

Stanisław BŁAWUCKI¹
Kazimierz ZALESKI²

BADANIA WPLYWU GRUBOŚCI WARSTWY SKRAWANEJ I CIECZY OBRÓBKOWEJ NA KSZTAŁT WIÓRÓW W PROCESIE SKRAWANIA ORTOGONALNEGO

Artykuł prezentuje sposób powstawania wiórów dla wybranych stopów metali nieżelaznych z zastosowaniem specjalnego stanowiska do skrawania ortogonalnego. W pracy przeprowadzono pomiary wizyjne strefy skrawania z wykorzystaniem kamery do obserwacji zjawisk szybkozmiennych, w celu analizy etapów procesu kształtowania się wióra. Dokonano identyfikacji kształtu powstałych wiórów przy skrawaniu ortogonalnym i zmiennej grubości warstwy skrawanej z użyciem cieczy smarujących oraz w warunkach skrawania bez smarowania. Wyniki badań mogą służyć do weryfikacji i walidacji modeli numerycznych skrawania ortogonalnego stopów metali nieżelaznych.

Słowa kluczowe: skrawanie ortogonalne, ciecz obróbkowa, kształtowanie wiórów, warstwa skrawana, stopy metali nieżelaznych

1. Wprowadzenie

Przeprowadzono wiele prac badawczych w celu określenia wpływu warunków skrawania na proces formowania wiórów [1, 3-10]. Jednym z częściej badanych zjawisk jest proces segmentacji wióra w paśmie ścinania adiabatycznego, co umożliwia diagnozowanie wpływu kształtu powstałego wióra na siłę skrawania, wahania długości powierzchni ścinania i chropowatość powierzchni obrobionej. Proces formowania wiórów był szeroko badany przez wiele ośrodków naukowych. Komanduri i Brown [6] dokonali klasyfikacji wiórów na cztery typy, zgodnie z ich morfologią, na faliste, segmentowane, łamane oraz ścinane katastroficznie (odrywane), definiując każdy z typów wióra.

Typ wióra zależy od warunków skrawania, geometrii narzędzia skrawającego oraz właściwości przedmiotu obrabianego, a szczególnie jego twardości. Dokładna klasyfikacja wiórów została zaprezentowana w pracy Grzesika [2],

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Stanisław Bławucki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, tel.: 081-5384227, e-mail: s.blawucki@pollub.pl

² Kazimierz Zaleski, Politechnika Lubelska, e-mail: k.zaleski@pollub.pl

gdzie przedstawiono rodzaje wiórów według kształtu oraz według budowy, na podstawie PN-ISO 3685:1996.

Barry i Byrne [1] przeprowadzili badania mechanizmu tworzenia wiórów schodkowych w obróbce skrawaniem stali hartowanej, opisując proces przejścia od wióra ciągłego do schodkowego przy zmiennych parametrach skrawania materiału obrabianego. Stwierdzili oni, że pierwsza niestabilność w strefie pierwotnego ścinania podczas formowania wióra schodkowego jest początkiem adiabatycznego ścinania na ostrzu narzędzia i propagacji pęknięć w kierunku powierzchni zewnętrznej materiału obrabianego, zwanej w literaturze powierzchnią swobodną. Badając powierzchnię wiórów, autorzy zidentyfikowali transformację fazową występującą w trakcie obróbki, która powoduje przejście z wióra ciągłego na schodkowy. Również Davies i inni [3] wspominają o tych samych zjawiskach po zbadaniu swobodnej powierzchni wióra przy przejściu ze struktury lamelarnej do struktury segmentowej.

Shaw i Vyas [9] wskazują, że dla stali o wysokiej wytrzymałości proces fragmentacji wióra rozpoczyna się od inicjacji pęknięć na powierzchni swobodnej wióra i rozprzestrzenia się w głąb tej powierzchni podczas kontaktu z powierzchnią natarcia narzędzia. Zachodzi pękanie materiału, które może być częściowe lub całkowite, w zależności od warunków technologicznych skrawania. Molinari i inni [8] zaproponowali analityczną metodę szacowania szerokości pasma ścinania i odległości pomiędzy dwoma kolejnymi pasmami ścinającymi w wiórach schodkowych podczas obróbki stopu Ti-6Al-4V w warunkach skrawania ortogonalnego. Odległość między dwoma kolejnymi pasmami ścinania zdaniem autorów zmienia się w funkcji właściwości materiałowych i termicznych, takich jak: przewodnictwo cieplne, pojemność cieplna, energia odkształcania plastycznego przekształcana w ciepło. Szerokość pasma ścinającego zależy również od prędkości skrawania i niektórych innych parametrów termomechanicznych, np. termicznego współczynnika zmęczenia materiału wióra.

