

Media-assisted machining processes using nano-fluids. Part 1: Properties and mechanisms of nano-fluids interaction

Hybrydowe procesy skrawania wspomagane nanocieczami. Część 1: Właściwości i mechanizmy oddziaływania nanocieczy

WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2021.2.3>

The comprehensive knowledge of the applications of nano-fluids for hybrid machining processes assisted by liquid media, which, in general, are applied in MQL systems is presented. In the first part of the article properties of nano-additives, which are added to base cutting fluids (such as vegetable and mineral oils and emulsion), and their influence on the performance of machining processes are outlined. The tribological mechanisms including rolling and plowing of the nano-particles in the contact zones, as well as resulting thermal influences are characterized. In the second part of the article, some practical examples of the possible influences of different nano-fluids on the cutting temperature, tool wear and tool life, surface roughness and surface quality will be provided and discussed. It was concluded that nano-fluids with graphene and carbon nanotubes additives are very effective in improving process behaviour. **KEYWORDS:** nano-particles, nano-fluids, MQL, machining, grinding

Przedstawiono zwięzłe informacje na temat zastosowania nanocieczy do wspomaganie hybrydowych procesów skrawania mediami ciekłymi, które zasadniczo znalazły zastosowanie w minimalnym smarowaniu/chłodzeniu MQL. W pierwszej części artykułu omówiono właściwości dodawanych do cieczy bazowych (olejów roślinnych i mineralnych oraz emulsji) nanocząstek i ich wpływ na przebieg procesu skrawania. Scharakteryzowano mechanizmy tribologiczne w strefie kontaktu i pochodne oddziaływania termiczne. W drugiej części artykułu zostaną opisane praktyczne przykłady wpływu nanocieczy na temperaturę skrawania, przebieg zużycia i trwałość ostrza oraz chropowatość i jakość powierzchni. Wykazano dużą efektywność zastosowania nanocieczy z dodatkami grafenu i nanorurek. **SŁOWA KLUCZOWE:** nanocząstki, nanocieczce, cieczce obróbkowe, MQL, skrawanie, szlifowanie

Wprowadzenie

Artykuł jest kontynuacją poprzednich publikacji autora w miesięczniku *Mechanik* [1, 2], poświęconych problematyce hybrydowych procesów obróbkowych z zastosowaniem różnych form i technik hybrydyzacji i ich znaczeniu w nowoczesnym przemyśle wytwórczym. Omówiono w nich m.in. metody wspomaganie procesu skrawania przez wprowadzenie dodatkowych mediów ciekłych, gazowych i stałych do strefy skrawania.

W tym artykule zwraca się uwagę na poprawę efektywności metod oszczędnego smarowania/chłodzenia (MQL/C) przez zastosowanie tzw. nanocieczy (*nano-fluids*). Badania nad tymi zagadnieniami są intensywnie prowadzone na świecie od ponad dekady, a ich rezultatem są liczne propozycje dodawania do bazowych cieczy obróbkowych (tj. emulsji, olejów roślinnych i mineralnych) nanocząstek metalicznych, niemetalicznych i ceramicznych.

Zasadę wytwarzania nanocieczy i ich wpływ na przebieg procesu skrawania przedstawiono na rys. 1.

Cząsteczki o wymiarach nanometrycznych są dodawane w odpowiedniej proporcji (koncentracji) do olejów mineralnych, roślinnych (kokosowego, sojowego, rzepakowego) i wody zdejonizowanej stosowanych jako chłodziwa w obróbce takich materiałów, jak: różne gatunki stali (utwardzone, odporne na korozję), trudno skrawalne stopy na osnowie z tytanu i niklu

