

Influence of changes in machinability of nodular cast iron on manufacturing costs

Wpływ zmian skrawalności żeliwa sferoidalnego na koszty wytwarzania

WOJCIECH BORKOWSKI
PIOTR CICHOSZ
MATEUSZ PUDŁOWSKI
HUBERT SKOWRONEK
KAMIL WASZCZUK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.99>

Attempts to explain changes in the efficiency of nodular cast iron machining caused by the dispersion of its mechanical properties affecting on the intensity of tools wear (such as VHM drills) have been presented. It has been also assessed to what extent changes in mechanical properties of tools, within the limits of the standards, can change the machining efficiency in quite intensive machining conditions of the automotive industry.

KEYWORDS: machinability, nodular cast iron, drilling, costs

Podjęto próbę wyjaśnienia zmian efektywności obróbki żeliwa sferoidalnego; było to spowodowane rozrzutem jego właściwości mechanicznych, odbijającym się na intensywności zużycia się narzędzi (w tym wypadku wiertel z węglików spiekanych). Oceniono, na ile zmiany właściwości mechanicznych narzędzi – mieszczące się w granicach norm – mogą wpływać na efektywność obróbki w dość intensywnych warunkach skrawania w przemyśle motoryzacyjnym.

SŁOWA KLUCZOWE: skrawalność, żeliwo sferoidalne, wiercenie, koszty

Wprowadzenie

Żeliwo sferoidalne ma bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe oraz plastyczne. Ponadto można je łatwo kształtować technikami odlewniczymi. Dzięki temu jest szeroko stosowane w produkcji masowej, np. w przemyśle motoryzacyjnym. Wykonuje się z niego m.in.: wały korbowe, wałki rozrządu, korbowody, części układu kierowniczego czy koła zębate. Jednym z głównych mankamentów tego materiału jest zła obrabialność [1, 6, 7, 9, 10, 13].

Podatność materiału na skrawanie odgrywa kluczową rolę w wytwarzaniu wyrobów. Wpływa nie tylko na jakość produkowanych elementów, ale – co również ważne – na efektywność obróbki. Tematykę skrawalności omówiono szerzej np. w pracy [7]. W dużym skrócie można powiedzieć, że obrabialność materiału zależy od wielu czynników, do których zalicza się jego właściwości fizykochemiczne, w tym strukturę powierzchniową, rodzaj i sposób obróbki. Skrawalność jest też ściśle związana z: właściwościami skrawnymi materiałów narzędziowych i powłok ochronnych, geometrią ostrza, w tym łamacza wióra, wspomaganie skrawania chłodzeniem/nagrzewaniem

i smarowaniem strefy skrawania, skrawaniem wibracyjnym, technologiami obróbki trochoidalnej, a także ze stanem technicznym i właściwościami dynamicznymi układu OUPN.

Głównym zadaniem wytwarzania jest wykonanie wyrobu o założonej jakości, w sposób jak najbardziej efektywny, czyli zazwyczaj – jak najtaniej lub najwydajniej, a niekiedy w sposób będący kombinacją tych oczekiwań.

Ten sam materiał półfabrykatu, zgodny z normą, nawet dostarczony przez tego samego producenta, w wyniku zmian technologii wykonania półfabrykatu może być łatwiejszy lub trudniejszy do obróbki. Celem pracy było zaprezentowanie wpływu zmian właściwości żeliwa sferoidalnego na trwałość wiertel oraz efektywność obróbki w intensywnych warunkach produkcji masowej.

Materiał obrabiany

W badaniach użyto żeliwa sferoidalnego GGG55 (norma zakładowa [11]) odpowiadającego gatunkowi EN-GJS 500-7. W tablicy przedstawiono jego skład chemiczny według normy oraz z dwóch dostaw półfabrykatów A i B.

