

Łukasz ŚLUSARCZYK¹

SKUTECZNOŚĆ PROCESU WEDM I DOKŁADNOŚĆ KSZTAŁTU PRZEDMIOTÓW WYKONANYCH ZE STALI TRUDNOOBRABIALNEJ

Artykuł omawia zagadnienia związane ze skutecznością procesu wycinania elektroerozyjnego WEDM (*Wire Electrical Discharge Machining*) i dokładnością kształtu wykonywanych przedmiotów. Badania wstępne służące doborowi parametrów procesu cięcia przeprowadzono na próbkach ze stali HS 18-0-1 o wymiarach 10x10mm oraz stali nierdzewnej o grubości 3mm. W badaniach poświęconym dokładności kształtu wycięto w blasze ze stali nierdzewnej dwa cylindry o średnicy 30mm i grubości 15,43mm. Dodatkowo, dla jednego z otworów pozostałych w próbce po procesie WEDM wykonano obróbkę wykończeniową. Dokonano pomiarów odchyłek okrągłości i błędów walcowości otworów i wyciętego cylindra, przy pomocy przyrządu pomiarowego Talyround 365. Analiza tych wyników wykazała wyraźną poprawę dokładności kształtu dzięki obróbce wykończeniowej. Zaobserwowano też różnice wymiarowe w mierzonych płaszczyznach. Było to spowodowane, prawdopodobnie specyficzną charakterystyką procesu WEDM. Produkty odpadowe erozji, gromadziły się bowiem na bazowej powierzchni walców, co powodowało większą intensywność wyładowań w tym obszarze.

1. WPROWADZENIE

Dla uzyskania wysokiej, właściwej wydajności, czyli szybkości procesu wycinania elektroerozyjnego WEDM (*Wire Electrical Discharge Machining*), muszą być zoptymalizowane wartości parametrów impulsu: częstotliwości impulsów, prądu wyładowania i czasu trwania impulsu [5]. Największy wpływ na podniesienie wydajności procesu ma zwiększenie częstotliwości impulsów. Podwojenie częstotliwości impulsów powoduje podwojenie wydajności. Zmiany prądu wyładowania wykazują podobną zależność, chociaż jego 100% wzrost wywołuje tylko około 50% zwiększenie wydajności. Najmniejszy wpływ na wydajność obróbki ma przedłużenie czasu trwania impulsu lub wyładowania [4]. Wynika to być może z faktu, że przedłużający się impuls nie zwiększa gęstości energii, ale raczej dąży do jej zmniejszenia (umożliwiając tym samym zwiększenie się promienia kanału plazmy). Istotnym dla wydajności procesu WEDM jest współczynnik wypełnienia impulsów τ . Dla danego czasu trwania impulsu istnieje optymalna wartość τ , przy której występuje maksymalna wydajność. Im dłuższy czas trwania impulsu, przy identycznym τ , tym dłuższy czas przerwy między impulsami. Być może to sprawia, że

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Kraków,
E-mail: slusarczyk@mech.pk.edu.pl

przepłukiwanie strefy staje się bardziej efektywne, ułatwiając jednocześnie usuwanie produktów procesu obróbkowego [3],[5]. W nowoczesnych obrabiarkach WEDM parametry zadaje się dobierając odpowiednie tablice technologiczne zawarte w pamięci obrabiarki. W tablicach tych znajdują się dane, które umożliwiają otrzymanieżądanego kształtu z określoną dokładnością oraz chropowatością powierzchni [3],[5].

2. BADANIA LABORATORYJNE

Część praktyczna badań została podzielona na dwa etapy. Etap pierwszy polegał na przecinaniu profilu ze stali HS 18-0-1 o wymiarach 10x10 mm oraz metalowej płytki z blachy nierdzewnej o grubości 3mm. Drugi etap badań polegał na wycinaniu krążków z blachy nierdzewnej o grubości 15,3mm. Podczas poszczególnych prób cięcia zmieniano nastawy generatora oraz rejestrowano przebiegi prądu i napięcia. Stanowisko badawcze, przedstawione na rysunku 1 składało się z elektroerozyjnej wycinarki drutowej BP - 95d z tranzystorowym generatorem izoczęstotliwościowym, oscyloskopu typu KIKUSUI COR 5541U oraz komputera klasy PC [6],[7]. Elektroda roboczą był drut mosiężny o średnicy 0,25mm, każda z prób odbywała się w podobnych warunkach przepłukiwania strefy obróbki wodą zdemineralizowaną z wykorzystaniem dwóch dysz, górnej i dolnej. W ramach badań wstępnych, w celu określenia zakresu pracy generatora wykonano 4 próby przecinania profilu o wymiarach 10x10mm ze stali HS 18-0-1.



