

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKII ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Ocena parametrów strumienia śrutu wskaźnikami próby z użyciem płytek kontrolnych

Evaluation of the shot stream parameters using indicators of the test with control plates

PIOTR ZYZAK *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.403

Oczyszczanie odlewów jest rodzajem obróbki, mającej na celu usuwanie z powierzchni odlewów pozostałości przywartej masy formierskiej i rdzeniowej oraz poprawę jakości powierzchni odlewów. Najczęstszym sposobem obróbki jest oczyszczanie strumieniowo-ścierna. Dla potrzeb badań opracowano metody określania jakości czyściwa, w tym jego trwałości oraz ocenę sprawności czyszczenia. W pracy przedstawiono mechanizm oczyszczania strumieniowo-ściernego ze szczególnym zwróceniem uwagi na badania sprawności czyszczenia. Przedstawiono zakres i wyniki badań celem oceny parametrów strumienia śrutu wskaźnikami próby z użyciem płytek kontrolnych.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka strumieniowo-ścierna, sprawność oczyszczania, płytki kontrolne Almena

Cleaning process is a treatment aimed at removing from surface of castings a residues of sandmix and core sand to improve surface quality of the castings. The most common method of the cleaning is shot blasting process. For needs of the test it have been developed a methods for determining quality of the towels, including assessment of its durability and efficiency of the cleaning. The paper presents the mechanism of the shot blasting process with particular emphasis on evaluation of cleaning efficiency. It has been presented the scope and results of the study to assess parameters of the shot stream using indicators of the test with control plates.

KEYWORDS: shot blasting, cleaning efficiency, Almen control plates

Wprowadzenie

Oczyszczanie odlewów jest rodzajem obróbki, mającej

na celu usuwanie z powierzchni odlewów pozostałości przywartej masy formierskiej i rdzeniowej oraz poprawę jakości powierzchni odlewów. Najczęstszym sposobem obróbki jest oczyszczanie strumieniowo-ścierna, które zostało po raz pierwszy wprowadzone w 1870 roku przez Beniamina Chew Tilgmana. Opracował on metodę obróbki powierzchni wyrobów metalowych strumieniem piasku [6]. Z czasem zaczęto wprowadzać inne rodzaje czyściwa. Dużym osiągnięciem w tej dziedzinie było wprowadzenie, w 1920 roku, w miejsce piasku metalicznych środków czyszczących [5].

Istotą procesu oczyszczania jest wytworzenie strumienia czyściwa (najczęściej metalowego, ale i szklanego) i skierowanie go na płaszczyzny oczyszczane. Oczyszczanie ścierna jest wtedy skuteczne, gdy:

- spełnione są warunki konstrukcyjne mechanizmów wytwarzających strumień ścierniwa (czyściwa),
- czyściwo jest materiałem o właściwościach zdefiniowanych wymaganiami technologicznymi,
- strumień czyściwa (śrutu) jest optymalnie kształtowany pod względem geometrycznym, kinematycznym i dynamicznym,
- warunki działania strumienia gwarantują uderzenie ziaren czyściwa w całkowite pole powierzchni oczyszczanej.

Wymienione zagadnienia w różnym stopniu składają się na bardzo złożony proces oczyszczania, którego efektem powinna być wysoka jakość powierzchni odlewów.

Rozwój i doskonalenie technik obróbki wyrobów metalowych, w tym odlewów, doprowadziły do szerokiego wdrożenia metod optymalizacji, w wyniku których można uzyskać

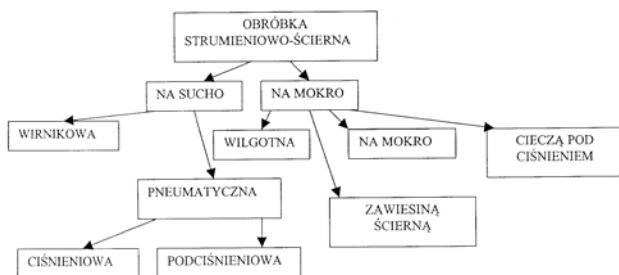
* Dr inż. Piotr Zyzak (pzyzak@ath.bielsko.pl)

zmiany stanu powierzchni i stabilizacji warunków realizacji procesu. W tym względzie istotnego znaczenia nabierają rezultaty prac dotyczących oceny warunków stabilizujących proces wytwarzania warstwy powierzchniowej.

Odlewy, po wybitciu z formy, poddawane są oczyszczaniu i wykańczaniu. Ten zespół operacji technologicznych obejmuje przede wszystkim oczyszczanie powierzchni.

Powierzchnia surowych odlewów, wytwarzanych w formach piaskowych, wymaga oczyszczenia z przywartej masy oraz obróbki powierzchni w celu uzyskania wymaganej gładkości powierzchni, stopnia chropowatości powierzchni. Odlewy wykonywane wg innych technologii również wymagają obróbki powierzchni przed końcowym wykończeniem.

Do oczyszczania powierzchni odlewów stosuje się wyłącznie urządzenia zmechanizowane, które realizują oczyszczanie odlewów metodą mechaniczno – udarową (rys.1.). W metodzie tej jedną z grup stanowi oczyszczanie strumieniowo-ściernie, które polega na wyrzucaniu strumienia cząstki z dużą prędkością na oczyszczane odlewy.



Rys. 1. Metody obróbki strumieniowo-ścierniej, według PN-EN ISO 8504-2:2000 [8]

Zgodnie z definicją zawartą w PN-EN ISO 8504-2:2000 obróbka strumieniowo-ścierna to "uderzanie strumieniem ścierniwa, charakteryzującego się wysoką energią kinetyczną w powierzchnię, która ma być przygotowana."

Czyszczenie powierzchni odlewu ułatwia i znacznie obniża koszty następnych operacji związanych z dalszą obróbką odlewu, poprawia ich jakość. Odbiorcy odlewów surowych wymagają uzyskania określonych własności tworzywa, dokładności wymiarowej oraz gładkości powierzchni. W przypadku odlewów podlegających dalszej obróbce mechanicznej, czystość powierzchni ma niebagatelne znaczenie dla parametrów obróbki skrawaniem i trwałości narzędzi skrawających. Również od innych wyrobów metalowych wymagana jest ściśle określona jakość powierzchni, co związane jest z potrzebami technologii nanoszenia powłok. Czystość powierzchni odgrywa zasadnicze znaczenie dla jakości i trwałości powłok ochronnych i dekoracyjnych.

