

WOJCIECH ZĘBALA*

MODELOWANIE PROCESU TOCZENIA MATERIAŁÓW TRUDNOSKRAWALNYCH

MODELLING OF DIFFICULT-TO-CUT MATERIALS TURNING PROCESS

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie modelowania procesu toczenia materiałów trudnoskrawalnych metodą MES na przykładzie wybranych stopów niklu: Inconel 718 oraz 625. W badaniach modelowych zastosowano geometrię płytki skrawającej o dwóch różnych kształtach powierzchni natarcia (zwijaczach wióra): VCMT 160404-SM oraz WNMG 080404-23. Wyniki symulacji komputerowej zweryfikowano eksperymentalnie, dokonując pomiarów składowych siły skrawania oraz maksymalnej temperatury w strefie tworzenia wióra.

Słowa kluczowe: modelowanie, materiały trudnoskrawalne, toczenie

Abstract

Paper presents the problem of turning process modelling by MES method of difficult-to-cut materials, basing on the example of chosen nickel alloys: Inconel 718 and 625. The geometry of inserts of two different rake face shapes (chipbreakers): VCMT 160404-SM and WNMG 080404-23, was used in the modelling. Simulation results were experimentally verified by measurements of cutting forces and maximum temperature in a chip creation zone.

Keywords: modelling, difficult-to-cut materials, turning

* Dr hab. inż. Wojciech Zębala, prof. PK, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój techniki obserwowany w ostatnich latach jest silnie związany z potrzebą powstawania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych o założonych właściwościach mechanicznych, fizycznych i chemicznych. Praktyczne wykorzystanie tych materiałów ściśle wiąże się z potrzebą opracowywania nowych technologii ich wytwarzania oraz ulepszania technologii już istniejących [1, 3, 7, 11, 15]. Poszukuje się optymalnych czynników, które pozwalają na zwiększenie wydajności i uzyskanie produktu o jak najwyższej jakości przy jednoczesnym obniżeniu kosztów wytwarzania. Z tego też względu stawia się coraz większe wymagania materiałom stosowanym na narzędzia.

Współcześnie jedną z najważniejszych technologii kształtowania części jest obróbka skrawaniem. Postęp w tym obszarze mierzony jest przede wszystkim wzrostem możliwości zwiększenia dokładności i jakości powierzchni obrobionych, otrzymywanych przez zastosowanie różnych rodzajów obróbki, np. toczenia, frezowania czy szlifowania.

Wraz z wytwarzaniem nowych wyrobów z trudnoskrawalnych materiałów, takich jak: stopy tytanu, stopy niklu, stale nierdzewne, ceramika specjalna itp., zachodzi potrzeba poszukiwania coraz to efektywniejszych dróg obróbki ubytkowej. W wielu przypadkach skutecznym środkiem polepszenia skrawalności materiału okazuje się zastosowanie hybrydowego procesu obróbkowego lub obróbki kompletnej [11, 13, 16, 17].

Materiały trudnoskrawalne obejmują znaczący zakres w technologii wytwarzania części maszyn, szczególnie w takich branżach przemysłowych, jak: przemysł lotniczy, motoryzacyjny, narzędziowy czy przemysł wytwarzający formy odlewnicze. Zwiększają się wymagania dotyczące zmniejszenia wagi elementów maszyn z jednoczesnym zwiększeniem ich wytrzymałości. Prowadzi to do rozwoju technologii wytwarzania materiałów o dużej twardości (do 70 HRC), odporności chemicznej i termicznej (np. odporność na zużycie, utlenianie, korozję) [13, 18].

Materiały konstrukcyjne zaliczamy do trudnoskrawalnych ze względu na następujące właściwości:

1. Duża wytrzymałość mechaniczna materiału, która jest utrzymywana w wysokich temperaturach, prowadzi do powstawania bardzo dużych sił skrawania.
2. Słaba przewodność cieplna utrudnia swobodny rozptyw ciepła i jego odprowadzanie ze strefy skrawania, co powoduje generowanie wysokiej temperatury na ostrzu narzędzia zwłaszcza w pobliżu krawędzi skrawającej.
3. Składniki stopowe występujące w strukturze materiału są materiałem ściernym, przyspieszającym zużycie powierzchni ostrza.
4. Utwardzanie się materiału podczas obróbki (superstopy).
5. Duże siły skrawania i szybkie zużycie ostrza skrawającego powodują, że obrabiane części posiadające stosunkowo cienkie ścianki mają tendencję do deformacji (np. łopatki wirnika sprężarki wykonywane ze stopu tytanu czy niklu).

Istotnym ograniczeniem w przypadku obróbki materiałów trudnoskrawalnych jest zbyt mała trwałość narzędzi skrawających, między innymi w wyniku wyższych temperatur skrawania w stosunku do tych, jakie występują w przypadku obróbki materiałów o dobrej skrawalności [5, 8, 13].

