

# Progress in modelling and simulation of the machining process – part II: Mesh-free modelling and simulation

## Postęp w modelowaniu i symulacji procesu skrawania – część II: Bezsiatkowe modelowanie i symulacja

WIT GRZESIK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.5-6.9>

In this paper some rules of mesh-free/meshless modelling and numerical simulations of fundamental physical phenomena associated with the machining process, including mechanisms of plastic deformation, chip formation and interfacial friction are overviewed. Some representative examples of the mesh-free modelling application to material removal processes at different scales, i.e.: machining processes, water jet-assisted processes, additive machining processes and simulation of micromachining processes using predominantly SPH (*smoothed particle hydrodynamics*) method are given.

**KEYWORDS:** mesh-free modelling, numerical simulations, machining process

W artykule omówiono zasady bezsiatkowego modelowania i symulacji numerycznej podstawowych zjawisk fizycznych towarzyszących procesom obróbki, w tym mechanizmów odkształcania materiału, tworzenia wióra i tarcia. Podano przykłady zastosowania bezsiatkowego modelowania procesów obróbki ubytkowej, m.in.: obróbki skrawaniem, wysokociśnieniową strugą wody (WJM i AWJM) oraz obróbki i symulacji mikroobróbki z użyciem metody SPH (hydrodynamiki wygładzonych cząstek).

**SŁOWA KLUCZOWE:** modelowanie bezsiatkowe, symulacja numeryczna, obróbka skrawaniem

### Wprowadzenie

W ostatniej dekadzie obserwuje się wzrost zainteresowania zastosowaniem tzw. bezsiatkowego modelowania i symulacji procesów obróbki ubytkowej przyrostowej i plastycznej, co jest następstwem rozwoju metod modelowania graficznego z użyciem kart graficznych, czyli na jednym procesorze (CPU), i solverów graficznych, czyli na wielu procesorach (GPU) [1–4]. W poprzednim artykule [1] opisano zastosowanie metod MD (*molecular dynamics*) i SPH (*smoothed particle hydrodynamics*) w hybrydowym modelowaniu procesu skrawania, łączącym tradycyjne modelowanie siatkowe (FEM/MES, ale głównie metodę hybrydową FEM Eulerian-Lagrangian – ALE), które jest jednym ze sposobów realizacji tzw. modelowania wieloskalowego (*multiscale modeling*). W ten sposób rozszerza się ich liczne zastosowania w modelowaniu i symulacji w mechanice ciała stałego, mechanice gruntów, przepływów wielofazowych, procesów odlewniczych (krzepnięcia) i spawalniczych oraz analizie konstrukcji do modelowania i symulacji procesów obróbkowych [5, 7, 8, 16].

Chronologicznie za pierwszą metodę bezsiatkową należy uznać metodę dynamiki molekularnej, która już w latach 80. ubiegłego wieku była stosowana do modelowania i symulacji procesu skrawania w mikro- i nanoskali [6]. Do podstawowych metod bezsiatkowych należą:

- metoda elementów dyskretnych (DEM – *discrete element method*),
- metoda SPH nazywana hydrodynamiką wygładzonych cząstek, metodą wygładzonej hydrodynamiki cząstek czy metodą cząstek rozmytych/wygładzonych.

Głównym wyróżnikiem metod bezsiatkowych jest to, że domena obliczeniowa nie musi mieć jawnie określonych granic zewnętrznych, co oznacza, że rozmiar domeny zależy od bieżącej lokalizacji obiektów biorących udział w symulacji. Alternatywnie można podać maksymalne granice zewnętrzne, po których przekroczeniu obiekt przestaje brać udział w symulacji.

W mechanice komputerowej wyróżnia się ponad 40 metod i odmian bezsiatkowych w zależności od kryteriów klasyfikacji [7]. Z metod najczęściej stosowanych we wspomnianych procesach wytwórczych można wymienić: bezsiatkową metodę różnic skończonych (BMRS), *element free Galerkin* (EFG) oraz *finite point method* (FPM). Są one oparte na metodzie lokalnej aproksymacji ważonymi najmniejszymi kroczącymi kwadratami (MWLS) oraz podstawowej metodzie SPH opartej na aproksymacji jądra całkowego [7]. SPH wykorzystuje aproksymację jądra z tzw. funkcji jądra, którą można rozumieć jako pewien rodzaj funkcji wagowej. W przeciwieństwie do metod siatkowych dany jest zbiór dowolnie rozmieszczonych węzłów, które nie są związane żadną strukturą (typu elementy, siatka) i które można dowolnie usuwać, przemieszczać, a nawet można do nich dodawać nowe węzły. Metoda SPH dała początek innym metodom bezsiatkowym, takim jak: *element free Galerkin* (EFG) lub *meshless local Petrov-Galerkin methods* (MLPG), jednak zarówno EFG, jak i MLPG wymagają dyskretyzacji o postaci pewnego rodzaju siatki (*background mesh*) w celu wykonania całkowania, przez co utraciły częściowo największą zaletę, jaką ma np. SPH, czyli zdolność do opisu dużych deformacji i fragmentacji.

Parametr  $h$  jest nazywany „długością wygładzenia” (*smoothing length*). Określa on, na jaką odległość cząstka może oddziaływać z innymi cząstkami. Najczęściej w symulacji długość wygładzenia pozostaje stała podczas obliczeń. Funkcja wygładzenia zależy od długości

\* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik – [wit.grzesik@gmail.com](mailto:wit.grzesik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Opole, Polska

wygładzenia  $h$  i odległości  $(r_i - r_j)$  – zwykle równej  $2h$  – uwzględnianej cząstki od otaczających cząstek – jak na rys. 1b. Funkcją jądra aproksymacji/wagową ( $W_h$ ) może być przykładowo funkcja Gaussa (rys. 1), kwadratowa albo funkcja sklejana 3. stopnia typu *cubic B-spline* lub specjalna funkcja 4. stopnia. Długość wygładzenia  $h$  można powiązać z promieniem nośnika funkcji jądra ( $r$ ), natomiast liczba cząstek SPH w danym nośniku funkcji ( $N_N$ ) reguluje dokładność aproksymacji [8, 10, 19]. Należy tylko uwzględnić, aby w promieniu  $2h$  znajdowała się odpowiednia liczba sąsiadów. Liczba ta powinna się wahać w granicach od  $N_N/2$  do  $2N_N$ .

Na rys. 2–4 porównano wyniki symulacji procesu tworzenia wióra oraz wymaganego czasu i pamięci operacyjnej. Przyjęto następujące warunki geometryczne dyskretyzacji strefy tworzenia wióra:

- w metodzie FEM zastosowano podział na 50 000 przestrzennych, czworościennych elementów o wielkości  $9 \mu\text{m}$  i 30 000 węzłów oraz adaptacyjną zmianę siatki (*remeshing*),
- w metodzie EFG zastosowano te same warunki co w FEM,
- w metodzie SPH strefę symulacji reprezentowało 40 000 cząstek.

Z rys. 2 i 3 wynika, że w metodach FEM i EFG otrzymuje się zbliżony kształt wióra, ale większe są wartości tak maksymalnych odkształceń, jak i naprężeń zredukowanych, tj.  $\epsilon_{\text{max}} = 3,3$  i  $6,3$  oraz odpowiednie wartości naprężenia  $\sigma_{\text{max}} = 1500$  i  $1750$  MPa [9].

Z kolei w metodzie SPH wyznaczone wartości odkształceń i naprężeń są znacznie mniejsze, tj.  $\epsilon_{\text{max}} = 2,8$  (czyli porównywalne jak w metodzie FEM)

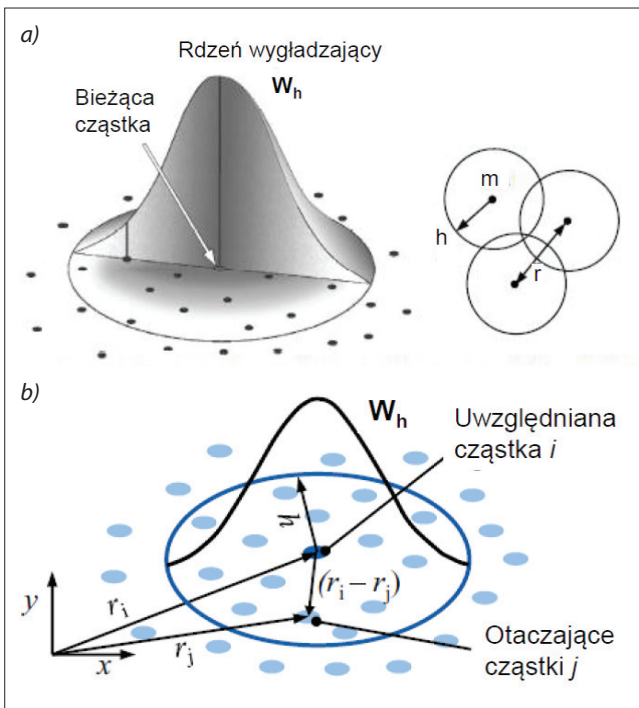


Fig. 1. Exemplary diagram of smoothing kernel function  $W_h(r)$  in  $R^3$  space (a) and the sphere of its influence (b). Symbols:  $m$  – mass,  $r$  – distance between particles,  $h$  – smoothing length [8, 10, 25]

