

Wybrane aspekty obróbki wiórowej i nagniataniem wyrobów z żeliw

dr inż. Kazimierz Czechowski, mgr inż. Iwona Wronska
Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie

Przedstawiono rodzaje żeliw. Omówiono zagadnienia obróbki wiórowej i nagniataniem wyrobów z żeliw. Przedstawiono przykładowe parametry toczenia, frezowania i nagniatania żeliw.

Zarówno coraz wyższe wymagania co do jakości wyrobów, jak i również dążenie do zwiększania wydajności ich wytwarzania, powodują, że w procesie produkcyjnym bardzo istotny jest, m.in. właściwy dobór narzędzi i parametrów ich użytkowania. Różnorodność poddawanych obróbce wiórowej materiałów konstrukcyjnych, posiadających coraz lepsze właściwości fizyczne, stwarza konieczność odpowiedniej oceny ich skrawalności, ściśle powiązanej ze skrawnością ostrzy narzędzi zastosowanych w tej obróbce. W procesie wytwarzania wyrobów najczęściej potrzebne jest uzyskanie nie tylko określonych wymiarów przedmiotu, ale również odpowiedniej struktury geometrycznej powierzchni i wymaganych właściwości fizycznych warstwy wierzchniej. Istotne jest dobranie odpowiedniego rodzaju obróbki wykończeniowej, z których jedną z możliwości jest nagniatanie, umożliwiające uzyskanie powierzchni o wysokiej gładkości oraz korzystnej mikrostrukturze, a także poprawiające wydajność i ekologiczność procesu technologicznego w porównaniu do obróbki wykończeniowej ściernej lub elektrochemicznej.

W przypadku żeliw będących przedmiotem rozważań w artykule, w zależności od rodzaju żeliwa i jego stanu, mamy do czynienia z różną wytrzymałością na rozciąganie i twardością materiału oraz jego mikrostrukturą (w tym postacią węgla),

które istotnie wpływają na skrawalność tego materiału. Za pomocą nagniatania, z uwagi na wykorzystywanie w tym procesie efektu odkształcenia plastycznego na zimno, trudno jest obrabiać materiały o wydłużeniu względnym przy rozciąganiu A_5 poniżej 6%; ograniczenie to nie dotyczy jednak żeliw szarych i niektórych żeliw stopowych, które mimo małej wartości A_5 można nagniatć.

Rodzaje żeliw

Żeliwo to stop żelaza z węglem, zawierający jako podstawowy składnik węgiel w ilości większej niż 2% oraz pierwiastki stopowe, takie jak: krzem, mangan, fosfor, siarka, nikiel, chrom, miedź, molibden i inne [1].

W literaturze często spotykany jest ogólny podział żeliw, w którym wyróżnia się jako podstawowe żeliwa: białe (*white iron*), ciągliwe (*malleable iron*), szare (*gray iron*) i sferoidalne (*ductile iron*). Bardzo przydatna jest klasyfikacja podstawowych rodzajów żeliw podana w monografii pod red. Davisa [2], uwzględniająca postać węgla, mikrostrukturę i barwę przełomu żeliwa (tab. 1).

Oprócz standardowych rodzajów żeliw (tab. 1), istnieje grupa żeliw specjalnych charakteryzujących się zawartością składników stopowych powyżej 3%. Można wyróżnić żeliwa stopowe: odpor-

ne na zużycie ścierne, żaroodporne, odporne na korozję oraz o strukturze austenitycznej do pracy w niskiej temperaturze. Bardziej szczegółowe dane dotyczące żeliw stopowych podane są w monografii Dobrzańskiego [1], gdzie przedstawiono strukturę i właściwości żeliw o różnych dodatkach stopowych (tab. 2).

Poszczególne rodzaje żeliw są przedmiotem norm: PN-EN 1561:2012 (żeliwo szare), PN-EN 1562:2012 (żeliwo ciągliwe), PN-EN 1563:2012 (żeliwo sferoidalne), PN-EN 1564:2012 (żeliwo sferoidalne austenityczne) i PN-EN 12513:2012 (żeliwo odporne na ścieranie). W normie PN-EN 1560:2011 przedstawione zostały systemy oznaczania żeliwa; oznaczenie żeliwa wg symboli jest następujące: symbol EN, po pauzie symbol GJ (G – materiał odlewany, J – żeliwo), symbol postaci grafitu (L – płatkowy, S – kulkowy, M – żarzenia, V – wermikularny, N – mikrostruktura nie zawierająca grafitu, ledeburyt, Y – mikrostruktura specjalna), symbol dla mikrostruktury lub makrostruktury (A – austenit, F – ferryt, P – perlit, M – martenzyt, L – ledeburyt, Q – stan po hartowaniu, T – stan po hartowaniu i odpuszczaniu, B – przełom czarny, W – przełom biały), po pauzie symbol określający właściwości mechaniczne lub skład chemiczny, po pauzie symbol dla wymagań dodatkowych – przy czym w oznaczeniu żeliwa nie wszystkie ww. pozycje muszą być użyte.



Tablica 1. Klasyfikacja podstawowych rodzajów żeliw z uwzględnieniem postaci węgla oraz mikrostruktury i barwy przełomu – na podstawie lit. [2]

Nazwa handlowa	Postać fazy bogatej w węgiel	Struktura osnowy ¹	Przełom	Procesy kształtujące strukturę końcową
Żeliwo szare (Gray iron)	Grafit płatkowy	P	Szary	Krzepnięcie
Żeliwo sferoidalne (Ductile iron)	Grafit sferoidalny-kulkowy	F, P, A	Srebrno-szary	Krzepnięcie lub obróbka cieplna
Żeliwo wermikularne (Compacted graphite iron)	Grafit zwarty krętkowy	F, P	Szary	Krzepnięcie
Żeliwo białe (White iron)	Cementyt Fe ₃ C	P, M	Biały	Krzepnięcie i obróbka cieplna ²
Żeliwo połowiczne-pestre (Mottled iron)	Grafit płatkowy + cementyt Fe ₃ C	P	Pocętkowany	Zestalenie-krzepnięcie
Żeliwo ciągliwe (Malleable iron)	Mieszany grafit	F, P	Srebrno-szary	Obróbka cieplna
Żeliwo sferoidalne hartowane izotermicznie (Austempered ductile iron)	Grafit sferoidalny-kulkowy	At	Srebrno-szary	Obróbka cieplna

¹ F – ferryt; P – perlit; A – austenit; M – martenzyt; At – ausferryt tj. austenit szczątkowy + ferryt bainityczny.

