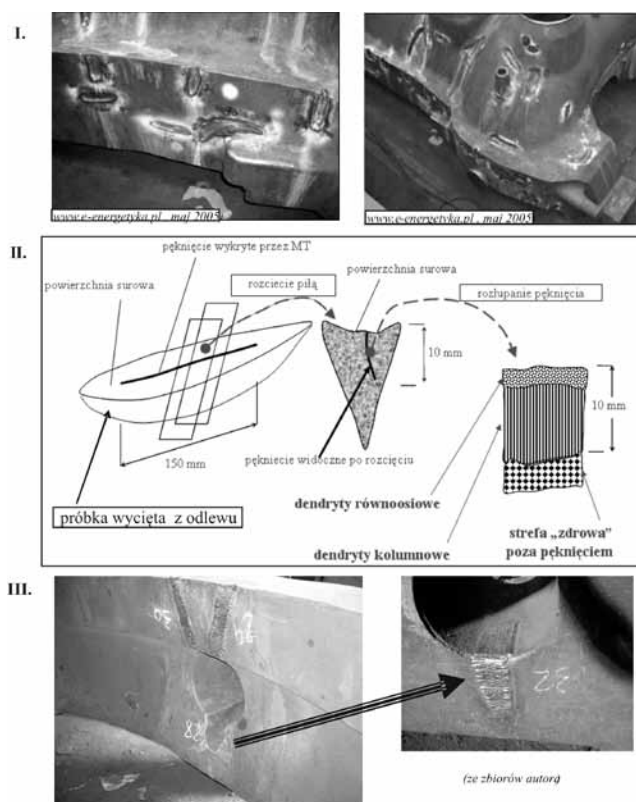
Jest stosowana przeważnie do odlewów ze stopów lekkich (na bazie Al, Mg), generalnie dość sporadycznie (koszt aparatury, czas pełnego badania, zwłaszcza dla długich czasów ekspozycji na jeden obraz), choć jej ewidentnym zaletom nie można zaprzeczyć. W [19 i 20] można znaleźć charakterystykę zastosowań w odlewnictwie i opis sposobów rozpoznawania nieciągłości. W [8, 21] opisano propozycje wykorzystania takich wyników do dalszych badań korelacji nieciągłości dopuszczalnych i lokalności eksploatacyjnego wyężenia materiału.

Kierunek nowoczesności w efektywnym stosowaniu badań nieniszczących nie musi być związany tylko z zakupem drogiej aparatury, lecz z właściwym podejściem do procedur wykrywania nieciągłości, interpretacji nieciągłości i ich napraw. Na rysunku 1 przedstawiono przykład lokalizacji pęknięć (metoda magnetyczno-proszkowa) i napraw spawalniczych w ciężkich odlewach stalowych dla przemysłu energetycznego. Tego typu badania na obecność wad typu „hot tears”, czyli rozerwania w stanie stało-ciekłym i ich naprawa, powinny być wykonane w odlewni, a nie u klienta [22, 23]. Charakter tych pęknięć wynika z opisów umieszczonych na rysunku 1. Również na tym rysunku podano przykład (z badań własnych) naprawy bardzo głębokiego pęknięcia (po wyżłobieniu materiału wokół tej wady), co było wykonane jeszcze w odlewni. Cały odlew był następnie poddany pełnej obróbce cieplnej (normalizacji, w warunkach przyspieszonego oddawania ciepła i odpuszczaniu). Klienci zamawiający odlewy tego typu nie dysponują najczęściej takim wyposażeniem, aby zagwarantować właściwą strukturę po tego rodzaju naprawie odlewu. Kwestia kosztu wykonania pełnych badań jakości odlewu surowego wg wymagań warunków odbiorowych wchodzi także w zakres negocjacji odlewnia – klient.