Rys. 1. Stanowisko badawcze na bazie elektroerozyjnej wycinarki drutowej BP - 95d, podłączonej do oscyloskopu typu KIKUSUI COR 5541U oraz komputera klasy PC

Fig. 1. Picture of the workstation consisting of electroerosion wire cutter BP – 95d connected with oscilloscope KIKUSUI COR 5541U and PC computer

Podczas prób zmieniano czas impulsu i czas przerwy dla stałej wartości impulsu prądowego, wynoszącej 56 A. Dodatkowo na oscyloskopie cyfrowym dokonywano

rejestracji przebiegów oraz odczytywano rzeczywiste czasy impulsu i przerwy. Parametry pracy generatora wycinarki oraz czas przecinania próbek przedstawiono w tabeli 1. Rzeczywiste wartości czasu impulsu i czasu przerwy różnią się od wartości zadanych. Prawdopodobnie, ze względu na konstrukcję stosowanego generatora, uzyskanie krótszych czasów impulsów jest możliwe tylko przez obniżanie wartości impulsu prądowego.

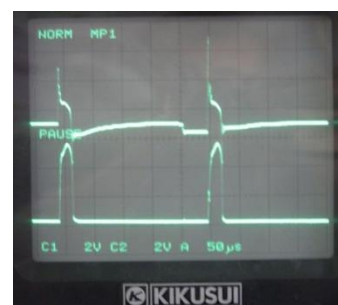
Tabela 1. Parametry podczas przecinania profilu 10x10 mm ze stali HS 18-0-1
Table 1. Parameters during cutting of profiles made from HS 18-0-1 steel

Numer próby	Czas impulsu T [μs]	Czas przerwy t [μs]	Rzeczywisty Czas impulsu T [μs]	Rzeczywisty Czas przerwy t [μs]	Wielkość impulsu prądowego [A]	Czas przecinania [min]
1	20	150	31,8	196	56	12,35
2	4	150	15	168	56	13,39
3	4	300	16	304	56	14,29
4	20	300	31,8	359	56	13,02

Rzeczywiste przebiegi natężenia i napięcia impulsów dla każdej próby rejestrowane były z wykorzystaniem dwóch kanałów oscyloskopu, rysunek 2. Przykładowe przebiegi zarejestrowane podczas przecinania przedstawia rysunek 3

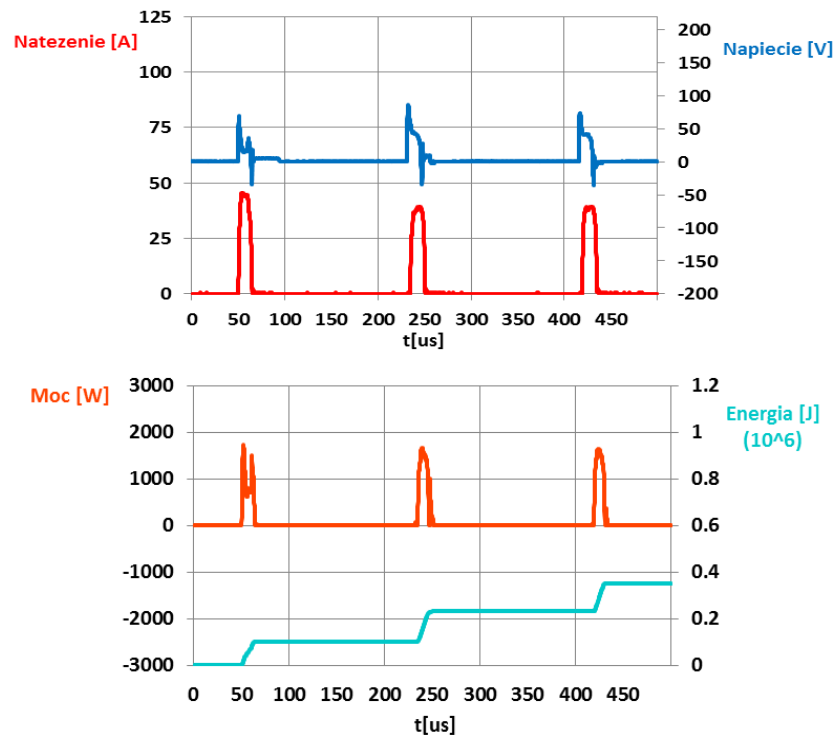


Rys. 2. Sposób przyłączenia przewodów sygnałowych do oscyloskopu cyfrowego
Fig. 2. The method of the digital oscilloscope connection