Korzystając z uproszczonej teorii niestabilności płynięcia plastycznego materiału, Xie i inni [10] zaproponowali parametr lokalizacji płynięcia (PLP) materiału w celu analizy formowania się pasm ścinania schodkowego przy skrawaniu ortogonalnym. Opracowania analityczne autorów pozwoliły stwierdzić, że PLP jest funkcją powiązanych warunków skrawania i właściwości materiału obrabianego. Przeprowadzono także symulację skrawania ortogonalnego metodą elementów skończonych. W celu odtworzenia zjawiska fragmentacji wiórów Lin i Lin [7] opracowali sprężysto-plastyczny model skrawania ortogonalnego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Autorzy wskazują, że inicjacja pęknięć powstaje pod powierzchnią wióra i rozprzestrzenia się wzdłuż jego grubości w kierunku powierzchni swobodnej. Używając lepkoplastycznego modelu zniszczenia przedmiotu obrabianego w ramach symulacji metodą elementów skończonych, Guo i Yen [5] wykazali, że nieciągły kształt wióra wynika z inicjacji pęknięcia wewnętrznego od strony powierzchni natarcia narzędzia, a nie od strony powierzchni swobodnej przedmiotu obrabianego.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu grubości warstwy skrawanej i cieczy obróbkowej na kształt wiórów powstałych podczas skrawania ortogonalnego wybranych stopów aluminium i magnezu.

2. Metodyka badań

Prace eksperymentalne metodą skrawania ortogonalnego przeprowadzono na specjalnie przygotowanych próbkach materiałów ze stopów aluminium EN AW-2024 T6, EN AW-6082 T6 i magnezu EN MA-MgAl3Zn1 o wymiarach przekroju 5 mm x 20 mm x 20 mm. Zdecydowano się na wybór tych stopów do badań ze względu na ich powszechne zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, szczególnie w branży lotniczej. Wybrane właściwości fizyczne badanych materiałów opisano w tab. 1.

Tabela 1. Wybrane właściwości badanych stopów metali nieżelaznych [2]

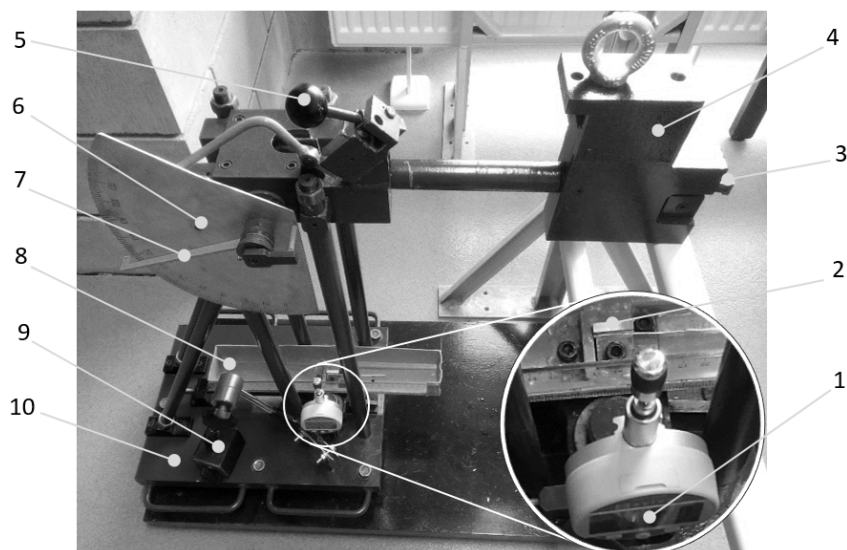
Table 1. Selected properties of investigated non-ferrous alloys [2]

| Znak stopu | Gęstość [kg/m ³] | Moduł Younga [GPa] | Granica sprężystości [MPa] | Granica wytrzymałości [MPa] | Twardość Vickersa [HV] | Przewodność cieplna [W/m·C°] |
|----------------|------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| EN AW-2024 T6 | 2780 | 75 | 381 | 472 | 150 | 163 |
| EN AW-6082 T6 | 2730 | 72 | 290 | 340 | 105 | 175 |
| EN MA-MgAl3Zn1 | 1770 | 45 | 160 | 245 | 65 | 97 |