Dlatego bardzo ważnym elementem rozwoju technologii obróbki materiałów trudnoskrawalnych jest odpowiedni rozwój i zastosowanie modelowania procesu skrawania w celu określenia prawdopodobnego rozkładu pola temperatury i pól naprężeń oraz od-

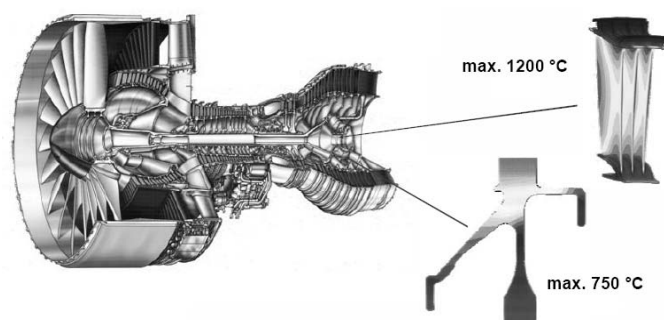
kształceń w całej strefie tworzenia się wióra. Lokalizacja miejsc o maksymalnych wartościach temperatury i naprężenia pozwala na predykcję zachowania narzędzia w czasie obróbki, a tym samym na bardziej korzystny dobór parametrów skrawania. Budowa modeli symulacyjnych obróbki skrawaniem pozwala na szybką wizualizację realizacji procesu w szerokim zakresie parametrów obróbki. Umiejętność modelowania przy minimalnej liczbie testów eksperymentalnych pozwala na znaczne obniżenie kosztów cyklu projektowania określonego procesu technologicznego, ze względu na znaczne obniżenie kosztów materiałowych i oprzyrządowania.

Główne korzyści wynikające ze stosowania modeli symulacyjnych w dziedzinie optymalizacji parametrów skrawania materiałów trudnoskrawalnych to:

1. Optymalizacja procesu obróbki bez wykonywania drogich testów skrawanych.
2. Możliwość modelowania procesu skrawania w warunkach nietypowych (np. przy zastosowaniu wyższych prędkości skrawania).
3. Prognozowanie i obniżenie wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych.
4. Zmniejszenie odkształceń obrabianych części (prognozowanie wartości siły skrawania oraz naprężeń wewnątrz p.o.).
5. Możliwość modelowania geometrii ostrza skrawającego oraz identyfikacji rodzaju wióra i kierunku jego spływu.
6. Możliwość określania właściwego zapotrzebowania mocy obrabiarki.
7. Prognozowanie zużycia ostrza.

W artykule opisano problem modelowania obróbki stopów niklu jako przykładu materiału trudnoskrawalnego. Większość tego typu materiałów zawiera od 10 do 20% chromu, do 8% aluminium i tytanu (łącznie), od 5 do 15% kobaltu oraz niewielkie ilości boru, cyrkonu, magnezu i węgla. Innymi dodatkami są jeszcze molibden, niob i wolfram. Wśród dostępnych na rynku superstopów stop Inconel 718 oraz 625 są jednymi z dominujących. Około 45% odkuwek i 25% odlewów jest wykonywana z tych materiałów [4, 5].

Stopy na osnowie niklu należą do grupy materiałów żarowytrzymałych. Dzięki swoim właściwościom mechanicznym w wysokich temperaturach są powszechnie stosowane w przemyśle lotniczym, między innymi na: korpusy turbin, komory spalania, łopatki, zawory wydechowe itp. Rysunek 1 przedstawia obszar zastosowania stopów niklu w tzw. strefie gorącej silnika odrzutowego.



Rys. 1. Schemat silnika lotniczego z przykładowymi elementami wykonanymi ze stopu niklu [10]

Fig. 1. Aero engine scheme with example elements made of nickel alloy [10]

Bardzo duży nacisk kładzie się na jakość powierzchni elementów wykonanych ze stopów niklu, gdyż podczas obróbki skrawaniem powstające ciepło zmienia mikrostrukturę stopu i powoduje powstawanie naprężeń, co przekłada się na trwałość, odporność na zmęczenie, wydajność i funkcjonalność obrabianego przedmiotu [2, 6, 9].

Analiza literatury opisującej zjawiska zachodzące podczas skrawania wskazuje, że ze wzrostem prędkości skrawania – przy jednakowej wydajności objętościowej procesu – maleje siła skrawania. Efekt ten wiąże się z wpływem prędkości odkształcania warstwy skrawanej na plastyczność materiału obrabianego i zjawiska narostowe na ostrzu narzędzia. Również temperatura w strefie obróbki jest bezpośrednio związana z prędkością skrawania i przeważnie zwiększa się z jej wzrostem [6, 8, 12].

Podczas obróbki z małymi prędkościami skrawania przeważającym mechanizmem zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza jest zużycie ściernie. Ze wzrostem prędkości ustępuje ono miejsca zużyciu adhezyjnemu, natomiast przy dużych prędkościach skrawania dominuje zużycie dyfuzyjne [6, 8].

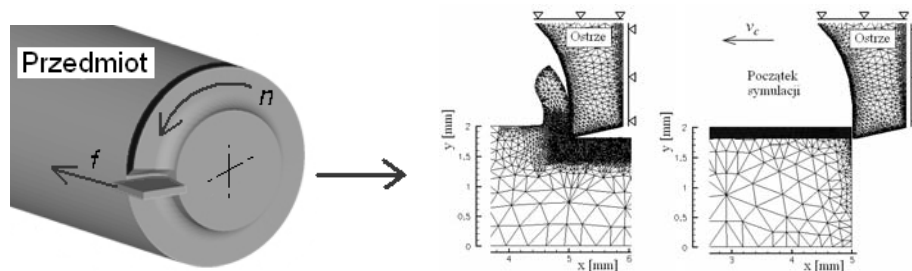
W badaniach modelowych, opisanych w tym artykule procesu toczenia stopów niklu (Inconel 718 oraz Inconel 625) oraz weryfikacji eksperymentalnej wyników symulacji komputerowej zastosowano geometrię płytki wieloostrowej o dwóch różnych kształtach powierzchni natarcia (związaczach wióra): VCMT 160404-SM oraz WNMG 080404-23.

2. Symulacja

Symulację komputerową procesu toczenia stopów niklu (Inconel 718, Inconel 625) przeprowadzono, opierając się na pakiecie programowym, bazującym na numerycznym modelu procesu powstawania wióra (równania Lagrange'a) [14]. Model materiałowy uwzględniający m.in. prędkość odkształcenia zbudowany jest na podstawie krzywych:

- umocnienia materiału w wyniku odkształcenia plastycznego,
- obniżenia twardości w miarę wzrostu temperatury,
- równań opisujących przekazywanie ciepła.