Rys. 1. Przykładowy wykres funkcji wygładzenia jądra  $W_h(r)$  w przestrzeni  $R^3$  (a) i obszar wpływu funkcji wygładzenia (b). Oznaczenia:  $m$  – masa,  $r$  – odległość między cząstkami,  $h$  – długość wygładzenia [8, 10, 25]

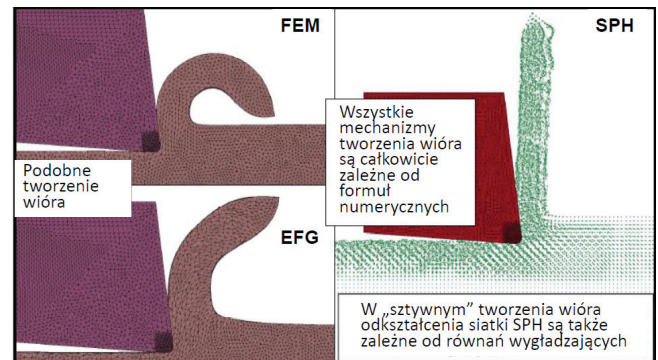


Fig. 2. Comparison of chip formation using FEM, EFG and SPH methods [9]

Rys. 2. Porównanie formowania wióra w metodach FEM, EFG i SPH [9]

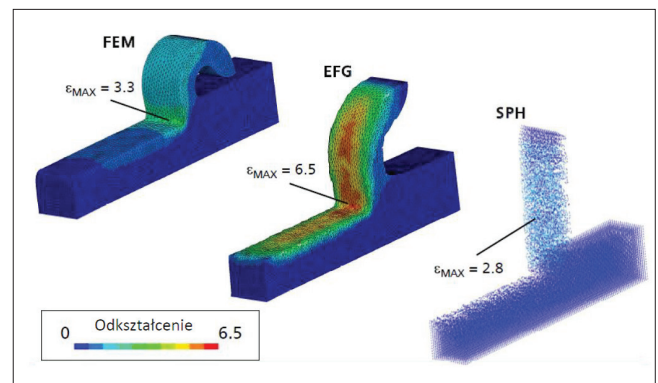


Fig. 3. Comparison of strain distribution in the chip formation zone using FEM, EFG and SPH methods [9]

Rys. 3. Porównanie rozkładu odkształceń w strefie formowania wióra w metodach FEM, EFG i SPH [9]

i  $\sigma_{\text{max}} = 980$  MPa (czyli porównywalne jak w metodach FEM i EFG). Może to świadczyć o tym, że wyniki symulacji silnie zależą od numerycznych uwarunkowań zastosowanych w każdej z metod, a w metodzie SPH – od zastosowanej funkcji jądra/wygładzenia.

Interesujące dla użytkowników może być porównanie czasów obliczeń i wymagań co do jednostek obliczeniowych. Są one następujące (w kolejności FEM/FEG/SPH):

- czas obliczeń: 3:52/9:45/4:19 [h:min],
- objętość zapisanych danych: 2320/2620/485 [MB],
- średnia pamięć operacyjna: 1,3/1,4/0,9 [GB].

Dane te świadczą na korzyść metody bezsiatkowej, zwłaszcza w odniesieniu do objętości zgromadzonych danych i niezbędnej pamięci operacyjnej. Duże znaczenie ma również uproszczone przygotowanie modelu symulacyjnego. Dalsze skrócenie czasu symulacji uzyskuje się w metodach łączonych, co zostanie udokumentowane w dalszej części artykułu.

## Analiza porównawcza wyników modelowania i symulacji procesu skrawania

W przypadku modelowania bezsiatkowego brak jest uwzględnienia tarcia, które zastępuje się kontaktem cząstek w obszarze aproksymacji numerycznej. Z tego względu interesującym problemem jest porównanie założeń i wyników symulacji metodą SPH i metodą hybrydową SPH+FEM, którą omówiono w poprzednim artykule [1].

Ponieważ *gros* badań z zastosowaniem symulacji SPH przeprowadzono w pakiecie LS-Dyna, na rys. 4a przedstawiono schemat typowego cyklu obliczeń, a na rys. 4b zasadę wyboru lokalizacji sąsiadujących cząstek, ważną w perspektywie uzyskania informacji, która z cząstek będzie dążyła do kontaktu z innymi cząstkami w każdym wybranym czasie obliczeń numerycznych [11]. Cykl obliczeń jest zasadniczo podobny jak w metodzie FEM za wyjątkiem kroków, w których stosuje się aproksymację rdzenia.

Na rys. 4b sfera wpływu każdej z cząstek ma skończony obszar o promieniu  $2h$  (czyli dwukrotną długość wygładzenia). Zadaniem przeszukiwania sąsiedztwa jest sporządzenie wykazu/listy cząstek wewnątrz domeny na każdym kroku czasu symulacji. W tym celu stosuje się algorytm podobny jak w poszukiwaniu kontaktu cząstek, tzw. listę poszukiwań – dosłownie „czerpanie kubłem” (*bucket search*). W ten sposób domena poszukiwań pokryta przez cząstki jest podzielona na kilka pudełek (*boxes*) – jak na rys. 4b. Takie podejście ogranicza zdecydowanie liczbę wyznaczanych odległości i w konsekwencji skraca czas obliczeń.

Na rys. 5a przedstawiono konfigurację modelu procesu z obrotowym ruchem głównym, np. frezowania walcowego, w którym dyskretyzacji narzędzia i obrabianego przedmiotu dokonano cząstkami; a na rys. 5b pokazano porównanie wartości siły skrawania wyznaczonej z symulacji SPH i metodą hybrydową

(FEM dla narzędzia i SPH dla przedmiotu) z wynikami pomiaru [10]. Materiałem obrabianym był stop aluminium w gatunku A2024-T351 ( $Y = 400$  MPa), a warunki obróbki przyjęto następujące:  $v_c = 800$  m/min,  $a_p = 0,1$  mm,  $a_f = 0,2$  mm.

W modelu ortogonalnym FEM przeprowadzonym w pakiecie komercyjnym LS-Dyna przyjęto dwie wartości współczynnika tarcia  $\mu = 0$  i  $0,17$ , co w pierwszym przypadku koresponduje z przyjętą w modelu SPH interakcją sąsiadujących ze sobą cząstek materialnych (czyli separacją wióra i narzędzia), oraz:  $f = 4$  mm/obr,  $a_p = 2$  mm i kąt natarcia  $\gamma_0 = 17,5^\circ$ . Na rys. 5b widoczna jest dobra zgodność przebiegu siły skrawania w czasie  $0,2$  ms dla metody SPH i FEM z założeniem „beztarciowego” kontaktu wiór-ostrze skrawające i wyniku pomiaru. Należy zauważyć, że wartości siły wyznaczone w modelu SPH+FEM dla  $\mu = 0,17$  są już wyraźnie wyższe, co pokrywa się z informacjami w raporcie [9]. Ta zgodność zależy od fazy procesu, tj. w pierwszej połowie wartości siły wyznaczone metodą symulacji SPH są wyraźnie niższe, co jest rezultatem charakterystycznej fluktuacji wartości siły w czasie  $0 \div 0,6$  ms. Z kolei wyznaczone grubość i długość wióra są porównywalne.

Zastosowany w badaniach [10] algorytm umożliwił wyznaczenie wartości siły skrawania i siły odporowej z dokładnością 8,4% i 12%. Skrawano stop aluminium EN AW6082-T6 z prędkością  $v_c = 300$  m/min,

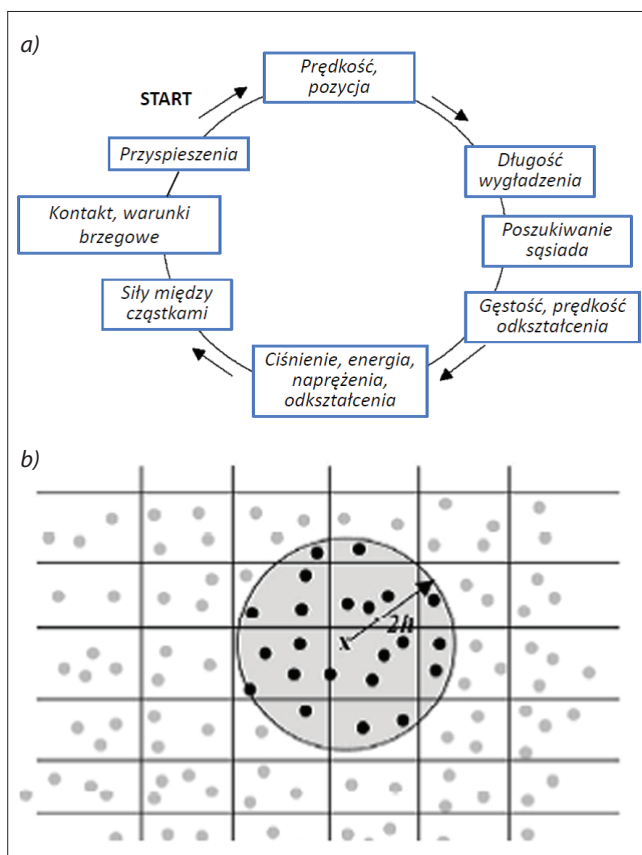


Fig. 4. Scheme of the calculation cycle in time for simulation using SPH method in LS-Dyna package (a) and a method of sorting and search particles inside a finite domain (b) [10, 14, 18]