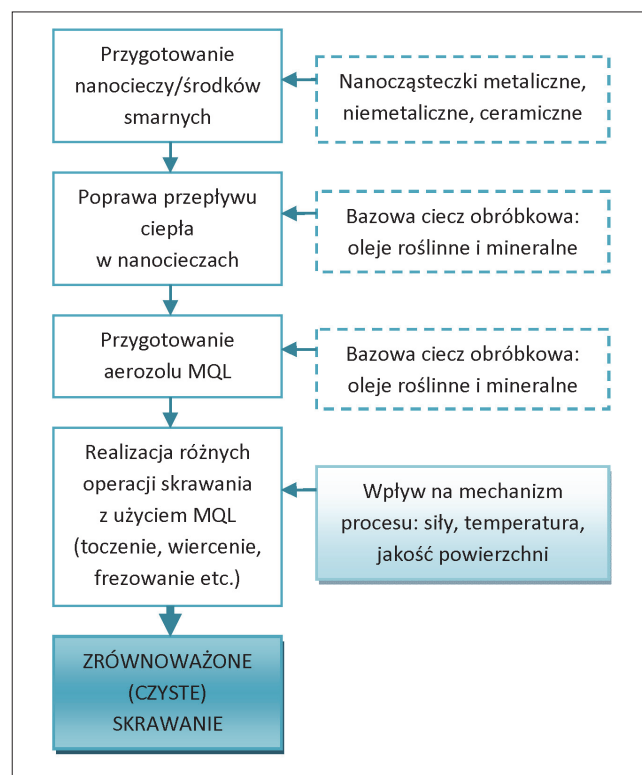


Fig. 1. Scheme of assessing the influence of nano-fluids on the performance of the MQL cutting process according to the concept [3]
Rys. 1. Schemat oceny wpływu nanocieczy na przebieg procesu skrawania metodą MQL według koncepcji [3]

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik, w.grzesik@po.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Opolskiej, Opole, Polska

czy materiały kompozytowe. Wśród nanocząsteczek zastosowanie jako dodatki do cieczy obróbkowych (*cutting fluids* – CFs) znalazły liczne tlenki metali (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_3O_4 , ZnO i CuO) o wymiarze cząstki 30÷45 nm, grafen (nGr), nanorurki węglowe (*carbon nanotubes* – CNTs), diament (ND) i dwusiarczki molibdenu MoS_2 . Należy podkreślić, że dzięki zastosowaniu nanocieczy w metodzie MQL/C proces skrawania (rys. 1) czy szlifowania jest bardziej ekologiczny i zrównoważony.

Podstawową przesłanką stosowania nanocieczy obróbkowych jest korzystny wpływ dodanych i dokładnie wymieszanych nanocząstek na właściwości termo-fizyczne nanocieczy (głównie transfer ciepła), którego wynikiem jest redukcja tarcia i zużycia ostrza narzędzi. W ten sposób zwiększa się wydajność i niezawodność procesu [4]. Aby metoda MQL była efektywna, konieczne są cieczy o dużej przewodności cieplnej, zapewniające intensyfikację dyssypacji ciepła ze strefy skrawania. Z opublikowanych badań, np. [5], wynika, że nanociecze w systemie MQL mogą być stosowane w wielu operacjach skrawania, np. w toczeniu, wierceniu i frezowaniu, a także szlifowaniu. Jednakże pierwsze zastosowania nanocieczy dotyczą procesów mikroskrawania.

Charakterystyka nanocieczy

Według definicji [4, 6] nanociecz jest mieszaniną cieczy bazowej (BCF) i cząsteczek o nanowymiarach, które przyczyniają się do wzrostu konwekcyjnego transferu ciepła i polepszenia zwilżalności powierzchni w porównaniu z czystymi cieczami chłodząco-smarującymi (CCS). Nanociecze można także określić jako specjalnie wytworzoną koloidalną zawiesinę nanowypełniaczy w cieczy bazowej. Należy dodać, że nanociecz powstaje przez dyspersję metalicznych i niemetalicznych nanocząsteczek o typowym wymiarze ok. 100 nm w cieczy bazowej. Przygotowanie nanocieczy opisano m.in. w pracy [4].