TABLE. Chemical composition of ductile iron GGG55 according to standard [11] and supplied lots A and B of this material

TABLICA. Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego GGG55 według normy [11] oraz dostarczonych partii A i B tego materiału

	Norma [11]	A	B
Fe [%]	reszta	93,98	93,75
C [%]	3,2±3,8	3,20	3,24
Si [%]	2,2±3,1	2,239	2,277
Mn [%]	0,1±0,3	0,248	0,280
Cr [%]	–	0,027	0,041
Cu [%]	0,20±0,55	0,232	0,266
P [%]	0±0,05	0,014	0,015
S [%]	0±0,03	0,003	0,002
Ti [%]	–	0,027	0,027

Z danych wynika, że obie partie – A i B – dostaw półfabrykatów były wykonane z żeliwa o składzie chemicznym zgodnym z normą.

* Mgr inż. Wojciech Borkowski, wojciech.borkowski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5906-0874> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska
Prof. dr hab. inż. Piotr Cichosz, piotr.cichosz@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-1636-1973> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska
Mgr inż. Mateusz Pudłowski, mpudlowski@guehring.pl – Gühring Sp. z o.o., Dąbrowa Górnicza, Polska
Dr inż. Hubert Skowronek, hubert.skowronek@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3398-1661> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska,
Dr inż. Kamil Waszczuk, kamil.waszczuk@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7889-4847> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska

Badania metalograficzne mikrostruktury ujawniły istotne różnice morfologiczne (rys. 1), zwłaszcza w warstwie przypowierzchniowej, która jest poddawana obróbce.

Badanie twardości przeprowadzono twardościomierzem Struers DuneJet. Pomiarów dokonywano na powierzchniach czołowych 16 próbek, w których wiercono otwory. Wyniki badań przedstawiono na rys. 2.

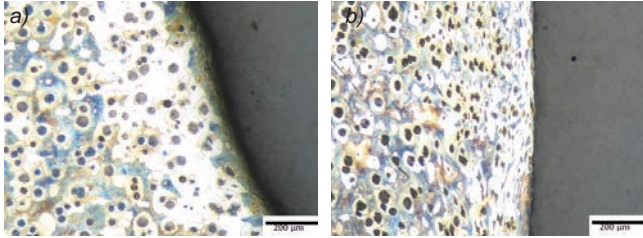


Fig. 1. Microstructure of the surface area: a) samples A and b) samples B, enlargement $\times 100$, digested with nital

Rys. 1. Mikrostruktura obszaru przypowierzchniowego: a) próbki A i b) próbki B, powiększenie $\times 100$, trawionej nitaliem

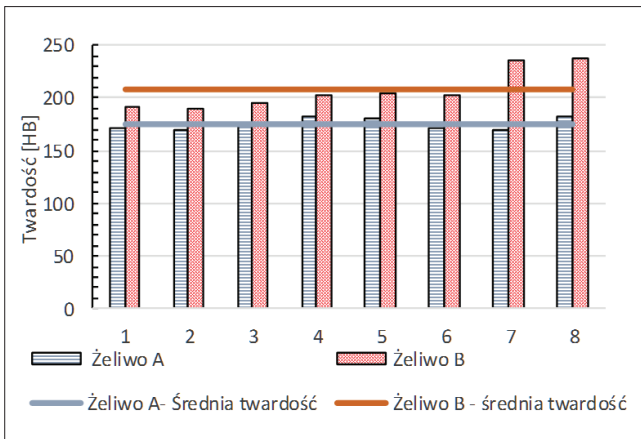


Fig. 2. Comparison of hardness of A and B ductile iron samples
Rys. 2. Porównanie twardości próbek z żeliwa sferoidalnego A i B

Stwierdzono, że średnia twardość żeliwa A wynosiła 175,5 HB, a żeliwa B 207,8 HB. Różnica wartości średnich twardości wyniosła 18,4% i na poziomie $\alpha = 0,05$ okazała się istotna. Odchylenie standardowe twardości żeliwa A ma wartość $S_d = 5,1$ HB, a żeliwa B $S_d = 18,8$ HB, czyli jest prawie czterokrotnie większe. Znaczniejsze rozrzuty wpływają na szybsze zużywanie się narzędzi podczas obróbki twardszych półfabrykatów i nie muszą być dostatecznie rekompensowane zmniejszonym zużyciem podczas obróbki tych mniej twardych. Taka intensyfikacja wpływu czynników na zmienną zależną – w tym przypadku trwałość – uwypukla się w bardzo wytężonych warunkach procesu, a takie były stosowane podczas wiercenia.