Na rysunku 1 zaprezentowano stanowisko badawcze, na którym prowadzono próby skrawania ortogonalnego przy zmiennej grubości warstwy skrawanej oraz przy zmiennych warunkach smarowania w obszarze obróbki. Zasada działania urządzenia przypomina wahadło fizyczne, w którym zaimplementowano narzędzie skrawające. Zastosowano nóż tokarski z płytką węglkową S10 o kącie natarcia $\gamma = 10^\circ$ oraz kącie przyłożenia $\alpha = 5^\circ$ i promieniu zaokrąglenia krawędzi $r_e = 0,008$ mm. Masa całkowita wahadła wyniosła 8,50 kg, a długość ramienia 450 mm. Prędkość skrawania zmierzona za pomocą szybkiej kamery wyniosła 178 m/min.

Próby skrawania prowadzono, wychylając wahadło o kąt 90° od położenia pionowego, tak jak na rys. 1, aby uzyskać energię potencjalną narzędzia. Badania przeprowadzono przy zmiennej grubości warstwy skrawanej h (0,2; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01) mm. Nie podjęto prób dalszego zmniejszania grubości warstwy skrawanej, ze względu na zastosowany czujnik zegarowy o rozdzielczości 0,001 mm. Próby powtórzono trzykrotnie dla każdego z badanych materiałów, skrawając bez cieczy obróbkowej (na sucho) oraz z minimalnym smarowaniem, przez równomierne pokrycie cieczą smarującą powierzchni roboczej narzędzia oraz

powierzchni próbki. Do smarowania użyto oleju Mobil DTE Oil Light w klasie lepkości ISO 32 oraz lepkości kinematycznej $5,5 \text{ m}^2/\text{s}$ w temperaturze 100°C .



Rys. 1. Urządzenie badawcze do skrawania ortogonalnego: 1 – czujnik nastawiania grubości warstwy skrawanej, 2 – skrawana próbka, 3 – nóż tokarski, 4 – wahadło, 5 – mechanizm wyzwalający, 6 – tarcza pomiaru kąta wychylenia, 7 – wskazówka, 8 – mechanizm regulacji głębokości skrawania, 9 – uchwyt magnetyczny, 10 – podstawa

Fig. 1. Testing device for orthogonal cutting: 1 – sensor of cutting depth, 2 – cut sample, 3 – turning tool, 4 – pendulum, 5 – release mechanism, 6 – dial of pendulum angle, 7 – pointer, 8 – mechanism for regulation of cutting depth, 9 – magnetic holder, 10 – base

Obserwacje wizyjne procesu kształtowania się wióra prowadzono z wykorzystaniem kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych Phantom v1610, stosując częstotliwość akwizycji obrazu na poziomie 16 600 klatek na sekundę. Uzyskane wióry poddano dalszym obserwacjom przy użyciu mikroskopu cyfrowego VHX-5000 firmy Keyence. Mikroskop posiada funkcję skanowania profili powierzchni i składania obrazu z kilku pomiarów.

3. Wyniki badań

Pomiary wizyjne z wykorzystaniem kamery Phantom do obserwacji zjawisk szybkozmiennych pozwoliły się bliżej przyjrzeć procesowi oddzielania wióra w zależności od badanego materiału, grubości warstwy skrawanej a także warunków smarowania. Badania wykazały, że dostarczenie nawet niewielkiej ilości cie-