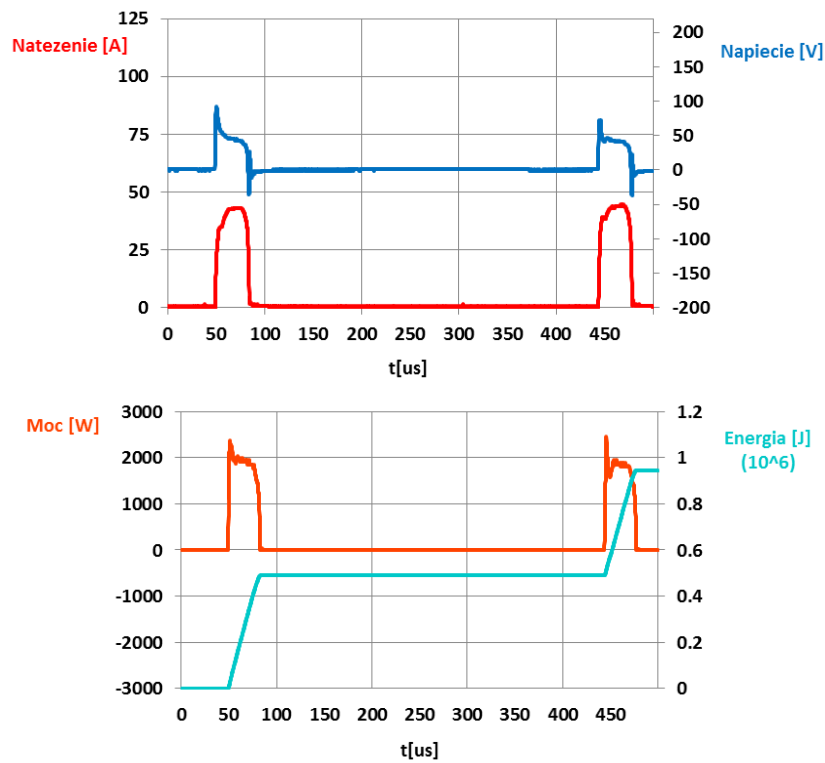


Rys. 3. Przykładowe przebiegi zarejestrowane podczas przecinania profilu
Fig. 3. Examples of impulses recorded during profile cutting

Przebiegi natężenia i napięcia impulsów były dodatkowo zapisywane w postaci plików tekstowych DSO na dysku komputera. Do obsługi transmisji między oscyloskopem a komputerem wykorzystano program Elsinco. W ramach prac opracowany został program komputerowy, który na podstawie zawartości plików DSO obliczał wartości napięcia, natężenia, mocy oraz energii i generował dla tych wartości wykresy. Wartość impulsu prądowego była taka sama dla wszystkich czterech prób. Eksperymentalnie wyznaczono maksymalny czas impulsu, wynoszący 20 μs, powyżej którego elektroda robocza ulegała zerwaniu. Poniżej, na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe przebiegi impulsów oraz wykresy mocy i energii dla prób 2 i 4.



Rys. 4. Przebiegi prądu i napięcia oraz mocy i energii dla ustawień nr 2
Fig. 4. The current, voltage, power and energy course for setting no. 2



Rys. 5. Przebiegi prądu i napięcia oraz mocy i energii dla ustawień nr 4
Fig. 5. The current, voltage, power and energy course for setting no. 4

Na podstawie wykonanych prób stwierdzono, że krótsze czasy przecinania próbek uzyskano dla czasu impulsu wynoszącego $20\mu\text{s}$. Ponadto, rzeczywiste wartości czasu impulsu oraz czasu przerwy zmierzone podczas prób przecinania różnią się od wartości zadanych.