² Żeliwa białe zwykle nie poddawane obróbce cieplnej, za wyjątkiem obróbki cieplnej dla odprężania i kontynuowania przemiany austenitu.

Obróbka wiórowa żeliw

Dla potrzeb projektowania procesów obróbki wiórowej materiały obrabiane podzielone zostały na grupy w zależności od ich charakterystycznych cech dotyczących skrawalności. Grupy materiałów obrabianych powiązane zostały z grupami zastosowań materiałów skrawających.

Norma ISO 513:2012 określa sześć głównych grup zastosowań materiałów narzędziowych oznaczonych symbolami literowymi P, M, K, N, S i H (tab. 3). W grupie zastosowań wraz ze wzrostem liczby podanej za symbolem literowym maleje odporność materiału narzędziowego na zużycie, a wzrasta jego ciągliwość; w związku z powyższym dla grup

zastosowań z mniejszą liczbą przy symbolu można stosować większe prędkości skrawania, a z kolei dla grup zastosowań z większą liczbą przy symbolu można stosować większe posuwy. Grupa żeliw K obejmuje żeliwa: szare, sferoidalne i ciągliwe. Żeliwa posiadające twardość ok. 300 HB i wyższą zaliczane zwykle są do grupy żeliw K – jeżeli posiadają twardość do 400 HB,

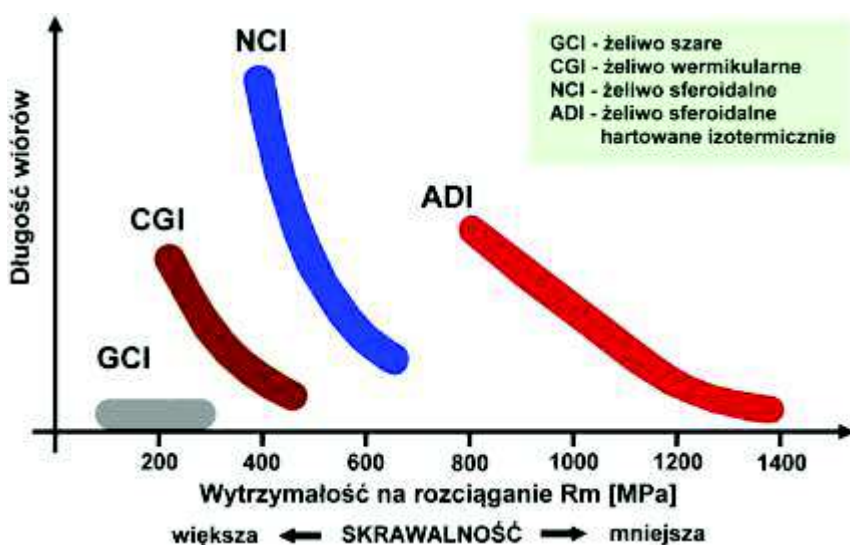
Tablica 2. Struktury żeliw stopowych o różnych składach chemicznych – na podstawie lit. [1]

Dodatki stopowe grafityzujące	Dodatki stopowe węglilotwórcze	Struktura osnowy ¹	Postać fazy bogatej w węgiel	Właściwości
Ni < 35% Cu < 7% Si < 6%	Mo < 1% Cr < 5% Mn < 7%	A		Mała twardość, dobre właściwości wytrzymałościowe, duże wydłużenie i udarność w niskiej temperaturze (do minus 200°C), bardzo dobra odporność na korozję, dobra odporność na zmęczenie cieplne, średnia obrabialność
Ni < 2,5% Co < 4% Si < 15%	Ti < 0,2% Zr < 0,2% Al < 23+25%	F	Grafit płatkowy, modyfikowany lub sferoidalny	Mała twardość, dobre właściwości wytrzymałościowe, duże wydłużenie i żaroodporność oraz odporność na działanie kwasów (szczególnie żeliwa krzemowego), łatwość usuwania naprężeń (z wyjątkiem żeliwa krzemowego)
Ni < 4% Cu < 2% Sn < 0,1%	Cr < 1,5% V < 0,5% W < 2,4% Mo < 1% Al < 4%	P		Średnia twardość, dobre właściwości wytrzymałościowe, duża odporność na ścieranie, dobre właściwości ślizgowe, duża odporność na korozję, dobra obrabialność
Ni < 8% Cu < 1,5%	Mn < 1% Mo < 1,5% W < 4%	M lub B		Duża twardość, dobre właściwości wytrzymałościowe, bardzo duża odporność na ścieranie, zwiększona odporność na korozję
Ni < 6%	Al < 12+16% i 28+32% Cr < 35% Mo < 4% Mn < 3% V < 1% Nb < 0,3% B < 0,2% Sb < 1% Te < 0,1%	Różna z węglnikami	Węgliki	Bardzo duża twardość, mała ciągliwość, największa odporność na ścieranie, bardzo duża odporność na korozję i erozję, bardzo dobra żaroodporność, bardzo trudna obrabialność

¹ F – ferryt; P – perlit; A – austenit; M – martenzyt; B – bainit.

Tablica 3. Grupy zastosowań materiałów skrawających wg normy ISO 513:2012

Symbol	Materiał obrabiany	Grupy zastosowań
P	Stal	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50
M	Stal nierdzewna	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40
K	Żeliwo	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40
N	Metale nieżelazne	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30
S	Nadstopy i tytan	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30
H	Materiały twarde	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30



Rys. 1. Wpływ wytrzymałości na rozciąganie podstawowych rodzajów żeliwa na długość wiórową powstających w trakcie ich obróbki – na podstawie lit. [3]

albo do grupy materiałów twardych H (do której wg ww. normy poza stałą utwardzoną należą materiały żeliwne utwardzone i żeliwo zabilone) – wówczas, gdy posiadają twardość 400 HB i wyższą.

Dla klasyfikacji żeliw w aspekcie ich skrawalności można wyróżnić jako najczęściej stosowane żeliwa: szare (GCI – *Gray Cast Iron*), ciągliwe (MCI – *Malleable Cast Iron*), sferoidalne (NCI – *Nodular Cast Iron*), o zwartym graficie zwane wermikularnym (CGI – *Compacted Graphite Iron*) i sferoidalne hartowane izotermicznie (ADI – *Austempered Ductile Iron*). Na rysunku 1 przedstawiono usytuowanie podstawowych rodzajów żeliw w zależności od ich wytrzymałości na rozciąganie i uzyskiwanej podczas ich obróbki długości wiórowych [3].

