

Inteligentna technika pomiarowa w inspekcji powierzchniowych defektów odlewniczych

JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2018.540
Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówiona została strategia pomiaru dla inspekcji online powierzchniowych defektów w odlewach aluminiowych po obróbce skrawaniem. Autorzy przedstawiają rozwiązanie w postaci stanowiska wizyjnego do inspekcji powierzchniowej odlewów aluminiowych z wykorzystaniem w pełni automatycznego układu do rejestracji, detekcji i analizy wykrywanych defektów. Tego typu rozwiązanie pozwala na zwiększenie wydajności i jakości uzyskiwanych wyrobów zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym, jak również prowadzi do zautomatyzowania kontroli nad przebiegiem technologii odlewania. Jest to jeden z podstawowych problemów prowadzonych badań w odniesieniu do ograniczeń i trudności w wykonaniu takich wyrobów, jak: bloki skrzyń biegów czy korpusy silników, w sposób znaczący wpływając na koszt ich wyrobu.

Zaproponowane rozwiązanie wizyjne jest odpowiedzią na oczekiwania technologów w zakresie systemów kontroli jakości będących łatwymi w użyciu, tanimi i wszechstronnymi rozwiązaniem dla przemysłu. Połączenie części softwarowej oraz aparatury pomiarowej w zaproponowanym rozwiązaniu wizyjnym umożliwia analizę pozyskiwanych obrazów w ułamku sekundy. Jest to rozwiązanie które jest alternatywą dla rozwiązań wizualnych, czy innych metod, kosztownych i pracujących w trybie offline. Zaproponowana inteligentna technika pomiarowa wspierająca produkcję przemysłową opiera się na zaawansowanym, automatycznym układzie pomiarowym ze zintegrowanym oświetleniem i oprogramowaniem pozwalającym na wykrywanie i klasyfikowanie defektów odlewniczych.

Słowa kluczowe: kontrola defektów odlewniczych, obróbka obrazu, systemy wizyjne.

Wstęp

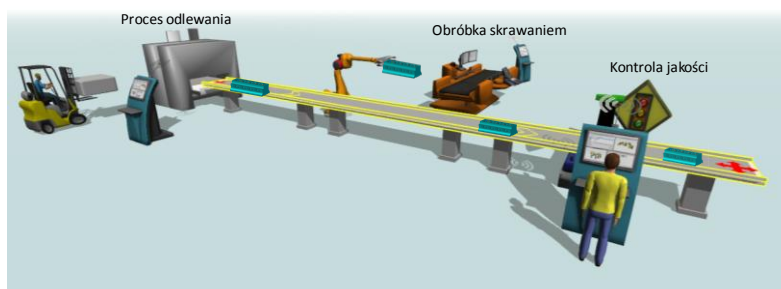
Logistyka produkcji otwiera nowe możliwości zarządzania i sterowania procesami wytwarzania. Do podstawowych zadań w tym zakresie zaliczyć można kontrolę wyrobów w poszczególnych fazach produkcji, w celu uzyskania optymalnych wyników kontroli jakości w stosunku do wydajności. Podstawowym problemem występującym w wielu procesach jest konieczność dokonywania przestojów (pomiar offline), w celu realizacji procesu kontroli. Zaproponowana inteligentna technika pomiarowa wpisuje się w aktualną

koncepcję inspekcji przemysłowej zakładającej możliwość dokonywania niemal natychmiastowych działań, w celu wyeliminowania nieprawidłowości technologicznych. Zaproponowane rozwiązania przyczyniają się także do lepszego zrozumienia problemu zagazowania odlewów aluminiowych, co powinno otworzyć nowe naukowe możliwości badawcze i stworzyć szanse na lepsze zrozumienie zjawiska powstawania defektów powierzchniowych. Pozwoli to doprowadzić do lepszego poznania i naukowego zgłębienia czynników ograniczających procesy odlewnicze części aluminiowych. Takie badania pozwolą w przyszłości na wczesne eliminowanie potencjalnych defektów powierzchniowych w przemysłowym procesie wytwarzania. Przeprowadzone w tym zakresie przez autorów badania zmierzają do opracowania podstaw zintegrowanego przemysłowego systemu wizyjnego pomiarów online, pozwalającego na uruchomienie inteligentnego systemu zarządzania procesami wytwarzania.