Skrawalność żeliwa

Skrawalność może być określana wskaźnikami względnymi bądź bezwzględny. W przypadku wskaźników względnych porównuje się obrabialność danego materiału z obrabialnością materiału wzorcowego. Do takich porównań można zastosować np. okresową prędkość skrawania lub chropowatość powierzchni. Pierwszy z tych wskaźników jest zazwyczaj trudny i pracochłonny w użyciu, dlatego można go zastąpić np. trwałością czy intensywnością zużywania się ostrza. W uproszczeniu: można zastosować wskaźniki pomocnicze, np. własności mechaniczne materiału obrabianego, składowe całkowitej

siły skrawania, temperaturę skrawania albo rodzaj wiórów. Przytoczone wskaźniki pomocnicze mogą skłaniać do podjęcia nie do końca słusznych decyzji, gdyż rzadko się zdarza, że np. zwiększenie wskaźnika twardości materiału o 10% spowoduje proporcjonalne podniesienie kosztów narzędziowych.

Aby porównać skrawalność, a w dalszej kolejności koszty i czas zabiegu wiercenia otworów w wyrobach z żeliwa sferoidalnego z dwóch partii dostaw (A i B), przyjęto następujące założenia i warunki badań:

- obróbka odbywała się na obrabiarce HAAS VF-3YT,
- wiercono otwory o średnicy $d = 18$ mm i długości $L = 40$ mm w próbce cylindrycznej o średnicy $D = 30$ mm,
- narzędziem było wiertło pełnowęglikowe typu RT100S z wielowarstwową powłoką PVD-TiN/TiAlN (firmy Gühring),
- koszt pracy stanowiska wynosił $K_m = 100$ zł/h,
- wynagrodzenie pracownika wynosiło 17 zł/h,
- koszt narzędzia $K_N = 900$ zł,
- przyjęto technologiczne kryterium stępienia narzędzia, którym była utrata dopuszczalnej dokładności wymiarowo-kształtowej wykonanego otworu,
- koszt regeneracji (ostrzenia i repowlekania) $K_R = 100$ zł,
- czas wymiany narzędzia po regeneracji $t_{wn} = 4$ min,
- liczba możliwych regeneracji wiertła 6,
- warunki obróbki: $v_c = 125$ m/min, $f = 0,27$ mm/obr, chłodzenie wewnętrzne emulsją (o stężeniu 6%) pod ciśnieniem $p = 6,9$ MPa.

Badania skrawalności wierceniem obu dostaw żeliwa realizowano w rzeczywistych warunkach przemysłowych produkcji masowej, w zakładzie z branży motoryzacyjnej.

Pierwszym określanym wskaźnikiem skrawalności była trwałość narzędzia T_c , wyrażona liczbą obrobionych otworów. Wartości średniej trwałości określano przez trzy miesiące, podczas których obrobiono ok. 220 tys. otworów, używając ok. 270 wiertel. Dla materiałów A i B trwałość wyniosła odpowiednio: $T_{CA} = 1100$ i $T_{CB} = 660$ szt. Różnica ta (40%) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ okazała się statystycznie istotna.

Zmniejszona trwałość wiertel spowodowała zwiększenie zapotrzebowania na narzędzia oraz częstsze przestoje linii produkcyjnej na ich wymianę. To musiało podnieść koszty obróbki oraz obniżyć jej wydajność. Należało się zastanowić nad głównymi przyczynami tego stanu rzeczy, a zwłaszcza nad zwiększoną intensywnością zużycia wiertel. Zdecydowano się na zbadanie innych pomocniczych wskaźników skrawalności, czyli: siły i momentu wiercenia, temperatury skrawania, rodzaju powstających wiórów i chropowatości po obróbce.

Wyniki badań doświadczalnych

Wyniki porównawczych badań doświadczalnych wskaźników skrawalności materiałów A i B zamieszczono na wykresie zbiorczym (rys. 3) i opisano jako procentowe wartości wskaźników dla materiału B względem materiału A.