Podstawy teoretyczne obróbki strumieniem cząstki zostały opracowane przez naukowców radzieckich, głównie przez Aksjonowa P.N. [1, 2] oraz Orłowa G.M. [10].

Aksjonow P.N. opracował podstawy teorii procesu robocznego wirnika oczyszczarki [1, 2].

Prace dotyczące rodzajów środków czyszczących były prowadzone głównie w USA oraz NRF [6]. Dla potrzeb badań opracowano metody określania jakości cząstki, w tym jego trwałości oraz ocenę sprawności czyszczenia. Dla oceny efektu działania uderzającego cząstki, Almen J.O. w 1940 r. opracował pośrednią metodę pomiaru energii kinetycznej ziaren cząstki. Metoda ta jest wykorzystywana

przede wszystkim przy ustalaniu i kontrolowaniu parametrów utwardzania warstwy powierzchniowej wyrobów.

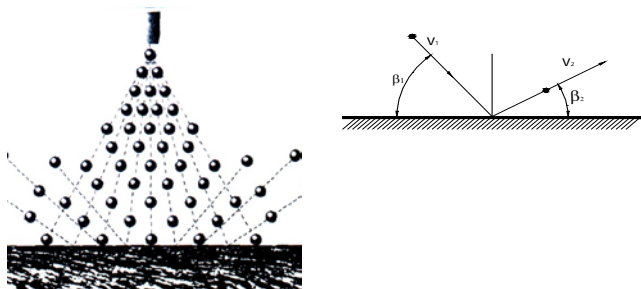
W kraju badania środków czyszczących, stosowanych w oczyszczarkach prowadzono w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie. Podsumowaniem tych badań była publikacja Małeckiego B. [6] oraz monografia Łempickiego J. i Paradyśa J. [5]. W obu tych publikacjach oraz innych dostępnych, nie spotyka się pełnych informacji o metodach badań, w tym o próbie Almena. W cytowanych publikacjach wspomina się jedynie, że amerykańska próba Almena (tzw. Almen-Test) polega na poddaniu działaniu śrutu znormalizowanych paszków blachy, które mocuje się w odpowiednich uchwytach. Wysokość ugięcia blachy jest miarą efektu śrutowania. Nie podano przy tym żadnych istotnych informacji o warunkach prowadzenia próby oraz o stosowanym oprzyrządowaniu. Należy przypuszczać, że przyczyną takiego stanu rzeczy był fakt nie rozprzestrzenienia informacji o procesie kulowania (shot peening), który był od początku stosowany i rozwijany w przemyśle zbrojeniowym.

Proces kulowania to dynamiczna, powierzchniowa obróbka plastyczna metali na zimno powodująca zmianę stanu warstwy wierzchniej. W wyniku zgniotu warstwy wierzchniej pojawia się umocnienie metalu i szereg zmian fizykochemicznych.

W 1952 roku w USA ukazała się instrukcja dotycząca technologii kulowania zawierająca ustalenia dotyczące wymiarów próbek kontrolnych Almena, uchwyty do ich mocowania oraz przyrządu pomiarowego do sprawdzania strzałki ugięcia płytek [7]. W kraju na temat powierzchniowych obróbek plastycznych, m.in. na temat technologii kulowania podjęto prace w szerszym zakresie po roku 1960. Prace prowadzono w różnych placówkach naukowo-badawczych w kraju m.in. w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, Politechnice Rzeszowskiej [7]. Dopiero te opracowania podają szczegółowe opisy próby z płytkami kontrolnymi Almena. Dostępne są również materiały i oprzyrządowanie (płytki kontrolne oraz uchwyty) [7, 9].

Mechanizm procesu czyszczenia

Badając efekt czyszczenia stwierdza się, że poszczególne ziarna uderzając o przedmiot czyszczony spełniają podwójną rolę: czyszczenia przez uderzenia i przez zdzieranie [6]. Różnica w hipotetycznym oddziaływaniu strumienia śrutu na powierzchnię odlewu wynika z prędkości v ziaren cząstki oraz kąta β padania. W zależności od tych parametrów możliwe są zmiany stanu powierzchni począwszy od odkształcenia i deformacji, a skończywszy na skrawaniu i deformacji. Zakres tych zmian opisuje teoria J.G. Bittera [4]. Bazuje ona na mechanice sprężystości i plastyczności ciała stałego. Zużycie erozyjne swym zasięgiem obejmuje zarówno procesy ścierania związane z oddziaływaniem ziaren pod małymi kątami, powodującymi głównie mikroskrawanie, aż po oddziaływanie pod dużymi kątami powodującymi wykruślanie i wyłupywanie.



Rys. 2. Przykłady oddziaływania ziaren śrutu na powierzchnię wyrobu [4], [7]

Typy oddziaływania ziaren czyściwa w zależności od kąta padania na powierzchnię zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Typy oddziaływania ziaren czyściwa [6]

Ozn.	Zakres kątów padania	Opis oddziaływania
1	$0 < \beta \leq \beta_p$ β_p - kąt graniczny	dla $v_1 = v_2$ i $\beta_1 = \beta_2$ - występują zjawiska sprężyste wielkość zużycia jest pomijalnie bardzo mała,
2	$\beta_p < \beta \leq \beta_0$ β_0 - kąt krytyczny	dla $v_1 > v_2$ i $\beta_1 > \beta_2$ - cząstka rysuje i skrawa powierzchnię tworząc "mikrowióry"
3	$\beta_0 < \beta \leq \beta_k$ β_k - kąt graniczny	dla $v_1 \gg v_2$ i $\beta_1 \ll \beta_2$ - cząstka skrawa materiał, odrywając "mikrowióry"
4	$\beta_k < \beta \leq 90^\circ$	dla $v_1 > v_2$ i $\beta_1 \geq \beta_2$ - deformacja "miękkich" powierzchni, wykruszanie "twardych" powierzchni

Zakres oddziaływania ziaren czyściwa obejmuje wartości:

- kąta granicznego β_p , do którego nie uwzględnia się ścierania, bo jest znikome,
- kąta granicznego β_k , powyżej którego bierze się pod uwagę tylko wektor prostopadły,
- kąta krytycznego β_0 , przy którym cząstka całkowicie wytraca swoją prędkość styczną.