1. Aktualny stan wiedzy

W szczególności w przemyśle transportowym, procesy odlewania stopów aluminiowych są coraz bardziej popularne. Odlewy aluminiowe zawdzięczają swoją popularność, możliwością uzyskania elementów o dostatecznych właściwościach wytrzymałościowych, jednak o znacznie zredukowanej masie (gęstość aluminium jest trzy razy mniejsza niż gęstość stali) [1-3]. Jednakże skomplikowany charakter procesów odlewniczych, powoduje ryzyko niepowodzeń podczas procesów wytwarzania. Niepowodzenia te mogą wynikać z różnych czynników, o różnym charakterze. Objawiają się one w gotowym produkcie jako defekty odlewnicze [4-5]. Defekty te mogą natomiast znacznie wpływać na wytrzymałość konstrukcji odlewane go elementu. Ze względu na powiązanie między wytrzymałością, a bezpieczeństwem, w szczególności w przemyśle transportowym i motoryzacyjnym, kładziony jest coraz większy nacisk na badania jakości powstających wyrobów oraz poszukiwanie nowych metod zarządzania tymi informacjami [6-7]. Dlatego zaproponowane przez autorów rozwiązania mają charakter uniwersalny wynikający z trzech podstawowych powodów: praktycznego (poszukiwania sprawnej metody inspekcji jakości), naukowego (poszukiwanie wyjaśnień powstawania defektów podczas procesów odlewania), oraz przemysłowego (opracowanie koncepcji sterowania technologią odlewania).

Po pierwsze, konieczne jest opracowanie takiego rozwiązania,



Rys. 1. Graficzna reprezentacja koncepcji zarządzania informacją w procesach wytwarzania z wykorzystaniem systemów wizyjnych w powierzchniowej inspekcji jakości aluminiowych odlewów korpusów silników samochodowych

które będzie skuteczną alternatywą dla istniejących rozwiązań. Metody detekcji tych wad zawierają się w grupie metod NDT (Non Destructive Testing), czyli metod nie niszczących. Wśród tych metod możemy wyróżnić badania wizualne (VT), badania penetracyjne (PT), badania magnetyczne (MT), badania metodami wiroprądowymi (Eddy Current), oraz badania radiologiczne (RT) [8-9]. Metody te są w większości trudne do zautomatyzowania lub wymagają warunków laboratoryjnych. Wiąże się to z dodatkowymi kosztami związanymi z odpowiednim personelem, konstrukcją odpowiednich stanowisk o warunkach laboratoryjnych lub wysyłaniem elementów do zewnętrznych placówek w celu zbadania obecności defektów odlewniczych. Jedną z możliwych do zautomatyzowania metod jest metoda X-Ray, czyli badania radiologiczne. Wymagają one jednak kosztownego sprzętu, jak również użycia promieniowania, które może zagrozić zdrowiu człowieka [10-11]. W tej publikacji zaprezentowano stanowisko będące alternatywą do wyżej wymienionych metod. Proponowane rozwiązanie opiera się na wykorzystaniu systemu wizyjnego do detekcji powierzchniowych defektów odlewów aluminiowych w trybie online.

Po drugie, istnieje potrzeba takiego zglębienia problemu zagazowania odlewów aluminiowych [5], które otworzy nowe naukowe możliwości badawcze i stworzy szansę na lepsze zrozumienie zjawiska powstawania defektów powierzchniowych. Pozwoli to doprowadzić do lepszego poznania i naukowego zglębienia czynników ograniczających procesy odlewnicze części aluminiowych. Takie badania pozwolą w przyszłości na wczesne eliminowanie potencjalnych defektów powierzchniowych w przemysłowym procesie wytwarzania. Przeprowadzone w tym zakresie przez autora badania zmierzały do opracowania podstaw zintegrowanego systemu wizyjnego pomiarów online, pozwalającego na uruchomienie inteligentnego systemu kontroli powierzchni obrabianych odlewów.