Model geometryczny (symulacyjny) strefy skrawania przedstawiono schematycznie na rys. 2. Ostrze narzędzia przesuwa się zgodnie z zaznaczonym wektorem prędkości skrawania v_c . Przyjęto w tym przypadku skrawanie swobodne.



Rys. 2. Przejście od mechanicznego do symulacyjnego modelu strefy skrawania

Fig. 2. Passage from the mechanical to the simulation model of the cutting process

Symulację procesu skrawania przeprowadzono od momentu zetknięcia ostrza z materiałem obrabianym i kontynuowano aż do uzyskania stanu ustalonego (ustalone pole naprężeń i temperatury). Dyskretyzacji podlegał materiał obrabiany i ostrze skrawające.

W czasie procesu skrawania materiał obrabiany płynie dookoła krawędzi skrawającej, rozdzielając się na dwa strumienie: częściowo wzdłuż powierzchni natarcia, tworząc wiór, a częściowo pod ostrze (trąc o powierzchnię przyłożenia), tworząc warstwę wierzchnią (powierzchnię obrobioną). W otoczeniu krawędzi skrawającej, czyli w obszarze zaburzenia płynięcia materiału, elementy siatki zostają czasowo bardzo zniekształcone i obliczenia tracą dokładność. Zastosowany algorytm w obliczeniach numerycznych częściowo niweluje te odkształcenia, aktualizując kształt siatki elementów skończonych przez usuwanie dużych odkształconych elementów, przywracając w ich miejsce elementy o prawidłowym kształcie.

Zestaw równań mechanicznych określa stan naprężeń, odkształcenia i warunki bezwładnościowe, w chwili gdy stykają się ze sobą narzędzie skrawające i materiał obrabiany. Równowagę ruchu liniowego opisują siły bezwładnościowe i siły wewnętrzne, zależne od aktualnego stanu naprężenia, będące w równowadze ze skończonymi obciążeniami granicznymi, co może być interpretowane jako:

Siły bezwładności + siły wewnętrzne = siły zewnętrzne + siły masowe

$$\int_B \rho v_i \ddot{u}_i dV + \int_B v_{i,j} \sigma_{ij} dV = \int_B v_i \sigma_{ij} n_j d\Omega + \int_B v_i \rho b_i dV \quad (1)$$

Generowanie i przepływ energii opisuje się za pomocą równań termodynamiki. Poniżej przedstawiono podstawowe równania umożliwiające obliczenia temperatury i ilości ciepła w poszczególnych węzłach siatki elementów.

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t T_n \quad CT_{n+1} + KT_{n+1} = Q_{n+1} \quad (2)$$

$$C_{ab} = \int_{Bt} c \rho N_a N_b dV_0 \quad K_{ab} = \int_{B0} D_{ij} N_{a,i} N_{b,j} dV \quad (3)$$

$$Q_a = \int_{Bt} s N_a dV + \int_{Btq} h N_a dS \quad (4)$$

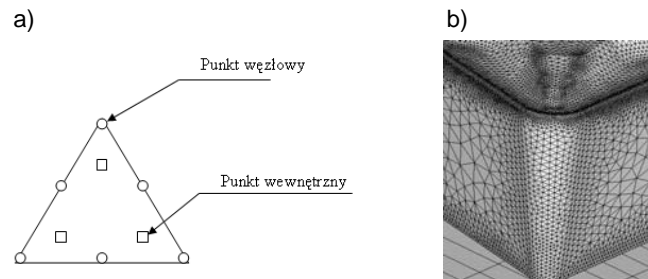
gdzie:

T – szereg węzłowych temperatur,

C – macierz pojemności cieplnej,

K – macierz przewodności cieplnej.

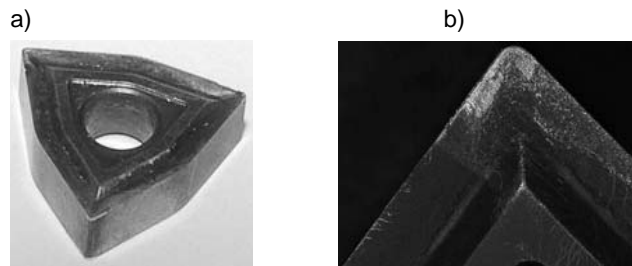
W strefie skrawania mamy do czynienia z głównymi źródłami ciepła występującymi w obszarach odkształceń plastycznych i tarcia ślizgowego wzdłuż powierzchni natarcia i przyłożenia ostrza narzędzia. Podstawowym elementem siatki modelu strefy skrawania jest trójkąt z trzema środkowymi punktami węzłowymi. W czasie adaptacji siatki tworzone są dodatkowe punkty wewnętrzne (rys. 3a). W miejscach szczególnie interesujących, takich jak: obszar zapoczątkowania procesu dekohezji, warstwa wierzchnia przedmiotu tuż po przejściu ostrza skrawającego czy otoczenie krawędzi skrawającej, następuje zagęszczenie siatki elementów, co zwiększa dokładność obliczeń (rys. 3b).