Kolejnym etapem badań było przecinanie metalowej płytki z blachy nierdzewnej o grubości 3mm. Na rysunku 6 przedstawiono zamocowanie płytki w obszarze roboczym wycinarki podczas przecinania. Na tym etapie badań wykonano 14 prób cięcia. Ustawiania parametrów generatora zmieniano zgodnie z tabelą 2.

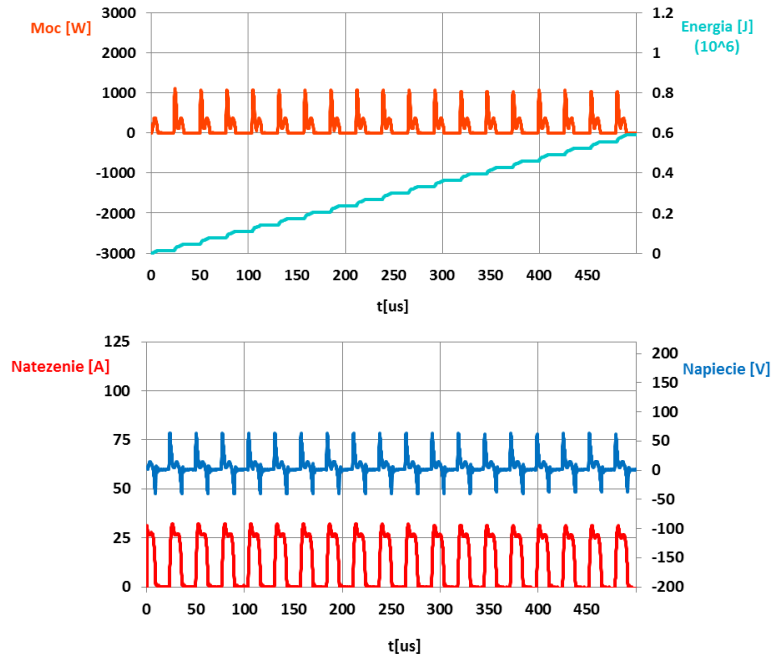


Rys. 6. Sposób zamocowania płytki z blachy nierdzewnej podczas procesu przecinania
Fig. 6. The way of stainless steel plate mounting during cutting process

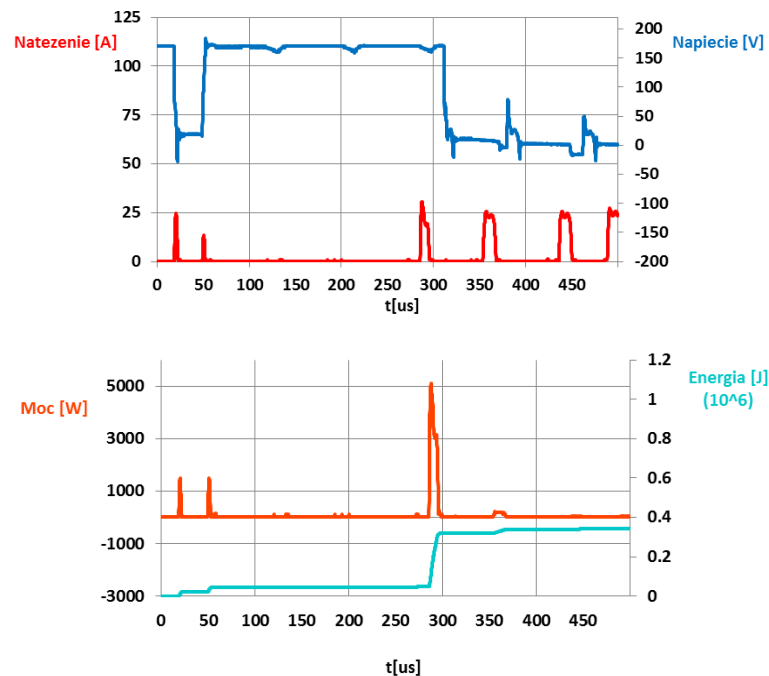
Tabela 2. Parametry podczas przecinania metalowej płytki z blachy nierdzewnej
Table 2. Parameters during stainless steel cutting

Numer cięcia	Czas impulsu $T[\mu\text{s}]$	Czas przerwy $t[\mu\text{s}]$	Wielkość impulsu prądowego [A]
1	4	25	32
2	4	100	32
3	4	100	48
4	4	200	32
5	4	200	48
6	10	200	8
7	10	200	16
8	10	200	32
9	10	200	48
10	20	100	48
11	20	200	8
12	20	200	32
13	30	200	32
14	35	300	32