Skrawalność żeliwa białego i zabilonego

Żeliwo białe, w którym węgiel występuje w postaci związanej w cementycie czyli metastabilnym węgliku żelaza Fe_3C , posia-

dając w całym przekroju strukturę ledeburytu przemienionego (mieszanina perlitu i cementytu), ma dużą kruchość i wysoką twardość (nawet do 600 HB), a przez to jest trudnoobrabialne; stosowane jest w budowie maszyn w bardzo niewielkim stopniu i zwykle bez obróbki wiórowej. W zastosowaniach technicznych żeliwo to występuje częściej w postaci warstwy przypowierzchniowej, m.in. w konstrukcjach bębnowych młynów i części maszyn do przeróbki kamieni, walców, wałów krzywkowych, mniej odpowiedzialnych przewodnic korpusów maszyn i bieżni kół roboczych wagoników. Warstwa żeliwa białego na żeliwie szarym, która powstaje najczęściej przez tzw. zabilenie (czyli szybkie lokalne chłodzenie odlewu), stosowana jest w celu zwiększenia odporności materiału na ścieranie (żeliwo takie nazywa się żeliwem zabilonym). W strefie przejściowej mamy tzw. żeliwo połowiczne (z węglem częściowo związanym w cementycie i w postaci wolnej jako grafit), a wolno stygnący rdzeń posiada

strukturę żeliwa szarego [1-6]. W tablicy 4 zamieszczono orientacyjne parametry skrawania przy obróbce odlewów z żeliwa zabilonego o twardości ok. 400 HB, zalecane przez firmę Sandvik-Coromant dla przewidywanej trwałości ostrzy ok. 15 min [7].

Skrawalność żeliwa ciągliwego

Żeliwo ciągliwe otrzymywane jest z żeliwa białego w wyniku długotrwałego wyżarzania w ośrodku obojętnym (wyżarzania grafityzującego); następuje rozkład cementytu na austenit i węgiel żarzenia (grafit w postaci kłaczkowej). Struktura żeliwa zależy w dużym stopniu od szybkości chłodzenia w ośrodku obojętnym. Przy bardzo wolnym chłodzeniu następuje rozkład austenitu na ferryt i grafit, w wyniku czego otrzymujemy żeliwo ciągliwe czarne. Przy chłodzeniu żeliwa z większą szybkością w zakresie przemiany eutektoidalnej następuje przemiana austenitu w perlit i powstaje żeliwo ciągliwe perlityczne. Natomiast przy grafityzacji przeprowadzanej w ośrodku silnie odwęglającym (np. odlewy przykryte rudą żelaza Fe_2O_3) powstaje odwęglona struktura ferrytyczna warstwy zewnętrznej o grubości ok. 3–5 mm, przy perlitycznej lub ferrytyczno-perlitycznej strukturze rdzenia; otrzymujemy żeliwo ciągliwe białe [1, 4].

Żeliwa ciągliwe charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i plastycznymi. Stosowane są w przemyśle m.in. górniczym, motoryzacyjnym, rolniczym i maszynowym. Przy skrawaniu żeliwa ciągliwego białego (o oznaczeniu EN-GJMW-...) ostrze narzędzia skrawającego jest silnie obciążone ze względu na dużą zawartość cementytu w strukturze obrabianego materiału. Dla uzyskania odpowiedniej trwałości narzędzia konieczne jest zmniejszenie prędkości skrawania. Wydajność obróbki lub trwałość ostrzy można znacząco zwiększyć poprzez stosowanie ostrzy ceramicznych zamiast ostrzy z węglików spiekanych. Obrabialność żeliwa ciągliwego białego jest w dużym stopniu zależna od grubości ścianek. Części grubościennne są trudniej skrawalne, ze względu na zwiększoną zawartość perlitu, w porównaniu z częściami cienkościennymi. Żeliwo ciągliwe czarne (EN-GJMB-...) posiada jednolitą strukturę w całym przekroju odlewu, składającą się z ferrytu i wtrąceń grafitu wtórnego, w związku z tym na ogół jest łatwiej skrawalne niż żeliwo ciągliwe

Zapraszamy na stoisko Prima Power - na 150m²
zostaną zaprezentowane maszyny
do kompleksowej obróbki blachy

MAŁA PRZESTRZEŃ WIELKIE MOŻLIWOŚCI

 Prima
Power



VIII Targi Obróbki Blach
STOM-BLECH



Odwiedź Nas na Targach Obróbki
Blach STOM-BLECH
Targi Kielce, ul. Zakładowa 1
Pawilon E, stoisko E-35

Tablica 4. Orientacyjne parametry toczenia i frezowania żeliwa zabelonego o twardości ok. 400 HB – na podstawie lit. [7]

Rodzaj obróbki	Materiał narzędziowy	Parametry skrawania		
		Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw f [mm/obr.]	Maksymalna grubość wióra h_{ex} [mm]
Toczenie	Węglik spiekany	11–35	0,10–0,60	–
	Węglik spiekany z powłoką CVD	15–50	0,10–0,60	–
	Ceramika mieszana na bazie Al_2O_3	60–120	0,10–0,40	–
	Ceramika na bazie Al_2O_3 wzmocniana wiskersami z SiC	60–120	0,10–0,40	–
	PCBN	120–180	0,10–0,40	–
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=125$ mm z szerokością frezowania $a_e=100$ mm	Węglik spiekany z powłoką PVD	55–75	–	0,07–0,20
	Węglik spiekany z powłoką CVD	55–100	–	0,10–0,25
	Węglik spiekany bardzo twardy drobnoziarnisty z powłoką PVD	150–215	–	0,07–0,20
	Cemetal	110–155	–	0,07–0,20
	Ceramika na bazie Si_3N_4	115–160	–	0,07–0,20
	PCBN	215–310	–	0,07–0,20
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=25$ mm z szerokością frezowania $a_e=10$ mm	Węglik spiekany z powłoką PVD	85–90	–	0,07–0,20
	Węglik spiekany z powłoką CVD	95–125	–	0,10–0,25
	Węglik spiekany bardzo twardy drobnoziarnisty z powłoką PVD	230–250	–	0,07–0,20
	Cemetal	165–180	–	0,07–0,20
	PCBN	330–355	–	0,07–0,20

Uwaga: większe wartości prędkości skrawania przy mniejszych posuwach lub grubościach wióra.

białe. Stosuje się je głównie na elementy grubościennie poddawane obróbce wiórowej [1, 3-6]. W tablicy 5 przedstawiono orientacyjne parametry skrawania przy obróbce żeliwa ciągliwego czarnego o twardości ok. 130 HB i perlitycznego o twardości ok. 230 HB, zalecane przez firmę Sandvik-Coromant dla przewidywanej trwałości ostrzy ok. 15 min [7].