Metodę MQL, w której stosuje się nanociecze, określa się jako MQL wspomaganą nanocieczą (*nano-fluid-assisted MQL* – NFAMQL) [7]. Wymiar nanocząstek jest uwarunkowany wielkością strefy skrawania w mikroobróbce, gdy typowy promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej wynosi 1÷2 μm , a głębokość skrawania jest rzędu 1 μm [8]. W rezultacie nanocząstki powinny wnikać do strefy kontaktu wiór-ostrze o tak minimalnych wymiarach.

W ostatnim czasie badania objęły nanorurki węglowe (CNTs) i cząstki grafenu (nGr), określane skrótowo jako GPL (*graphene platelets*), z uwagi na większe prawdopodobieństwo ich penetracji do strefy skrawania. Dzięki temu takie cechy wymiarowe jak grubość w nanoskali i długość w mikroskali w połączeniu ze zwiększoną przenikalnością cieplną (współczynnik przenikalności ciepła znacznie powyżej 1000 W/mK) powodują, że nanociecze mogą zmienić cieplne i tribologiczne warunki w strefie skrawania [8]. Ważnym parametrem jest jednak koncentracja nanocząstek dodawanych do cieczy bazowej, co pokazano na rys. 2.

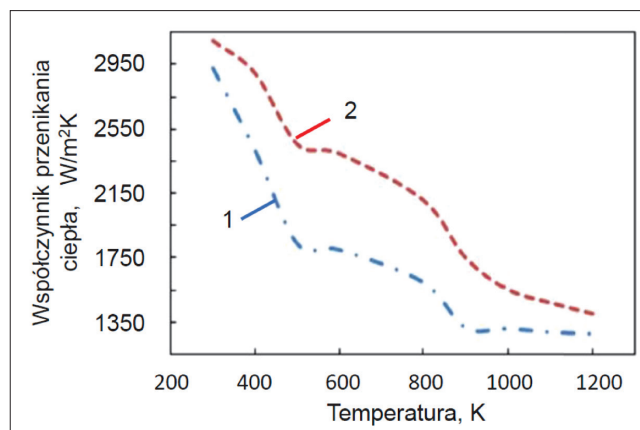


Fig. 2. Change of heat transmission coefficient as a function of temperature for different MWCNTs particle concentrations [9]. Markings: 1 – 2% wt, 2 – 4% wt

Rys. 2. Zmiana współczynnika przenikania ciepła w funkcji temperatury dla różnych koncentracji cząstek MWCNTs [9]. Oznaczenia: 1 – 2% wt, 2 – 4% wt

Na rys. 2 przedstawiono wyniki symulacji dynamiki przepływu dwufazowego strumienia nanocieczy z osłoną powietrza przeprowadzonej metodą CDF (*computation fluid dynamics*) dla dwóch koncentracji (2 i 4% wt) cząstek wielobocznych nanorurek węglowych (*multi-walled carbon nano-tubes* – MWCNTs). Należy dodać, że stosowane są także cząstki jednobocznych nanorurek węglowych (*single-walled carbon nano-tubes* – SWCNTs). Symulację przeprowadzono w zakresie temperatury 200÷1200 K. Widać, że rozkład zmian współczynnika przenikania ciepła w funkcji temperatury jest nieliniowy i jednocześnie zdecydowanie większy dla koncentracji MWCNTs w procentach wagowych równej 4% wt [9].