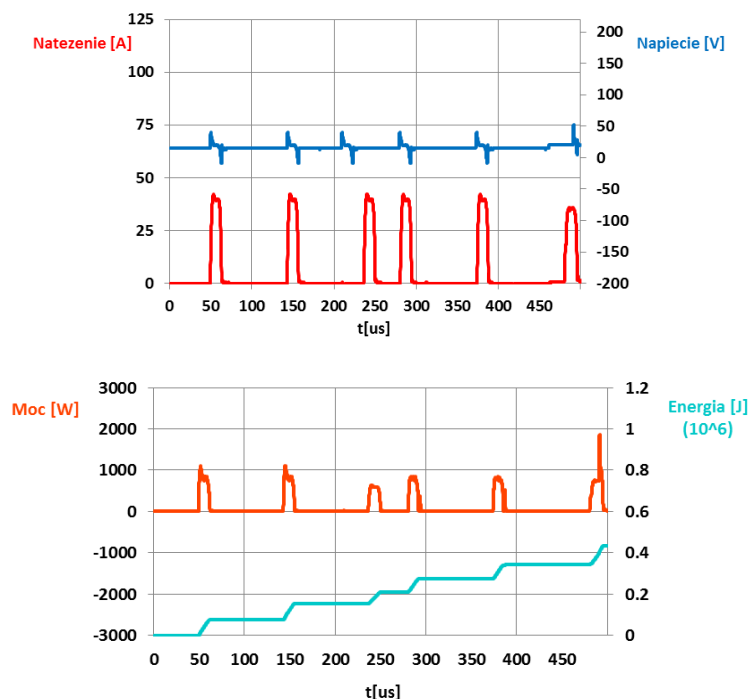
Na kolejnych rysunkach 7 do 9 przedstawiono przykładowe przebiegi uzyskane podczas przecinania płytki z blachy nierdzewnej o grubości 3mm.



Rys. 7. Przebiegi prądu i napięcia oraz mocy i energii dla ustawień nr 1
Fig. 7. The current, voltage, power and energy course for setting no. 1



Rys. 8. Przebiegi prądu i napięcia oraz mocy i energii dla ustawień nr 2
Fig. 8. The current, voltage, power and energy course for setting no. 2



Rys. 9. Przebiegi prądu i napięcia oraz mocy i energii dla ustawień nr 3
 Fig. 9. The current, voltage, power and energy course for setting no. 3

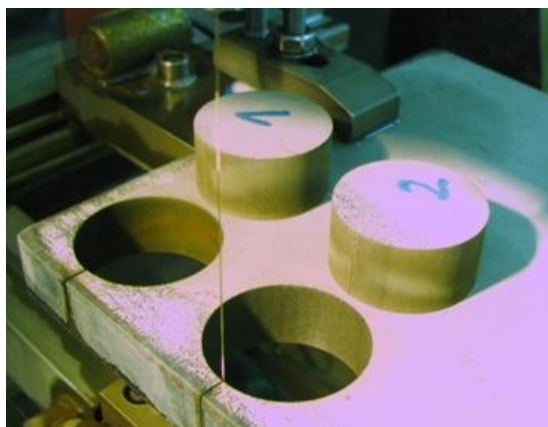
Ze względu na mniejszą grubość materiału w stosunku do poprzednich prób uzyskano krótsze czasy przerwy. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów można stwierdzić, że wyższe częstotliwości impulsów uzyskano dla prób 1, 3. Dla tych prób czasy przerwy były niższe w stosunku do pozostałych i wynosiły dla próby 1: $25\mu\text{s}$, natomiast dla próby 3: $100\mu\text{s}$. Otrzymane wyniki reprezentują przebiegi na rysunkach 7 do 9. Najgorszą wydajność przecinania, przez występowanie impulsów pustych, zarejestrowano dla próby numer 2, rysunek 8.

W ramach drugiej części pracy, wycięto dwa walce o średnicy 30mm, z blachy ze stali nierdzewnej o grubości 15,43mm. Parametry i ustawienia wycinarki podczas pracy zestawiono w tabeli 3.