Skrawalność żeliwa szarego, sferoidalnego i wermikularnego

Ogólnie żeliwa szare to takie, w których węgiel występuje w postaci wolnej jako grafit. Żeliwo to, uznawane za wyższej jakości, jest bardziej ciągliwe, łatwiej obrabialne, charakteryzuje się dobrą lejnością i posiada mniejszy skurcz odlewniczy (ok. 1%) niż żeliwo białe. Różne rodzaje żeliwa szarego różnią się kształtem występującego w nich grafitu: w postaci płatków (żeliwo szare zwykłe o oznaczeniu EN-GJL...), kulek (żeliwo sferoidalne EN-GJS...) i krętek (żeliwo wermikularne EN-GJV...) [1, 4]. Wtrącenia grafitu w żeliwie redukują tarcie pomiędzy narzędziem i przedmiotem

obrabanym. Struktura żeliwa z grafitem płatkowym, przerywana przez płatki grafitu, sprzyja powstawaniu wiórów krótkich najczęściej odpryskowych, co jest zjawiskiem korzystnym zapobiegającym nadmiernemu zużyciu powierzchni przyłożenia ostrza i powodującym zmniejszenie siły skrawania. Z ww. powodów żeliwa szare zwykłe (GCI) posiadają na ogół bardzo dobrą obrabialność. Zawartość chromu zwiększa wytrzymałość mechaniczną tych żeliw, ale skutkuje pogorszeniem ich skrawalności. Żeliwa GCI posiadają wysokie właściwości tłumienia drgań; wytwarzane są z nich m.in. bloki silników, cylindry sprężarek, koła zębate i obudowy przekładni [3–6].

Dla żeliw sferoidalnych (NCI), tj. z grafitem w postaci kulek, podczas skrawania z większymi prędkościami ujawniają się problemy związane z dużym zużyciem powierzchni przyłożenia ostrza skrawającego. Dobrej skrawalności sprzyja struktura z łatwo skrawalnego ferrytu; powstają przy tym niekorzystne wióry śrubowe, które jednak z powodu zawartości grafitu łatwo się łamią.

W przypadku żeliw NCI o większej twardości, charakteryzujących się wysoką zawartością perlitu, mogą podczas ich obróbki wiórowej powstać wysokie temperatury w strefie skrawania i może wystąpić duże ściernie oddziaływanie oraz deformacja plastyczna ostrza narzędzia. Żeliwa NCI posiadają ok. dwukrotnie mniejszą zdolność do tłumienia drgań niż żeliwa GCI, ale charakteryzują się dobrą wytrzymałością, sztywnością i udurowością; z żeliw NCI wytwarza się np. wały korbowe i rozrządu [3, 4]. W tablicy 6 przedstawiono orientacyjne parametry skrawania przy obróbce żeliwa szarego zwykłego o twardości z zakresu 180–220 HB, a z kolei w tablicy 7 przy obróbce żeliwa sferoidalnego o strukturze osnowy ferrytycznej (o twardości ok. 160 HB) i perlitycznej (o twardości ok. 250 HB), zalecane przez firmę Sandvik-Coromant dla założonej trwałości ostrzy ok. 15 min [7].

Pod względem skrawalności żeliwa o zwartym graficie (wermikularne – CGI) znajdują się między dobrze obrabianymi żeliwami GCI, a żeliwami NCI [3, 4]. W strukturze żeliw CGI grafit jest

Tablica 5. Orientacyjne parametry toczenia i frezowania żeliwa ciągliwego czarnego o twardości ok. 130 HB i perlitycznego o twardości ok. 230 HB - na podstawie lit. [7]

Rodzaj obróbki	Materiał narzędziowy	Rodzaj żeliwa ciągliwego	Parametry skrawania		
			Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw f [mm/obr.]	Maksymalna grubość wióra h_{ex} [mm]
Toczenie	Węglik spiekany	czarne	110-140	0,10-0,50	-
		perlityczne	90-125		
	Węglik spiekany z powłoką CVD	czarne	225-365	0,20-0,60	-
		perlityczne	185-295		
	Węglik spiekany z bardzo gładką powłoką CVD	czarne	265-460	0,20-0,60	-
		perlityczne	215-375		
	Ceramika na bazie Al_2O_3	czarne	600-800	0,10-0,40	-
		perlityczne	500-700		
	Ceramika na bazie Si_3N_4	czarne	500-810	0,20-0,60	-
		perlityczne	400-700		
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=125$ mm z szerokością frezowania $a_e=100$ mm	Węglik spiekany	czarne	75-120	-	0,10-0,40
		perlityczne	65-100		
	Węglik spiekany z powłoką CVD	czarne	130-255	-	0,10-0,30
		perlityczne	110-210		
	Węglik spiekany z powłoką PVD	czarne	140-295	-	0,10-0,30
		perlityczne	115-240		
	Węglik spiekany z grubą powłoką CVD	czarne	180-305	-	0,10-0,30
		perlityczne	150-255		
	Ceramika na bazie Si_3N_4	czarne	800-1300	-	0,10-0,30
		perlityczne	660-1100		
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=25$ mm z szerokością frezowania $a_e=10$ mm	Węglik spiekany	czarne	125-135	-	0,10-0,30
		perlityczne	105-110		
	Węglik spiekany z powłoką CVD	czarne	210-295	-	0,10-0,25
		perlityczne	175-245		
	Węglik spiekany z powłoką PVD	czarne	220-340	-	0,10-0,30
		perlityczne	180-280		
	Węglik spiekany z grubą powłoką CVD	czarne	290-360	-	0,10-0,25
		perlityczne	240-295		
	Ceramika na bazie Si_3N_4	czarne	1250-1500	-	0,10-0,30
		perlityczne	1050-1250		

Uwaga: większe wartości prędkości skrawania przy mniejszych posuwach lub grubościach wióra.

rozgałęziony i może sprzyjać dobrej skrawalności, podobnie jak grafit płatkowy. Przy niedużych prędkościach skrawania obrabialność żeliw CGI jest zbliżona do obrabialności żeliw GCI. Przy większych prędkościach skrawania (np. powyżej $v_c = 300$ m/min) występuje duże zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wywołane ściernym działaniem wtrąceń grafitu [4]. Wytrzymałość zmęczeniowa żeliw CGI jest ok. dwa razy większa niż żeliw GCI. Z kolei właściwości termiczne i tłumienia drgań żeliwa CGI zawierają

się pomiędzy tymi właściwościami dla żeliw GCI i NCI. Żeliwa CGI stosowane są zwłaszcza na bloki silników wysoko- i średnio- i niskoprężnych, głowice cylindrów i hamulce tarczowe [3, 4].