Ostatecznie po trzecie, zaproponowane przez autorów rozwiązanie wizyjne wpisuje się w aktualną koncepcję przemysłowego zarządzania procesami wytwórczymi, znaną pod nazwą rewolucji przemysłowej 4.0. W ramach zaproponowanej inteligentnej techniki pomiarowej z wykorzystaniem zbudowanego systemu wizyjnego możliwe będzie sterowanie procesem odlewania poprzez zmianę jego parametrów (Rys.1). Rodzaj tych zmian określony będzie dzięki znajomości rodzaju defektów, ich rozkładu gęstości i innych charakterystycznych cech, określonych na podstawie pomiarów wizyjnych. Z kolei w następnym kroku, automatyczne przesyłanie pozyskanych w ten sposób informacji i uwzględnienie niezbędnych korekt technologii odlewania pozwoli na wczesną eliminację zidentyfikowanych wad powierzchniowych.

2. Inteligentna strategia zarządzania procesem odlewania

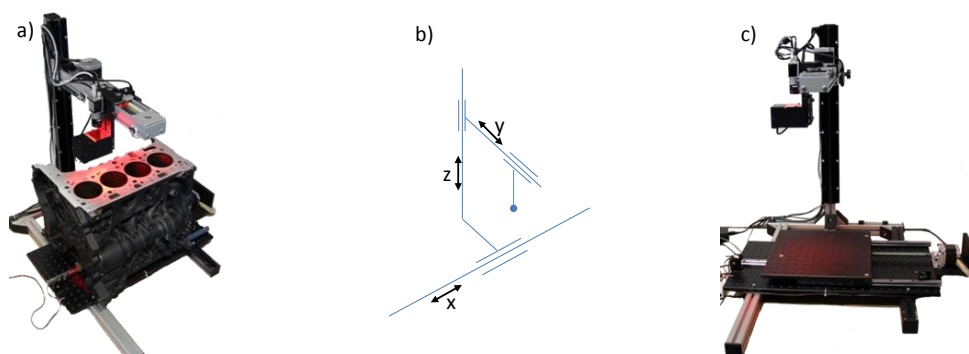
Zaadaptowana technika pomiarowa wraz z zaproponowanym systemem pomiarowym jest rozszerzonym rozwiązaniem zaproponowanym przez autorów wcześniejszych publikacji. Technika ta

umożliwia realizację kompleksowego obszaru działań i znanego pod nazwą inteligentnej strategii zarządzania informacją w procesie wykrywania wad odlewniczych. Zaproponowana przez autorów artykułu strategia sprowadza się do podstawowych trzech etapów realizacji zadań badawczych, tj.: wykrywania wad odlewniczych, analizowania przyczyn powstawania tych wad oraz generowania reakcji eliminującej przyczyny powstawania wad.

Szczegółowo, w pierwszym etapie tego procesu zaplanowany jest proces eliminacji wadliwych odlewów, co pozwoli na wczesną eliminację zidentyfikowanych wad powierzchniowych [12,13]. W zaproponowanym rozwiązaniu przewidziane jest przechwytywanie zdjęć badanej powierzchni, numeryczna obróbka obrazu tych zdjęć i identyfikacja defektów. Przewidziane jest zapisywanie obrazów i proces ten realizowany jest przez kartę akwizycji w połączeniu z zastosowaniem odpowiedniego oświetlenia, w celu ujawnienia defektów powierzchniowych, co jest krytycznym punktem pomiarów. Z kolei realizowana jest analiza uzyskanych zdjęć (numeryczna obróbka obrazu), w celu wskazania potencjalnych defektów powierzchniowych. Głównym elementem tych obliczeń jest zastosowanie odpowiednio zaprojektowanego modelu filtru obliczeniowego, umożliwiającego identyfikację krawędzi defektów (wad) z różnym kształtem i różną wielkością. Zaproponowany filtr pozwala na zastosowanie dwóch parametrów: pierwszego w zakresie czułości identyfikowanych wad (ich wielkości i dokładności), drugiego w zakresie poziomu odciążenia szumów obrazu, przy których zaczynają się właściwe defekty.