Oddziaływanie typu 2 i 3 określa się jako skrawanie odpowiednio nisko- i wysoko-kątowe o intensywności $W1$ i $W2$ oraz oddziaływania typu 4, jako zużycie materiału przez wykruszenie $W3$.

Na bazie teorii sprężystości i plastyczności oraz przy założeniu kulistego kształtu ziaren Bitter wyprowadził zależności określające poszczególne rodzaje zużycia [4].

Dla zużycia skrawającego, gdy ziarna zarysowują powierzchnię z tworzeniem „mikrowiórów”, gdy $\beta_p < \beta \leq \beta_0$:

$$W1 = \frac{2 \times m \times C \times (v \times \sin \beta - K)^2}{\sqrt{v \times \sin \beta}} \times \left(v \times \cos \beta - \frac{C \times (v \times \sin \beta - K^2)}{\sqrt{v \times \sin \beta}} \times E_{j,skr} \right) \quad (1)$$

Dla zużycia skrawającego, gdy ziarna skrawają powierzchnię odrywając „mikrowiór”, gdy $\beta_0 < \beta \leq \beta_k$ wynosi:

$$W2 = \frac{m \times (v^2 \times \cos^2 \beta - K_1 (v \times \sin \beta - K))^{3/2}}{2 \times E} \quad (2)$$

Dla zużycia przez wykruszenie, gdy $\beta_k < \beta \leq 90^\circ$:

$$W3 = \frac{m \times (v \times \sin \beta - K)^2}{2 \times E_{j,krusz}} \quad (3)$$

gdzie: β - kąt padania ziaren czyściwa; deg; m - masa ziaren; g , v - prędkość ziaren; cm/s, C , K , K_1 - parametry ścieralności materiałów.

Uwzględnione w zależnościach 1 ÷ 3 parametry ścieralności wyznaczane z zależności [4]:

$$C = \frac{0,288}{Y} \times \sqrt{\frac{H^2}{Y}} \quad (4)$$

$$K = 1,56 \times Y^{2,5} \times \frac{H^2}{\rho} \quad (5)$$

$$K_1 = 0,82 \times Y^2 \times \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \times H^2 \quad (6)$$

$$H = \frac{1 - \vartheta_1^2}{E_1} + \frac{1 - \vartheta_2^2}{E_2} \quad (7)$$

gdzie: Y - granica sprężystości dynamicznej; MPa, ρ - gęstość ścierniwa; g/cm³, H - współczynnik max. naprężeń kontaktowych kuli z powierzchnią płaską; MPa⁻¹, E_1 , E_2 - moduły Younga materiału ściernego i ścierniwa; Pa, ϑ_1 , ϑ_2 - współczynniki Poissona materiału ściernego i ścierniwa, $E_{j,krusz}$ - energia potrzebna do wykruszenia jednostki objętości materiału; J/m³, $E_{j,skr}$ - energia potrzebna do zeskrawiania jednostki objętości materiału; J/m³.

Oprócz analitycznego zapisu ścieralności, Bitter opracował graficzne ujęcia, które dla materiałów miękkich i twardych zostały przedstawione w pracy [4].

Korzystanie z zależności (1 ÷ 3) wymaga znajomości wielu cech materiałowych i energetycznych, których wartości są możliwe do wyznaczenia na drodze doświadczalnej. Metodyka wyznaczania, opracowana przez S. Jurę [4], składa się z dwóch zasadniczych części. Pierwsza polega na eksperymentalnym poddaniu erozji w strumieniu ściernym próbek z materiałów badanych oraz porównawczych. Drugą część metody polega na wyznaczeniu parametrów ścierania na podstawie wyników eksperymentalnych z zastosowaniem opracowanego programu komputerowego. Program komputerowy dokonuje dopasowania wyników eksperymentu do wzorów Bittera.

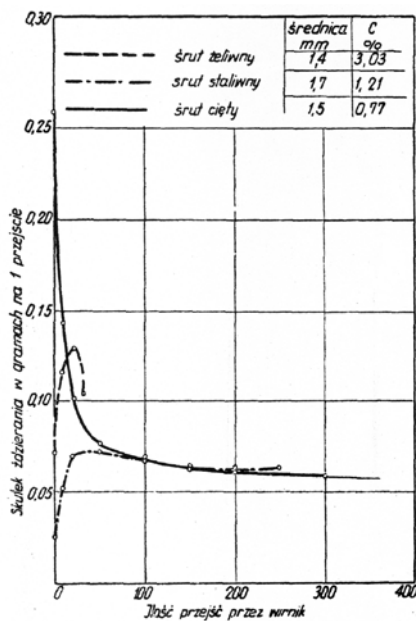
Badanie sprawności czyszczenia

Badania prowadzone przez B. Małeckiego [6] doprowadziły do stwierdzenia, że sprawność procesu należy określać w odniesieniu do działania zdzierającego (skrawającego) strumienia śrutu oraz działania uderzającego, prowadzącego do wykruszania.

■ Badanie działania zdzierającego

Badanie efektów działania zdzierającego przeprowadza się poprzez wyznaczanie ubytków masy w zależności od parametrów charakteryzujących tworzywo obrabianego wyrobu, tworzywo czyściwa oraz parametry procesu. Przykładowe dane przedstawiono na rysunku 3., na którym przedstawiono ubytki masowe w gramach na jedno przejście dla trzech przykładowo wybranych gatunków czyściwa.

Oczywiście w czasie trwania pomiaru musi być zachowana stała wydajność wirnika rzutowego oczyszczarki.



Rys. 3. Efekty zdzierania przez różne rodzaje tworzywa śrutu [6]

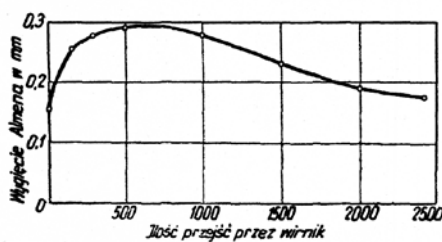
Na efekt obróbki ścierniej wpływa prędkość strumienia śrutu oraz kierunek jego oddziaływania. Wykazano, że w miarę wzrostu prędkości strumienia śrutu wzrasta efekt obróbki ścierniej.

■ Badanie działania uderzającego

Działanie udarowe powoduje odkształcenie plastyczne powierzchni oczyszczanej lub jej rozkruszenie. W wyniku tego, krucha częstokroć warstwa powierzchniowa przedmiotu czyszczonego opada.