Skrawalność żeliwa sferoidalnego hartowanego z przemianą izotermiczną

Żeliwa sferoidalne po odlaniu mogą być poddawane obróbce cieplnej polegającej na hartowaniu z przemianą w za-

kresie temperatury 250-400°C. Proces taki składa się z austenitzowania (zwykle w temperaturze 850-950°C) oraz izotermicznego hartowania bainitycznego, po którym żeliwo schładza się do temperatury otoczenia. Wskutek obecności w żeliwie ok. 1,5% krzemu nie występuje wydzielanie cementytu, z uwagi na hamujący wpływ krzemu na wydzielanie węglików. Optymalna struktura żeliwa sferoidalnego hartowanego z przemianą izotermiczną (ADI) złożona jest z austenitu szczątkowego i ferrytu

Tablica 6. Orientacyjne parametry toczenia i frezowania żeliwa szarego zwykłego o twardości z zakresu 180–220 HB – na podstawie lit. [7]

Rodzaj obróbki	Materiał narzędziowy	Parametry skrawania		
		Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw f [mm/obr.]	Maksymalna grubość wióra h_{ex} [mm]
Toczenie	Węglík spiekany	95–180	0,10–0,50	–
	Węglík spiekany z powłoką CVD	220–400	0,20–0,60	–
	Węglík spiekany z bardzo gładką powłoką CVD	245–530	0,20–0,60	–
	Ceramika na bazie Al_2O_3	540–800	0,10–0,40	–
	Ceramika na bazie Si_3N_4	435–890	0,20–0,60	–
	PCBN	890–1700	0,10–0,40	–
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=125$ mm z szerokością frezowania $a_p=100$ mm	Węglík spiekany	65–130	–	0,10–0,40
	Węglík spiekany z powłoką CVD	115–275	–	0,10–0,30
	Węglík spiekany z powłoką PVD	120–335	–	0,10–0,30
	Węglík spiekany z grubą powłoką CVD	155–335	–	0,10–0,30
	Ceramika na bazie Si_3N_4	700–1600	–	0,10–0,30
	PCBN	620–910	–	0,10–0,20
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=25$ mm z szerokością frezowania $a_p=10$ mm	Węglík spiekany	110–145	–	0,10–0,30
	Węglík spiekany z powłoką CVD	185–320	–	0,10–0,25
	Węglík spiekany z powłoką PVD	190–390	–	0,10–0,30
	Węglík spiekany z grubą powłoką CVD	255–390	–	0,10–0,25
	Ceramika na bazie Si_3N_4	1100–1850	–	0,10–0,30
	PCBN	1000–1150	–	0,10–0,20

Uwaga: większe wartości prędkości skrawania przy mniejszych posuwach lub grubościach wióra.

bainitycznego (mieszany nazywanej ausferytem) [8]. Czasami obok ausferytu może wystąpić martenzyt, który pojawia się, gdy hartowanie izotermiczne przeprowadza się w stosunkowo niskiej temperaturze [9]. Żeliwa ADI posiadają ok. 2-krotnie większą wytrzymałość na rozciąganie i ok. 1,5-krotnie wyższą wytrzymałość zmęczeniową niż żeliwa NCI; stosowane są w przemyśle motoryzacyjnym, m.in. na części zawieszenia i przeniesienia napędu. Żeliwa ADI mogą sprawiać trudności w obróbce wiórowej z uwagi na ich wysokie właściwości mechaniczne, zwłaszcza przy wysokiej twardości. Podczas obróbki wiórowej żeliw ADI powstają wysokie temperatury w strefie skrawania i występuje bardzo duże ścierne oddziaływanie na ostrze narzędzia; może następować także deformacja plastyczna ostrzy. Materiał ostrzy powinien charakteryzować się bardzo dużą twardością i stabilnością chemiczną w wysokich temperaturach oraz dużą wytrzymałością mechaniczną i odpornością na ścieranie. Żeliwa ADI są jednym z gorzej

skrawalnych materiałów. W obróbce wiórowej żeliwa ADI można oczekiwać ok. 40–50% skrócenia trwałości ostrzy narzędzi w porównaniu do skrawania żeliwa NCI [3–6]. W tablicy 8 przedstawiono orientacyjne parametry toczenia żeliwa ADI o twardości ok. 380 HB, zalecane przez firmę Sandvik-Coromant dla założonej trwałości ostrzy ok. 15 min [7].

Polishetty i in. [10] w przeprowadzonych badaniach uzyskali pozytywne wyniki stosowania do obróbki żeliwa ADI ceramiki Al_2O_3 umocnionej wiskersami SiC. W próbach toczenia na sucho żeliwa ADI klasy Grade 3 (wg ASTM 897-90) o twardości ok. 388 HB za pomocą ostrzy z ww. materiału, stosowano posuw $f = 0,1-0,4$ mm/obr. oraz dla obróbki zgrubnej prędkość skrawania $v_c = 425$ m/min i głębokość skrawania $a_p = 2$ mm, a dla obróbki wykończeniowej $v_c = 700$ m/min i $a_p = 0,5$ mm. W badaniach tych, w przypadku obróbki zgrubnej i wykończeniowej, rezultaty uzyskane dla ceramiki Al_2O_3 umocnionej wiskersami SiC były istotnie lepsze niż uzyskane dla ceramiki mieszanej $Al_2O_3 + TiC$ oraz na tym

samym poziomie co uzyskane za pomocą ostrzy z PCBN przy stosowaniu ostrzy z 90% zawartością cBN do obróbki zgrubnej oraz ostrzy z 50% zawartością cBN do obróbki wykończeniowej (w odwrotnym zastosowaniu uzyskano gorsze wyniki).