W drugim etapie przewidziana jest analiza danych pomiarowych z systemu wizyjnego, co umożliwi uzyskanie odpowiedzi na pytanie o przyczyny powstawania wad powierzchniowych. Proces ten realizowany jest z wykorzystaniem sieci neuronowych [6]. Na tym etapie dokonywana jest klasyfikacja wad powierzchniowych pozwalająca pogrupować wykryte wady. Pośród licznych wad powierzchniowych należy wyróżnić: zagazowania, pęknięcia, wtrącenia, pory, drobne zadrapania czy w końcu ślady po obróbce mechanicznej.

W ostatnim, trzecim etapie prac planowane jest wykorzystanie uzyskanych wyników dotyczących przyczyn występowania wad, w celu opracowania strategii transferu danych i dokonywania korekty technologii odlewania. Zaprojektowany w ten sposób proces sterowania przepływem informacji pozwoli nie tylko na przeprowadzenie klasycznej kontroli gotowych wyrobów, ale również (głównie dzięki kontroli online) doprowadzi do dalszego eliminowania powtarzających się w kolejnych wyrobach wad. Zaproponowane rozwiązania sprzętowe i algorytmy obliczeniowe zostały przetestowane wstępnie przez autorów na specjalnie zaprojektowanych stanowiskach do badań modelowych z wykorzystaniem różnych typów defektów [14-15], a zaproponowane w artykule, przemysłowe rozwiązanie wizyjne (Rys.2) odgrywa kluczową rolę w procesie zarządzania wybraną technologią odlewania.



Rys. 2. Zdjęcia stanowiska pomiarowego do powierzchniowej kontroli odlewów bloków silników samochodowych: a) widok całego układu pomiarowego, b) prezentacja schematu pomiarowego stanowiska (wariant rozwiązania), c) stanowisko pomiarowe bez wyrobu

3. Opis stanowiska pomiarowego

Zbudowane stanowisko pomiarowe opisane zostało pod kątem zawartych w nim licznych układów: mechanicznego, napędowego, wizyjnego, oraz elektronicznego i dedykowane jest do realizacji zadań inspekcji bloków (aluminiowych korpusów) silników samochodowych. Przewiduje się realizację pomiarów w trybie online, co oznacza, że pomiary realizowane są w trakcie procesu technologicznego, na linii produkcyjnej. Pomiar jednak nie jest realizowany w czasie rzeczywistym i wymaga krótkiego czasu na realizację procesu skanowania badanej powierzchni i wykonanie niezbędnych obliczeń numerycznych (obróbki obrazu).

Przy konstruowaniu układu mechanicznego zostało wykorzystane rozwiązanie typu wysięgnikowego. Rozwiązanie to gwarantuje łatwy dostęp do wyrobu w warunkach laboratoryjnych, docelowo jednak zalecane jest zastosowanie tradycyjnych rozwiązań typu portalowego lub mostowego zapewniających większą sztywność ramienia pomiarowego, na którym zamocowana jest kamera. Do budowy układu mechanicznego wykorzystano profile aluminiowe zapewniające dużą sztywność, niewielki ciężar konstrukcji i jej łatwy montaż przy różnych wariantach rozwiązań konstrukcyjnych. Z kolei układ napędowy zaprojektowany został z wykorzystaniem dwóch silników krokowych. Przesuw w kierunku osi Z realizowany jest ręcznie z dwóch podstawowych powodów: z uwagi na konieczność zogniskowania układu optycznego i z powodu sporadyczności przy okazji zmiany badanego wyrobu. Do realizacji szybkiego posuwu elementów silnie obciążonych (znaczna masa korpusu silnika) zastosowano napęd śrubowy z płytą nośną przesuwaną na profilowanych prowadnicach szynowych (Rys.3a). Z kolei oś Y realizuje przesuw układu wizyjnego, gdzie wykorzystano moduł z dedykowanym profilem aluminiowym i profilową prowadnicą szynową, po której toczy się wózek napędzany paskiem zębatym (Rys.3b). Układ wizyjny wyposażony jest w kamerę ace640-100gm, obiektyw 8mm i oświetlenie osiowe zapewniające równomierne oświetlenie badanej powierzchni (Rys.3c).