Rys. 4. Schemat cyklu obliczeń w czasie dla symulacji metodą SPH w pakiecie LS-Dyna (a) i metoda sortowania i sporządzenia listy cząstek wewnątrz domeny na każdym kroku czasu symulacji (b) [10, 14, 18]

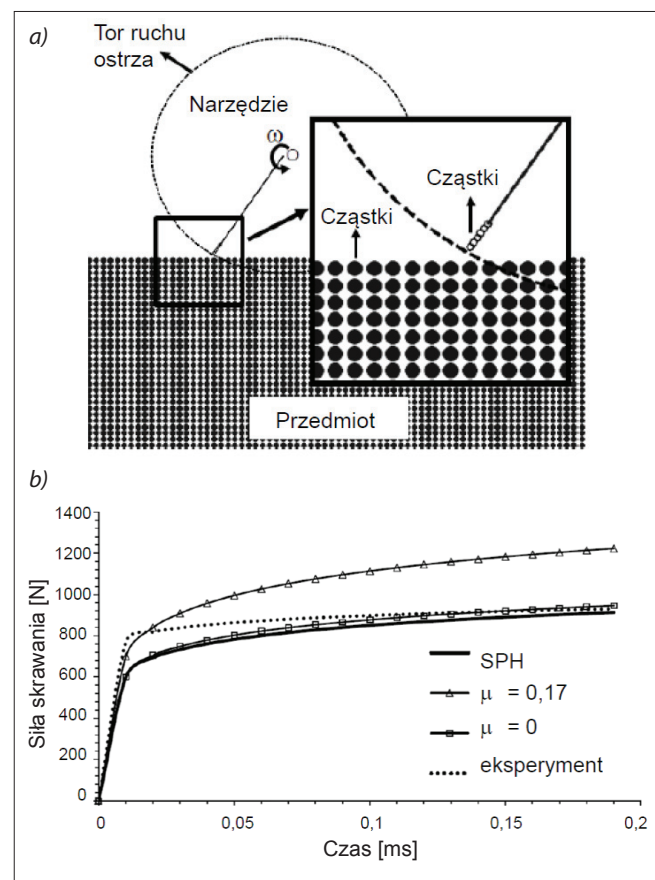


Fig. 5. Full SPH model of a rotational cutting process (a) and comparison of cutting force values determined in numerical simulations and obtained experimentally (b) [2, 6]

Rys. 5. Pełny model SPH procesu skrawania z obrotowym ruchem głównym narzędzia (a) i porównanie wartości siły skrawania wyznaczonej w symulacjach i w pomiarach (b) [10]

posuwem  $f = 0,234$  mm/obr i głębokością  $a_p = 0,2$  mm. Było to rezultatem przeprowadzonej analizy wrażliwości (*sensitivity analysis*) w odniesieniu do rozdzielczości rozkładu cząstek, masy cząstek, czasu trwania procesu i intensywności tarcia między wiórem i narzędziem – rozpatrzono statyczny i dynamiczny współczynnik tarcia. Założono: gęstość rozkładu cząstek równą  $512\,000$  cząstek/cm<sup>3</sup>, statyczny i dynamiczny współczynnik tarcia równy  $0,23$  i czas obliczeń  $31$  h  $43$  min. Wynik symulacji został zilustrowany na rys. 6.

W innych badaniach, np. [10–13], wykazano, że dokładność prognozy sił i odkształceń bez takiej analizy jest znacznie niższa. Na przykład dla metody SPH/SPH z zastosowaniem tego samego pakietu symulacyjnego uzyskano  $10\%$  odchylenie dla siły skrawania i prawie  $30\%$  dla siły odporowej, co pokrywa się z powszechną wiedzą w zakresie symulacji procesu skrawania [6]. Natomiast z porównania czasu symulacji skrawania stopu aluminium w gatunku 1100 Al metodą FEM Eulera i SPH wynika, że odpowiednie maksymalne wartości stopnia odkształcenia są równe  $7,5$  i  $8$ , a czas obliczeń na procesorze CPU może być nawet  $2,75$  razy

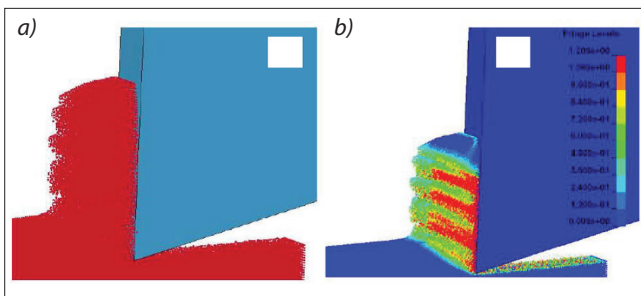


Fig. 6. The result of chip formation simulation using SPH method for the workpiece and FEM for the tool: a) 3D view and b) contours of effective plastic strain in the cutting zone [10]

Rys. 6. Rezultat symulacji tworzenia wióra metodą SPH dla przedmiotu i FEM dla narzędzia: a) widok 3D i b) rozkład efektywnych odkształceń plastycznych w strefie skrawania [10]

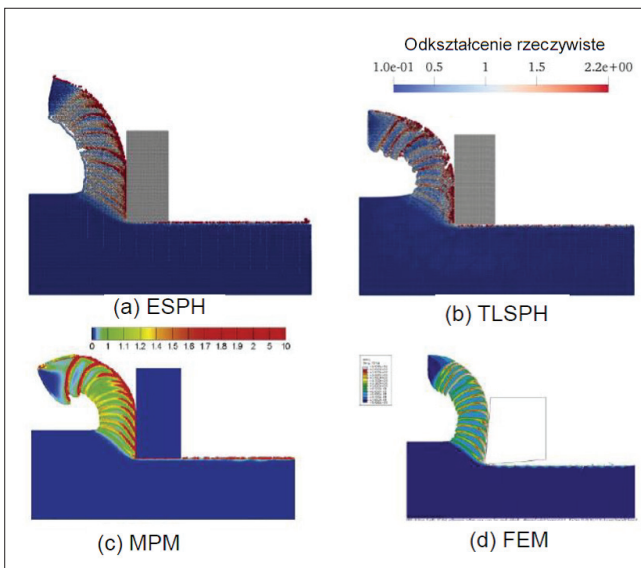


Fig. 7. Comparison of distribution of effective plastic strain using four simulation methods of metal cutting process, i.e.: ESPH, TLSPH, MPM i FEM [13]

Rys. 7. Porównanie rozkładu intensywności odkształceń plastycznych dla czterech metod symulacji, tj.: ESPH, TLSPH, MPM i FEM [13]

krótszy na korzyść metody SPH [12]. Szerokość strefy poślizgu (PDZ) z rys. 6b była równa  $700$   $\mu\text{m}$  dla modelu Eulera,  $600$   $\mu\text{m}$  dla modelu SPH i  $800$   $\mu\text{m}$  z analizy metalograficznej, a z wtórnej (SDZ) dla modeli numerycznych wynosiła około  $250$   $\mu\text{m}$ .

Na rys. 7 przedstawiono porównanie rozkładu intensywności odkształceń plastycznych dla czterech metod symulacji: ESPH, TLSPH, MPM (*material point method*) i FEM [13]. Zastosowano dwie metody bezsiatkowe, a mianowicie ESPH (*Eulerian SPH*) i TLSPH (*total Lagrangian SPH*), w której wdrożono specjalną procedurę wyznaczania funkcji wygładzenia w konfiguracji referencyjnej i wprowadzono możliwość opisu wzajemnej interakcji oraz przenikania/penetracji cząstek w czasie ich kontaktu. Rozrózono więc rdzeń wygładzenia Eulera i Lagrange'a. W ten sposób wyeliminowano niestabilności symulacji prowadzące do numerycznego pęknięcia materiału. Wyniki symulacji zweryfikowano za pomocą testu Taylora [6]. Skrawano ortogonalnie stal w gatunku AISI 4340 z prędkością  $50$  m/s. Ustalono, że wyniki symulacji tworzenia wióra i pasm poślizgu w wiórze uzyskane metodami ESPH i TLSPH (rys. 7a–b) są zbliżone do rezultatów uzyskanych metodą MPM i klasyczną metodą FEM (rys. 7c–d), jednak na korzyść metody TLSPH. Taka sytuacja wynika – jak już wskazano – z odczuwalnego wyeliminowania niestabilności. Symulacja metodą TLSPH lepiej odwzorowuje zakrzywienie wióra (rys. 7b). Nie występuje także konieczność regulacji nacisków jednostkowych. Symulacje przeprowadzono w pakiecie LS-Dyna.