Kakatu i in. [11] w badaniach toczenia na sucho, za pomocą ostrzy z PCBN, żeliwa ADI klasy Grade 2 (302–375 HB; wg ASTM) określili zależność funkcyjną trwałości ostrzy T od prędkości skrawania v_c (rys. 2), przy kryterium stępienia $VB_c = 0,3$ mm. Płytkę skrawającą typu SNGN 090312 zostrzem z materiału narzędziowego Seco CBN100 (zawierającego 50% cBN o ziarnie $2 \mu m$ i spoiwo TiC) z fazą wzmacniającą o szerokości $0,1$ mm usytuowaną pod kątem ujemnym 20° , mocowana była w nożu tokarskim CSDNN 2525M12C umożliwiającym obróbkę z kątem natarcia -6° , kątem przyłożenia 6° i kątem przystawienia 45° . Badania prowadzono w zakresie prędkości skrawania $v_c = 50-800$ m/min, osiągając trwałość ostrza T od 1 min dla $v_c = 800$ m/min do ponad 250 min dla $v_c = 50$ m/min. Trwałość



3 – 5 marca 2015

Targi Techniki
Laserowej

LASERexpo

*Trade Fair of Laser
Technology*

Targi Technologii
Szlifowania

GRINDexpo

*Trade Fair of
Grinding Technology*

Targi Technologii
Cięcia

ExpoCUTTING

*Trade Fair of Cutting
Technology*

Targi Technologii
Łączenia i Elementów
Złącznych

FixingTECH EXPO

*Fixing and Fastener
Technology Fair*

ZAREJESTRUJ SIĘ ON-LINE na stronie internetowej targów.
Po rejestracji wstęp bezpłatny.

www.laserexpo.pl

www.expocutting.pl

tereny targowe: Expo Silesia
Centrum Targowo-Konferencyjne
ul. Braci Mieroszewskich 124
41-219 Sosnowiec

www.grindexpo.pl

www.fixingtechexpo.pl

kontakt:

tel. 32 78 87 541
tel. 32 78 87 538
tel. 32 78 87 514
tel. 32 78 87 506

e-mail:

laserexpo@exposilesia.pl
expocutting@exposilesia.pl
fixingtechexpo@exposilesia.pl

Sosnowiec Zagłębiem obróbki metalu!

expo**silesia**

Sosnowiec

Tablica 7. Orientacyjne parametry toczenia i frezowania żeliwa sferoidalnego o strukturze osnowy ferrytycznej (o twardości ok. 160 HB) i perlitycznej (o twardości ok. 250 HB) - na podstawie lit. [7]

Rodzaj obróbki	Materiał narzędziowy	Rodzaj żeliwa sferoidalnego	Parametry skrawania			
			Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw f [mm/obr.]	Maksymalna grubość wióra h_{ek} [mm]	
Toczenie	Węglik spiekany	ferrytyczne	95–135	0,10–0,50	–	
		perlityczne	90–125			
	Węglik spiekany z powłoką CVD	ferrytyczne	195–330	0,20–0,60	–	
		perlityczne	175–280			
	Węglik spiekany z bardzo gładką powłoką CVD	ferrytyczne	250–390	0,20–0,60	–	
		perlityczne	225–350			
	Ceramika micszana na bazie Al_2O_3	ferrytyczno	450–610	0,10–0,40	–	
		perlityczne	350–510			
	Ceramika na bazie Si_3N_4 z powłoką CVD	ferrytyczne	345–580	0,20–0,60	–	
		perlityczne	250–480			
	Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=125$ mm z szerokością frezowania $a_e=100$ mm	Węglik spiekany	ferrytyczne	50–80	–	0,10–0,40
			perlityczne	50–75		
Węglik spiekany z powłoką CVD		ferrytyczne	90–175	–	0,10–0,30	
		perlityczne	85–160			
Węglik spiekany z powłoką PVD		ferrytyczno	95–200	–	0,10–0,30	
		perlityczne	90–185			
Węglik spiekany z grubą powłoką CVD		ferrytyczne	125–210	–	0,10–0,30	
		perlityczne	115–195			
Ceramika na bazie Si_3N_4		ferrytyczne	620–1000	–	0,10–0,30	
		perlityczno	510–840			
PCBN		perlityczne	360–495	–	0,10–0,20	
Frezowanie płaszczyzn głowicą o średnicy $D=25$ mm z szerokością frezowania $a_e=10$ mm	Węglik spiekany	ferrytyczne	85–95	–	0,10–0,30	
		perlityczne	80–85			
	Węglik spiekany z powłoką CVD	ferrytyczne	145–200	–	0,10–0,25	
		perlityczne	135–185			
	Węglik spiekany z powłoką PVD	ferrytyczne	150–230	–	0,10–0,30	
		perlityczne	140–215			
	Węglik spiekany z grubą powłoką CVD	ferrytyczne	200–245	–	0,10–0,25	
		perlityczne	185–225			
	Ceramika na bazie Si_3N_4	ferrytyczne	980–1200	–	0,10–0,30	
		perlityczne	810–980			
	PCBN	perlityczne	590–630	–	0,10–0,20	

Uwaga: większe wartości prędkości skrawania przy mniejszych posuwach lub grubościach wióra.

ostrza ok. $T = 15$ min osiągnięto dla prędkości skrawania $v_c = 200$ m/min [11].

Skrawalność żeliw stopowych

Skrawalność żeliw stopowych w dużym stopniu uzależniona jest od struktury ich osnowy i postaci węgla. Na ogół żeliwa stopowe o strukturze osnowy martenzytycznej i bainitycznej posiadają gorszą skrawalność niż żeliwa stopowe o strukturze austenitycznej i dużo gorszą skrawalność niż żeliwa stopowe o strukturze