Na rys. 3 przedstawiono wpływ objętościowej koncentracji nanododatków w postaci nanocząstek o wymiarze 40 nm na intensywność zużycia i tarcie. Zwraca uwagę znaczący wzrost dodatkowego zużycia powierzchni, gdy koncentracja zwiększa się do ok. 4% vol. Zagadnienie to zostanie przybliżone w kolejnym rozdziale. Z kolei wzrost koncentracji nanocząstek powoduje zwiększenie czynnej powierzchni

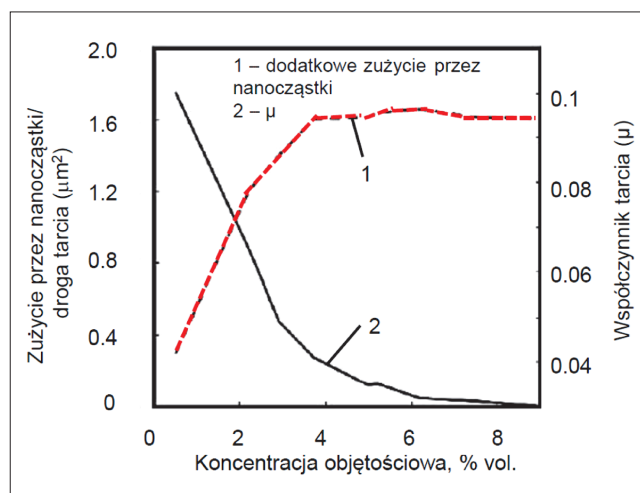


Fig. 3. Influence of the volumetric concentration of nano-additives on the wear intensity and friction [10]

Rys. 3. Wpływ objętościowej koncentracji nanododatków na intensywność zużycia i tarcie [10]

kontaktu (rys. 4b) i w rezultacie stopniową redukcję współczynnika tarcia (krzywa #2 na rys. 3). Jednakże wartość współczynnika tarcia w całym zakresie jest bardzo mała w porównaniu ze zwykłym chłodzeniem/smarowaniem. Opisany efekt tribologiczny oraz wspomniana wcześniej poprawa warunków transferu ciepła dowodzą, że koncentracja nanocząstek w cieczy bazowej musi być dobierana w zależności od warunków przebiegu procesu.

Mechanizmy wpływu nanocieczy na przebieg procesu skrawania

W przypadku stosowania nanocieczy w systemie MQL można wyróżnić dwa podstawowe mechanizmy oddziaływania na właściwości tribo-kontaktów w strefie wiór-ostrze [9, 11]. Przedstawiono je schematycznie na rys. 4.

Pierwszy mechanizm (MECH I), polegający na obrocie nanocząstek (*rolling mechanism*), przebiega w następujący sposób:

- Dokładna mieszanina (w postaci mgły) jest wytwarzana przez dodawanie i następnie rozdrabnianie nanocząstek pod wpływem powietrza przepływającego pod dużym ciśnieniem przez dyszę MQL (rys. 4a). Ten proces jest zwany rozpylaniem (*atomization*).
- Wytworzona zawiesina pełni rolę cienkiego filmu zbudowanego z nanocząsteczek, które mają zdolność wnikania do strefy wiór-ostrze, ponieważ ich prędkość jest większa od prędkości ruchu ostrza narzędzia. Następuje penetracja cząstek głównie do porów na powierzchni ostrza i mikrorowków na powierzchni obrobionej powstałych wskutek pęknięcia ziaren materiału.
- W czasie skrawania na powierzchnię ostrza narzędzia i powierzchnię obrobioną nanoszone są kropelki/drobinki nanocieczy. W rezultacie powstaje stabilny film, który w znaczący sposób redukuje i modyfikuje tarcie w strefie kontaktu.
- Jeśli koncentracja nanocząstek wzrasta, to rośnie również gęstość nanocieczy w strefie skrawania. W końcowej fazie takiego procesu nanocząstki i nano-

rurki działają jak nanorolki i w ten sposób redukują tarcie (rys. 4b).