Poszczególne elementy stanowiska zamocowane zostały do profili aluminiowych za pomocą precyzyjnych, lekkich elementów metalowych firmy Edmund Optics. Sterowanie silnikami umożliwia układ elektroniczny dedykowany do sterowania pomiarami CNC, a transfer danych obrazowych realizowany jest za pomocą złącza typu Giga Ethernet. Z kolei transfer sygnału do sterowania silnikami odbywa się poprzez kartę akwizycji danych NI USB-DAQ 6009 firmy National Instrument. Całe sterowanie pomiarami realizowane jest w środowisku Matlab/ Simulink.

4. Pomiary i analiza wyników

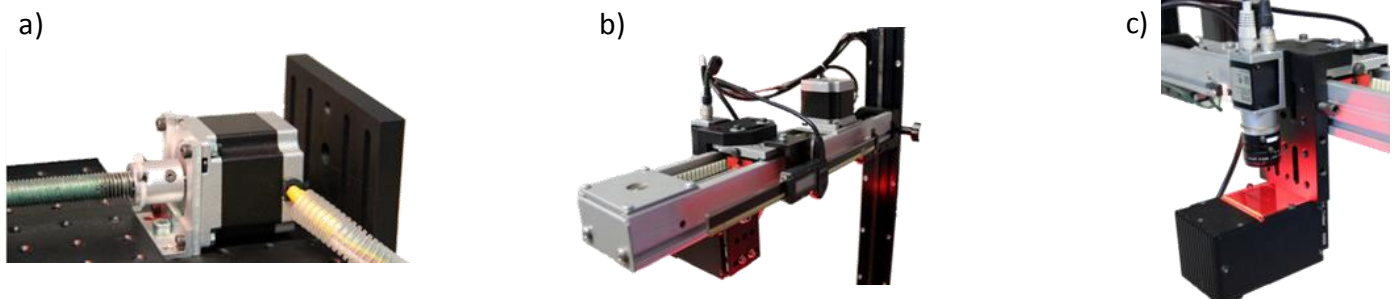
Wykonane na zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku polegały na uzyskaniu zestawu obrazów powierzchni odlewu korpusu silnika. Do realizacji tego zadania opracowano program napisany w środowisku Matlab/Simulink. Program ten realizuje dwie funkcje: po pierwsze, generuje sygnały sterujące pracą silników, po drugie

sczytuje obrazy z kamery.