Jak nadmieniono w poprzednim artykule [1], rozwijane są modele hybrydowe typu SPH+FEM, które zwiększają dokładność prognozy charakterystyk procesu i przyczyniają się do wydatnego skrócenia czasu obliczeń. W takim przypadku model SPH dotyczy tylko silnie odkształconej warstwy oddzielanej od reszty materiału, a sztywne narzędzie podlega dyskretyzacji siatką MES. Podstawowe problemy to numeryczne połączenie cząstek i elementów siatki MES oraz wybór parametru uszkodzenia  $D$  w równaniu konstytutywnym [6]. Wtedy liczba cząsteczek w modelu SPH może być zredukowana nawet o  $50\%$ . Z tego względu w pracy [14] udokumentowano prawie  $40\%$  skrócenie czasu obliczeń tak 3D ortogonalnego skrawania, jak i mikroskrawania z głębokością  $300$   $\mu\text{m}$ . Podobieństwo w wyniku symulacji z zastosowaniem obydwóch metod potwierdzają prognozowane wartości siły skrawania równe odpowiednio:  $15$  N i  $15,1$  N. Z kolei czas symulacji skrócono o  $43\%$ .

Na rys. 8 przedstawiono rozkłady naprężenia zredukowanego von Misesa dla skrawania ortogonalnego (2D) i ukośnego (3D) uzyskane z symulacji metodą SPH [30]. Nowym podejściem do analiz wyników symulacji metodą SPH jest zastosowanie uczenia maszynowego (ML – *machine learning*) [21]. W tym przypadku zastosowano metodę DOE (*design of experiment*) [22] i sztuczną sieć neuronową do oceny wpływu parametrów skrawania ( $r_p$ ,  $f$ ,  $v_c$ ,  $\gamma_0$ ) na składowe siły skrawania i siły właściwe ( $k_c$ ,  $k_f$ ) w skrawaniu ortogonalnym stopu tytanu Ti6Al4V. Uzyskano zależności zgodne z danymi eksperymentalnymi i literaturowymi [6].

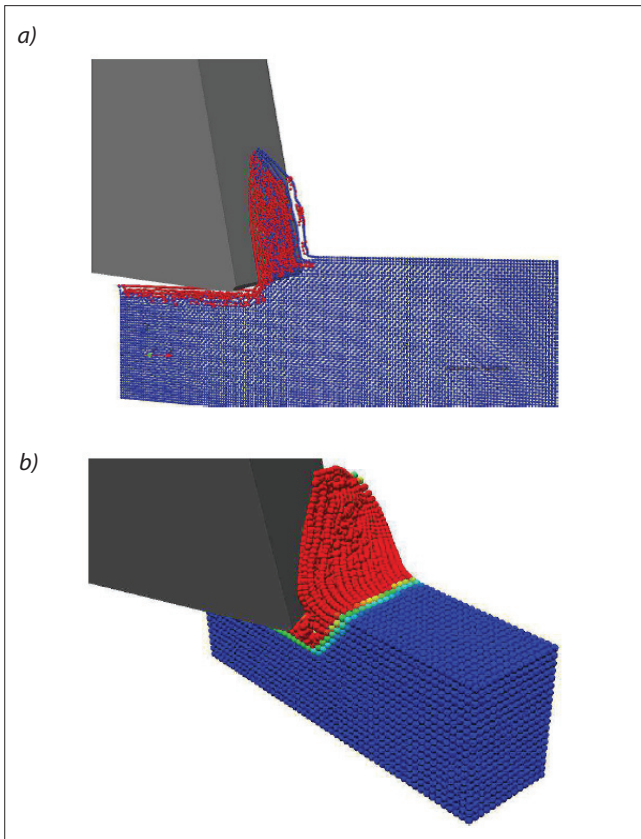


Fig. 8. Distributions of the effective von Mises stresses in: a) orthogonal machining and b) oblique machining determined by using SPH model [30]

Rys. 8. Rozkłady naprężeń zredukowanych von Misesa w skrawaniu: a) ortogonalnym i ukośnym, b) uzyskane z modelu SPH [30]

### Symulacja termiczna i ewolucji zużycia

Omówiona wcześniej metoda TLSPH jest także przydatna do analiz termicznych w ten sposób, że rozkład temperatury wyznacza się na podstawie zgodności z rozkładem ekwiwalentnego stopnia odkształcenia plastycznego (*equivalent plastic strain*) [6, 13].

Na rys. 9 przedstawiono oryginalną koncepcję termomechanicznego modelu z dyskretyzacją SPH dla materiału i ostrza na potrzeby symulacji procesu skrawania ortogonalnego. Jak w wielu modelach tego typu narzędzie jest elementem doskonale sztywnym, a przedmiot elementem odkształcalnym. Przyjęto, że cząstki SPH nie są aktywne na kontaktowej stronie ostrza. W celu ujęcia wpływu ciepła w modelu początkowym (rys. 9a) rozwiązuje się odpowiednie równania opisujące generowanie ciepła w skrawaniu [6]. Dyskretyzacji przedmiotu cząstkami SPH (rys. 9b) dokonuje się na obszarze o długości 3 mm i szerokości równej co najmniej trzykrotnej grubości wióra. Parametr wygładzenia przyjęto  $h = 1,3\Delta x$  ( $\Delta x$  jest odległością między cząstkami).

Na rys. 10 przedstawiono wyznaczone błędy prognozy temperatury na powierzchni natarcia ( $T_{RF}$ ) i swobodnej powierzchni wióra ( $T_{FCS}$ ) w metodzie SPH i PEFM (*particle FEM* – stosująca technikę Lagrange'a do modelowania ruchu węzłów/cząstek) [18, 19] w skrawaniu ortogonalnym stali AISI 1045 (a) i stopu tytanu Ti6Al4V (b) dla grubości warstwy skrawanej  $h = 0,15$  mm w porównaniu z wartościami pomiarowymi. Zależą one od miejsca pomiaru, gatunku obra-

bianego materiału, grubości warstwy skrawanej ( $h$ ) oraz prędkości skrawania ( $v_c$ ) i są zawarte w granicach 20÷40% poza przypadkami małych prędkości. Zasadniczo prognozy temperatury na powierzchni natarcia są bardziej dokładne dla stali AISI 1045 niż dla stopu tytanu Ti6Al4V. Z kolei metoda SPH daje lepszą zgodność dla temperatury na swobodnej powierzchni wióra dla stopu tytanu.

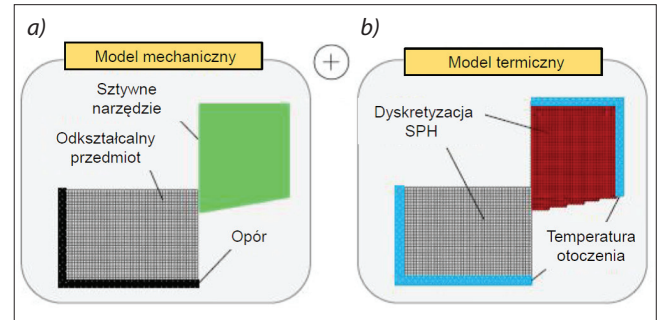


Fig. 9. Configuration of the thermomechanical SPH model: a) initial geometry and b) boundary conditions [17]

Rys. 9. Konfiguracja termomechanicznego modelu SPH: a) geometria początkowa i b) warunki brzegowe [17]