Pomiary sił oraz momentów skrawania wykonano czteroskładowym siłomierzem piezoelektrycznym 9273 firmy Kistler, współpracującym z wielokanałowym wzmacniaczem sygnałów 5011 firmy Kistler.

Stwierdzono, że średnia siła osiowa F_f podczas wiercenia żeliwa A wynosiła 2127 N, a żeliwa B – 2378 N. Różnica wartości średnich wynosiła 11,8% i była statystycznie istotna. Odchylenia standardowe siły osiowej obu żeliw były niemal identyczne i wynosiły ok. 73 N. Moment skrawający wyniósł w przypadku obróbki żeliwa A $M_c = 29,75$ Nm, natomiast w przypadku żeliwa B $M_c = 35,75$ Nm, co przełożyło się na różnicę 20,2%.

Celem pomiarów temperatury skrawania nie było określenie rzeczywistej, maksymalnej temperatury, jaka występuje w strefie kontaktu ostrza z materiałem obrabianym, a jedynie zbadanie różnic temperatury, jakie można zaobserwować podczas obróbki obu żeliw. Aby określić rzeczywistą temperaturę, należałoby zastosować bardzo złożone metody badawcze, obejmujące konieczność wzorcowania emisyjności powierzchni ostrzy, która zależy od wielu czynników (chropowatości powierzchni, rodzaju materiału powłoki, temperatury itp.), a także użycia bardzo szybkich kamer termowizyjnych lub pirometrów do rejestrowania temperatury na wybranym, zidentyfikowanym fragmencie obracającego się z bardzo dużą prędkością wiertła. Ponadto wymagałoby to przygotowania samych próbek i narzędzi. Byłoby to niezmiernie czasochłonne i kosztowne, wiązałoby się z niewspółmiernie dużym wysiłkiem wobec postawionego celu, czyli porównania skrawalności materiałów o zbliżonych właściwościach.

Porównywano temperaturę wiertła w chwili jego wyjścia z materiału. Na rys. 4 pokazano przykładowy zapis obrazu termowizyjnego z zaznaczonym miejscem $Sp1$, w którym odczytywano temperaturę narzędzia. Badania starano się prowadzić w powtarzalnych warunkach, dla obu ocenianych materiałów, podczas wiercenia na sucho. Przyjęto emisyjność powierzchni wiertła $\varepsilon = 0,9$.

Określona w ten sposób temperatura narzędzia nie jest zatem najwyższą temperaturą, a jedynie jej wartością średnią. Pomiaru temperatury przeprowadzono za pomocą kamery termowizyjnej FLIR model p620, która znajdowała się w odległości 2 m od badanego obiektu.

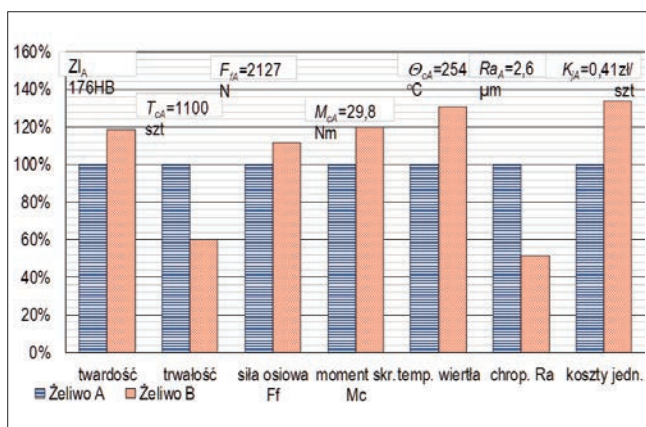


Fig. 3. Comparison of selected machinability indicators
Rys. 3. Porównanie wybranych wskaźników skrawalności



Fig. 4. Picture from a thermal imaging camera with the drill temperature point marked
Rys. 4. Obraz z kamery termowizyjnej z zaznaczonym miejscem pomiaru temperatury wiertła