Tolerance of damage w odlewnictwie w aspekcie wirtualizacji konstruowania i optymalizacji technologii odlewania

Obecne od pewnego czasu w dziedzinie nauk o materiałach pojęcie materiału z gradientem właściwości – tej lokalności nadały rangę wymogu nobilitującego cechy użytkowe wyrobu. Może to prowadzić nawet do obniżenia kosztu wytwarzania: podniesienie jakości w strefach o wysokich wymaganiach eksploatacyjnych, co uzyskać można na drodze celowego i dopuszczalnego obniżenia jakości w strefach wyrobu, gdzie wymagania ze względu na obciążenia (naprężenia) i środowisko pracy wyrobu są zredukowane do udokumentowanego minimum.

Powyższy wywód należy łączyć z zagadnieniem *Tolerance of damage* (dopuszczenie wadliwości wyrobu)



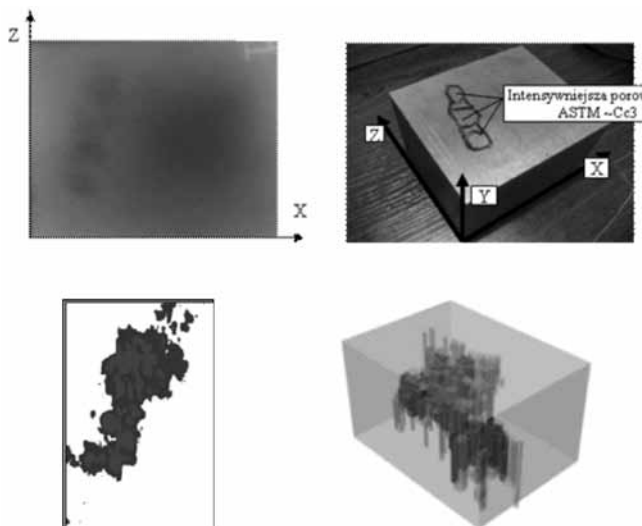
Rys. 1. Typowe pęknięcia w strefie stało-ciekłej podczas krzepnięcia ciężkich odlewów stalowych. I – naprawy spawalnicze surowego odlewu A wykonane po badaniach NDT przez klienta zamiast w odlewni (www.e-energetyka.pl, 2005), II – schemat pobrania próbki i badania strefy pęknięcia – dowód na kwalifikację „hot tears”, III – przykład naprawy przez napawanie głębokiego pęknięcia surowego odlewu B o masie 25 ton (po usunięciu strefy wokół pęknięcia, z kontrolą MT) **Fig. 1.** Typical cracks in the solid-liquid zone during solidification of heavy-section casting of cast steel; I – repair welding of raw casting A made after NDT testing by client in stead of foundry (www.e-energetyka.pl, 2005), II – scheme of sampling and testing of fracture zone – the proof of the „hot tears” classification, III – an example of repairing the surfacing by welding of deep cracks in the raw casting B weighing 25 tons (after removal of the zone around the cracks, with the control of MT)

co jest terminem odnoszącym się do odporności na propagację uszkodzeń struktury (pochodzących z etapu produkcji lub/i eksploatacji) podczas użytkowania wyrobu. Termin ten wywodzi się z inżynierii kosmicznej (*Aerospace Engineering*) i polega na akceptacji rzeczywistej struktury odbiegającej od struktury doskonałej (doskonałej – w sensie technicznych możliwości jej uzyskania). Przy prawidłowym nadzorze procesów wytwórczych i eksploatacyjnych (kontrola jakości, polityka remontowa) doprowadza się do wykrywania i naprawy incydentalnych uszkodzeń, śladów korozji i pęknięć zmęczeniowych, co chroni przed groźnymi dalszymi uszkodzeniami.