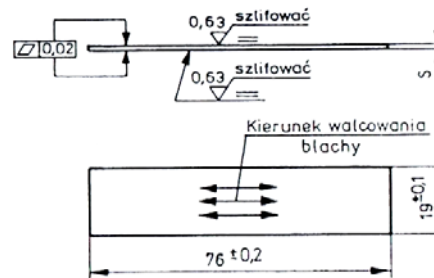
Intensywność działania uderzającego jest określona wartością krzywizny płytki „Almena” odkształconej w wyniku jej jednostronnej obróbki. W opracowaniu [6] B. Małeckci poleca próbę Almena (tzw. Almen – Test) jako skuteczną ocenę badania efektu uderzającego.

Próba Almena polega na zastosowaniu specjalnie przygotowanych, znormalizowanych pasków z miękkiej blachy, które po zamocowaniu w odpowiednich uchwytach poddaje się działaniu strumienia czyszczywa. Wskutek odkształcenia powierzchnia paska wydłuża się z jednej strony, co powoduje jej wygięcie ku górze. Miarą efektów działania udarowego strumienia czyszczywa jest wygięcie paska. Na rysunku 4. podano przykładowe wyniki wygięcia (w mm wysokości wybrzuszenia się paska) dla pewnego gatunku drutu ciętego w funkcji ilości przejść czyszczywa przez wirnik rzutowy. Dane te nie uzupełniono żadnymi informacjami o metodyce próby [6].



Rys. 4. Charakterystyka działania udarowego strumienia czyszczywa zdjęta metodą Almena; śrut o ziarnach 0,6 mm z drutu ciętego [6]

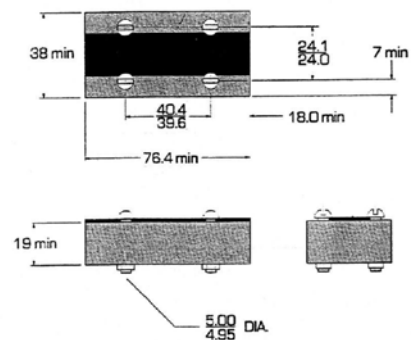
Szczegółowe dane na temat warunków prowadzenia badań przy użyciu pasków kontrolnych, opracowana przez J.O. Almena podaje literatura dotycząca tzw. procesu kulowania, inaczej procesu uszlachetniania, umacniania warstwy wierzchniej wyrobów [7, 9]. Dane te wcześniej nie publikowano w kraju, a dostępna literatura z tego zakresu pochodzi dopiero z lat 90. XX w. Wymiary próbek kontrolnych przedstawiono na rysunku 5. Na rysunku 6 przedstawiono sposób pomiaru strzałki ugięcia płytek kontrolnych. Wymiary uchwytu płytek kontrolnych przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 5. Wymiary płytek kontrolnych



Rys. 6. Pomiar strzałki ugięcia płytek kontrolnych



Rys. 7. Wymiary uchwytu płytek kontrolnych oraz sposób ich mocowania [9]

Dla różnego zakresu intensywności oddziaływania strumienia śrutu są stosowane płytki N, A i C o zróżnicowanej grubości. Płytki kontrolne charakteryzują się odpowiednią płaskością oraz twardością (tabela 2). Zakres stosowania określono w tabeli 3. Stosowanie płytek kontrolnych (C, A lub N) zależy od parametrów procesu kulowania, głównie od granulacji i prędkości śrutu oraz od rodzaju obrabianego materiału.

Tab. 2. Charakterystyka płytek kontrolnych Almena [7, 9, 11]

Oznaczenie	Typ	Płaskość, mm	Twardość, HRC
A1-S	A	0,0127	45÷48
A1-B	A	0,0254	45÷49
A-1	A	0,0254	44÷50
A-2	A	0,0381	44÷51
A3-55 HRC	A	0,0254	53÷56
A3-60 HRC	A	0,0254	58÷62
C1-S	C	0,0127	45÷48
C1	C	0,0254	40÷50
C2	C	0,0381	40÷51
N1-S	N	0,0127	45÷48
N1	N	0,0254	44÷50
N2	N	0,0381	44÷51

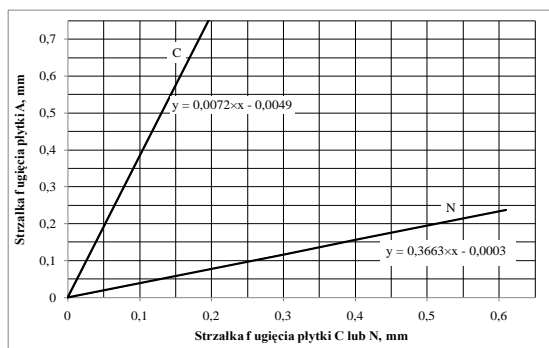
Tab. 3. Zakres stosowania płytek kontrolnych Almena [7]

Typ płytki kontrolnej	Grubość s, mm	Zakres stosowania
N	0,8±0,02	dla niskiej intensywności obróbki, gdy strzałka ugięcia płytki typu A wynosi < 0,15 mm
A	1,3±0,02	dla średniej intensywności obróbki, gdy strzałka ugięcia płytki typu A wynosi 0,15 ÷ 0,60 mm
C	2,4±0,02	dla wysokiej intensywności obróbki, gdy strzałka ugięcia płytki typu A wynosi > 0,60 mm

Metodę próbek kontrolnych J.O. Almena opracował dla potrzeb procesu kulowania w celu ustalenia stałych parametrów procesu utwardzania (umocnienia) powierzchni warstwy wierzchniej wyrobów w całej obrabianej serii wyrobów. Na podstawie tej próby są ustalane i porównywane takie parametry: jak intensywność oddziaływania strumienia śrutu oraz pokrycie powierzchni.

Intensywność kulowania jest określana poprzez wartość strzałki ugięcia mierzonej na jednostronnie kulowanych próbkach kontrolnych Almena, wykonanych zgodnie z normą SAE J 444 (Cast shot and grit for peening and cleaning, 1969) oraz BN – 80/1062-01 (Kulowanie. Wytyczne obróbki, 1980).