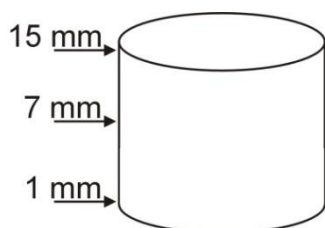
Tabela 3. Parametry podczas wycinania walców
 Table 3. Parameters during cutting of cylinders

Rodzaj materiału	Stal nierdzewna
Wysokość materiału [mm]	15,43
Średnica walca [mm]	30
Krok interpolacji [mm]	0,1
Prędkość drutu [mm/s]	0,04
EQ [mm]	0,14
Prędkość wycinania walca [mm/s]	0,017
Prędkość wyiskrzania [mm/s]	0,17
Czas cięcia [s]	5700

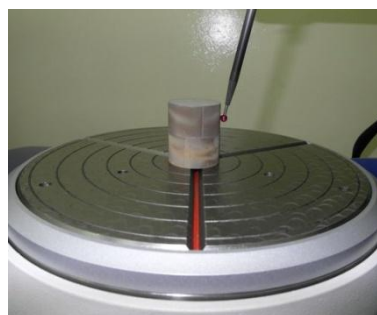
Na rysunku 10 pokazano stół roboczy elektroerozyjnej wycinarki drutowej wraz z zamontowanym materiałem obrabianym, z którego zostały wycięte walce. Na rysunku 11. przedstawiono walec z zaznaczonymi trzema płaszczyznami, na których dokonano pomiarów okrągłości [1],[2]. Rysunek 12 przedstawia zbliżenie stołu obrotowego przyrządu pomiarowego Taylorond 365 wraz z mierzonymi walcami. Na takich samych płaszczyznach zmierzona została również okrągłość otworów powstałych po wycięciu walców. W ramach badań jeden z otworów, o numerze 2, poddany został przejściu wyiskrzającemu. W tabeli 4 przedstawiono wyniki pomiarów odchyłek okrągłości RON_p , RON_v , RON_t walca w trzech płaszczyznach.



Rys. 10. Sposób zamontowania materiału z którego zostały wycięte walce
Fig. 10. The way of mounting of material from which cylinders were cut



Rys. 11. Strategia pomiaru okrągłości walca w trzech płaszczyznach
Fig. 11. Outlines roundness strategy measurements in three planes of the cylinder



Rys. 12. Zbliżenie stołu obrotowego wraz z walcami podczas pomiaru
Fig. 12. The rotational table close-up along with cylinders during measurement

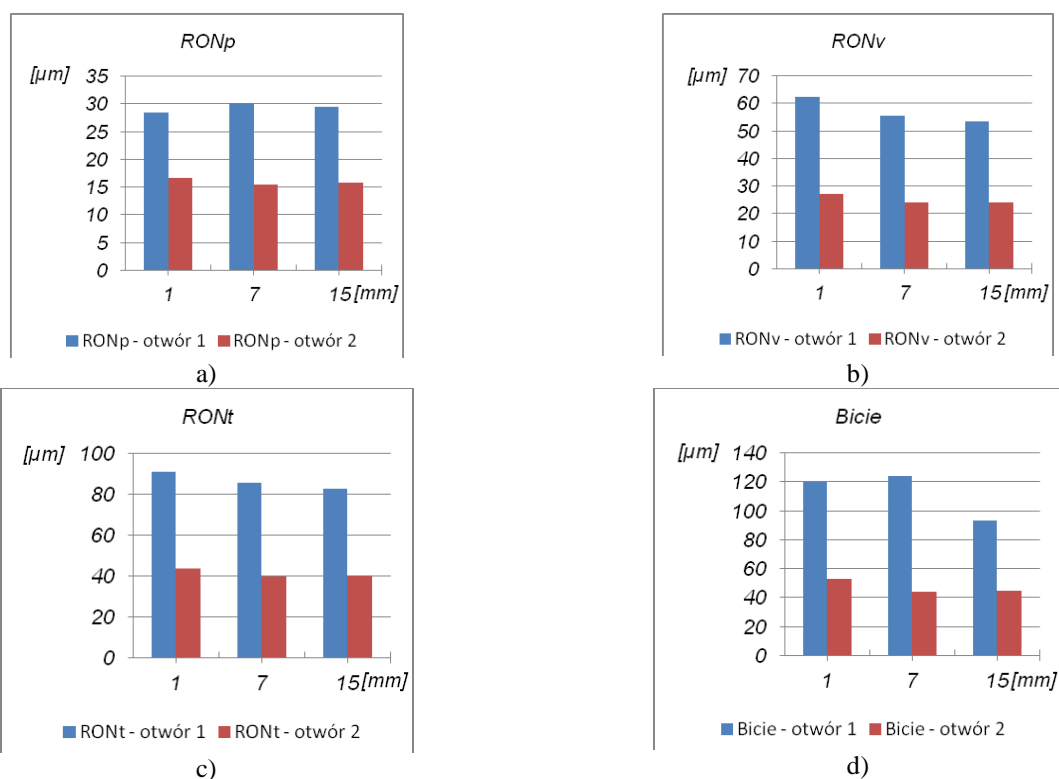
W kolejnej części zamieszczono wyniki pomiarów okrągłości otworów 1 i 2. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczone zostały odchyłki okrągłości RON_p , RON_v , RON_t otworów 1 i 2, które zestawiono łącznie z biciem mierzonych powierzchni otworów w tabeli 5 i przedstawiono w formie graficznej na rysunku 13.