Rys. 3. Budowa siatki elementów skończonych: a) podstawowy element siatki modelu z zaznaczonymi punktami węzłowymi, b) dogęszczenie elementów w otoczeniu krawędzi skrawającej

Fig. 3. FE net construction: a) the main net element of the model with marked node points, b) concentration of elements in vicinity of the cutting edge

Na rysunku 4 przedstawiono widok płytki WNMG o symbolu zwijacza „23”. Profil rowka wiórowego w zależności od usytuowania płaszczyzny przekroju w stosunku do wierzchołka ostrza zmienia się. Kilka przykładowych profili powstałych w odległościach od krawędzi skrawającej: 0,5 mm, 1 mm oraz 2,5 mm przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Płytko o symbolu zwijacza „23”: a) widok całej płytki, b) widok fragmentu ostrza

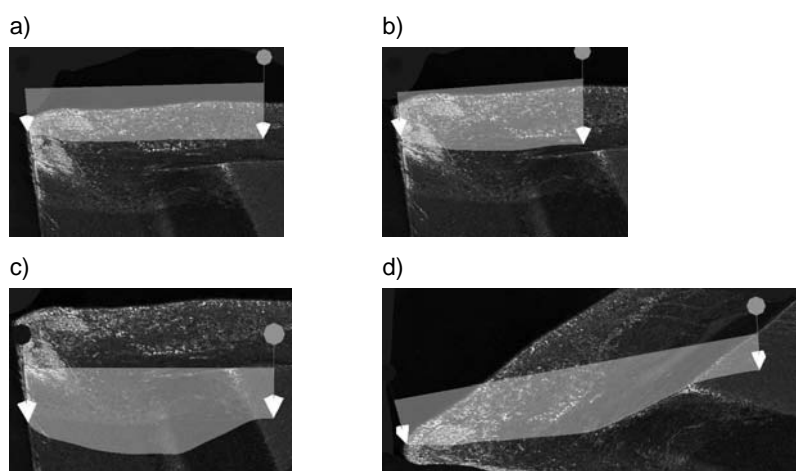
Fig. 4. Insert with chipbreaker “23”: a) view of the whole insert, b) view of the edge fragment

Do badań modelowych przyjęto przekrój zwijacza wiórów o wymiarach uśrednionych, z zakresu odległości od wierzchołka ostrza 1–2 mm (rys. 6).

Na rysunku 7 przedstawiono widok płytki VCMT o symbolu zwijacza „SM”. W tym przypadku profil rowka wiórowego również jest zmienny w zależności od usytuowania płaszczyzny przekroju w stosunku do wierzchołka ostrza. Kilka przykładowych profili powstałych w odległościach od krawędzi skrawającej: 0,3 mm, 1 mm oraz prostopadle do wierzchołka ostrza, przedstawiono na rys. 8.

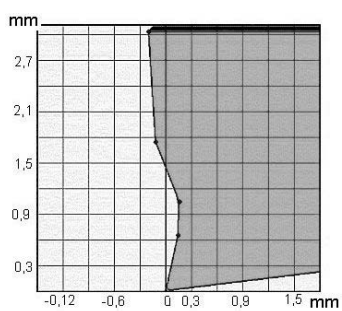
Do badań modelowych przyjęto w tym przypadku przekrój zwijacza wiórów o wymiarach uśrednionych z zakresu odległości od wierzchołka ostrza 0,5–2 mm (rys. 9).

Parametry skrawania zastosowane do badań modelowych przedstawiono w tabeli 1. Na rysunkach 10–14 przedstawiono przykładowe modele strefy skrawania (przypadek 1, 2, 4, 5), wyznaczone metodą MES dla obróbki stopów niklu (Inconel 718 oraz 625) płytką z węglików spiekanych o kształcie zwijacza wiórów o symbolu „23” oraz „SM”.



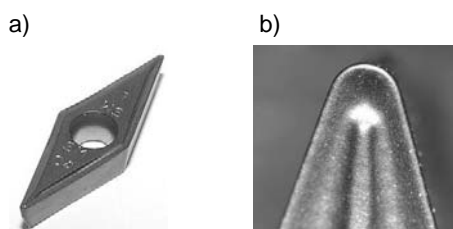
Rys. 5. Geometria powierzchni natarcia płytki o symbolu zwijacza „23” pokazana w przekroju w kilku przykładowych odległościach od wierzchołka ostrza: a) 0,5 mm; b) 1 mm; c) 2,5 mm; d) prostopadle do wierzchołka ostrza

Fig. 5. Geometry of the rake face of insert with “23” chipbreaker, shown in the cross section in a couple of distances from the tool nose; a) 0,5 mm; b) 1 mm; c) 2,5 mm; d) perpendicular to the tool nose



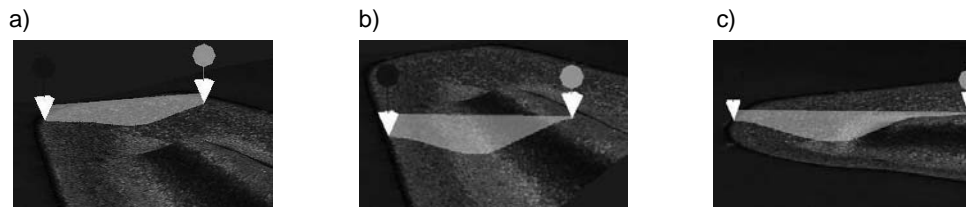
Rys. 6. Model geometrii powierzchni natarcia ostrza o symbolu zwijacza wiórow „23”

Fig. 6. Model of the rake face geometry with chipbreaker symbol “23”



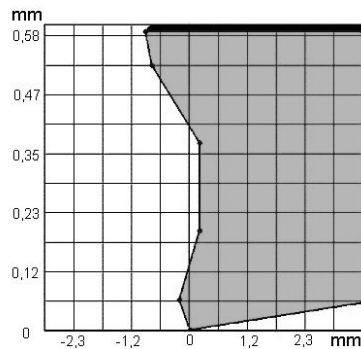
Rys. 7. Płytki o symbolu zwijacza „SM”: a) widok całej płytki, b) widok fragmentu ostrza