Tolerance of damage zwana też „fail safe”, jest stosunkowo nową zasadą projektowania i wymaga, aby konstrukcja była w stanie oprzeć się trybowi uszkodzeń

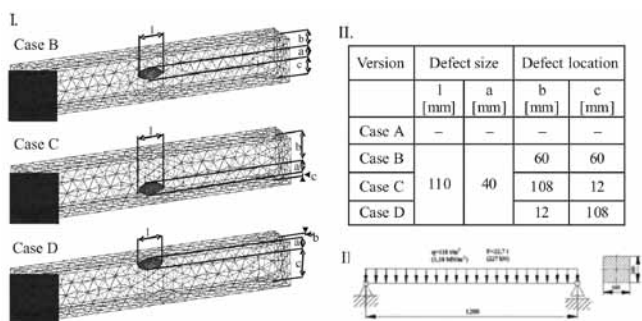
z powodu zmęczenia materiału, w najbardziej prawdopodobnych lokalizacjach.

Ta filozofia przenosi się coraz szerzej do dobrych europejskich odlewni, we współpracy z klientami [24, 25] i obejmuje następujące okoliczności eksploatacji wyrobów (materiałów):



Rys. 2. Schemat położenia nieciągłości w przestrzeni próbki wyciętej z grubościennego bloku o grubości 180 mm, odlanego z żeliwa sferoidalnego oraz identyfikacja ilościowa za pomocą klasycznej metody RT (u góry) oraz u dołu – wizualizacja modelu wady (2D – z lewej i 3D – z prawej) uzyskanego metodą PhA, z wyodrębnieniem dwóch progów detekcji nieciągłości [18]

Fig. 2. Schematic location of discontinuity in the space of a sample of heavy-walled block 180 mm thick, ductile cast iron, and the quantitative identification with the use of the classical RT method (top) and visualization of defects model (bottom: left - 2D and right) obtained by PhA, with separation of the two thresholds detection of discontinuity [18]

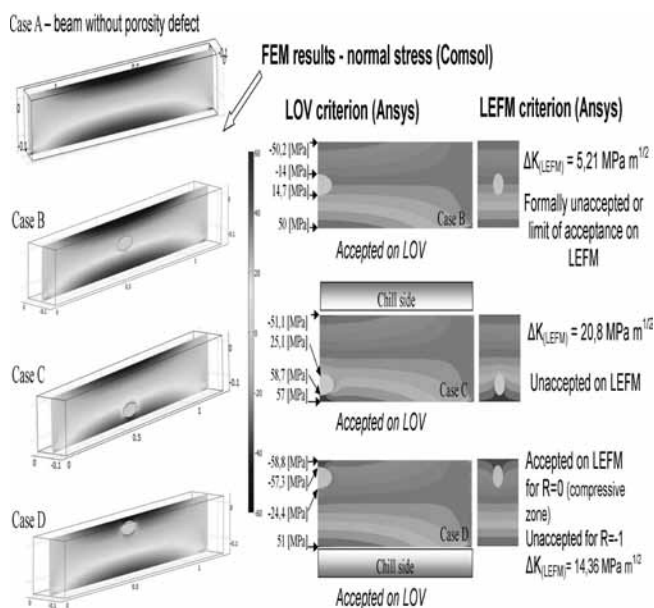


Rys. 3. Belka 160x160x1200 mm z przestrzenną porowatością odpowiadającą wielkości nieciągłości w odlewie rzeczywistym z żeliwa sferoidalnego (rys. 2) i zmienną lokalizacją na grubości belki (I i tablica II), III – schemat obciążenia (przyjęto 118 ton/m², zgodnie z warunkami dla odlewu dennicy kruszarki) [26]

Fig. 3. 160x160x1200 mm beam with a three-dimensional porosity corresponding to the size of discontinuity in the casting of ductile cast iron (fig. 2) and variable location on the thickness of the beams (I and II), III - load diagram (118 ton/m², in accordance the conditions for casting crusher bottom) [26]

- odpowiednio wczesne wykrywanie nieciągłości, z oceną granic ich dopuszczalności, począwszy od etapu badań produkcyjnych (odbiorowych) i później podczas całego okresu eksploatacji, aby nie dopuścić do nieprzewidzianego zniszczenia obiektu,
- zdefiniowana odporność na zmęczenie przy danym obciążeniu eksploatacyjnym (niekiedy z włączeniem możliwości przybliżenia do zaistnienia katastroficznych przeciążeń konstrukcji),
- oszacowany wpływ poziomu naprężeń własnych po poddaniu konstrukcji eksploatacyjnemu obciążeniu zmęczeniowemu.