Tabela 4. Wartości okrągłości walca w trzech płaszczyznach
Table 4. Roundness deviations of cylinders in three planes

	RONp [μm]	RONv [μm]	RONt [μm]	Bicie [μm]
1 [mm]	26,53	41,25	67,79	83,54
7 [mm]	27,88	35,6	63,48	106,25
15 [mm]	23,82	44,01	67,84	105,05

Tabela 5. Wartości odchyłek okrągłości otworu nr 1 i nr 2 w trzech płaszczyznach
Table 5. Roundness deviations of hole no. 1, 2 in three planes

	RONp [μm]		RONv [μm]		RONt [μm]		Bicie [μm]	
	otwór1	otwór2	otwór1	otwór2	otwór1	otwór2	otwór1	otwór2
1 [mm]	28,45	16,64	62,51	27,25	90,96	43,89	119,75	52,79
7 [mm]	30,23	15,46	55,53	24,08	85,76	39,54	124,07	44,3
15 [mm]	29,51	15,86	53,36	24,16	82,87	40,03	93,35	44,53



Rys. 13. Wartości parametrów okrągłości dla otworu nr 1 i nr 2 w trzech płaszczyznach:
a) RONp, b) RONv, c) RONt, d) Bicie

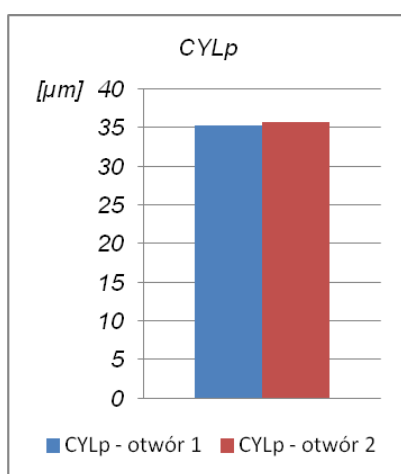
Fig. 13. Roundness deviations of holes in three planes: a) RONp, b) RONv, c) RONt, d) Run-Out

	$RONp$ [μm]		$RONv$ [μm]		$RONt$ [μm]		$Bicie$ [μm]	
	otwór1	otwór2	otwór1	otwór2	otwór1	otwór2	otwór1	otwór2

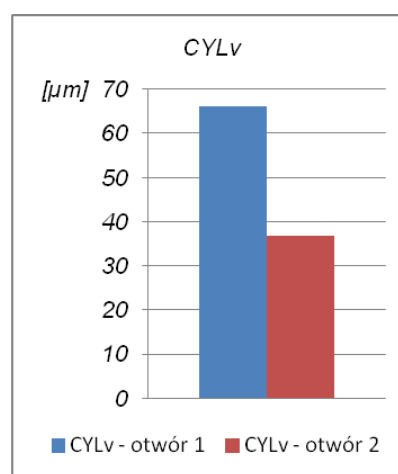
Na podstawie wcześniej wykonanych pomiarów przeprowadzono porównanie walcowości otworu 1, wykonanego podczas obróbki zgrubnej z walcowością otworu 2, wykonanego z przejściem wyiskrzającym i z walcowością samego walca. Wyniki tego porównania przedstawia tabela 6 oraz rysunek 14 (CYp , CYv , CYt – odchyłki walcowości).