Fig. 7. Insert with chipbreaker “SM”: a) view of the whole insert, b) view of the edge fragment



Rys. 8. Geometria powierzchni natarcia płytki o symbolu zwijacza „SM” pokazana w przekroju w kilku przykładowych odległościach od wierzchołka ostrza: a) 0,3 mm; b) 1 mm; c) prostopadle do wierzchołka ostrza

Fig. 8. Geometry of the rake face of insert with “SM” chipbreaker, shown in the cross section in a couple of distances from the tool nose; a) 0,5 mm; b) 0,3 mm; c) 1 mm; d) perpendicular to the tool nose



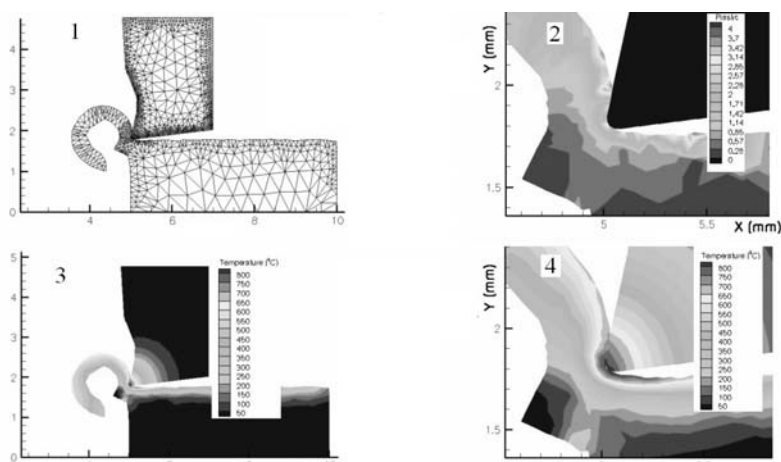
Rys. 9. Model geometrii powierzchni natarcia ostrza o symbolu zwijacza wiórow „SM”

Fig. 9. Model of the rake face geometry with chipbreaker symbol “SM”

Tabela 1

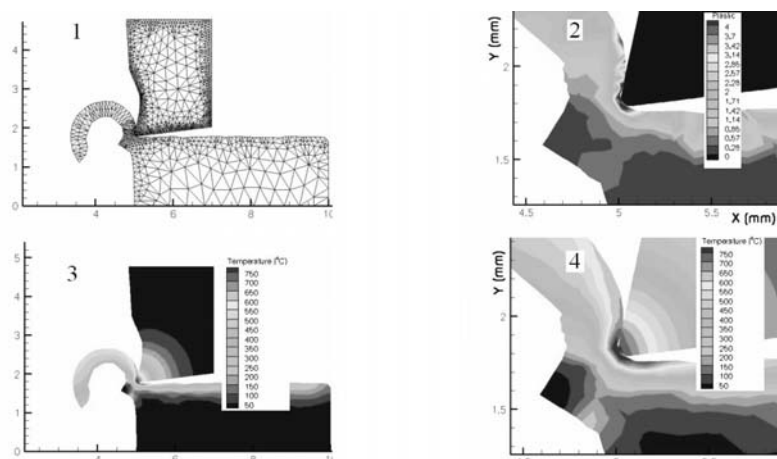
Parametry skrawania zastosowane do badań modelowych

Przypadek modelowy	Zwijacz	Materiał obrabiany	f mm/obr	v_c m/min	a_p mm
1	23	Inconel 718	0,211	75	2
2				50	
3				75	
4	SM	Inconel 625	0,153	65	1,5
5			0,077		0,5
6			0,249		



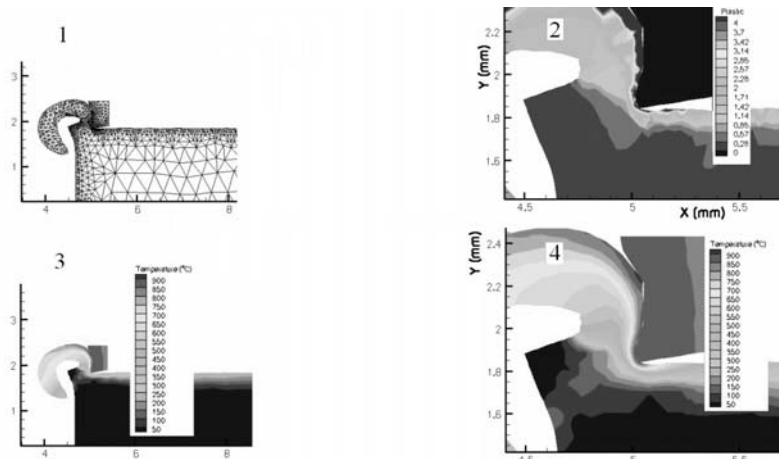
Rys. 10. Model strefy skrawania (przypadek 1) wyznaczony metodą MES dla toczenia stopu Inconel 718 płytką ze zwijaczem wióra o symbolu „23”. Parametry skrawania: $f = 0,211$ mm/obr., $v_c = 75$ m/min oraz $a_p = 2$ mm. Na rysunkach przedstawiono kolejno: 1) model z naniesioną siatką MES, 2) rozkład odkształceń plastycznych, 3) 4) rozkłady temperatury

Fig. 10. Model of cutting zone (case 1), determined by FEM method for turning of alloy Inconel 718 by insert with chipbreaker “23”. Cutting parameters: $f = 0,211$ mm/rev, $v_c = 75$ m/min and $a_p = 2$ mm. Figures present: 1) MES model, 2) plastic strain distribution, 3), 4) temperature distributions