Na rysunku 2 pokazano wynik badań metodą PhA wycinka odlewu ciężkiego z żeliwa sferoidalnego. Oszacowano w ten sposób przestrzenne położenie wady (nieciągłości), które następnie można wprowadzić do pliku geometrii 3D odlewu (stl, iges, step) i poddać badaniu symulacyjnemu pod obciążeniem jakim odlew będzie podlegał podczas eksploatacji. Na rysunku 3 i 4 przedstawiono wyniki takiej procedury, która jest aktualnie rozwijana [26].



Rys. 4. Mapy naprężeń i wartości ΔK_{th} (ΔK_{th} – threshold stress intensity factor) w analizowanej belce. Trzy przypadki sterowanej położeniem ochładzalników (chils) lokalizacji nieciągłości, odniesienie do dopuszczalnych wartości stosowanych w metodzie LOV (loss of volume) i w metodzie LEFM (linear elastic fracture mechanics). Skala naprężeń: ± 60 MPa. Dla nieciągłości przestrzennych typu porowatość skurczowa metoda LEFM jest bardziej rygorystyczna niż metoda LOV [26]

Fig. 4. Maps of the stress and the ΔK_{th} (ΔK_{th} – threshold stress intensity factor) in the analyzed beam. Three cases of controlled location of chills in accordance to discontinuity location, related to limit values used in the method of LOV (loss of volume) and the method of LEFM (linear elastic fracture mechanics). Stress scale: ± 60 MPa. For three-dimensional discontinuity of porosity, the LEFM method is more rigorous than the LOV method [26]

Podsumowanie

W artykułach autor wykorzystał swoje wieloletnie doświadczenie współpracy ze znaczącymi odlewami europejskimi, w których zasada synergii przyswiera nowoczesnym trendom w optymalizacji produkcji i doskonaleniu jakości odlewów. W zasadzie sprowadza się to do opisanych działań wychodzących naprzeciw zasadzie *tolerance of damage* i wiąże się z uwarunkowaną technologicznie specyfiką wyrobów odlewanych. Odnosi się do granic osiągalnych lokalnych właściwości mechanicznych odlewów. Wskazano na nieuchronność ilościowego uwzględnienia tej

lokalności właściwości mechanicznych w nowoczesnym projektowaniu. Dotyczy to struktur i ich patologii w wyrobach, które powstają bezpośrednio na drodze krystalizacji z ciekłego stopu. Powinno mieć to ścisły związek z formułowaniem warunków odbioru odlewów. W artykule zasygnalizowano przykład wykorzystania w tym celu wiedzy z dziedziny mechaniki pęknięcia. Takie podejście inspiruje konstruktorów i technologów do opracowań innowacyjnych i postępu w uwzględnieniu gradientu właściwości w odlewie i jego eksploatacyjnych zadań wyężeniowych.