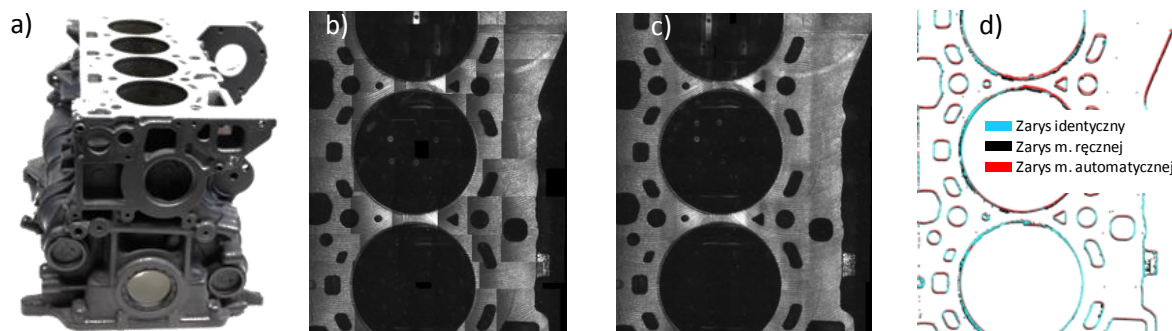
Proces zapisywania danych przewidywał przemieszczenie kamery tak, aby kolejne obrazy nieznacznie zachodziły na siebie. Wykonano w ten sposób serię 10 zdjęć wzdłuż osi Y (oś przesuwu kamery) i powtórzono to 10 razy dla różnych położeń osi X (oś przesuwu wyrobu), co dało ostatecznie 100 ujęć. Do złożenia całego ujęcia skanowanej powierzchni wykorzystano metodę ręcznego łączenia oraz metodę automatyczną z wykorzystaniem środowiska ImageJ. W przypadku programu ImageJ do realizacji samego zadania łączenia posłużyła odrębna aplikacja o nazwie 'Stitching', służąca do łączenia obrazów o wspólnych obszarach w oparciu o korelację z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera (FFT) [16]. Jedynym warunkiem poprawnego zdefiniowania odpowiedniej pozycji każdego z ujęć było nadanie poszczególnym zdjęciom numeracji odpowiadającej właściwej pozycji w szablonie pomiarowym. Wyniki połączeń obrazów zostały zaprezentowane na Rys. 4. Porównując uzyskane wyniki z dwóch metod połączeń (Rys.4c) widać potencjalne trudności w realizacji tego obszaru obróbki obrazu. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość występowania problemu przesunięć łączonych zdjęć (właściwego ich dopasowania) oraz na możliwość występowania niejednorodności przejść pomiędzy obrazami.

Podsumowanie

W artykule podjęty został temat dotyczący powierzchniowej kontroli jakości aluminiowych wyrobów odlewanych na przykładzie różnych powszechnie stosowanych metod badawczych. Zaprezentowane jednak przez autorów rozwiązanie systemu kontroli wizyjnej prowadzi do możliwości wczesnego eliminowania potencjalnych defektów powierzchniowych poprzez stałe monitorowanie przebiegu procesu technologicznego. W pracy przedstawiono szczegółowy opis budowy stanowiska pomiarowego w odniesieniu do poszczególnych układów. Opisano program sterowania układem pomiarowym w zakresie pozyskiwania obrazów i generowania impulsów układu napędowego. Zaprezentowano problematykę związaną z łączeniem zdjęć w pełne ujęcie skanowanej powierzchni odlewu z wykorzystaniem metody ręcznej i automatycznej na przykładzie bloku silnika samochodowego. Głównym jednak celem opracowania była prezentacja stanowiska badawczego pod kątem określenia możliwości, ograniczeń i efektywności zaproponowanej inspekcji wizyjnej. Opracowane rozwiązanie umożliwia pomiar w trybie online tzn. w trakcie procesu technologicznego, co znacznie przyspiesza i zwiększa efektywność pracy. Opracowane rozwiązanie jest kolejnym etapem badań autorów dotyczących wykrywania powierzchniowych defektów odlewniczych, umożliwiając sprawne, inteligentne zarządzanie procesami wytwarzania przemysłowego i wpisuje się we współczesną koncepcję rewolucji przemysłowej 4.0.



Rys. 3. Obrazy poszczególnych układu stanowiska pomiarowego: a) układ napędowy stolika pomiarowego, b) układ napędowy kamery, c) układ wizyjny



Rys. 4. Wyniki analizy obrazu dla powierzchni bloku silnika samochodowego: a) blok silnika samochodowego, b) wynik łączenia ręcznego zdjęć, c) wynik automatycznego łączenia zdjęć, d) wyniki nałożenia zarysów powierzchni czołowej dla dwóch metod: automatycznej i ręcznej

Bibliografia:

1. L.A. Dobrzański, M. Krupiński, J.H. Sokolowski, „Methodology of automatic quality control of aluminium castings”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering VOLUME 20 - ISSUES 1-2*, pp. 69-78, 2007.
2. Y.Yalcin, H.Akbulut, „Dry wear properties of A365-SiC particle reinforced MMCs produced by two melting routes”, *Material and Design* 27, pp. 872-881, 2006.
3. A.Lombardi, C.Ravindran, R.MacKay, “Optimization of the solution heat treatment process to improve mechanical properties of 319 Al alloy engine blocks using billet casting method.”, *Materials Science and Engineering A* 633, pp. 125-135, 2015.
4. A. Juriani, “Casting Defects Analysis in Foundry and Their Remedial Measures with Industrial Case Studies” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Volume 12, Issue 6 Ver. I, pp. 43-54, 2015.
5. R. Rajkolhe, J. G. Khan, “Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process: A Review” *International Journal of Research in Advent Technology* Vol.2, No.3, pp. 375-383, 2014.
6. S.J.Świłło, M.Perzyk, “Surface casting defects inspection using vision system and neural network techniques.”, *Archives of foundry engineering* Vol. 13 Issue 4, pp. 103-106, 2013.
7. K. Siekański, S. Borkowski, “Analysis of foundry defects and preventive activities for quality improvement of castings”, *METABK* 42 (1), pp. 57-59, 2003.
8. X. E. Gros, “NDT Data fusion”, John Wiley and Sons, NY, 1997, no. ISBN 0 470 23724 4
9. I.Narasimha Murthy, J Babu Rao, “Non Destructive Evaluation of A356 alloy Castings made in Sand and Granulated Blast Furnace Slag Moulds”, *Materials Today: Proceedings* 5, pp. 168–174, 2018.
10. H. Boerner, H. Strecker, “Automated X-Ray Inspection of Aluminium Castings”, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* vol. 10 no. 1, pp. 79-89, 1988.
11. D. Mery, Th. Jaeger, D. Filbert, “A review of methods for automated recognition of casting defects,” *Insight*, 44(7), pp. 428-436, 2002.
12. S. Świłło, M. Perzyk, Automatic inspection of surface defects in die castings after machining, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 11, (3), pp. 231 – 236, 2011.
13. S. Świłło, D. Myszka, Advanced metrology of surface defects measurement for aluminum die casting, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 11, (3), pp. 227 – 230, 2011.
14. S. Świłło., D. Myszka, Komputerowy system wizyjny do kontroli defektów odlewniczych, *Eksperti NEMU*, Nr 2(10), pp.10-12, 2011.
15. S. Świłło, M. Perzyk, Automated vision system for inspection of surface casting defects based on advanced computer techniques, *Supplement Proceedings, Materials Properties, Characterization and Modeling TMA (The Minerals, Metals & Materials Society) 2012 141st Annual Meeting and Exhibition*, Vol. 2, pp.387-394, 2012.
16. S. Preibisch, S. Saalfeld, P. Tomancak, Globally optimal stitching of tiled 3D microscopic image acquisitions”, *Bioinformatics*, 25(11), pp.1463-146, 2009.

Smart technology measurement for surface defects inspection in die casting

The objective of the paper is to demonstrate a measurement strategy for online inspection of surface defects in products, especially discontinuities which appear in castings after machining. The essence of the proposed online vision inspection system is to provide an automated method for obtaining and analyzing images of the inspected surfaces, to allow an unmistakable and consistent finding of defects and specifying their types. The proposed solution could improve productivity and quality in the manufacturing process especially for the automotive industry and significantly improve automation in die casting technology. This is one of the most fundamental problems of a research studies in process design for automotive parts such as: handles of transmission systems, cylinder pistons and cylinder front faces in engine bodies, that has significant influence for the manufacturing cost.

Proposed by the author an online vision inspection systems are responded to users demands for systems that are easier to use, low-cost, and flexible. Using a combination of a vision hardware and software, the proposed vision system could analyze the images, usually in a fraction of a second. Since the human visual inspection is slow and expensive, a smart technology is an alternative solution for the online inspection. The developed smart technology uses advance vision system with specially designed lighting, an advanced image processing algorithm for defect detection and their classification.

Keywords: die casting defects inspection, image processing, vision system technology.

Autorzy:

dr hab. inż. **Sławomir Świłło** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Zakład Obróbki Plastycznej i Odlewnictwa, email: s.swillo@wip.pw.edu.pl.

mgr inż. Jan Tadeusz Wąsik – Politechnika Warszawska