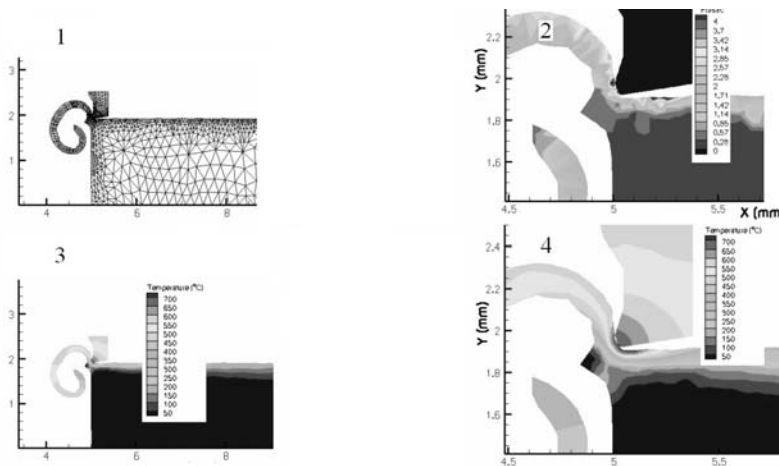
Rys. 11. Model strefy skrawania (przypadek 2) wyznaczony metodą MES dla toczenia stopu Inconel 718 płytką ze zwijaczem wióra o symbolu „23”. Parametry skrawania: $f = 0,211$ mm/obr., $v_c = 50$ m/min oraz $a_p = 2$ mm. Na rysunkach przedstawiono kolejno: a) model z naniesioną siatką MES, b) rozkład odkształceń plastycznych, c), d) rozkłady temperatury

Fig. 11. Model of cutting zone (case 2), determined by FEM method for turning of alloy Inconel 718 by insert with chipbreaker “23”. Cutting parameters: $f = 0,211$ mm/rev, $v_c = 50$ m/min and $a_p = 2$ mm. Figures present: a) MES model, b) plastic strain distribution, c), d) temperature distributions



Rys. 12. Model strefy skrawania (przypadek 4) wyznaczony metodą MES dla toczenia stopu Inconel 625 płytką ze zwijaczem wióra o symbolu „SM”. Parametry skrawania: $f = 0,153$ mm/obr., $v_c = 65$ m/min oraz $a_p = 1,5$ mm. Na rysunkach przedstawiono kolejno: a) model z naniesioną siatką MES, b) rozkład odkształceń plastycznych, c), d) rozkłady temperatury

Fig. 12. Model of cutting zone (case 4), determined by FEM method for turning of Inconel 625 by insert with chipbreaker “SM”. Cutting parameters: $f = 0,153$ mm/rev, $v_c = 65$ m/min and $a_p = 1,5$ mm. Figures present: a) MES model, b) plastic strain distribution, c), d) temperature distributions

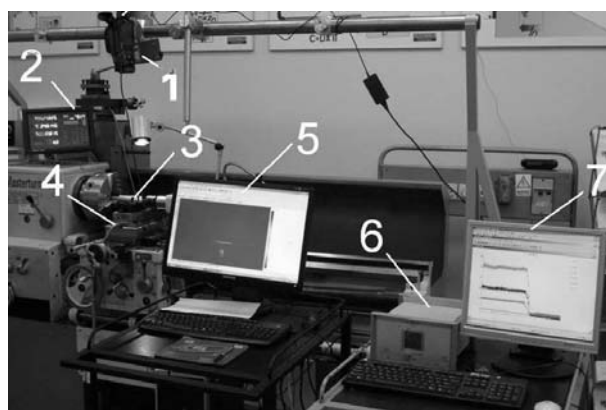


Rys. 13. Model strefy skrawania (przypadek 5) wyznaczony metodą MES dla toczenia stopu Inconel 625 płytką ze zwijaczem wióra o symbolu „SM”. Parametry skrawania: $f = 0,077$ mm/obr., $v_c = 65$ m/min oraz $a_p = 0,5$ mm. Na rysunkach przedstawiono kolejno: a) model z naniesioną siatką MES, b) rozkład odkształceń plastycznych, c), d) rozkłady temperatury

Fig. 13. Model of cutting zone (case 5), determined by FEM method for turning of Inconel 625 by insert with chipbreaker “SM”. Cutting parameters: $f = 0,077$ mm/rev, $v_c = 65$ m/min, $a_p = 0,5$ mm. Figures present: a) MES model, b) plastic strain distribution, c), d) temperature distributions

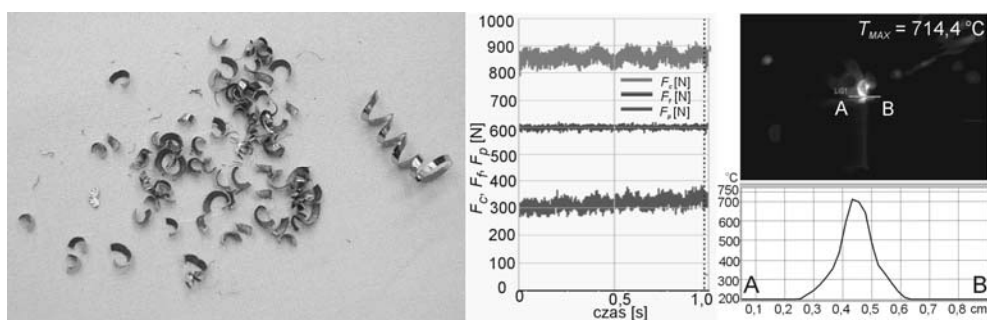
3. Badania eksperymentalne

W celu weryfikacji badań modelowych przeprowadzono pomiary składowych siły skrawania i maksymalnej temperatury w strefie tworzenia wióra za pomocą siłomierza piezoelektrycznego i kamery termowizyjnej (rys. 14). Przykładowe wyniki pomiarów (przebiegi składowych głównej siły skrawania, rozkładu temperatury w strefie skrawania wzdłuż zaznaczonej linii A-B oraz fotografie powstałych wiórów) przedstawiono na rys. 15–18.