Literatura

- [1] Ignaszak Z.: Uwarunkowania i perspektywy badań nieniszczących wyrobów kształtowanych ze stanu ciekłego przed poddaniem ich eksploatacji. cz.I. Artykuł przygotowany na 40 KKBN, Warszawa, 2011.
- [2] Ignaszak Z., Ciesiołka 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.
- [3] Norma EN 583-5 „Nondestructive testing – Ultrasonic examination – Part 5: Characterization and sizing of discontinuities.
- [4] Norma EN 1713 „Non destructive examination of welds – Ultrasonic examination – Characterization of indications in welds”.
- [5] Deputat J.: Ocena rodzaju wad w ręcznych badaniach ultradźwiękowych. Proceedings Konferencji Badania Nieniszczące. Zakopane 11-14.03.2003, s. 23-36.
- [6] Ignaszak Z., Ciesiołka 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.
- [7] Ignaszak Z., Ciesiołka J.: Wybrane aspekty powiązań problematyki jakości odlewów w inżynierii wirtualnej i w kontroli ultradźwiękowej. Proceedings – VIII Seminarium Badania Nieniszczące. Zakopane 2002, s. 99-115.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Mackiewicz S.: Głos w dyskusji na temat [16]. 38 KKBN, Poznań-Licheń, 2009.
- [11] Sika R., Ignaszak Z.: Data acquisition in modeling using neural networks and decision trees. Arch.of Foundry Eng, Volume 11, Issue 2/2011, s. 113-122.
- [12] Bobrowski P., Kopeć A.: Phased array – metoda na miarę potrzeb diagnostyki w energetyce, Energetyka, 4, 2007.
- [13] Lipnicki i inni: Zaawansowane badania diagnostyczne wirtualnych turbin energetycznych techniką phased array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek. Proceedings – XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2011.
- [14] Dragan K.: Zastosowanie głowic Phased Array w diagnostyce konstrukcji lotniczych. Proceedings – XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2011,
- [15] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiołka J.: Phased array w odlewnictwie nowe możliwości identyfikacji nieciągłości. Proceedings – XVI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 9-12 marca 2010.
- [16] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiołka J., Kopeć A.: Porównanie badań radiograficznych i ultradźwiękowych phased array próbki odlewu z porównałością rozproszoną. Proceedings – 38 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, „Synergia Teorii i Praktyki w Służbie Jakości”, Poznań-Licheń, 20-22.X.2009.
- [17] Praca zbiorowa: Detection comparative des discontinuities par les methodes US: classique et phased array. Raport z badań zrealizowanych w jednej z odlewni francuskich. 2009.
- [18] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiołka J.: Wykorzystanie danych z badań ultradźwiękowych do realizacji przestrzennego modelu wady. Artykuł niepublikowany. Archiwum prac Laboratorium CAD/CAE i Zakładu Odlewnictwa, ITMat PP, styczeń-marzec 2011.
- [19] Herold F.: Image Registration Combining Digital Radiography and Computer-Tomography Image Data. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [20] Navalgund M. i inni: Systematic Approach for Validation of X-Ray Automatic Defect Recognition Systems, AIP Conference Proceedings, Volume 894, pp. 1847-1854, March 21, 2007.
- [21] Ignaszak Z.: Validation Problems of Virtual Prototyping Systems Used in Foundry for Technology Optimization of Ductile Iron Castings, Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Springer IDMME 06 Proceedings, 2007 (rozdział w książkowym wydaniu Springer).
- [22] 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.
- [23] Trzesczyński J.: Uszkodzenia kadłubów turbin i komór zaworowych wywołane przez wady odlewnicze. Energetyka 1997, nr 9, s. 412-415.
- [24] Ignaszak Z., Ciesiołka J.: Specyfika badań nieniszczących i oceny dopuszczalności wad w odlewach. Proceedings – XV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [25] Ignaszak Z.: Wybrane aspekty „tolerance of damage” w projektowaniu i eksploatacji wyrobów odlewanych. Proceedings 38 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, „Synergia Teorii i Praktyki w Służbie Jakości”, Poznań-Licheń, 20-22.X.2009.
- [26] Piekło J., Maj M.: Ocena trwałości odlewu ze stopu Ak9 w warunkach obciążeń zmiennych. Proceedings – Jubileuszowa Konferencja 60-lecia Wydziału Odlewnictwa AGH, Kraków – 10, 11 czerwca 2011 r.
- [27] Ignaszak Z., Popielarski P., Hajkowski J., Prunier J-B.: Problem of acceptability of internal porosity in semi-finished cast product as new trend – “tolerance of damage” present in modern design Office. Przyjęty w Journal of Defect and Diffusion Forum Vols. 312-315 in 2011 with the title Diffusion in Solids and Liquids VI.