

	Organizatorzy:	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	Politechnika Łódzka		
	Wydział Mechaniczny		
• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn			

## Obrabialność żeliwa sferoidalnego ADI w procesie szlifowania zewnętrznych powierzchni cylindrycznych

### Machinability of austempered ductile cast iron in cylindrical external grinding

DARIUSZ OSTROWSKI  
GRZEGORZ GUMIENNY  
MAŁGORZATA SIKORA  
BOGDAN KRUSZYŃSKI  
TADEUSZ PACYNIAK \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.381

W artykule przedstawiono wyniki prób wglębnego szlifowania żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego z węglnikami dla różnych ściernic i parametrów obróbki. Wyznaczono wpływ kinematycznych parametrów procesu na wybrane właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu oraz siłę szlifowania i drgania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szlifowanie cylindryczne, żeliwo sferoidalne ADI

*The results of investigations of plunge grinding of austempered ductile cast iron (ADI) with metal carbides content are presented in the paper. Investigations were carried out for different grinding wheels and grinding parameters. The influence of grinding process conditions on the selected surface layer properties after grinding as well as on grinding forces and vibrations was determined.*

**KEYWORDS:** cylindrical plunge grinding, austempered ductile cast iron

#### Wstęp

Żeliwem sferoidalnym o najwyższych właściwościach wytrzymałościowych jest żeliwo ADI (Austempered Ductile Iron – żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną). Jego mikrostruktura składa się z grafitu kulkowego i ausferrytu [4, 11]. Ausferryt jest to mieszanina ferrytu bainitycznego i austenitu przesyconego węglem. Ilość austenitu w żeliwie ADI może dochodzić do 40%. Jest on pożądanym składnikiem mikrostruktury ponieważ pod wpływem naprężeń ulega przemianie martenzytycznej, co skutkuje umoc-

nieniem materiału.

W celu uzyskania ausferrytu żeliwo należy poddać obróbce cieplnej, polegającej na hartowaniu z izotermicznym wytrzymaniem w zakresie przemiany austenit → bainit [1, 2, 5, 9, 10, 12]. Gatunki żeliwa ADI ujmuje norma PN-EN 1564:2012; przedstawiono je w tabeli 1.

Tab. 1. Gatunki żeliwa ADI wg PN-EN 1564:2012

Oznaczenie żeliwa	Własności mechaniczne			
	R <sub>m</sub> , MPa min.	R <sub>p0,2</sub> , MPa min.	A, % min.	HBW
EN-GJS-800-10 EN-GJS-800-10-RT	800	500	10	250÷310
EN-GJS-900-8	900	600	8	280÷340
EN-GJS-1050-6	1050	700	6	320÷380
EN-GJS-1200-3	1200	850	3	340÷420
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1	380÷480

Dodatkowo ww. norma przewiduje dwa gatunki żeliwa ADI o podwyższonej twardości. Przedstawiono je w tabeli 2.

Tab. 2. Gatunki żeliwa ADI o podwyższonej twardości wg PN-EN 1564:2012

Oznaczenie żeliwa	Własności mechaniczne			
	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>p0,2</sub> , MPa	A, %	HBW min.
EN-GJS-HB400	1400	1100	1	400
EN-GJS-HB450	1600	1300	–	450

Żeliwo ADI znajduje zastosowanie na elementy narażone na zużycie ściernic i wysokie naciski powierzchniowe, np. części maszyn rolniczych, kruszarki, młyny kulowe do mielenia kamieni, wykładziny oczyszczarek bębnowych, gaśnice, kraty więzione, itp.

\* dr inż. Dariusz Ostrowski (dariusz.ostrowski@p.lodz.pl),  
dr hab. inż. Grzegorz Gumienny (grzegorz.gumienny@p.lodz.pl),  
dr inż. Małgorzata Sikora (malgorzata.sikora@p.lodz.pl),  
prof. dr hab. inż. Bogdan Kruszyński (bogdan.kruszynski@p.lodz.pl),  
prof. dr hab. inż. Tadeusz Pacyniak (tadeusz.pacyniak@p.lodz.pl),

W celu podwyższenia odporności na zużycie w osnowie żeliwa można wytworzyć węgliki. Żeliwo, w którym węgliki otrzymuje się w stanie surowym, a mikrostrukturę ausferrytyczną poprzez obróbkę cieplną określa się mianem CADI (Carbide Austempered Ductile Iron - żeliwo sferoidalne hartowane z przemianą izotermiczną z węglnikami).