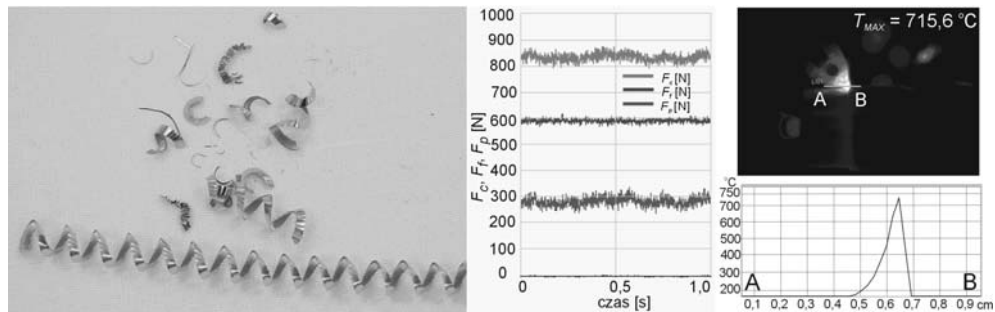
Rys. 14. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – kamera termowizyjna, 2 – tokarka, 3 – przedmiot, 4 – siłomierz, 5, 7 – komputer, 6 – wzmacniacz ładunku

Fig. 14. Scheme of measurement site: 1 – thermovision camera, 2 – lathe, 3 – workpiece, 4 – dynamometer, 5, 7 – computer, 6 – charge amplifier



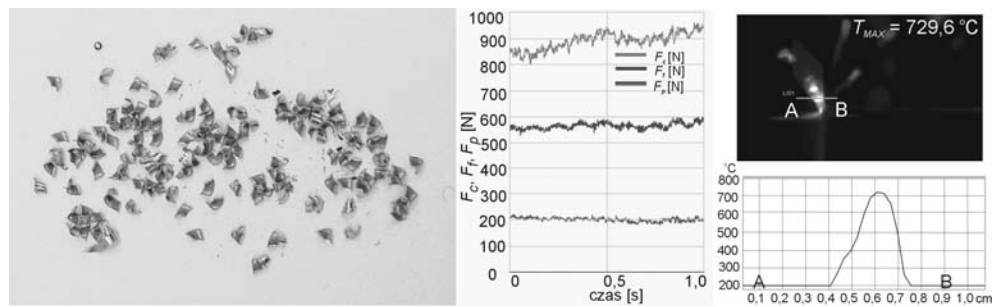
Rys. 15. Wyniki badań dla przypadku 1: $f=0,211$ mm/obr., $v_c=75$ m/min oraz $a_p=2$ mm

Fig. 15. Results of researches for case 1: $f=0,211$ mm/rev, $v_c=75$ m/min and $a_p=2$ mm



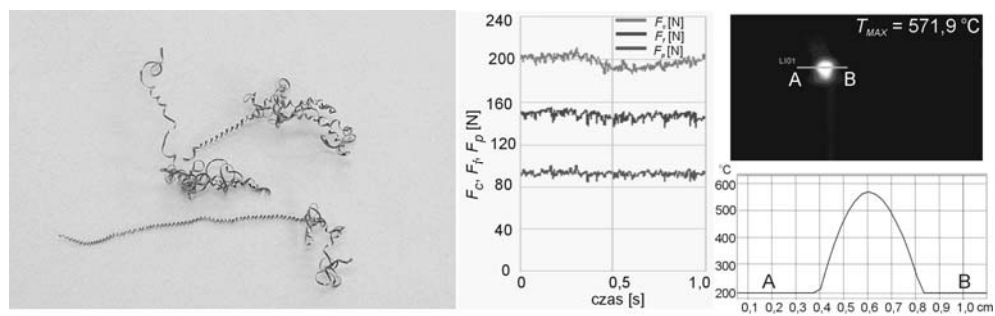
Rys. 16. Wyniki badań dla przypadku 2: $f = 0,211$ mm/obr., $v_c = 50$ m/min oraz $a_p = 2$ mm

Fig. 16. Results of researches for case 2: $f = 0,211$ mm/rev, $v_c = 50$ m/min and $a_p = 2$ mm



Rys. 17. Wyniki badań dla przypadku 4: $f = 0,153$ mm/obr., $v_c = 65$ m/min oraz $a_p = 1,5$ mm

Fig. 17. Results of researches for case 4: $f = 0,153$ mm/rev, $v_c = 65$ m/min and $a_p = 1,5$ mm