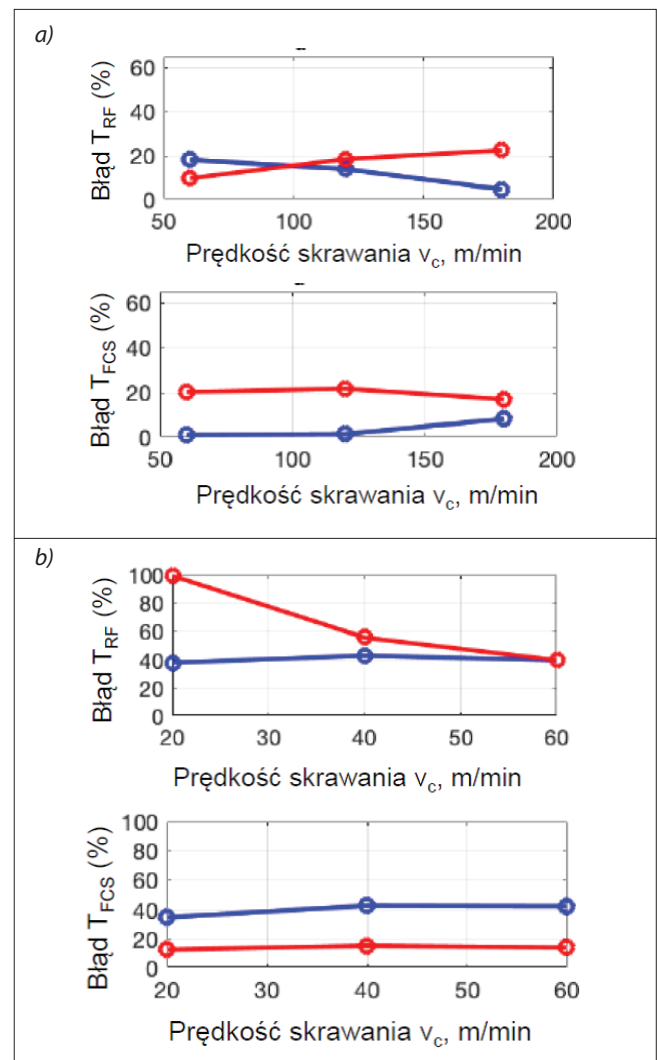


Fig. 10. Temperature prediction errors at the rake face and free chip surface by means of SPH and PEFM models in orthogonal machining of: a) AISI 1045 steel and b) titanium alloy Ti6Al4V [17]

Rys. 10. Błędy prognozy temperatury na powierzchni natarcia i swobodnej powierzchni wióra metodą SPH i PEFM w skrawaniu ortogonalnym: a) stali AISI 1045 i b) stopu tytanu Ti6Al4V [17]

Symulacja SPH okazała się przydatna do oceny zużycia zewnętrznej warstwy powłoki CVD- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$  o grubości  $4\div 8\ \mu\text{m}$  w skrawaniu stali o strukturze perlityczno-ferrytycznej w gatunku 45R (P75/F25) i 60R (P85/F15) [28]. Model SPH przedmiotu zawierał 18 000 SPH cząstek, co odpowiada gęstości  $4,5 \times 10^6$  cząstek/ $\text{cm}^3$ . Na rys. 11a przedstawiono prognozowany przyrost szerokości starcia wierzchniej powłoki, który dobrze koresponduje z badaniami SEM.

Z kolei w pracy [29] model przedmiotu (narzędzia) zawierał 419 000 cząstek SPH. Na rys. 11b przedstawiono prognozowane rozkłady warunków termomechanicznych i przekroje śladów zużycia na powierzchni natarcia ( $KT$ ) i przyłożenia ( $VB_B$ ) w chwili, gdy  $VB_B \approx 100\ \mu\text{m}$ . Można zaobserwować, że dopasowanie przebiegów pomiarów i prognozy nie są idealne, ponieważ uwzględniono zużycie wskutek tarcia, natomiast pominięto zużycie dyfuzyjne.

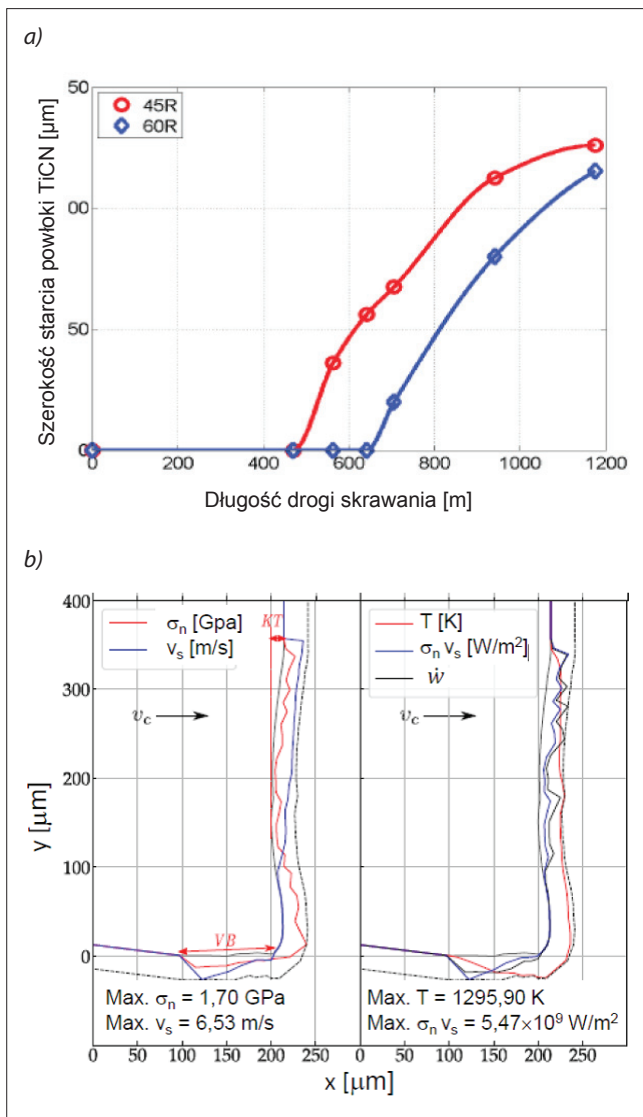


Fig. 11. Progress of the width of exposed TiCN coating as a function of the cutting length [28] (a) and simulated thermo-mechanical conditions and wear rates on the tool-chip and tool-workpiece contacts [29] (b)

Rys. 11. Przyrost szerokości powłoki TiCN w funkcji drogi skrawania [28] (a) i prognoza rozkładu termomechanicznych warunków i stopnia zużycia na powierzchni kontaktu wiór-ostrze i ostrze-przedmiot [29] (b)

## Symulacja obróbki ścierniej i hybrydowej wspomaganiej ściernie

Symulacja procesu obróbki ścierniej sprowadza się do wykorzystania wyników próby skrawania ortogonalnego (2D) i testu zarysowania (*scratch test*) (3D), a następnie modelowania śladu zarysowania (rowka i wypływek bocznych) [22] z zastosowaniem metod PFEM (*particle FEM method*) i SPH [23]. Dyskretyzację takich modeli ilustruje rys. 12a. Zastosowano cząstki o średnicy  $d_p = 3\ \mu\text{m}$  i takie same elementy siatki FEM w porównawczej metodzie ALE. Symulację przeprowadzono w pakiecie ABAQUS Explicit 2019.

Na rys. 13 zaprezentowano porównanie rozkładów naprężeń zredukowanych (a) i wartości siły skrawania (a) z użyciem metod siatkowych i bezsiatkowych. Wyniki dotyczą testu zarysowania pojedynczym ostrzem (ziarnem) (*single grit scratch test*) stożkowym o kącie rozwarcia  $105^\circ$  z głębokością  $a_p = 50\ \mu\text{m}$ . Na rys. 13b widać wyraźnie, że niedoszacowanie wartości sił składowych sięga nawet  $40\div 60\%$ . Z kolei klasyczne metody siatkowe dają wyniki rozbieżne z pomiarami o około 10%. Świadczy to bez wątpienia o tym, że wyników testu zarysowania nie można odnosić do modeli 2D.

W artykule [24] zaprezentowano pakiet do symulacji metodą SPH o nazwie iMFREE, który oprócz symulacji typowego skrawania ortogonalnego można także zastosować do szlifowania pojedynczym ziarnem i wieloma ziarnami stopu tytanu Ti6Al4V oraz węgla krzemu SiC. Na rys. 14a pokazano wynik symulacji równoczesnego skrawania pięcioma ziarnami stopu

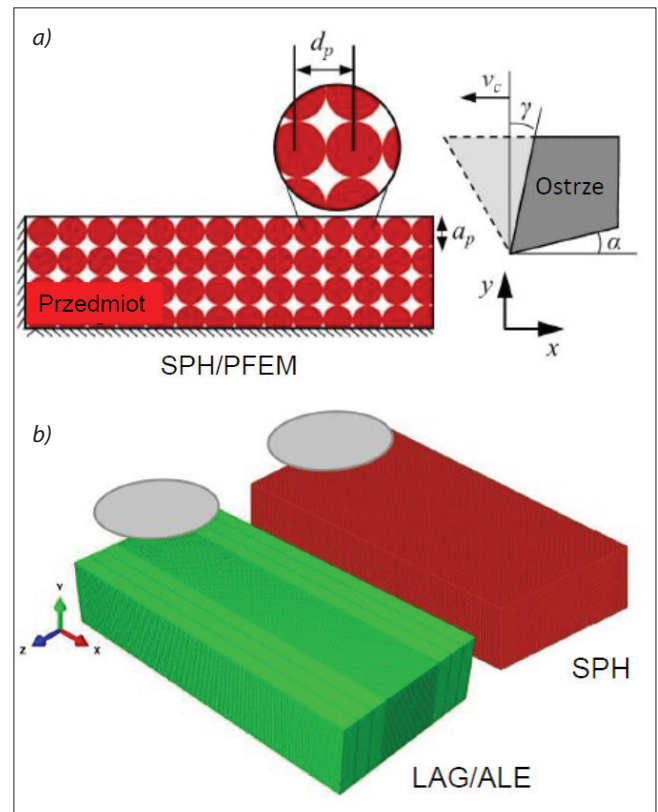


Fig. 12. Configuration and discretization of SPH/PFEM models in the analysis of orthogonal cutting (a) and scratch test (b) [23]  
Rys. 12. Konfiguracja i dyskretyzacja modeli SPH/PFEM w analizie skrawania ortogonalnego (a) i testu zarysowania (b) [23]