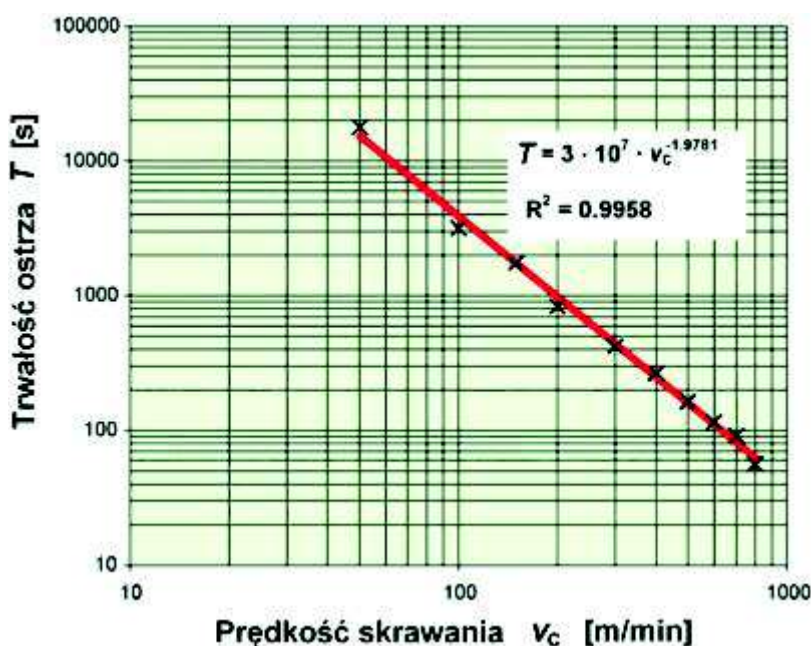
ferrytycznej i perlitycznej. O skrawalności decyduje również zawartość składników stopowych i związana z tym postać i wielkość węglików. Kawalec i Kazana [12] badali strukturę i właściwości żeliwa stopowego w różnych wariantach stopów Fe-C-V, w których fazę bogatą w węgiel stanowiły twarde węgliki wanadu VC_{1-x} , a osnowę tych stopów stanowił plastyczny ferryt stopowy lub perlit. Poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego tych stopów (tab.9) można uzyskać żeliwa charakteryzujące się wysokimi właściwo-

ściami wytrzymałościowymi, dużą twardością i odpornością na ścieranie. Skrawalność tych żeliw stopowych oceniana na podstawie prób wiercenia przy stałej sile posuwowej (rys. 3) zależna była od ich składu chemicznego, twardości, struktury osnowy oraz kształtu i rozmieszczenia węglików. Najlepszą skrawalność uzyskano dla stopu nr 2, a najgorszą dla stopu nr 6 – przy którym nie było możliwe przeprowadzenie prób wiercenia w warunkach zastosowanych dla pozostałych stopów.

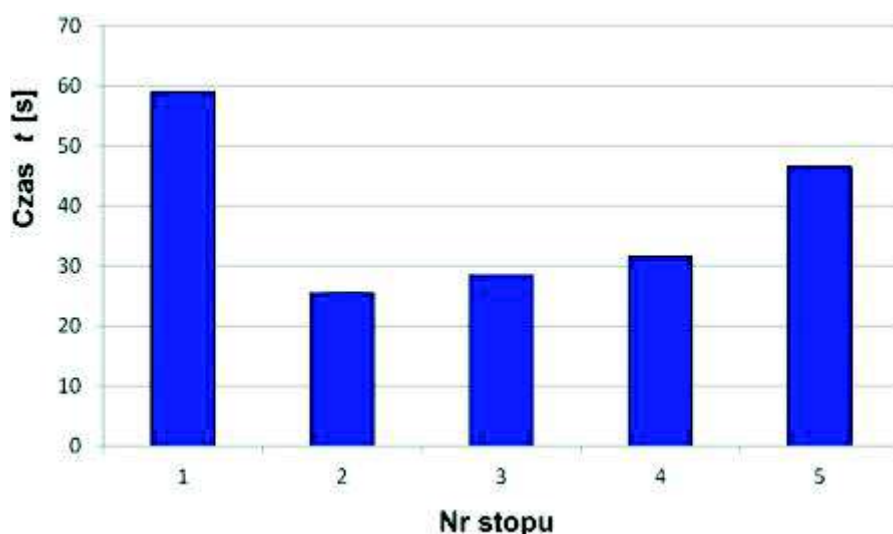
Tablica 8. Orientacyjne parametry toczenia żeliwa sferoidalnego hartowanego z przemianą izotermiczną o twardości ok. 380 HB – na podstawie lit. [7]

Materiał narzędziowy	Parametry skrawania	
	Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw f [mm/obr.]
Węgiel spiekany	65–100	0,10–0,50
Węgiel spiekany z powłoką CVD	125–220	0,20–0,60
Węgiel spiekany z bardzo gładką powłoką CVD	170–265	0,20–0,60
Ceramika na bazie Si_3N_4 z powłoką CVD	220–325	0,20–0,60
Ceramika mieszana na bazie Al_2O_3	260–350	0,10–0,40

Uwaga: większe wartości prędkości skrawania przy mniejszych posuwach.



Rys. 2. Wpływ prędkości skrawania v_c na trwałość ostrzy T przy toczeniu na sucho żeliwa ADI klasy Grade 2 (wg ASTM) za pomocą płytek z PCBN (Seco CBN100) [wg lit. 11]



Rys. 3. Wartości średnie czasu t wiercenia otworu o średnicy $D = 15$ mm i długości $l = 10$ mm przy stałej sile posuwowej $F = 500$ N i prędkości obrotowej $n = 680$ obr./min, jako wskaźnika skrawalności (im mniejszy tym lepiej) pięciu różnych stopów Fe-C-V – na podstawie lit. [12]

Nagniatanie żeliw

Sposoby nagniatania żeliw nie różnią się od nagniatania stali; można stosować do tego celu te same narzędzia. Stosowanie obróbki nagniataniem naporowym wyrobów z żeliwa nie jest możliwe w przypadku wystąpienia większych wad odlewniczych (jamy, pory). Niewielkie pory i rzadizny mogą ulec zagnieceniu. W wyniku obróbki nagniataniem żeliw mogą powstać wygniecenia grafitu z warstwy wierzchniej, które w przypadku występowania grafitu w dużych skupiskach mogą powodować widoczne wgłębienia na powierzchni obrobionej. Warunki obróbkowe dla różnych odmian nagniatania naporowego różnią się głównie wartością siły docisku i stosowanymi elementami nagniatającymi (kształt i wymiary). Zalecane naciski jednostkowe dla krążkowania i kulkowania powierzchni żeliw szarych obrobionych wstępnie różnymi metodami przedstawiono w tablicy 10. Dokonując doboru nacisków jednostkowych można wyznaczyć siłę docisku krążka lub kulki za pomocą jednego z doświadczalnych wzorów zamieszczonych w tablicy 11 [13, 14]. Przykładowo po obróbce nagniataniem żeliwa sferoidalnego ferrytyczno-perlitycznego EN-GJSFP-500-7 (o twardości ok. 198 HB) za pomocą krążka o średnicy zewnętrznej $d = 60$ mm i promieniu $R = 20$ mm (ze stali narzędziowej stopowej do pracy na zimno o twardości 60 HRC), z użyciem dobranego środka smarnego MotorLIFE i bez niego, dla określonych parametrów obróbki poprzedzającej nagniatanie (prędkość toczenia $v_c = 60$ m/min, posuw $f = 0,15$ mm/obr., promień naroża $r = 0,8$ mm, głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm) i obróbki nagniataniem (siła $F = 1500$ N, prędkość $v = 60$ m/min, posuw $f = 0,08$ mm/obr., liczba przejść $i = 1$), uzyskiwano po nagniataniu parametr chropowatości powierzchni $Ra = 0,51 \div 0,53 \mu\text{m}$ [15, 16].