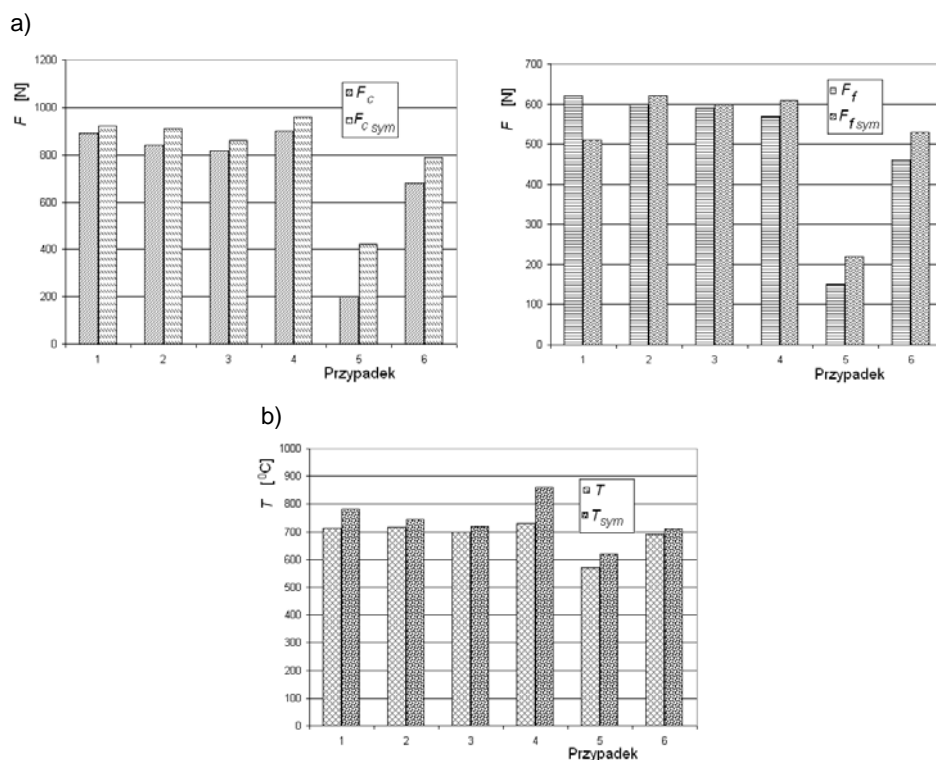


Rys. 18. Wyniki badań dla przypadku 5: $f = 0,077$ mm/obr., $v_c = 65$ m/min oraz $a_p = 0,5$ mm

Fig. 18. Results of researches for case 5: $f = 0,077$ mm/rev, $v_c = 65$ m/min and $a_p = 0,5$ mm

4. Wnioski

Badania, zarówno eksperymentalne, jak i modelowe, wykazały istotny wpływ parametrów skrawania na wartości składowych całkowitej siły skrawania oraz maksymalnej temperatury w otoczeniu krawędzi skrawającej. Różnica względna pomiędzy wynikami uzyskanymi z symulacji komputerowej i pomiarów mieściła się w zakresach: 3,2–14% dla składowej głównej siły skrawania F_c (z wyjątkiem przypadku 5, gdzie ta różnica wynosiła ok. 50%), 1,2–18% dla składowej posuwowej siły skrawania F_f oraz 2,8–15,2% w przypadku maksymalnej temperatury skrawania (rys. 19), co wskazuje na dobrą zgodność modelu z rzeczywistym procesem toczenia.



Rys. 19. Porównanie wartości rzeczywistych z wartościami uzyskanymi z symulacji komputerowej dla: a) składowych całkowitej siły skrawania, b) maksymalnej temperatury skrawania T_{\max}

Fig. 19. Comparison of the real values with values achieved from the simulation for: a) cutting force components, b) maximum cutting temperature T_{\max}

Literatura

- [1] Andrae P., *High-efficiency machining*, Manufacturing Engineering, 2004.
- [2] Axinte D., Gindy N., Fox K., Unaune I., *Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining*, Machine Tools and Manufacture, nr 44/2004, 1091-1108.
- [3] Byrn G., Dornfeld D., Denkena B., *Advancing Cutting Technology*, Annals of the CIRP, nr 52/2/2003.
- [4] Choudhury I.A., El-Baradid M.A., *Machinability of nickel-base super alloys: a general review*, Materials Processing Technology, nr 77/1998, 278-284.
- [5] Ezugwu E.O., *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*, Machine Tools & Manufacture, nr 45/2005, 1353-1367.
- [6] Ezugwu E.O., Wang Z.M., Machado A.R., *The machinability of the nickel-based alloys. A review*, Materials Processing Technology, nr 89/1999, 1-16.
- [7] Grzesik W., *Kierunki rozwoju obróbki skrawaniem*, Inżynieria Maszyn, R. 6, z. 2/2001.
- [8] Jawaid A., Koksalski S., Sharif S., *Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy*, Materials Processing Technology, nr 116/2001, 2-9.
- [9] König W., Gerschwiler K., *Machining nickel-based superalloys*, Manuf. Eng. t. 122, nr 3/1999, 102, 104, 106, 108.
- [10] MTU Aero Engine Materials, <http://www.mtu.de/de/>.
- [11] Narutaki N., Yamane Y., *Machining of difficult-to-cut materials*, Int. J. of Japan Soc. Prec. Eng., t. 27, nr 4, 1993, 307-310.
- [12] Ng E.G., Aspinwall D.K., Brazil D., Monaghan J., *Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel*, Machine Tools and Manufacture, nr 39/1999, 885-903.
- [13] SANDVIK Coromant – Application Guide, *Aerospace Engine*, 2004.
- [14] User's Manual of AdvantEdge v5.6 machining simulation software, Minneapolis, MN, 2010.
- [15] Oczko K., *Postęp w obróbce skrawaniem. II. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem*, Mechanik, z. 5-6/1998, 307.
- [16] Oczko K., *Postęp w obróbce skrawaniem. I. Obróbka z dużymi prędkościami (High Speed Machining)*, Mechanik, z. 3/1998, 109-124.
- [17] Oczko K., *Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. I. Obróbka skrawaniem*, Mechanik, z. 8-9/2002, 537.
- [18] Oczko K., *Postęp w obróbce skrawaniem. III. Obróbka materiałów twardych i utwardzonych*, Mechanik, z. 7/1998, 419-426.