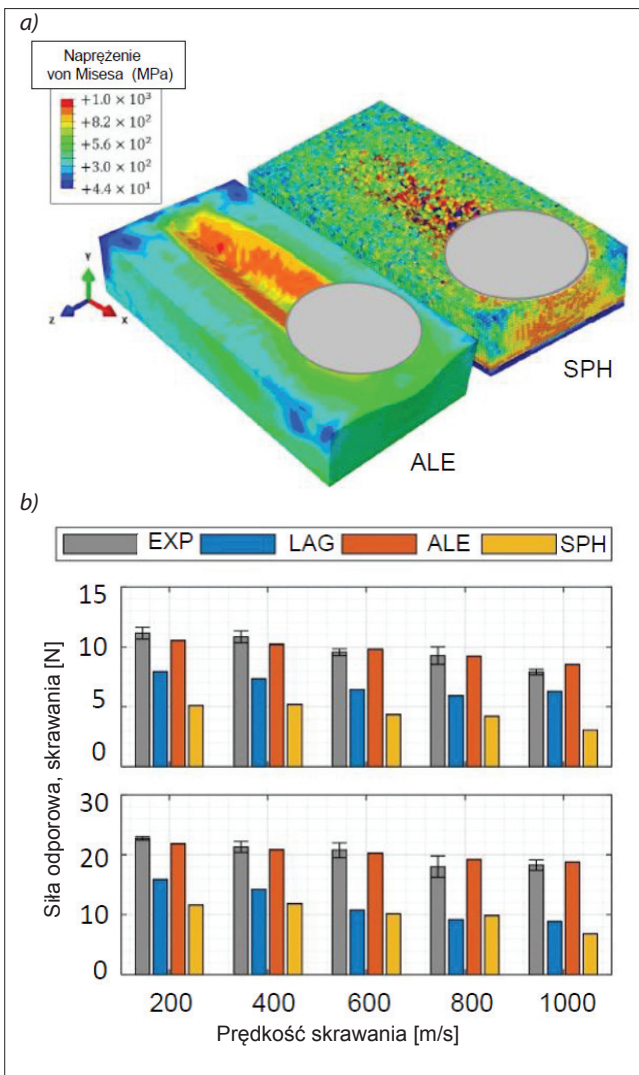


Fig. 13. Distribution of effective von Mises stress determined in ALE and SPH simulation methods (a) and predicted values of cutting forces (b) [23]

Rys. 13. Rozkład naprężeń zredukowanych von Misesa wyznaczonych w symulacji metodą ALE i SPH (a) oraz prognozowane wartości siły skrawania (b) [23]

tytanu Ti6Al4V (a), a na rys. 14b – ceramiki krzemowej z wizualizacją rozkładu naprężeń hydrostatycznych i śladów zarysowania.

Udowodniono, że symulacja w pakiecie iMFREE jest realizowana 90 razy szybciej (normalna symulacja trwa 90 godzin) i dobrze odwzorowuje interakcję sąsiednich ziaren w ściernicy w realnym procesie z bardzo dużą rozdzielczością (rys. 14a). Z kolei na rys. 14b przedstawiono symulację 3D skrawania ziarnem diamentowym w stanie plastycznym z wizualizacją rozkładu naprężeń hydrostatycznych i efektem powrotu sprężystego, który zmienia głębokość rysy po przejściu ziarna w porównaniu z zagłębieniem wstępnym równym 500  $\mu\text{m}$ .

W artykule [25] przedstawiono sposób zastosowania symulacji metodą SPH do analizy szlifowania jednym ziarnem dwóch dwufazowych materiałów ceramicznych – węgla spiekane WC-12%Co i ceramiki krzemowej w gatunku SiC/SiC wzmocnionej włóknami SiC w zakresie prognozowania siły normalnej. Rozpatrzono wpływ stanu ziarna ściernego, posuwu węgłnego i kierunku usytuowania włókien.

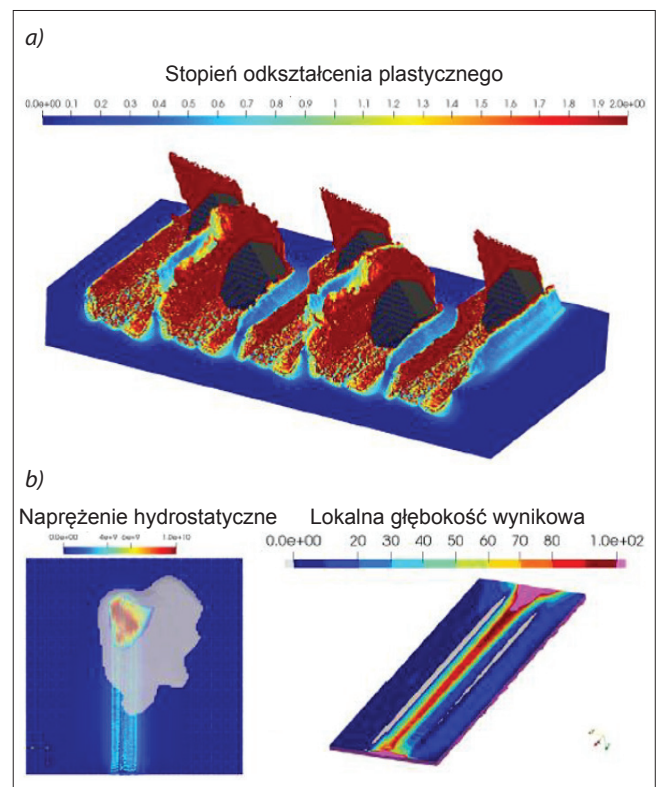


Fig. 14. Result of concurrent grinding with five diamond grains a) titanium alloy Ti6Al4V and b) silicon ceramics with visualization of hydrostatic stress and scratching grooves [24]

Rys. 14. Wynik symulacji równoczesnego szlifowania pięcioma ziarnami a) stopu tytanu Ti6Al4V i b) ceramiki krzemowej z wizualizacją rozkładu naprężeń hydrostatycznych i śladów zarysowania [24]

Na rys. 15a przedstawiono sposób modelowania struktury przedmiotu przez połączenie przestrzennego elementu z wydzielonymi pudełkami i elementarnych komórek (EC – *elementary cell*) wypełnionych cząstkami imitującymi włókna SiC, które są odległe od siebie o 2  $\mu\text{m}$ . W każdej komórce umieszczono 729 cząstek, co przy założonych wymiarach ceramicznego przedmiotu 16/16/6 (długość/szerokość/wysokość) EC daje sumaryczną liczbę cząstek równą 1 119 744 w symulacji zarysowania i prognozowania siły normalnej  $F_{s,n}$ . Podobnie jak w poprzednich przykładach wykazano duże rozbieżności wyników symulacji i pomiarów, zwłaszcza dla posuwu węgłnego powyżej 8  $\mu\text{m}$  (rys. 15b). Są one spowodowane zmianą geometrii ziarna wskutek zużycia, tj. w rzeczywistości ziarno nie jest ostre, ale w stanie częściowego zużycia (hybrydowe). W badaniach morfologii powierzchni zarysowania wydzielono obszary stanu plastycznego i kruchego [6].

Z uwagi na charakter procesu cięcia strugą wodno-ścierną jest bardzo dobrym przykładem zastosowania symulacji metodą SPH. Liczbę cząstek w modelu SPH zawiesziny wodno-ściernej ustalano na podstawie ich zawartości procentowej i prędkości strumienia masy. Przykładowo: model tworzą 2340 cząstek wody i 58 cząstek ściernych. Ich rozkład ustalano losowo jak na rys. 16a. Model przedmiotu o wymiarach  $30 \times 1 \times 55$  [mm] wykonano ze stali niskowęglowej. Ciśnienie strugi było równe 100 MPa. Rozwój rowka w czasie ilustruje rys. 16b. Symulację przeprowadzono w programie LS-Dyna.

Ze względu na długi czas symulacji lepszym rozwiązaniem jest połączenie metody SPH z DEM (*discrete element method*) [27], tak że dyskretyzacja strumienia wody i przedmiotu następuje z użyciem cząstek SPH, a każde ziarno ściernie jest modelowane jako cząstka DEM. Cząstki SPH i DEM są łączone na podstawie obliczanych sił interakcji między tymi fazami i odniesione do lokalnej porowatości strumienia wodno-ściernego. Podstawowym aspektem jest symulacja pojedynczego uderzenia strugi wodno-ściernej o swobodną powierzchnię ciała stałego. W rezultacie przedstawiono wizualizację ewolucji uderzenia strugi wodno-ściernej o swobodną powierzchnię elementu z miedzi OFHC z widocznymi odkształceniami plastycznymi i niewielkimi lokalnymi wgłębieniami (mikrokraterami). Symulację przeprowadzono w 60 000 krokach czasowych w czasie 840 s [27].