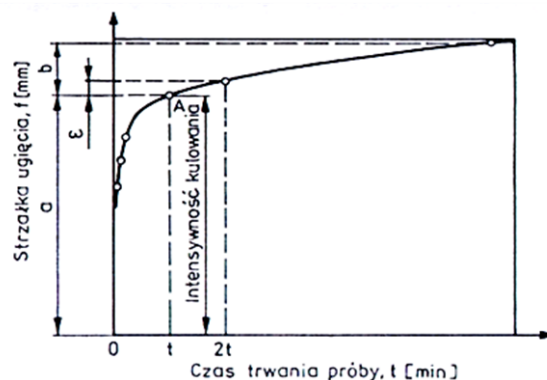
Charakterystykę płytek kontrolnych przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Charakterystyka płytek kontrolnych; zakres wartości strzałki ugięcia płytek C, N w stosunku do A [11]

Ustalenie optymalnej intensywności kulowania polega na wyznaczeniu zależności ugięcia próbki kontrolnej Almena od czasu obróbki w postaci wykresu podanego na rysunku 9. Czas kulowania ustala się w wartości spełnienia warunku: $\varepsilon = \frac{a}{10}$; wówczas czas odpowiadający punktowi A na

krzywej przyjmuje się za czas kulowania. Powyżej punktu A (strefa b) dużym przyrostom czasu odpowiadają bardzo małe strzałki ugięcia.



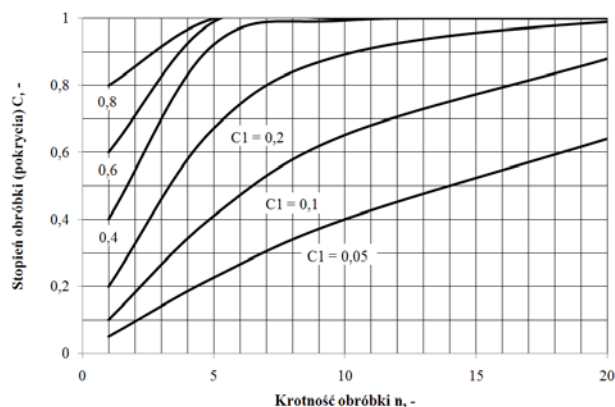
Rys. 9. Krzywa intensywności kulowania: a – strefa szybkiej zmiany strzałki ugięcia próbki kontrolnej, b – strefa powolnej zmiany strzałki ugięcia próbki kontrolnej [7, 9]

Parametrem ściśle wiążącym się z intensywnością kulowania i mającym istotny wpływ na jakość obróbki jest stopień obróbki - pokrycia powierzchni próbek kontrolnych Almena oraz powierzchni wyrobów. Stopień obróbki określa również gęstość padania ziaren na powierzchnię.

Pokrycie powierzchni jest to iloraz wartości powierzchni obrabianej przez śrut (z odciskami śrutu) do całkowitej powierzchni próbki kontrolnej Almena lub powierzchni próbek wyrobu. W normie amerykańskiej SAE J 443 (Procedures for using standard shot peening test strip, 1968) podano zależność:

$$C = 1 - (1 - C_1)^n \quad (8)$$

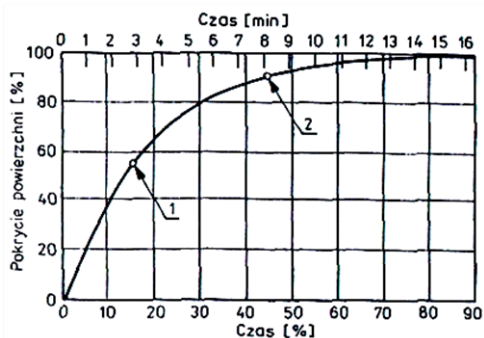
gdzie: C – pokrycie powierzchni obrabianej po n cyklach; %, C_1 – pokrycie powierzchni obrabianej po 1 cyklu; %, n – krotność obróbki; liczba przejść czyściwiwa przez wirnik rzutowy.



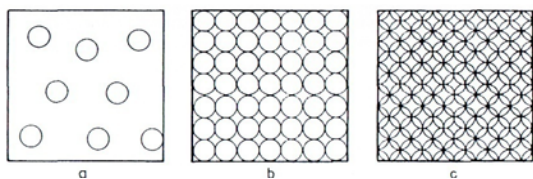
Rys. 10. Stopień obróbki (pokrycia)

Wartość pokrycia powierzchni w wyniku kulowania powinna wynosić powyżej 80% (rys. 11.)

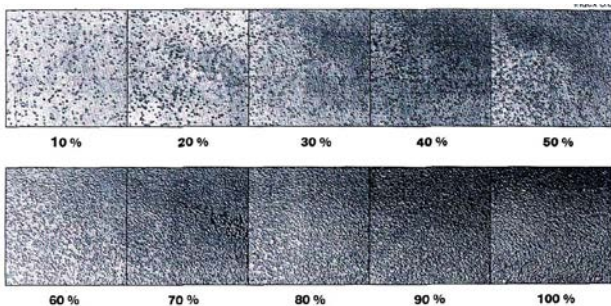
Postuluje się, aby oddziaływanie śrutu obejmowało całą powierzchnię przedmiotu obrabianego (rys. 12.c). Opracowano również wzorce oceny powierzchni obrabianej strumieniem śrutu (rys. 13.).



Rys. 11. Wzrost pokrycia powierzchni w funkcji czasu: 1 – czas obróbki odpowiadający 55 % pokryciu powierzchni, 2 – czas obróbki do uzyskania 90% pokrycia [7, 9]

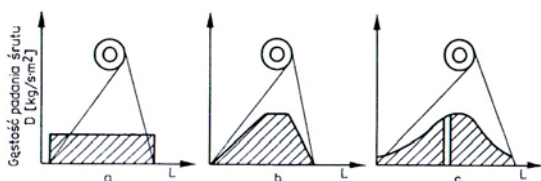


Rys. 12. Przykłady stopni pokrycia powierzchni po obróbce strumieniem śrutu: a – niedopuszczalne pokrycie powierzchni kulowanymi, b – nieprawidłowe, c – prawidłowe, efekt najkorzystniejszy [7]



Rys. 13. Wzorce powierzchni obrabianego wyrobu [9]

Ważnym czynnikiem decydującym o jakości obróbki jest gęstość strumienia śrutu padającego na obrabiany wyrób. Należy dążyć, aby rozkład gęstości padania śrutu był zbliżony do optymalnego. Na rysunku 14. przedstawiono rozkłady gęstości padania śrutu: a, b – najkorzystniejszy rozkład, c – rzeczywisty rozkład.