Osnowę ausferrytyczną można uzyskać również bez kosztownej i szkodliwej dla środowiska obróbki cieplnej (stosowanie kąpieli solnych), w wyniku modyfikacji składu chemicznego żeliwa. Należy w tym celu wprowadzić pierwiastki wpływające na trwałość austenitu w zakresie przemiany perlitycznej i bainitycznej. Stosować do tego celu można Mo, Ni, Cu i Cr. Szczegółowe dane w tym zakresie podane są w pracy [3].

Ze względu na konieczność łączenia elementów wykonanych z żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego z innymi elementami maszyn istnieje konieczność poddania wybranych powierzchni odlewów obróbce skrawaniem. Obecność węglików, pożądana w elementach narażonych na zużycie ściernie, może skutkować trudnościami w procesach obróbki skrawaniem np. nadmiernym zużyciem narzędzia.

W związku z tym w ramach niniejszego artykułu podjęto próbę wyznaczenia wpływu kinematycznych parametrów procesu szlifowania oraz przydatności wybranych ściernic na wybrane właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu oraz siły szlifowania i drgań.

### Przygotowanie próbek

Wsad do pieca składał się z surówki specjalnej o składzie przedstawionym w tabeli 3, to jest żelazokrzemu FeSi75, żelazomanganu FeMn75, technicznie czystego molibdenu oraz miedzi. Metal wytopiono w piecu elektrycznym indukcyjnym średniej częstotliwości o pojemności tygla 30 kg. Skład chemiczny żeliwa przedstawiono w tabeli 4. Sferoidyzacji żeliwa dokonano metodą Inmold. Żeliwem o temperaturze około 1480°C zalewano formę piaskową, w której układzie wlewowym znajdowała się komora reakcyjna w kształcie kuli o średnicy  $\phi 85$  mm. Umieszczano w niej zaprawę sferoidyzująco-modyfikującą Lamet® 5504 norweskiej firmy Elkem o składzie pokazanym w tabeli 5. Za komorą reakcyjną znajdowała się komora mieszania zapewniająca całkowite rozpuszczenie zaprawy. Następnie znajdowała się komora odlewu w kształcie walca o średnicy  $\phi 70$  i długości 250 mm.

Tab. 3. Skład chemiczny surówki specjalnej

Skład chemiczny, %				
C	Si	Mn	P	S
3,91	0,22	0,05	0,072	0,02

Tab. 4. Skład chemiczny zaprawy sferoidyzująco-modyfikującej

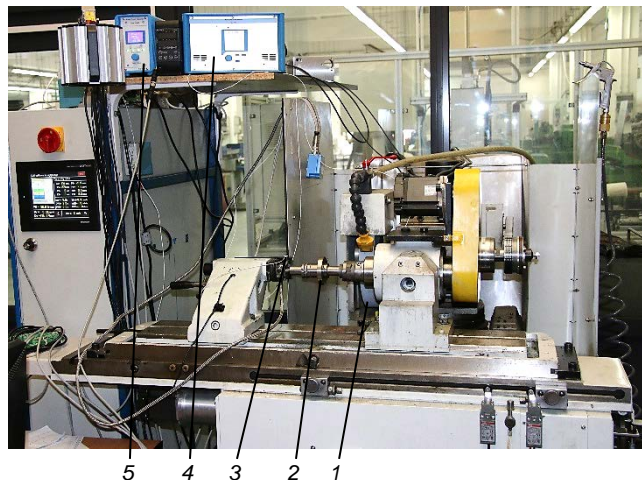
Skład chemiczny, % mas.					
Si	Mg	Ca	La	Al	Fe
44÷48	5÷6	0,4÷0,6	0,25÷0,40	0,8÷1,2	reszta

Tab. 5. Skład chemiczny badanego żeliwa

Skład chemiczny, % mas.						
C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu
3,90	2,45	0,24	0,06	0,02	2,30	2,94

### Badania doświadczalne

Prace badawcze przeprowadzono na szlifierce sterowanej numerycznie zbudowanej na bazie szlifierki Tacchella 4M przez zespół pracowników Instytutu Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechnik Łódzkiej, na rysunku 1 przedstawiono widok stanowiska.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego: 1 – ściernica, 2 – przedmiot obrabiany, 3 – czujnik drgań, 4 – wzmacniacz sił, 5 – wzmacniacz drgań

Struktura układów pomiarowych szlifierki oraz autorskie oprogramowanie sterujące i rejestrujące zostało szczegółowo opisane w [7].