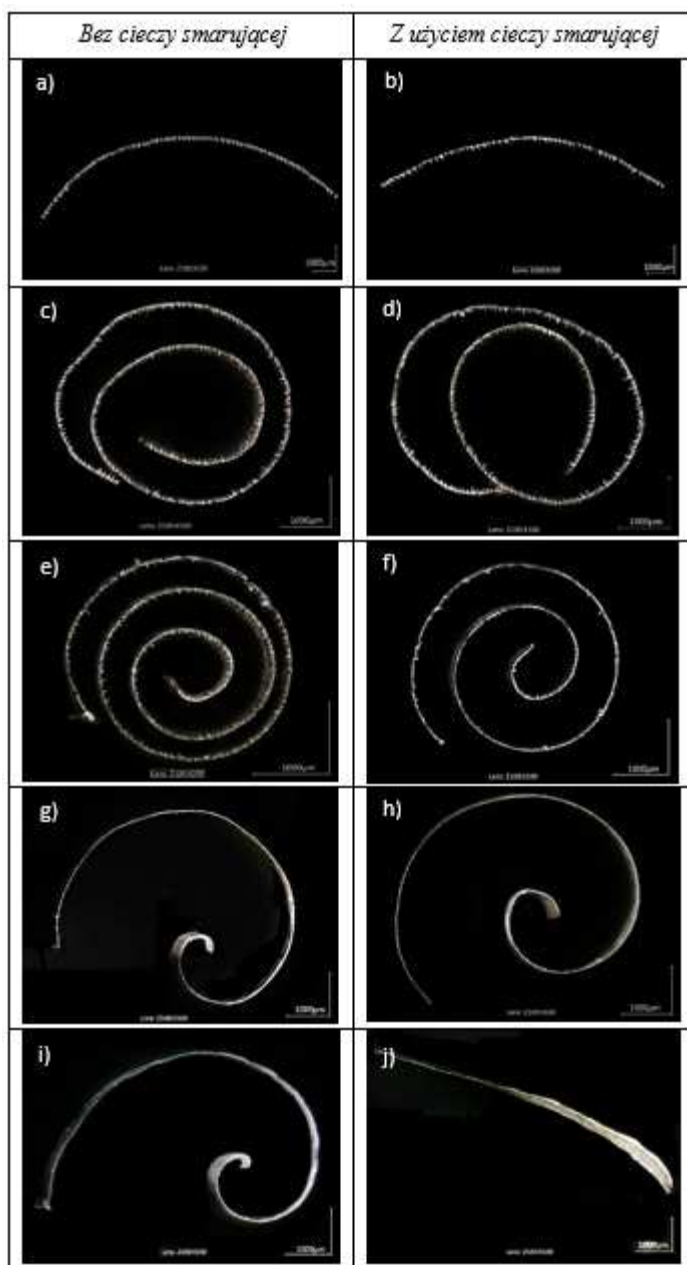
czy smarującej wpływa znacząco na kształt i rodzaj powstałego wióra. Przy skrawaniu na sucho obserwuje się większe odkształcenie wióra, co jest szczególnie widoczne w przypadku małej grubości warstwy skrawanej. Ciecz obróbkowa powoduje mniejsze deformacje wióra, zmieniając jego kształt ze spiralnego na pasmowy.

Rodzaj powstałego wióra ma ścisły związek ze stanem naprężenia i odkształcenia w strefie tworzenia się wióra. Towarzyszą temu mechanizmy dekohezji materiału i w zależności od jego właściwości może dojść albo do złomu kruchego, albo do złomu rozdzielczego. Złom kruchy jest charakterystyczny dla materiałów elastokruchych, czyli posiadających zdolność do znacznych odkształceń sprężystych. Stopy metali lekkich są na ogół materiałami elastoplastycznymi, czyli niewielkie naprężenia prowadzą do odwracalnych odkształceń sprężystych, natomiast po przekroczeniu granicy proporcjonalności dochodzi do odkształcenia plastycznego materiału, przy czym wartość względna i prędkość odkształcenia zależą od właściwości fizycznych stopu metali.

Można zauważyć, że grubość warstwy skrawanej ma bardzo istotny wpływ na kształt wióra w przypadku skrawania stopu magnezu (rys. 2). Dla grubości warstwy skrawanej h z zakresu 0,05-0,10 mm powstaje schodkowy długi wiór spiralny płaski, w pozostałych przypadkach wiór przyjmuje zaś kształt pośredni między spiralnym stożkowym a pasmowym. Ciecz smarująca przyczynia się do powstawania kształtu pasmowego wióra.