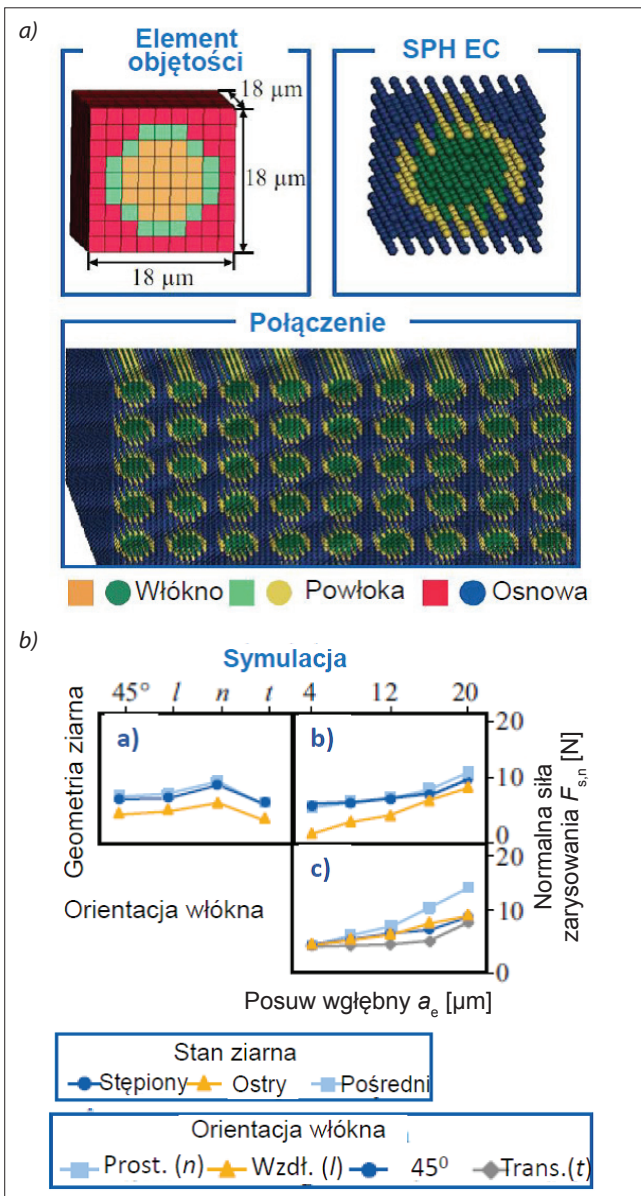


Fig. 15. SPH modelling and discretization of SiC/SiC ceramics (a) and influence of grain geometry, infeed and fibre orientation on the value of scratching normal force (b) [25]  
Rys. 15. Sposób modelowania SPH i dyskretyzacji ceramiki SiC/SiC (a) i wpływ geometrii ziarna ściernego, posuwu wgłębny oraz orientacji włókien na wartość siły normalnej (b) [25]

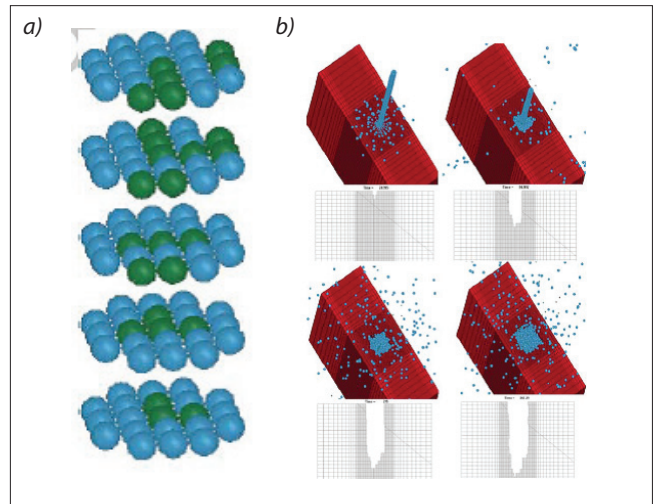


Fig. 16. Distribution of the abrasive and water SPH particles (a) and simulation of the cross-section evolution at different time intervals [26]  
Rys. 16. Rozkład cząstek wody i ziaren ściernych w modelu SPH (a), symulacja ewolucji przekroju rowka (b) [26]

### Symulacja obróbki materiałów kompozytowych

Interesującym zastosowaniem sprzężonej metody SPH+FEM jest symulacja skrawania kompozytu CFRP (*carbon-fibre-reinforced plastic*), w której rozdzielono zniszczenie włókien węglowych i osnowy polimerowej (matrycy) [15]. W tym modelu oczka siatki

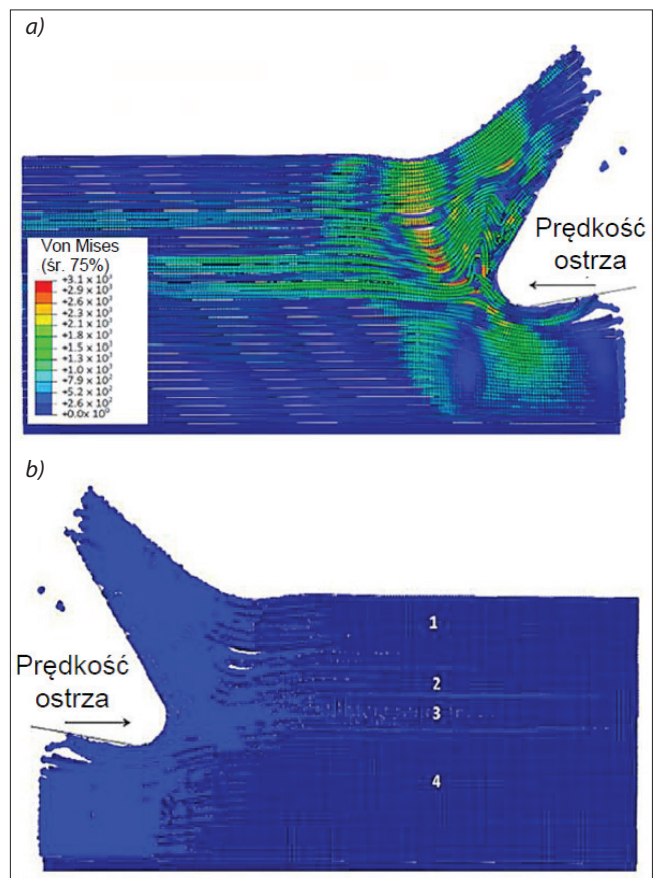


Fig. 17. SPH+FEM model configuration at  $2,85 \times 10^{-3}$  s for the fibre orientation and a matrix damage of  $D = 0,8$ : a) fibre section, b) matrix section [15]  
Rys. 17. Konfiguracja modelu SPH+FEM po czasie symulacji  $2,85 \times 10^{-3}$  s dla orientacji włókna  $0^\circ$  i parametru zniszczenia  $D = 0,8$ : a) sekcja włókna, b) sekcja osnowy [15]



rozmieszczono wzdłuż włókien, a w centrum każdego z nich ulokowano cząstkę SPH o średnicy 0,7  $\mu\text{m}$ , co powoduje, że staje się ona aktywna, jeśli zostanie zainicjowana dekohezja materiału.

Na rys. 17a można zaobserwować, że w czasie skrawania pojawia się pęknięcie, które przemieszcza się prostopadłe do krawędzi skrawającej w kierunku powierzchni przedmiotu. Taki efekt jest spowodowany kilkoma mechanizmami, a mianowicie, że inicjacja pęknięcia na czole ostrza jest wynikiem wybrzuszenia (wyboczenia) włókna, a jego propagacja następuje z powodu pęknięcia wskutek zgięcia. Model wskazuje, że materiał osnowy pod ostrzem podlega ścisaniu, prowadząc do widocznych odkształceń cząstek, które są wyciskane na zewnątrz. Podobnie jak w modelu FEM ma miejsce nagromadzenie (aglomeracja) rozerwanych włókien i cząstek osnowy, ale ten efekt jest bardziej widoczny. Obszar usytuowany na czole ostrza (rys. 17b) może być rozdzielony na cztery oddzielne wstęgi/pasma, z których pasma 1 i 4 doznają zginania włókien, a 2 i 3 zasadniczo podlegają wyboczeniu. Dodatkowo, wskutek ruchu ostrza, cząstki SPH gromadzą się wokół krawędzi skrawającej.