W przeprowadzonych próbach szlifowano włącznie próbki w postaci pierścieni o średnicy  $\phi 65$  mm i szerokości 15 mm osadzone na trzpieniu. Badania realizowano dla różnych wydajności objętościowych szlifowania  $Q'_w$  wynoszących 0,5, 1,0 i 1,25 mm<sup>3</sup>/(mm·s), prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  wynoszącej 100, 150, 200, 250 i 300 mm/s, natomiast prędkość skrawania wynosiła  $v_s$  15, 25 i 35 m/s. Parametry skrawania ustalono na podstawie wstępnych prób szlifowania sugerując się otrzymanymi wartościami chropowatości powierzchni i przebiegami składowych sił szlifowania [8].

Proces szlifowania realizowano w cyklu składającym się z dosuwu roboczego bez wyiskrzania i szybkiego odsoku z prędkością 200  $\mu$ m/s, każdorazowo zbierając objętość właściwą zeszlifowanego materiału  $V_w$  równą 50 mm<sup>2</sup>/mm.

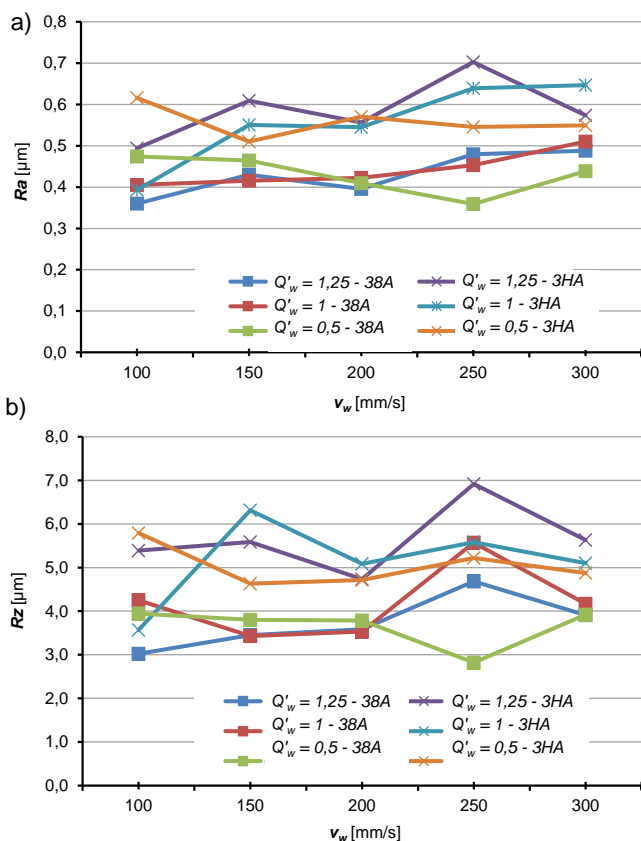
Proces kondycjonowania ściernicy przeprowadzono przy prędkości obwodowej ściernicy  $v_s$  33 m/s, przyjęto dosuw kondycjonowania ściernicy  $a_d$  wynoszący 20  $\mu$ m i posuw wzdłużny kondycjonowania  $v_{fd}$  równy 100 mm/min. Wynikowo wskaźnik pokrycia  $k_d$  wynosił około 8.

Jako chłodziwo zastosowano 3% wodny roztwór emulsji syntetycznej Mobilcut 321. Badania przeprowadzono z użyciem ściernicy ceramicznej z ziarnem z elektrokorundu szlachetnego 38A60K5VBE oraz ściernicą z ziarnem mikrokrystalicznym 3HA060J8V114 firmy Molemab.

Pomiar parametrów chropowatości dokonano przyrządem do pomiaru chropowatości SurfTest SJ-200 firmy Mitutoyo.

## Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono zmiany parametrów chropowatość Ra i Rz powierzchni dla dwóch ściernic w funkcji prędkości przedmiotu przy różnych  $Q'_w$  dla prędkości obwodowej ściernicy  $v_s$  35 m/s. Z rysunku 2 wynika, że najniższą chropowatość opisaną parametrami Ra i Rz uzyskano przy zastosowaniu konwencjonalnej ściernicy 38A dla  $v_w$  250 mm/s i  $Q'_w$  0,5 mm<sup>3</sup>/(mm·s), oraz dla  $v_w$  100 mm/s i  $Q'_w$  1,25 mm<sup>3</sup>/(mm·s). Znaczący wzrost chropowatości zaobserwowano przy obu ściernicach dla  $v_w$  250 mm/s i  $Q'_w$  1,25 mm<sup>3</sup>/(mm·s). W przypadku ściernicy z ziarnem mikrokrystalicznym prędkość obwodowa przedmiotu znacząco wpływa na zmianę chropowatości powierzchni przy  $Q'_w$  wynoszących 1,0 i 1,25, natomiast dla  $Q'_w$  0,5 i  $v_w > 150$  chropowatość ulega niewielkiej zmianie.

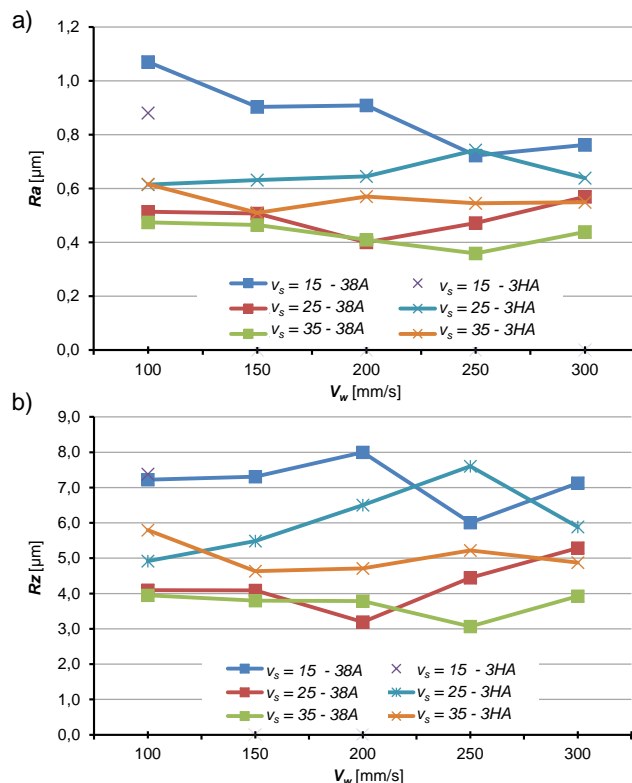


Rys. 2. Zależność chropowatości Ra i Rz szlifowanej powierzchni od prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  i wydajności objętościowych szlifowania  $Q'_w$  przy prędkości skrawania  $v_s$  35 m/s dla ściernicy 38A i 3HA

Na rysunku 3, przedstawiono zmiany parametrów chropowatość opisaną parametrami Ra i Rz dla zastosowanej ściernicy 38A i 3HA przy  $Q'_w$  0,50 mm<sup>3</sup>/(mm·s) i prędkości skrawania  $v_s$  15, 25 i 35 m/s w funkcji prędkości przedmiotu  $v_w$ . Z rysunku wynika, że wzrost prędkości skrawania powoduje znaczący spadek chropowatości przedmiotu. Dla ściernicy 3HA i prędkości skrawania  $v_s$  15 m/s możliwe było przeprowadzenie próby szlifowania jedynie dla prędkości przedmiotu  $v_w$  100 mm/s, wzrost prędkość obwodowej przedmiot skutkowało znaczącą niestabilnością procesu i uniemożliwiło przeprowadzenie dalszych prób.

Podczas szlifowania ściernicą 38A (rys. 3) najmniejszą chropowatość opisaną parametrami Ra i Rz uzyskano dla prędkości skrawania  $v_s$  35 m/s i prędkości przedmiotu  $v_w$  250 mm/s, natomiast dla ściernicy 3HA przy prędkości przedmiotu  $v_w$  150 mm/s, dalsze zwiększenie  $v_w$  powoduje

nieznaczny wzrost chropowatości opisaną parametrami Ra i Rz.