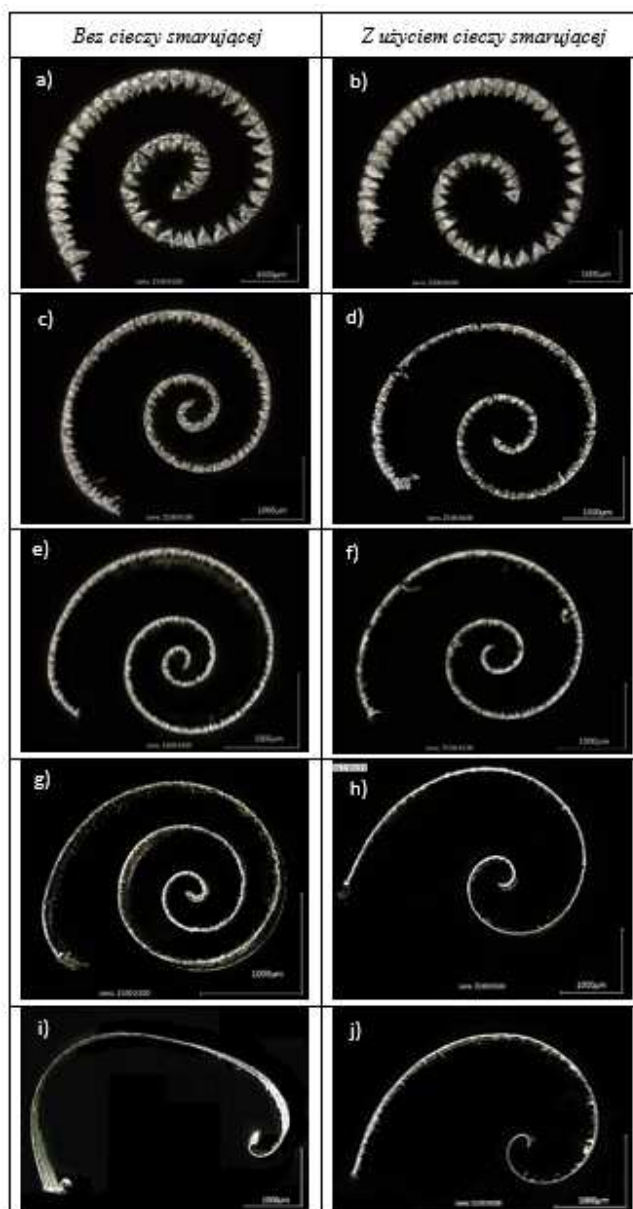
W przypadku ortogonalnego skrawania stopu aluminium EN AW-2024 T6 wiór przybiera kształt spiralny płaski, a odstępstwa od tego kształtu obserwuje się tylko przy bardzo małej grubości warstwy skrawanej (rys. 3). Przy grubości h rzędu 0,01 mm wiór jest ciągły, zaś wraz ze wzrostem wartości tego parametru dominująca staje się budowa schodkowa. Ciecz smarująca z jednej strony przyczynia się do obniżenia pracy odkształceń plastycznych, co z kolei ujawnia się w postaci mniejszej liczby zwojów spirali w porównaniu z wiórem skrawanym w warunkach bez smarowania, z drugiej strony natomiast powoduje obniżenie temperatury w strefie skrawania, co zmniejsza wpływ naprężeń cieplnych, a tym samym pękanie wióra. Wiór spiralny jest uważany za korzystny ze względu na dobre odprowadzanie ciepła ze strefy skrawania, swoje niewielkie gabaryty i łatwość transportowania.

Stop aluminium EN AW-6082 T6 wykazuje właściwości pośrednie między stopem magnezu EN MA-MgAl₃Zn₁ oraz EN AW-2024 T6 pod względem twardości i wytrzymałości doraźnej. Pomimo tego kształt uzyskanego wióra znacząco różni się od wspomnianych materiałów (rys. 4). Przede wszystkim wiór jest bardziej spęczony i można go zaliczyć do postaci łukowej, choć posiada także cechy wióra spiralnego. Segmentacja częściowo zanika przy grubości warstwy skrawanej h z zakresu 0,1-0,2 mm, jednak wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy skrawanej są zauważalne wyraźne schodki, a kształt wióra zbliża się do postaci pasmowej ciągłej.