Przebieg drugiego mechanizmu (MECH II) – bruzdowania (*plowing mechanism*) – jest następujący:

- Nanocząstki osadzają się bardzo intensywnie na powierzchni przedmiotu, ale z powodu dużych nacisków oprócz podstawowego wymuszonego obrotu są także wyrywane.
- Wzrost nacisków nanocząstek na powierzchnię w strefie kontaktu powoduje również zmianę ich kształtu i wywołuje raczej ich przemieszczanie się po powierzchni niż wspomniany obrót. Obserwuje się też zmywanie cząstek i następnie ich zabieranie przez dostarczaną świeżą porcję nanocieczy.
- W kolejnej fazie takie przemieszczające się nanocząstki ścinają inne cząstki, które zostają osadzone w powierzchni i w ten sposób duża liczba nowych cząstek gromadzi się w przestrzeniach między nierównościami powierzchni.
- Pojawia się nowe, osobliwe zjawisko, którego efektem jest szczelne pokrycie powierzchni nanocząstkami (*shielding effect*) zmieniającymi warunki dyssypacji ciepła. Następuje też zmiana warunków tarcia z elasto-hydrodynamicznego na graniczne.

Można więc jednoznacznie stwierdzić, że z jednej strony nanocząstki działają jak mikroskopijne elementy oddzielające kontaktujące się powierzchnie narzędzia i przedmiotu i ograniczające ścieranie mikrowystępów, ale z drugiej strony oderwane (swobodne) nanocząstki tworzą cienki złuszczonego filmu, który zabezpiecza przed nadmiernym przepływem ciepła do obrabianego przedmiotu.

Na rys. 5 przedstawiono eksperymentalną instalację MQL z zasilaniem nanocieczą przygotowaną w specjalnej komorze, która jest podłączona do pionowej frezarki CNC. Zastosowano komercyjny system MQL dostarczający nanociecz razem ze sprężonym powietrzem w postaci zawiesiny. Ustalono następujące optymalne warunki procesu:

- natężenie przepływu oleju roślinnego – 100 ml/h,
- kąt natrysku – 45°,
- ciśnienie mgły olejowej – 8 barów.

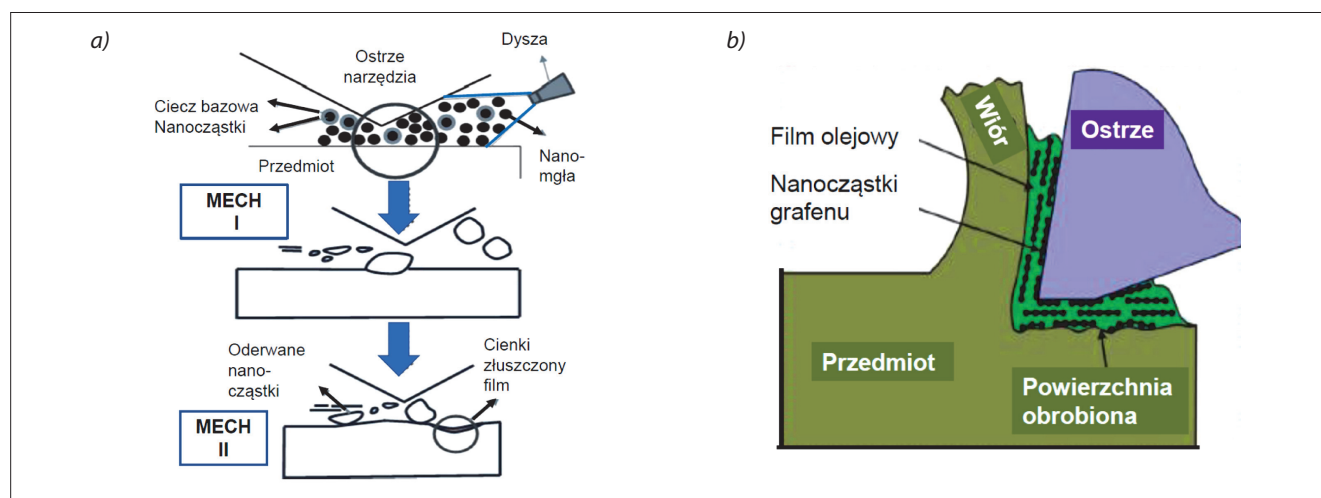


Fig. 4. Mechanisms of influence of nano-fluids in MQL lubrication (rolling and plowing) [9, 11] (a), illustration of the contact zone in the case of graphene-assisted MQL [12] (b)