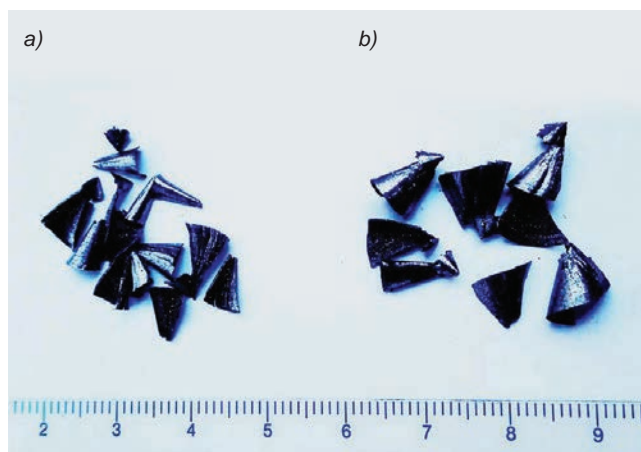


Fig. 5. Chips formed during drilling: a) cast iron A, b) cast iron B
Rys. 5. Wióry powstałe podczas wiercenia: a) żeliwa A, b) żeliwa B

Temperatura części roboczej wiertła podczas wiercenia żeliwa A wynosiła $254,3^\circ C$, a w przypadku żeliwa B miała wartość $332,2^\circ C$. Różnica (30,6%) była statystycznie istotna. Tak duża różnica temperatury, mimo że różnice w twardości obu żeliw stanowiły tylko 18,4%, wynikała zapewne z tego, że narzędzia pracowały w bardzo wytężonych warunkach.

Kolejnymi ocenianymi wskaźnikami skrawalności były budowa i kształt wióra. Wióry miały typową postać, jaką uzyskuje się podczas wiercenia żeliw sferoidalnych (rys. 5). Można je zakwalifikować według PN-ISO 3686 jako łukowe łuzne o oznaczeniu 6.2. Nie zauważono istotnych różnic w budowie wiórów obu badanych żeliw.

Chropowatość otworów wierconych w materiale A i B różniła się istotnie. Dla materiału B wartości parametrów Ra były mniejsze o ok. 49% w porównaniu z materiałem A.

Koszty i czas zabiegu wiercenia

Koszty i czas jednostkowy obróbki obliczono według metodyki zaprezentowanej w pracy [5] i załączonego do niej arkusza *Kalkulacja kosztów i czasu operacji.xls*. Stwierdzono, że w wyniku zmiany partii materiału z A na B wzrosły koszty wiercenia z $K_{cA} = 0,41 \text{ zł/szt}$. do $K_{cB} = 0,55 \text{ zł/szt}$. (aż o 34%) oraz wydłużył się czas obróbki z $t_{cA} = 0,1066 \text{ min}$ do $t_{cB} = 0,1093 \text{ min}$ (zaledwie o 2,6%). Koszty narzędziowe zwiększyły się odpowiednio aż o 66%. Odnosząc się do kosztów liczonych dla całej serii wyrobów, którą wykonywano przez ok. trzy miesiące, można zauważyć, że globalnie koszty obróbki K_{serii} wzrosły aż o 30924 zł, a koszty narzędziowe K_N o 29734 zł. Są to bardzo znaczące kwoty.

Na bazie przytoczonych danych dokonano symulacji, w jaki sposób będą się zmieniać koszty i czas zabiegu wiercenia dla szerszego zakresu hipotetycznie zmieniającej się trwałości narzędzi, np. w wyniku zmian właściwości materiału obrabianego. Wyniki tych analiz przedstawiono na rys. 6.

Widać, że zmiana właściwości skrawanych materiału, skutkująca zmianami trwałości narzędzi, najintensywniej oddziałuje na koszty narzędziowe K_N , a niemal o połowę słabiej na koszty obróbki K_f . Wynika to np. z bezpośredniego przełożenia się zmian trwałości narzędzi na ich liczbę konieczną do wykonania serii produkcyjnej. Funkcja kosztów obróbki ma jeszcze człon związany z kosztami pracy stanowiska, wynagrodzenia pracownika oraz czasem obróbki, stąd zmiana liczby narzędzi w mniejszym stopniu oddziałuje na całkowite koszty wytwarzania ΣK_f .