## Podsumowanie

Bezsiatkowe SPH lub hybrydowe metody symulacji (SPH-FEM, SPH-DEM) są perspektywnym narzędziem do rozwiązań numerycznych w procesach obróbki ubytkowej, m.in. tworzenia wióra, charakterystyki mechanicznej i termicznej strefy tworzenia wióra w skrawaniu i szlifowaniu, zużycia ostrza, oddziaływania ziaren ściernych i zawiesiny wodno-ścierniej w obróbce AWJM czy interakcji włókien w kompozytach typu CFRP. Przyczyniają się do uwzględnienia w symulacjach złożonych mechanizmów fizycznych oraz wizualizacji procesu 2D i 3D. Dostępne są moduły w popularnych pakietach symulacyjnych, np. LS-Dyna, lub programy autorskie, np. opisane w pracy [24]. W zamieszczonej literaturze można znaleźć szczegółowe opisy podstaw modelowania i zastosowane procedury.

## LITERATURA

- [1] Grzesik W. "Progress in modelling and simulation of the machining process – part I: Multiscale modeling" / „Postęp w modelowaniu i symulacji procesu skrawania – część I: Modelowanie wieloskalowe”. *Mechanik*. 3 (2024): 30–37, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.3.4>.
- [2] Zhang N., Klippel H., Afrasiabi M., Röthlin M., Kuffa M., Bambach M., Wegener K. „Hybrid SPH – FEM solver for metal cutting simulations on the GPU including thermal contact modelling”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 41 (2023): 311–327, <https://doi.org/10.1016/j.j.cirpj.2022.12.012>.
- [3] Yanagimoto J., Banabic D., Banu M., Madej L. “Simulation of metal forming. Visualization of invisible phenomena in the digital era”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 71 (2022): 599–622, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.007>.
- [4] Zhang Y., Jung Y-G, Zhang J. “*Multiscale modelling of additively manufactured metals*”. Elsevier (2020).
- [5] Rojek J. „Modelowanie i symulacja komputerowa złożonych zagadnień mechaniki nieliniowej metodami elementów skończonych i dyskretnych”. *Prace IPPT PAN*. 4 (2007), [https://rcin.org.pl/Content/67301/PDF/WA727\\_16636\\_4-2007\\_Rojek-Modelowanie.pdf](https://rcin.org.pl/Content/67301/PDF/WA727_16636_4-2007_Rojek-Modelowanie.pdf).
- [6] Grzesik W. „*Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*”. Warszawa: PWN (2018).
- [7] Orkisz J. „Dziś i jutro metod komputerowych mechaniki”, <https://kmech.pan.pl/images/stories/prezentacje/50lecieKM/metody%20komputerowe%20mechaniki.pdf> (dostęp: luty 2024).
- [8] Danielewicz A. „Metoda SPH+MES na przykładzie symulacji wzmocnienia podłoża gruntowego metodą wymiany dynamicznej”. *Rozprawy i Monografie PG*. Gdańsk: Politechnika Gdańska (2016).
- [9] Martinez H.V. “Practical comparison between the finite-element and mesh-free calculation methods in the analysis of machining simulations”. Fraunhofer IPA, <https://www.dynamore.de/de/download/papers/dynamore/de/download/papers/2014-ls-dyna-forum/documents/simulationsmethodik-ii/practical-comparison-between-the-finite-element-and-mesh-free-calculation-methods-in-the-analysis-of-machining-simulations> (dostęp: luty 2024).
- [10] Villumsen M.F., Fauerholdt T.B. “Simulation of metal cutting using Smooth Particles Hydrodynamics”. *LS-Dyna Anwenderforum*, Sektion Metallumformung III. Bamberg (2008).
- [11] Dehghani M., Shafiei A. “Replacing friction model with interaction between particles in analyzing orthogonal and rotational cutting processes using SPH method”. *Journal of Computational Applied Mechanics*. 52, 2 (2021): 297–306, <https://doi.org/10.22059/jcamech.2019.280356.390>.
- [12] Akarca S.S., Altenhof W.J., Alpas A.T. “A Smoothed-Particle Hydrodynamics (SPH) model for the machining of 1100 aluminium”. *10<sup>th</sup> International LS-Dyna<sup>®</sup> Users Conference*, Section Metal Forming. 3 (2008): 12.1–12.8, <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2008/MetalForming3-1.pdf>.
- [13] Islam R.I., Bansal A., Peng Ch. “Numerical simulation of metal machining process with Eulerian and Total Lagrangian SPH”. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 117, 5 (2020): 269–283, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.05.007>.
- [14] Ojal N., Cherukuri H.P., Schmitz T.L., Jaycox A.W. “A comparison of smoothed particle hydrodynamics (SPH) and coupled SPH-FEM methods for modeling machining”. *Proceedings of the ASME 2020 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2020-24646* (2020), <https://doi.org/10.3390/jmmp6020033>.
- [15] Abena A., Ataya S., Hassanin H., El-Sayed M.A., Ahmadein M., Alsaleh N.A., Ahmed M.Z., Essa K. “Hybrid Finite Element-Smoothed Particle Hydrodynamics Modelling for Optimizing Cutting Parameters in CFRP Composites”. *Polymers*. 15, 2789 (2023), <https://doi.org/10.3390/polym15132789>.
- [16] Nguyen T.T., Hojny M. “Application of Smoothed Particle Hydrodynamics Method in Metal Processing: An Overview”. *Archives of Foundry Engineering*. 2022, 3 (2022), <https://doi.org/10.24425/afe.2022.140238>.
- [17] Prieto J.M.R., Larsson S., Afrasiabi M. “Thermomechanical Simulation of Orthogonal Metal Cutting with PFEM and SPH Using a Temperature-Dependent Friction Coefficient: A Comparative Study”. *Materials*. 16, 3702 (2023), <https://doi.org/10.3390/ma16103702>.

- [18] Limido J., Espinosa C., Salaun M., Lacomme J.L. "SPH method to high speed cutting modelling". *Int. J. Mechanical Sciences*. 49 (2007): 898-908, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.11.005>.
- [19] Markopoulos A.P., Karkalos N.E., Papazoglou E.-L. "Meshless methods for the simulation of machining and micro-machining: A review". *Archives of Computational Methods in Engineering*. 27 (2020): 831-853, <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09333-z>.
- [20] Fraser K.A., St-Georges L., Kiss L.I., Chiricota Y. "Hybrid Thermo-Mechanical Contact Algorithm for 3D SPH-FEM Multi-Physics Simulations". *IV International Conference on Particle-Based Methods – Fundamentals and Applications – Particles 2015*. E. Oñate, M. Bischoff, D.R.J. Owen, P. Wriggers & T. Zohdi (Eds). Barcelona (2015).
- [21] Klippel H., Sanchez E.G., Isabel M., Röthlin M., Afrasiabi M., Kuffa M., Wegener K. "Cutting force prediction of ti6al4v using a machine learning model of SPH orthogonal cutting process simulations". *Journal of Machine Engineering*. 22, 1 (2022): 111-123, <https://doi.org/10.36897/jme/147201>.
- [22] Grzesik W., Żak K., Tomkiewicz-Zawada A. *Analiza i modelowanie powierzchni wytwarzanych w obróbce ubytkowej*. Warszawa: PWN (2023).
- [23] Sridhar P., Prieto J.M., de Payerebrune K.M. "Modeling grinding processes – mesh or mesh-free methods, 2D or 3D approach?". *J. Manuf. Mater. Proc.* 6, 120 (2022), <https://doi.org/10.3390/jmmp60500120>.
- [24] Klippel H., Zhang N., Kuffa M., Afrasiabi M., Bambach M., Wegener K. "iMFREE: A versatile software tool for modelling machining process with particle methods". *Procedia CIRP*. 117 (2023): 13-19, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.004>.
- [25] Dehmer A., Prinz S., Breurer P., Barth S., Bergs T. "Simulation of machining behaviour of two-phase brittle materials during grinding by modelling single-grain scratching using a combination of FE and SPH methods". *Int. J. Advance Manufacturing Technology*. 128 (2023): 1709-1723, <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12006-8>.
- [26] Shahverdi H., Zohoor M., Mousavi S.M. "Numerical simulation of abrasive water jet cutting process using the SPH and ALE methods" *Int. J. Advanced Design and Manufacturing Technology*. 5/1 (2011): 43-50.
- [27] Yu R., Dong X., Li Z. "A coupled SPH-DEM model for the simulation of abrasive water-jet impacting solid surface". ICCM Conferences. *The 13<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods (ICCM2022)*. *Computational Practice Mechanics*. 10 (2023): 1093-1112, <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00555-4>.
- [28] Stenberg N., Delic A., Björk T. "Using the SPH method to easier predict wear in machining". *Procedia CIRP*, 58 (2017): 317-322, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.234>.
- [29] Zhang N., Klippel H., Kneubühler F., Afrasiabi M., Röthlin M., Kuffa M., Bambach M., Wegener K. "Study on the effect of wear models in tool wear simulation using hybrid SPH-FEM method". *Procedia CIRP*. 117 (2023), 414-419, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.070>.
- [30] Spreng F., Eberhard P. „Machining process simulations with Smoothed Particle Hydrodynamics". *Procedia CIRP*. 31 (2015): 94-99, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.073>. ■