Rys. 14. Postacie rozkładów gęstości: a – idealny, b – pożądany, teoretycznie osiągalny, trapezowy, c – rzeczywisty, osiągalny w warunkach rzeczywistych

Rozkład rzeczywisty odpowiada obrazowi teoretycznego rozkładu normalnego, zwiniętego, tak jak i chropowatość powierzchni obrabianych wyrobów.

Wykazano doświadczalnie, że efektywną część procesu kulowania stanowi działanie tej porcji śrutu, która uderza z maksymalną intensywnością [7]. Odpowiada to pracy największych i najtwardszych ziaren w mieszance, uderzających o część kulowaną z największą prędkością i przy kącie uderzenia śrutu zbliżonym do 90° w stosunku do powierzchni kulowanej.

Zakres i warunki prowadzenia badań własnych

Badania własne obejmowały ocenę ilościową i jakościową parametrów i charakterystyk oczyszczania strumieniem czyszczywa. Rozwinięciem zakresu badań własnych jest:

- wyznaczenie i walidacja parametrów strumienia śrutu oraz ich współzależności,
- ocena stanu powierzchni odlewów w zależności od parametrów strumienia określonego czyszczywa.

W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych na charakterystyki strumienia śrutu. Dokonano to w oparciu o zależności podane w specjalistycznej literaturze [1, 2].

Następnym, działaniem była ocena przebiegu procesu i jego efektów. Oceniano stan powierzchni odlewów w zależności od parametrów strumienia określonego czyszczywa.

W badaniach własnych [3, 11, 12] skoncentrowano się na doskonaleniu metodyki wyznaczania parametrów strumienia śrutu i ustalenia zakresu ich wartości. Badania prowadzono korzystając z oczyszczarek przemysłowych OWS – 1000, OWT – 400 A, OWH – $1,0 \times 1,5$ oraz OWK – 4500. Realizacja badań w założonym zakresie wymagała ponadto opracowania konstrukcji, wykonania i oprzyrządowania stanowisk badawczych.

Zakres badań własnych obejmuje ocenę parametrów strumienia śrutu metodą wskaźników wyznaczonych z badań z użyciem płytek kontrolnych. Metodyka oceny wymaga przeprowadzenia badań zachowania się i wyglądu płytek poddanych działaniu strumienia śrutu przy zmiennych parametrach pracy zespołu rzutowego.

Badania własne prowadzono z użyciem stanowiska przemysłowego oczyszczarki wirnikowej OWS-1000 Firmy Technical. Oczyszczarka wyposażona jest w dwa wirniki rzutowe o regulowanej wydajności. Odlewy umieszczone są na obrotowym stole. Zastosowane rozwiązania i przemienniki częstotliwości pozwalają na ustalenie i rejestrowanie parametrów pracy oczyszczarki. Podstawowe parametry zespołów rzutowych używanego stanowiska są następujące: ilość wirników rzutowych – 2, średnica koła rzutowego – $D=300$ mm, wydajność zespołu rzutowego – $\dot{G}=50 \div 150$ kg/min, ilość obrotów wirnika – $n=1400 \div 3000$ obr/min, szerokość łopatek – $b=75$ mm, moc zainstalowana – $P=20$ kW. W badaniach stosowano odlewy z różnych tworzyw: staliwa, żeliwa oraz stopów metali nieżelaznych. Oczyszczaniu poddawano odlewy oraz takie ich elementy jak układ wlewowy czy nadlew. Stosowano do badań również odlewy testowe wykonane dla potrzeb realizacji badań doświadczalnych. Odlewy wykonano w formach z masy syntetycznej z bentonitem. Odlewy testowe ze stopów metali nieżelaznych z brązu i aluminium oraz żeliwa zostały wykonane w Odlewni Doświadczalnej Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Odlewy stalowe do badań doświadczalnych wykonano w Krakowskich Zakładach Odlewniczych „ZREMB” S.A. W badaniach własnych stosowano różne rodzaje czyszczywa, o charakterystyce podanej w tabeli 4.

Tab. 4. Charakterystyka śrutu kulistego stosowanego w badaniach doświadczalnych

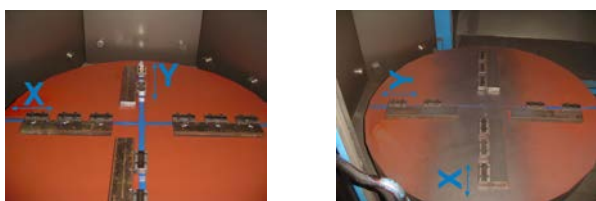
Oznaczenie czyszczywa	Rodzaj tworzywa / ozn. wg SAE	Ziarnistość nominalna śrutu, d_{90} , mm	Gęstość właściwa, g/cm^3	Zastosowanie w oczyszczarkach wirnikowych i śrutownicy
B	Śrut stalowy CS	0,42 ÷ 2,0	7,9	OVS – 1000

Dla przedstawionego w tabeli 4 czyszczywa określono charakterystyki granulometryczne, wyznaczono średnie średnice ziaren oraz określono gęstość właściwą.

■ Wyniki badań intensywności oddziaływania strumienia śrutu

Z dostępnych płytek kontrolnych typu N, A, C do badań doświadczalnych wytypowano płytki typu A i C. Badania procesu oczyszczania na stanowisku oczyszczarki OVS-1000 prowadzono w ten sposób, że używano jedynie wirnika rzutowego umieszczonego nad stołem roboczym. Drugi wirnik, wchodzący w skład oczyszczarki, umieszczony na bocznej ścianie komory był wyłączony.

Do badań intensywności oddziaływania strumienia śrutu wykonano specjalne uchwyty mocujące płytki Almena. Płytki zamocowane w uchwytach umieszczano na stole roboczym oczyszczarki. Pomiarzy zrealizowano wykorzystując śrut stalowy kulisty S280, S330, S550 firmy Wheelabrator Allevard. Ustalono następujące warunki prowadzenia badań doświadczalnych: czasy oczyszczania – 1, 3, 5 min, prędkość obrotowa turbiny rzutowej – minimalna, średnia i maksymalna. Dodatkowo każdą próbę prowadzono dla minimalnej i maksymalnej wydajności wirnika rzutowego. Płytki Almena umieszczono w osi x i osi y stołu, jak pokazano na rysunku 15. Skoncentrowany strumień śrutu z wirnika rzutowego swoim zakresem działania obejmuje obszar, którego pole można określić jako $L \times B = 90 \times 30$ cm. (rys. 15).