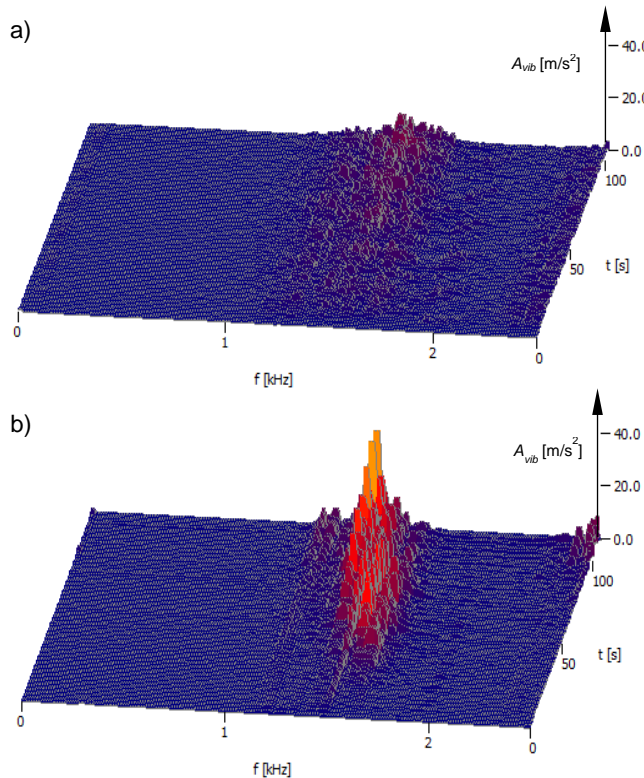


Rys. 3. Zależność chropowatości Ra i Rz szlifowanej powierzchni od prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  i prędkości skrawania  $v_s$  przy wydajności objętościowych szlifowania  $Q'_w = 0,50$  mm<sup>3</sup>/(mm·s) dla ściernicy 38A i 3HA

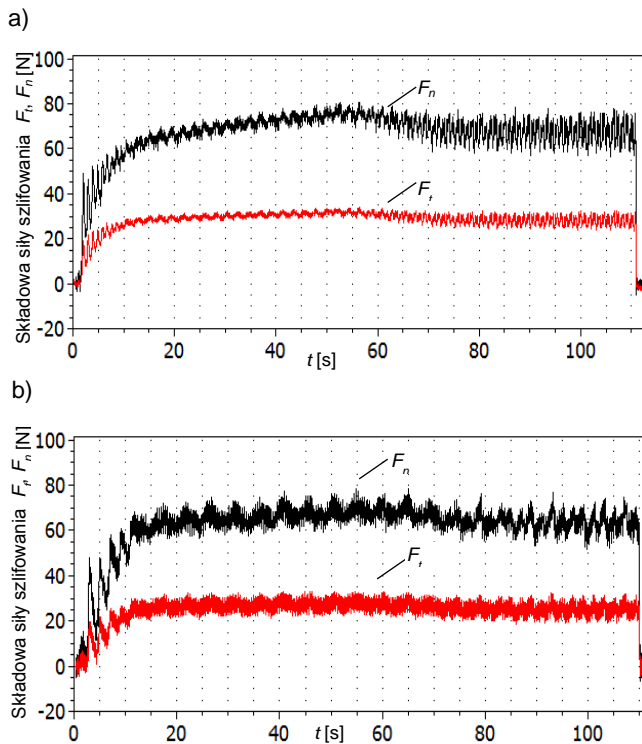
Na rysunku 4a przedstawiono przykładowe zmiany widma drgań na kle konika dla ściernicy 38A. Nieznaczny przyrost drgań w zakresie całej próby może świadczyć o prawidłowo wytypowanej specyfikacji ściernicy i parametrach procesu. Natomiast rysunek 4b przedstawia widmo drgań na kle konika dla ściernicy 3HA. Charakter uzyskanego przebiegu może świadczyć o występowaniu drgań regeneracyjnych czego powodem może być niewłaściwie dobrana twardość ściernicy lub nieprawidłowo wytypowane parametry kinematyczne procesu. Znaczny wzrost drgań występuje po 30 s, co odpowiada ubytkowi materiału rzędu 14 mm<sup>3</sup>. Powodem ich wzrostu może być zachodzący proces zalepania się ściernicy i utrata właściwości skrawnych.

Przedstawione charakterystyki mogą świadczyć iż ściernica z ziarnem z mikrokrystalicznym ulega znacznie szybciej zużyciu niż ściernica z elektrokorundu szlachetnego.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi składowej normalnej i stycznej siły podczas szlifowania dla parametrów  $v_s$  35 m/s,  $v_w$  200 mm/s oraz  $Q'_w$  0,5 mm<sup>3</sup>/(mm·s). Na rysunku 5a przedstawiono przebiegi składowej siły szlifowania dla ściernicy 38A, charakter wykresu może świadczyć o zachodzącym procesie samoostrzenia narzędzia co sprzyja utrzymaniu właściwości skrawnych przez ściernicę. Z analizy wykresu wynika również iż wraz z rozpoczęciem etapu samoostrzenia składowa odporowa siły maleje natomiast wzrasta amplituda drgań. W przypadku ściernicy 3HA (rys. 5b) przebieg obu składowych siły szlifowania jest silnie niestacjonarny, co świadczy o wysoce niestabilnym przebiegu procesu, czego potwierdzeniem jest przedstawione na rysunku 4b widmo drgań na kle konika.