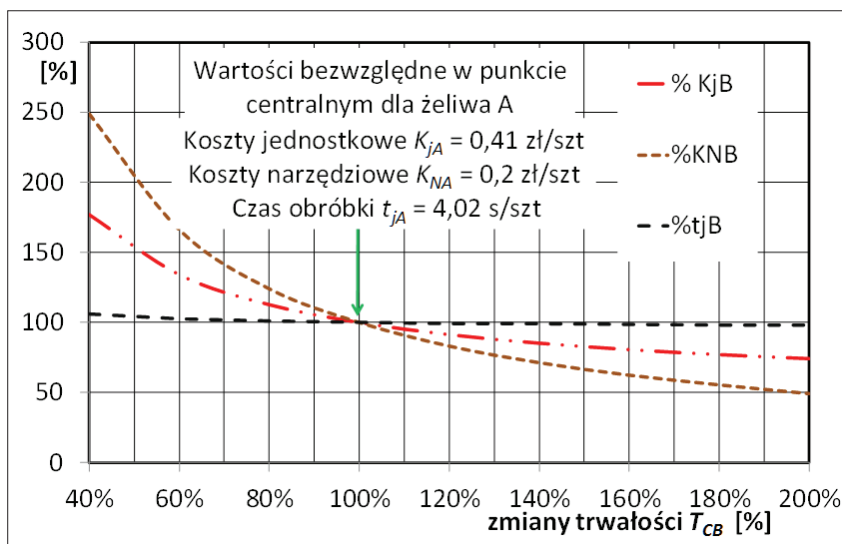


Fig. 6. Changes in machining costs K_j , tool costs K_N and unit time t_j caused by a change in tool life T_{CB}

Rys. 6. Zmiany kosztów obróbki K_j , kosztów narzędziowych K_N oraz czasu jednostkowego t_j wywołane zmianą trwałości narzędzi T_{CB}

Wpływ zmian trwałości narzędzi na czas obróbki jest niewielki, jeśli nie koryguje się parametrów skrawania. Wydajność chwilowa nie ulega wówczas zmianie. Skróci się lub wydłuży jedynie czas związany z przestojami obrabiarzy koniecznymi do wymiany narzędzi. Jednak w przypadku dużej trwałości narzędzi, wymaganej w wysoko wydajnych, zautomatyzowanych systemach produkcyjnych, wpływ ten jest niewielki.

Warto też zwrócić uwagę na to, że zmiany przedstawionych na rys. 6 efektów ekonomicznych względem trwałości nie mają zależności liniowej, lecz są odwrotnie proporcjonalne. Oznacza to, że skrócenie trwałości narzędzi np. o 50% spowoduje wzrost kosztów narzędziowych o 100%, natomiast takie samo wydłużenie trwałości zmniejszy koszty narzędziowe jedynie o ok. 50%.

Warto zaznaczyć, że w warunkach zakładu produkcyjnego w wyniku istotnego pogorszenia się skrawalności materiału może zająć konieczność zmniejszenia parametrów obróbki, by wydłużyć trwałość narzędzi i ograniczyć koszty narzędziowe. Jednak na skutek wydłużenia czasu obróbki rosną związane z nim pozostałe koszty procesu. Przed podjęciem takiej decyzji trzeba więc skalkulować, czy jest ona opłacalna.

Podsumowanie

Z badań wynika, że zmiana właściwości mechanicznych nawet tego samego gatunku materiału, np. żeliwa sferoidalnego, może bardzo silnie rzutować na intensywność zużywania się narzędzi skrawających. Może to istotnie zmienić koszty wytwarzania, a zwłaszcza koszty narzędziowe. Na czas obróbki wpływ ten jest mało istotny, jeśli nie zostaną zmienione parametry skrawania.

Przytoczone w artykule dane i zależności zmian analizowanych czynników, zaczerpnięte z rzeczywistych warunków zakładu produkcyjnego, obowiązują jedynie dla tych warunków i nie mogą być bezkrytycznie przeniesione do analizy innych operacji obróbkowych. Przedstawione tendencje będą miały podobny charakter, ale podejmowane każdorazowo decyzje powinny być poprzedzone analizą i obliczeniami dostosowanymi do aktualnych danych.