Rys. 4. Mechanizmy wpływu nanocieczy w smarowaniu MQL (obrót i rowkowanie) [9, 11] (a), ilustracja strefy kontaktu w przypadku dodawania cząstek grafenu (*graphene-assisted MQL*) [12] (b)

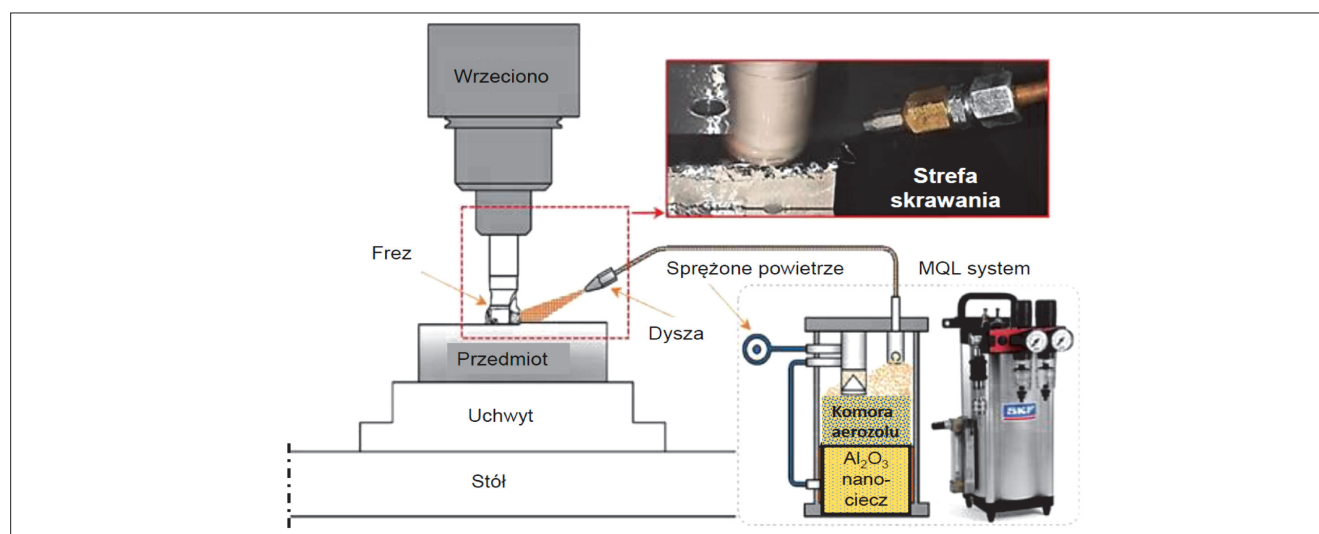


Fig. 5. Example of nano-fluid supplying with Al_2O_3 nano-particles in the case of MQL milling [13]

Rys. 5. Przykład zasilania nanocięczą z dodatkiem nanocząstek Al_2O_3 w przypadku frezowania z MQL [13]

W próbach frezowania stosowano następujące koncentracje nanocząstek Al_2O_3 – 0,5%; 1% i 1,5% vol. Procedurę przygotowania jednorodnej mieszaniny oleju i nanocząstek opisano w pracy [13]. Należy dodać, że do rozpylania nanocząstek stosuje się często piezoelektryczne wzbudniki drgań ultradźwiękowych (US).

Wnioski

Skrawanie wspomagane nanocięciami w systemie MQL (NFAMQL) poprawia przebieg procesu w takich ważnych aspektach, jak: temperatura kontaktowa, tarcie, zużycie i trwałość ostrza.