Rys. 4. Widmo drgań na kle konika przy prędkości skrawania  $v_s$  35 m/s, prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  250 mm/s i wydajności objętościowej szlifowania  $Q_w$  0,50 mm<sup>3</sup>/(mm·s) dla ściernicy: a) 38A, b) 3HA



Rys. 5. Przebieg czasowych sił szlifowania  $F_t$  i  $F_n$  przy prędkości skrawania  $v_s$  35 m/s, prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  200 mm/s i wydajności objętościowej szlifowania  $Q_w$  0,50 mm<sup>3</sup>/(mm·s) dla ściernicy: a) 38A, b) 3HA

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych w zakresie wpływu parametrów kinematycznych procesu szlifowania jak również rodzaju materiału ściernego ściernicy na obrabialność żeliwa sferoidalnego ausferytycznego z węglnikami można stwierdzić, że:

1. Zmiana prędkości obwodowej przedmiotu  $v_w$  ma znaczący wpływ na otrzymaną chropowatość powierzchni.
2. Konwencjonalna ściernica 38A60K5VBE szlifuje stabilnie w pełnym zakresie przebadanych prędkości skrawania.
3. Zalecana prędkości skrawania dla ściernicy 3HA060J8V1 powinna być większa od 25 m/s.
4. Wyższe prędkości skrawania powodują znaczący spadek chropowatość przedmiotu w przypadku obu ściernic.
5. Większe naddatki na szlifowanie czyli większa wydajności objętościowych szlifowania  $Q_w$  powoduje zwiększenie chropowatości.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## LITERATURA

1. Bayati H., Elliot R., The Concept of an Austempered Heat Treatment Processing Window, *Int. J. Cast Metals Res.*, 11, 413–417, 1999.
2. Daber S., Ravishankar K. S., Rao P. P., Influence of Austenitising Temperature on the Formation of Strain Induced Martensite in Austempered Ductile Iron, *J. Mater. Sci.*, 43 (14), 4929–4937, 2008.
3. Gumienny G., Wybrane aspekty teorii i technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego z węglnikami otrzymywanego w stanie surowym, *Zeszyty Naukowe Nr 1140, Rozprawy naukowe, Z. 440, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2013.*
4. Guzik E., Procesu uszlachetniania żeliwa – wybrane zagadnienia, *Monografia Nr 1M, 2001.*
5. Guzik E., Wybrane zagadnienia kształtowania struktury i właściwości żeliwa ausferytycznego, *Archiwum Odlewnictwa, Nr 21, 33-42, 2006.*
6. Guzik E., Kapturkiewicz W., Lelito J., Zasady otrzymywania żeliwa ausferytycznego. Międzynarodowa Konferencja Naukowa, nt. Żeliwo ADI – oferta odlewnictwa dla konstruktorów i użytkowników odlewów. Kraków, 23-24.IX. I/11, 2000.
7. Lajmert P., Kruszyński B., Sikora M., Ostrowski D., Stanowisko do badania procesu szlifowania wałków, *Mechanik*, 8/9, 187-194/596, 2014.
8. Oczko K., Porzycki J., *Szlifowanie*. WNT Warszawa, 1986.
9. Olson B. N., Moore D. J., Rundman K. B., Simula G. R., Potential for Practical Applications of Ausforming Austempered Ductile Iron, *AFS Transactions*, 111, 965, 2002.
10. Putatunda S. K., Development of Austempered Ductile Cast Iron (ADI) with Simultaneous High Yield Strength and Fracture Toughness by a Novel Two-step Austempering Process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 315, Nr 1, 70–80, 2001.
11. Tybulczuk J., Kowalski A. W., *Żeliwo ADI – własności i zastosowanie w przemyśle*. Atlas odlewów, Instytut Odlewnictwa w Krakowie, Kraków 2002.
12. <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=K&N=243>, dostęp 05.07.2015.