W dużych zakładach produkcyjnych gospodarkę narzędziową często zleca się firmie zewnętrznej, ne-

gociując koszty obsługi za wykonanie określonej partii wyrobów [3]. Bywa, że ustalony koszt takiej usługi ulega znacznym wahaniom spowodowanym zmianami właściwości materiału półfabrykatów, rzutującymi na intensywność zużywania się narzędzi. To wszystko może dość istotnie zmienić efektywność obróbki. Wymagać to może renegocjacji warunków umowy outsourcingowej. Warto zwrócić uwagę na taką ewentualność i zadbać o wprowadzenie stosownych zapisów w umowie.

Analiza uzyskanych wyników badań wybranych wskaźników skrawalności podczas wiercenia żeliwa GGG55 z dwóch różnych dostaw A i B półfabrykatów pozwoliła stwierdzić, że w przypadku zmiany materiału A na twardszy o 18,5% materiał B:

- nastąpiło znaczne (aż o 40%) zmniejszenie trwałości wiertel pełnowęglkowych,
- siły osiowe F_f zwiększyły się o ok. 11,8%, a moment skrawania M_c o 20,2%,
- temperatura wiertła na wyjściu z otworu wzrosła z 254,3 do 332,2°C (o 30,6%),
- nie uległy zmianie budowa i kształt wiórów,
- chropowatość powierzchni wierconych otworów wyrażona parametrem R_a uległa poprawie o 49%,
- koszty jednostkowe operacji wiercenia K_j zwiększyły się z 0,41 do 0,55 zł/szt. (o 34%),
- czas obróbki t_j wydłużył się z 0,107 do 0,11 min/szt. (co stanowiło zaledwie 2,6%).

LITERATURA

- [1] Benedetti M., Fontanari V., Lusuardi D. "Effect of graphite morphology on the fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron". *Engineering Fracture Mechanics*. 206 (2019): 427–441, <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2018.12.019>.
- [2] Cichosz P. „Efektywność kształtowania przedmiotów osiowosymetrycznych w zintegrowanym wytwarzaniu”. Wrocław: Oficyna Wyd. PWr, 1998: 31–57.
- [3] Cichosz P., Subbotko R. „Gospodarka narzędziowa”. *Mechanik*. 10, 90 (2016): 1340–1343, <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2016.10.352>.
- [4] Cichosz P. „Ekonomiczne aspekty doboru narzędzi skrawających do zadania produkcyjnego”. *Mechanik*. Cz. 1 i 2. 10, 11, 77 (2004): 642–647.
- [5] Cichosz P. et al. „Wybrane aspekty projektowania i wdrażania specjalnych narzędzi skrawających”. *Prace Naukowe ITMiA PWr*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza PWr, 2012: 111–122.
- [6] Ghani A.K., Choudhury I.A. "Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool". *Journal of Materials Processing Technology*. 127 (2002): 17–22.
- [7] Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: WNT, 2010: 349–372.
- [8] Grzesik W., Kiszka P., Kowalczyk D., Rech J., Claudin Ch. "Machining of nodular cast iron (PF-NCI) using CBN tools". *Procedia CIRP*. 1 (2012): 483–487.
- [9] Kowalczyk D., Grzesik W. „Badania tarcia i zużycia ostrzy z CBN w obróbce żeliwa sferoidalnego”. *Obróbka skrawaniem – Efektywne wytwarzanie*. Wrocław: Wydawnictwo ITMiA Politechniki Wrocławskiej, 2012: 143–150.
- [10] Kowalczyk D., Kiszka P., Grzesik W., Żak K. „Zużycie ostrza w toczeniu żeliwa sferoidalnego ostrzami z ceramiki azotowej i jego wpływ na przebieg procesu skrawania”. Kruszyński B. (red.) *Obróbka skrawaniem – Współczesne problemy*. Łódź: Agencja MALAGA, 2010: 183–190.
- [11] Materiały informacyjne firmy Gühring.
- [12] PN-EN 1563:2018, Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne.
- [13] Yigit R., Celik R., Findik F., Koksall S. "Tool life performance of multilayer hard coatings produced by HTCVD for machining of nodular cast iron". *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 26 (2008): 514–524, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.12.003>.