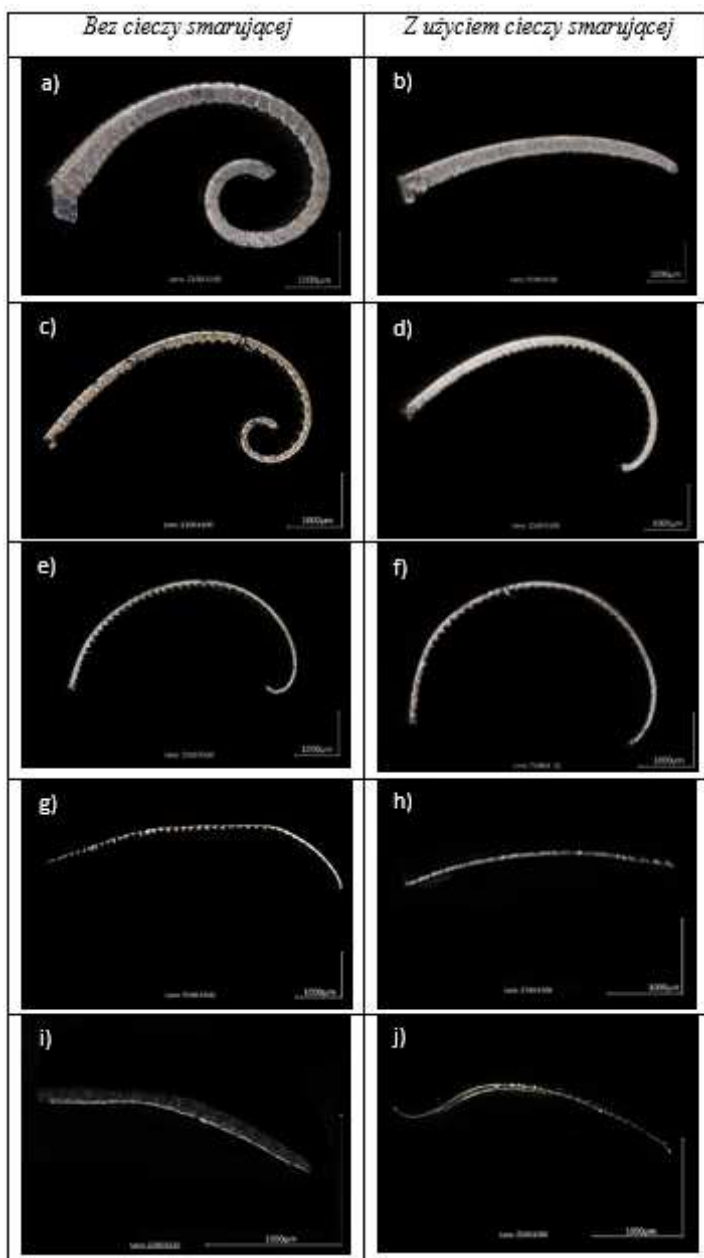
Rys. 2. Kształty wiórów uzyskane w procesie skrawania ortogonalnego stopu magnezu EN MA-MgAl₃Zn1: a-b) $h = 0,2$ mm, c-d) $h = 0,1$ mm, e-f) $h = 0,05$ mm, g-h) $h = 0,02$ mm, i-j) $h = 0,01$ mm; powiększenie $\times 100$

Fig. 2. Shapes of chips obtained during orthogonal cutting process of magnesium alloy EN MA-MgAl₃Zn1: a-b) $h = 0.2$ mm, c-d) $h = 0.1$ mm, e-f) $h = 0.05$ mm, g-h) $h = 0.02$ mm, i-j) $h = 0.01$ mm; magnification $\times 100$



Rys. 3. Kształty wiórów uzyskane w procesie skrawania ortogonalnego stopu aluminium EN AW-2024 T6: a-b) $h = 0,2$ mm, c-d) $h = 0,1$ mm, e-f) $h = 0,05$ mm, g-h) $h = 0,02$ mm, i-j) $h = 0,01$ mm; powiększenie x100

Fig. 3. Shapes of chips obtained during orthogonal cutting process of aluminium alloy EN AW-2024 T6: a-b) $h = 0.2$ mm, c-d) $h = 0.1$ mm, e-f) $h = 0.05$ mm, g-h) $h = 0.02$ mm, i-j) $h = 0.01$ mm; magnification x100



Rys. 4. Kształty wiórów uzyskane w procesie skrawania ortogonalnego stopu aluminium EN AW-6082 T6: a-b) $h = 0,2$ mm, c-d) $h = 0,1$ mm, e-f) $h = 0,05$ mm, g-h) $h = 0,02$ mm, i-j) $h = 0,01$ mm; powiększenie $\times 100$