Nanocięcze poprawiają zwilżalność na powierzchniach kontaktowych ostrza i zwiększają przenikalność cieplną wskutek obecności zawiesiny o dużej przewodności cieplnej, co prowadzi do bardziej efektywnego odprowadzania ciepła w porównaniu z konwencjonalnymi CCS.

Można wyróżnić dwa podstawowe mechanizmy wpływu nanododatku do cieczy bazowych, tj. ich obrotu i przemieszczania się po powierzchni. Pierwszy mechanizm powoduje, że nanocząstki i nanorurki działają jako nanorolki i w ten sposób redukują tarcie w strefie kontaktu. W przypadku drugiego mechanizmu nanocząstki pozostają na powierzchni i tworzą cienką, złuszczoną warstwę zabezpieczającą przed przepływem ciepła do obrabianego przedmiotu.

Korzystne właściwości nanocięczy stosowanych w MQL sprawiają, że zrównoważoność procesu (*proces sustainability*) można wykazać nie tylko w odniesieniu do ochrony środowiska, ale także oszczędności energii oraz kosztów i czasu obróbki.

LITERATURA

- [1] Grzesik W. „Hybrydowe procesy obróbki ubytkowej. Definicje, zasady tworzenia i znaczenie w przemyśle”. *Mechanik*. 91, 5–6 (2018): 338–341, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.5-6.50>.
- [2] Grzesik W. „Hybrydowe procesy skrawania wspomagane mediami technologicznymi” (“Media-assisted machining processes”). *Mechanik*. 91, 12 (2018): 1050–1056, DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.186>.
- [3] Kulkarni H.B., Nadakatti M.M., Patil M.S., Kulkarni R.M. “A review on nanofluids for machining”. *Current Nanoscience*. 13, 6 (2017): <https://doi.org/10.2174/1573413713666170623094121>.
- [4] Sidik N., Samion S., Ghaderian J., Yazid M. “Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining. A review”. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 108 (2017): 79–89, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.105>.
- [5] Shokoohi Y., Shekarian E. “Application of nanofluids in machining processes – a review”. *J. Nanoscience and Technology*. 2 (2016): 59–63, https://www.researchgate.net/publication/325514175_Application_of_Nanofluids_in_Machining_Processes_-_A_Review.
- [6] Khandekar S., Sankar M., Ramkumar J. “Nano-cutting fluid for enhancement of metal cutting performance”. *Materials and Manufacturing Processes*. 27 (2012): 1–5, <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.610078>.
- [7] Gupta M., Jamil M., Wang X., Song Q., Liu Z., Mia M., et. al. “Performance evaluation of vegetable oil-based nano-cutting fluids in environmentally friendly machining of Inconel-800 alloy”. *Materials*. 12 (2019): 2702, <https://doi.org/10.3390/ma12172792>.
- [8] Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN, 2018.
- [9] Hegab H., Umer U., Esawi A., Kishawy H.A. “Tribological mechanisms of nano-cutting fluid minimum quantity lubrication: a comparative performance analysis model”. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 108 (2020): 3133–3139, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05450-3>.
- [10] Hegab H., Darras B., Kishawy H.A. “Sustainability assessment of machining with nano-cutting fluids”. *Procedia Manufacturing*. 26 (2018): 245–254, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.033>.
- [11] Hegab H., Kishawy H.A., Umer U., Mohany A. “A model for machining with nano-additives based minimum quantity lubrication”. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 102 (2019): 2013–2028, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03294-0>.
- [12] Li M., Yu T., Zhang R., Yang L., Li H., Wang W. “MQL milling of TC4 alloy by dispersing graphene into vegetable oil-based cutting fluid”. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 99 (2018): 1735–1753, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2576-7>.
- [13] Gúnan F., Kivak T., Yildirim C., Sarikaya M. “Performance evaluation of MQL with Al_2O_3 mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy”. *J. Materials Research and Technology*. 9, 5 (2020): 10386–10400, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.018>. ■