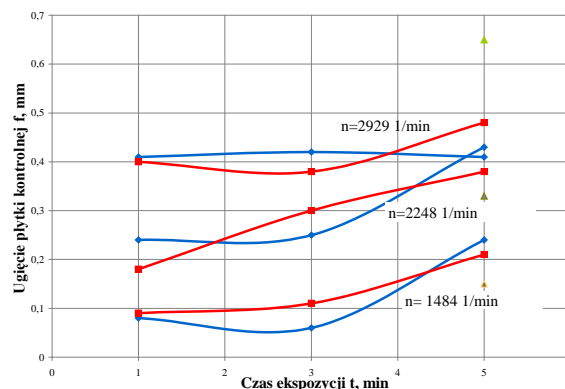


Rys. 15. Widok rozmieszczenia płytek kontrolnych Almena w komorze oczyszczarki [11]

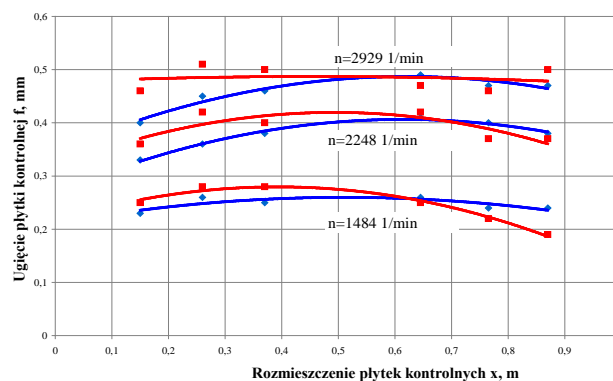
Płytki umieszczone w tym obszarze wzdłuż osi x ulegają odkształceniu znacznie więcej niż płytki poddane działaniu strumienia rozproszonego (oś y stołu). Po próbach wstępnych zdecydowano się, że płytki Almena podczas badań będą umieszczane wyłącznie w strefie działania skoncentrowanego strumienia śrutu. Umieszczanie płytek kontrolnych w strefie działania strumienia rozproszonego nie przyczynia się do uzyskania miarodajnych informacji o parametrach strumienia śrutu, gdyż ugięcia płytek są znikome i mieszczą się w zakresie f do 0,05 mm.

Wyniki badań, w celu lepszej interpretacji opracowano w formie graficznej i zamieszczono na rysunkach 16-18. W pierwszej kolejności przedstawiono w formie graficznej wyniki badań ugięcia płytek Almena przy oczyszczaniu śrutem

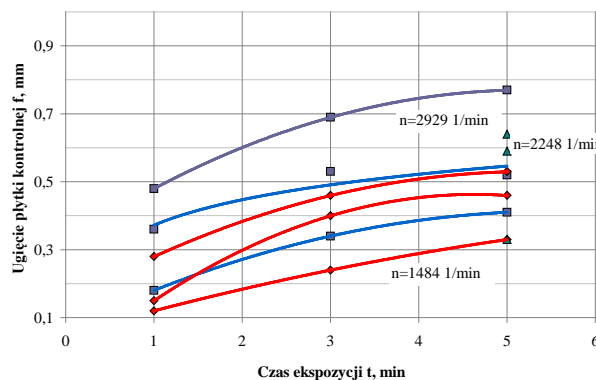
stalowym, kulistym S280. Każda z prób była przeprowadzona przy stałej odległości płytek od wylotu z wirnika rzutowego wynoszącej odpowiednio 1185 mm. W zależności od wybranego gatunku śrutu cechującego się odpowiednią granulacją uzyskano następujące wydajności wirników rzutowych: dla śrutu S280 - $\dot{G} = 100$ kg/min, $\dot{G} = 220$ kg/min; dla śrutu S330 - $\dot{G} = 66$ kg/min, $\dot{G} = 162$ kg/min; dla śrutu S550 - $\dot{G} = 48$ kg/min, $\dot{G} = 180$ kg/min.



Rys. 16. Wpływ czasu ekspozycji, prędkości obrotowej wirnika oraz położenia płytek kontrolnych na wartość strzałki ugięcia płytki kontrolnej typu C; śrut S280, $\dot{G} = 220$ kg/min, $t = 1, 3, 5$ min, $n = 1484 \div 2929$ min^{-1}



Rys. 17. Wpływ czasu ekspozycji, prędkości obrotowej wirnika oraz położenia płytek kontrolnych na wartość strzałki ugięcia płytki kontrolnej typu C; śrut S330, $\dot{G} = 66, 162$ kg/min, $t = 1$ min, $n = 1484 \div 2929$ min^{-1}



Rys. 18. Wpływ czasu ekspozycji, prędkości obrotowej wirnika oraz położenia płytek kontrolnych na wartość strzałki ugięcia płytki kontrolnej typu C; śrut S550, $\dot{G} = 48$ kg/min, $t = 1, 3, 5$ min, $n = 1484 \div 2929$ min^{-1}

Stosowanie płytek kontrolnych pozwala na określenie stopnia pokrycia powierzchni czyszczywem. Określenie stopnia

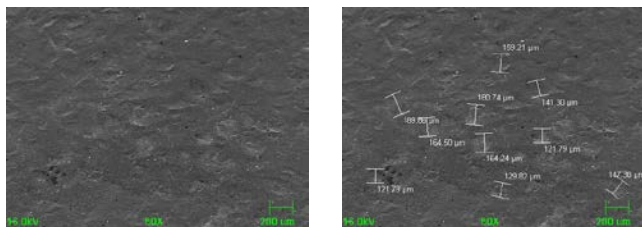
pokrycia polegało na obserwacji po mikroskopem powierzchni płytek Almena poddanych działaniu ziaren śrutu. Określano ilość śladów pozostawionych na powierzchni płytki przez ziarna śrutu jakie znajdują się w obserwowanym obszarze. W badaniach własnych zdecydowano się na określenie tego parametru poprzez analizę ilości i powierzchni odcisków.

Przykładową płytkę Almena po obróbce strumieniowo-ściernej przedstawiono na rysunku 19. W sposób wyraźny, daje się zauważyć, usuniętą warstwę lakieru kontrastowego po przeprowadzonej obróbce strumieniowo-ściernej.