Fig. 4. Shapes of chips obtained during orthogonal cutting process of aluminium alloy EN AW-6082 T6: a-b) $h = 0.2$ mm, c-d) $h = 0.1$ mm, e-f) $h = 0.05$ mm, g-h) $h = 0.02$ mm, i-j) $h = 0.01$ mm; magnification $\times 100$

4. Wnioski

Przeprowadzone badania dały ogólny pogląd co do wpływu cieczy smarującej na kształt i postać uzyskanego wióra, pozwoliły także na sformułowanie pewnych wniosków:

1. Ciecz smarująca wywiera wpływ na postać powstałego wióra, powodując mniejsze jego odkształcenie, co oznacza, że proces skrawania jest bardziej energooszczędny i efektywny.
2. Grubość warstwy skrawanej wywiera istotny wpływ na kształt wióra uzyskany w procesie skrawania ortogonalnego. Zazwyczaj wraz ze wzrostem grubości warstwy skrawanej wzrasta tendencja do segmentacji wióra.
3. Podobne właściwości fizyczne materiału obrabianego nie zawsze powodują powstawanie wiórów o zbliżonym kształcie. Decydujące znaczenie mogą mieć skład chemiczny materiału obrabianego i warunki smarowania.
4. Należy podkreślić rozpoznawczy charakter przeprowadzonych badań z zakresu tematu pracy. Uzyskane rezultaty wskazują na konieczność prowadzenia dalszych prac o szerszym zakresie i z wykorzystaniem kolejnych narzędzi badawczych.
5. Przeprowadzone badania stanowią punkt odniesienia do dalszych prac eksperymentalnych z zakresu procesu tworzenia się wióra, a ponadto mogą się okazać przydatne do analiz numerycznych skrawania ortogonalnego metodą elementów skończonych przy walidacji metody obliczeniowej.

Literatura

- [1] Barry J., Byrne G.: The mechanisms of chip formation in machining hardened steels, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 124 (2002) 528-535.
- [2] CES EduPack 2013, Granta Design Limited (baza danych materiałowych).
- [3] Davies M.A., Burns T.J., Evans C.J.: On the dynamics of chip formation in machining hard metals, *CIRP Annals – Manuf. Technol.*, 46 (1997) 25-30.
- [4] Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych, WNT, Warszawa 2010.
- [5] Guo Y.B., Yen D.W.: A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining, *J. Mat. Proc. Technol.*, 155-156 (2004) 1350-1356.
- [6] Komanduri R., Brown R.H.: On the mechanics of chip segmentation in machining, *J. Eng. Industry*, 103 (1981) 33-51.
- [7] Lin Z.C., Lin Y.Y.: Three-dimensional elastic-plastic finite element analysis for orthogonal cutting with discontinuous chip of 6-4 brass, *Theor. Applied Fracture Mech.*, 35 (2001) 137-153.
- [8] Molinari A., Musquar C., Sutter G.: Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modelling, *Int. J. Plasticity*, 18 (2002) 443-459.

- [9] Shaw M.C., Vyas A.: The mechanism of chip formation with hard turning steel, CIRP Annals Manufacturing Technology, 47 (1) (1998) 77-82.
- [10] Xie J.Q., Bayoumi A.E., Zbib H.M.: A study on shear banding in chip formation of orthogonal machining, Int. J. Machine Tools Manuf., 36 (1996) 835-847.

INVESTIGATION ON THE INFLUENCE OF DEPTH OF CUTTING AND COOLANT ON THE SHAPE OF CHIPS IN THE ORTHOGONAL CUTTING PROCESS

S u m m a r y

This article presents the method of chip formation for selected non-ferrous metal alloys using a special device for orthogonal cutting. To analyze the stages of the chip forming process the measurements of cutting zone were carried out using a video camera for recording quick-change phenomena. The shape of chips formed at orthogonal cutting was determined for the variable depth of cut and under fluid lubrication and dry cutting conditions. The results of research can be used to verify and validate numerical models of orthogonal cutting of non-ferrous metal alloys.

Keywords: orthogonal cutting, cutting oil, chip formation, cutting layer, non-ferrous metal alloys

DOI: 10.7862/rm.2017.24

Otrzymano/received: 12.07.2017

Zaakceptowano/accepted: 14.09.2017