Tabela 6. Walcowość otworu nr 1 i nr 2 i walca
Table 6. Cylindricity of hole no. 1, 2 and cylinder

	$CYLp$ [μm]	$CYLv$ [μm]	$CYLt$ [μm]	$Współosiowość$ [μm]
Otwór 1	35,23	66,12	101,35	12,56
Otwór 2	37,76	36,85	72,61	3,31
Walec	54,45	51,72	106,17	17,34



a)



b)

Rys. 14. Walcowość dla otworu nr 1 i nr 2: a) $CYLp$, b) $CYLv$
Fig. 14. Cylindricity of holes nr1 and no. 2: a) $CYLp$, b) $CYLv$

3. WNIOSKI

Artykuł omawia zagadnienia związane ze skutecznością procesu WEDM i dokładnością kształtu wykonywanych przedmiotów (walec, otwór) ze stali trudnoobrabialnej. Efektywność pracy generatora sprawdzono przecinając próbki

o wymiarach 10x10 mm ze stali HS 18-0-1 i próbki ze stali nierdzewnej o grubości 3mm. Dla pierwszego przypadku wyznaczono maksymalny czas impulsu, wynoszący 20 μ s, powyżej którego elektroda robocza ulegała zerwaniu oraz określono ustawienia parametrów generatora, przy których czas przecinania był najkrótszy. Na podstawie prób przecinania próbek o grubości 3mm stwierdzono, że najmniejsza wydajność przecinania miała miejsce dla parametrów procesu w próbie numer 2. Jak wykazały pomiary wynikało to głównie z występowania impulsów pustych, co zarejestrowano w tej próbie.

W kolejnej fazie badań, z blachy o grubości 15,43mm, wycięto dwa walce o średnicy 30mm, a dla jednego z otworów, pozostałych po procesie WEDM, wykonano przejście wykończeniowe. Na podstawie zmierzonych odchyłek okrągłości i walcowości oraz bicia i współosiowości uzyskanych powierzchni otworów i walca wykazano, że dzięki obróbce wykończeniowej uzyskuje się wyraźną poprawę dokładności kształtu. Zauważono też pewną różnicę wymiarów na płaszczyznach, w których dokonywano pomiarów, co powoduje baryłkowość walca. Jest to prawdopodobnie związane ze specyfiką obróbki WEDM, a głównie z przepłukiwaniem strefy obróbki od dołu i od góry. Większa bowiem koncentracja produktów erozji przy podstawach walca przekłada się na większą intensywność wyładowań.

LITERATURA

- [1] ADAMCZAK S., 1998, *Odniesieniowe metody pomiaru zarysów okrągłości części maszyn*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- [2] ADAMCZAK S., 2008, *Pomiary geometryczne powierzchni, Zarysy kształtu falistości i chropowatości*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa.
- [3] DĄBROWSKI L., MARCINIAK M., NOWICKI B., 2007, *Obróbka skrawaniem ścierna i erozyjna*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [4] MIERNIKIEWICZ A., 2000, *Doświadczalno teoretyczne podstawy obróbki elektroerozyjnej (EDM)*. Politechnika Krakowska, Seria Mechanika, Monografia, 274, Kraków.
- [5] SIWCZYK M., 2001, *Obróbka Elektroerozyjna, Podstawy Technologiczne*, Tom II, Firma Naukowo-Techniczna "Mieczysław Siwczyk", ISBN 8391382710.
- [6] <http://www.megacad.pl/>
- [7] <http://www.zapbp.com.pl/>

EFFICIENCY OF WEDM PROCESS AND SHAPE ACCURACY OF PARTS MADE OF DIFFICULT-TO-CUT STEEL

The paper presents efficiency of WEDM process (*Wire Electrical Discharge Machining*). Preliminary tests, to check the effectiveness of generator, were performed with specimens made of HS 18-01 steel and stainless steel. Two cylinders with diameter 30mm and thickness 15.43mm were cut. Additionally, for one hole, the finishing cut was performed. The hole roundness as well as cylindricity accuracy were measured by means of Talyround 365. The results for the hole number 1 (without finishing cut) and number 2 (with finishing cut) were analyzed. The hole number 2 showed better results. A dimension difference in measured planes was noticeable. It was probably caused by specific operation of WEDM. Waste products of erosion which gathered in the base area of cylinders resulted in greater intensity of discharges.