Rys. 19. Widok powierzchni płytki Almena ze śladami uderzeń śrutu, stanowisko oczyszczarki OWS-1000, śrut stalowy kulisty [11]

Celem oceny stopnia pokrycia powierzchni płytek kontrolnych Almena wykorzystano do badań mikroskop elektronowy skaningowy JEOL JSM-5500LV oraz mikroskop optyczny Leica MZ6. Analizowano na wybranym obszarze wymiary śladów jakie pozostawiły ziarna czyściwa. Przykładowy obraz powierzchni płytki C przedstawiono na rysunku 20.



Rys. 20. Powierzchnia płytki C, $n = 1486$ obr/min, $t = 1$ min, $\dot{G} = 162$ kg/min; a) powierzchnia bez zwymiarowanych odcisków śrutów, b) zwymiarowane odciski śrutów

Odnosząc stan powierzchni płytek po oczyszczeniu, do danych wzorcowych zawartych w publikacji [7], określono, że stopień pokrycia w przypadku strumienia skoncentrowanego (stanowisko OWS-100) zawierał się w granicach $40 \div 80$ %. Dla strumienia rozproszonego stopień pokrycia wynosił $20 \div 30$ %.

Podsumowanie

Podstawowymi wskaźnikami, wiążącymi się ze stanem końcowym powierzchni, są: intensywność (natężenie) oddziaływania strumienia śrutu, energia kinetyczna oraz kąt padania, od którego zależą efekty obróbki (skrawanie i uderzanie - odbijanie) oraz stopień pokrycia powierzchni.

Intensywność oddziaływania to łączne, siłowe oddziaływanie, na powierzchnię odlewu, zbioru ziaren. Ziarna zbioru charakteryzują się indywidualnymi parametrami zależnymi od ich geometrii ale również przebiegu ruchu w elementach zespołu rzutowego. W związku z łącznym wpływem tak wielu czynników determinujących proces obróbki strumie-

niowo-ściernej możliwa jest często jedynie uśredniona ocena wielkości.

Stosowanie płytek kontrolnych pozwala na określenie siłowego oddziaływania ziaren śrutu w polu rozrzutu strumienia oraz skutki oddziaływania, ilość i wielkość odcisków. Jest to próba, której praktyczne możliwości i szczegóły stosowania dotychczas nie omawiano i stosowano w praktyce odlewniczej. Opracowanie szczegółowych warunków stosowania tej próby pozwala na porównawczą analizę wpływu parametrów konstrukcyjno – eksploatacyjnych procesu oczyszczania i ustalenia ich związków z efektami. Próba Almena daje możliwość optymalizacji procesu m. innymi poprzez: dobór czasu obróbki, ocenę skuteczności obróbki związanej z doborem czyściwa i jego stanem w wyniku wielokrotnego używania, wybór położenia obrabianych odlewów i ich ruchu, dobór wydajności i ilości pracujących wirników rzutowych. Oprócz ustalenia czasu obróbki daje możliwość ustalenia warunków celem zapewnienie powtarzalności efektów obróbki.

Pomiar strzałki ugięcia i sprawdzenie powierzchni odlewów poprzez ocenę pokrycia powierzchni, porównywanie z wzorcami to jedyna, prosta metoda kontroli możliwości i efektów oczyszczania. Ujmuje ona efekty łącznego oddziaływania: rodzaju i granulacji śrutu, prędkości wirników rzutowych lub ciśnienia powietrza, średnicy dyszy, odległości wirnika (dyszy) od powierzchni odlewów, kąta padania śrutu na powierzchnię, czasu obróbki.

Opanowanie metody i warunków stosowania płytek pozwala rekomendować ją dla praktycznego wykorzystania w praktyce odlewniczej.

LITERATURA

1. Aksjonow P.N., Oborudowanije litejnych ciechow. Izdatielstwo „Mashinostrojenie”. Moskwa, 1977.
2. Aksjonow P.N., Wybrane zagadnienia z Teorii Maszyn Odlewniczych. Wydawnictwo „Śląsk” Katowice, 1965.
3. Fedoryszyn A., Zyzak P., Charakterystyka warstwy wierzchniej odlewów poddanych obróbce strumieniowo-ściernej. Archives of Metallurgy and Materials / Polish Academy of Sciences. Committee of Metallurgy. Institute of Metallurgy and Materials Science ;ISSN 1733-3490. — 2010 vol. 55 iss. 3 s. 813–818.
4. Kilarski J., Studnicki A., Suchoń J., Bartocha D., Zastosowanie teorii Bittera do oceny materiałów stosowanych na elementy maszyn i urządzeń pracujących w warunkach zużycie ściernego. Przegląd Odlewnictwa 4, 2005, s.284.
5. Łempicki J., Paradysz J., Oczyszczanie i wykańczanie odlewów żeliwnych i stalowych. WNT. Warszawa, 1979.
6. Małecki B., Środki czyszczące stosowane w oczyszczarkach wirnikowych i metody ich badań. Przegląd Odlewnictwa, 1963, s.45.
7. Nakonieczny A., Dynamiczna obróbka plastyczna - kulowanie. Instytut Mechaniki Precyzyjnej. Warszawa 2002.
8. Piosik T., Wirnikowe oczyszczarki strumieniowo-ścierne. Materiały Sympozjum „Metody i Środki do Strumieniowo-Ściernego Przygotowania Podłoży Metali Pod Powłoki Ochronne”. Instytut Mechaniki Precyzyjnej. Hajnówka, 2001, s.89
9. Pr zbiorowa, Shot Peening. A Dynamic application and Its Future. Wydawnictwo Metal Finishing News (MFN). Wetzikon, 2006.
10. Zajgerow J. B., Maszyny i Automatykacja Litiejnego Proizvodstva. Wydawnictwo Wyższaja Szkoła. Minsk, 1969.
11. Zyzak P., Analiza wpływu parametrów strumienia śrutu na jakość powierzchni oczyszczonych odlewów. Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Kraków 2010.
12. Zyzak P., Charakterystyka strumienia śrutu w oczyszczarce wirnikowej. Archives of Metallurgy and Materials / Polish Academy of Sciences. Committee of Metallurgy. Institute of Metallurgy and Materials Science ;ISSN 1733-3490. — 2010 vol. 55 iss. 3 s. 977–984.