Podsumowanie

Pomimo dużej ilości stosowanych różnych rodzajów żeliw, istniejący szeroki wachlarz możliwości w zakresie doboru do ich obróbki odpowiednich narzędzi sprzyja opracowywaniu wydajnych i ekonomicznych rozwiązań w zakresie obróbki tych materiałów.

Literatura

[1] Dobrzański L.A.: „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego”. WNT, Warszawa, 2002.

Tablica 9. Zawartość podstawowych pierwiastków w stopach Fe-C-V, twardość stopów oraz główne cechy ich struktury – na podstawie lit. [12]

Nr stopu	Zawartość % wag.		Twardość HV30	Rodzaj stopu	Struktura osnowy stopu
	C	V			
1	3,07	15,25	381	Nadeutektyczny	Perlit płytkowy
2	1,38	15,11	198	Podutektyczny	Ferryt stopowy
3	1,44	15,10	216	Eutektyczny	Ferryt stopowy
4	1,72	11,36	187	Eutektyczny	Perlit kulkowy
5	1,79	9,19	339	Podutektyczny	Perlit płytkowy
6	2,16	7,66	408	Eutektyczny	Perlit płytkowy

Tablica 10. Zalecane naciski jednostkowe nagniatania naporowego tocznego krążkowaniem i kulkowaniem powierzchni żeliwa szarego po różnej obróbce – na podstawie lit. [13]

Obróbka poprzedzająca nagniatanie	Zalecane naciski jednostkowe nagniatania q_n [MPa]	
	Krążkowanie	Kulkowanie
Toczenie	850–1100	800–1100
Wytaczanie	600–800	550–800
Szlifowanie	400–700	350–650
Rozwiercanie	200–450	200–400

Uwaga: większe wartości nacisków jednostkowych nagniatania dla żeliw o większej wytrzymałości na rozciąganie.

Tabl. 11. Przybliżone wzory do obliczania wartości siły nagniatania naporowego tocznego dla krążkowania i kulkowania jednym elementem nagniatającym – na podstawie lit. [13, 14]

Rodzaj elementu nagniatającego	Rodzaj powierzchni obrabianej	Siła nagniatania F [N]
Krążek lub rolka	walek	$F = 7,9 \frac{dlq_n^2}{E(\frac{d}{D} + 1)}$
	otwór	$F = 5,5 \frac{dlq_n^2}{E(\frac{d}{D} - 1)}$
Kulka	walek	$F = (\frac{Dq_n}{0,054 E})^2 q_n$ przy $\frac{d}{D} \geq 10$
	otwór	$F = [\frac{Dq_n}{0,054 E (\frac{d}{D} - 1)}]^2 q_n$

Oznaczenia:

- q_n – największa wartość nacisku nagniatania w MPa,
- d – średnica obrabianej powierzchni przedmiotu w mm,
- D – średnica elementu nagniatającego w mm,
- l – długość powierzchni styku elementu z przedmiotem obrabianym w mm,
- E – moduł Younga w MPa.

[2] Davis J.R. (ed.): "Metals Handbook, Desk Edition", 2nd edition. ASM International, 2001.

[3] „Poradnik Obróbki Skrawaniem”. Sandvik Coromant, 2010.

[4] „Poradnik Garant. Obróbka Skrawaniem”. Garant, 2009.

[5] Czechowski K., Wronska I.: „Obróbka na sucho materiałów w stanie twardym. Cz. III”. Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie”, 2012, nr 10, s. 48-55.

[6] Czechowski K., Stós J., Wronska I.: „Rozwój obróbki Skrawaniem – cz. IV. Obrabialność żeliwa utwardzonego”. Stal, Metale & Nowe Technologie, 2013, nr 1-2, s. 44-48.

[7] Katalog główny firmy Sandvik Coromant: 2009, 2012.

[8] Ławrynowicz Z., Dymski S.: „Oszacowanie zawartości austenitu szczątkowego w żelwie ADI za pomocą sztucznej sieci neuronowej”. Archiwum Odlewnictwa, 2006, nr 19, s. 183-188.

[9] Kaczorowski M., Krzyńska A., Psoda M.: „Badania strukturalne żeliwa sferoidalnego po dwustopniowym hartowaniu izotermicznym”. Archiwum Odlewnictwa, 2004, nr 12, s. 127-138.

[10] Polishetty A., Goldberg M., Littlefair G.: “Wear characteristics of ultra-hard cutting tools when machining austempered ductile iron”. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJME-IJENS, 2010, vol. 10, nr 1, s. 1-6.

[11] Katuku K., Koursaris A., Sigalas S.: “Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions”. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) pp. 2412-2420.

[12] Kawalec M., Kozana J.: Effect of microstructure of Fe-C-V alloys on selected functional properties. Archives of Foundry Engineering, 14 (2014) 3, pp. 33-36.

[13] Przybylski W.: „Technologia obróbki nagniataniem”. WNT, Warszawa, 1987.

[14] Polowski W.: „Nagniatanie”. Rozdział w Poradniku inżyniera, konstruktora i mechanika „Obróbka skrawaniem w praktyce” pod red. J. Stósa. Wyd. Verlag Dashofer, Warszawa, 2008.

[15] Lewandowski A.: „Właściwości tribologiczne żeliwa EN-GJSFP-500-7 nagniatanego w obecności preparatów eksploatacyjnych na bazie środków smarnych stałych i o działaniu chemicznym”. Tribologia, 2013, nr 4, s. 67-84.

[16] Lewandowski A., Feldshtein E.: „Technological heredity when roller burnishing of ductile cast iron”. Journal of Scientific & Industrial Research, Vol 73, August 2014, pp. 559-565. ■