

Michał TOMALA<sup>1</sup>

Opiekun naukowy: Dorota WIĘCEK<sup>2</sup>, Paweł ZIOBRO<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.53052/9788366249844.21>

## **KLUCZOWE ELEMENTY KOMPLEMENTARNE W TECHNOLOGII MINIMALNEGO SMAROWANIA**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono czym jest technologia minimalnego smarowania (MQL) oraz czym różni się od tradycyjnego chłodzenia zalewowego. Ukazane zostały kluczowe składniki umożliwiające skuteczne wprowadzenie tej technologii w przedsiębiorstwie. Zaprezentowano kryteria doboru odpowiednich środków smarujących oraz charakterystyczne właściwości dotyczące budowy wybranego narzędzia skrawającego.

**Słowa kluczowe:** minimalne smarowanie, kluczowe składniki minimalnego smarowania, środki smarujące i narzędzia MQL

## **KEY COMPLEMENTARY ELEMENTS IN MINIMAL QUANTITY LUBRICATION**

**Summary:** The article presents what is the minimum quantity lubrication (MQL) and how it differs from traditional flood cooling. The key ingredients enabling the effective implementation of this technology in the enterprise are shown. The criteria for the selection of appropriate lubricants and the characteristic properties of the construction of the selected cutting tool are presented.

**Keywords:** minimum quantity lubrication, key components of minimum quantity lubrication, lubricants and tools in MQL

### **1. Wprowadzenie**

Smarowanie minimalną ilością (MQL) zdobyło sobie pozycję w dziedzinie obróbki skrawaniem i zostało już sprawdzone jako alternatywa dla konwencjonalnej obróbki

---

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Inżynieria zarządzania produkcją, [michaltomala10@interia.pl](mailto:michaltomala10@interia.pl)

<sup>2</sup> dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, [dwiecek@ath.bielsko.pl](mailto:dwiecek@ath.bielsko.pl)

<sup>3</sup> Właściciel firmy ZPT Paweł Ziobro, [pawel.ziobro@zp-team.pl](mailto:pawel.ziobro@zp-team.pl)

na mokro w wielu procesach. W przeciwieństwie do konwencjonalnych systemów mokrego smarowania, które zalewają przedmiot obrabiany dużymi ilościami krążących płynów obróbkowych, w smarowaniu minimalną ilością zużywa się kilka mililitrów środka smarującego na godzinę. Od początku XXI wieku korzyści techniczne, środowiskowe i ekonomiczne wynikające z zastosowania MQL przekonały wiele przedsiębiorstw produkcyjnych, począwszy od Niemiec i Japonii, do stopniowego przestawienia swoich procesów obróbkowych ze środków smarujących do obróbki metali z domieszką wody na środki dedykowane do MQL. Minimalne smarowanie stanowi dzisiaj nowy standard przemysłowy dla narzędzi z wewnętrznym systemem podawania środka smarującego i dla coraz większej liczby producentów w różnych krajach i branżach, takich jak przemysł motoryzacyjny, lotniczy i kosmiczny zapewniając produkcję złożonych części przy braku zanieczyszczenia środowiska i prawie na sucho. Technologia MQL opiera się na ciągłych dostawach bardzo małych ilości środka smarującego w postaci aerozolu do punktu skrawania. Podczas obróbki środek smarujący znacznie zmniejsza tarcie między wiórem a powierzchnią skrawającą, dzięki czemu generowana jest mniejsza ilość ciepła, które w dużej mierze jest rozpraszane przez wióry. Narzędzia kompatybilne z MQL ułatwiają szybkie usuwanie wiórów. W rezultacie żywotność narzędzia wzrasta, zwiększa się prędkość skrawania, poprawia się jakość powierzchni obrabianej i cały proces obróbki odbywa się w krótszym czasie i przy niższych kosztach [1].

## 2. Kluczowe składniki minimalnego smarowania (MQL)

Każde przedsiębiorstwo zainteresowane wprowadzeniem smarowania minimalną ilością zadaje sobie pytanie w jaki sposób może go wdrożyć w swoje procesy produkcyjne. W celu bezproblemowego wprowadzenia i realizacji smarowania minimalną ilością w procesach produkcyjnych niezbędne jest wcześniejsze posiadanie kompleksowych informacji na temat podstawowych elementów. Rysunek 1 przedstawia podstawowe elementy umożliwiające skuteczne wprowadzenie MQL [2].



Rysunek 1. Podstawowe elementy skutecznego wprowadzenia smarowania minimalną ilością [2]

Niezawodny proces obróbki jest osiągnięty, gdy środek smarujący, narzędzie, urządzenie dozujące i maszyna są przeznaczone do minimalnego smarowania i są do siebie optymalnie dostosowane [2].

### 3. Środki smarujące używane w minimalnym smarowaniu

Smarowanie minimalną ilością zaliczane jest do smarowania bezstratnego. Stosowany środek smarujący często podlega wysokim obciążeniom termicznym oraz mechanicznym i jest aplikowany do strefy roboczej w postaci aerozolu. Użytkownik powinien upewnić się, że używa tylko środków nieszkodliwych toksykologicznie. Do bezawaryjnej, niskoemisyjnej obróbki metali przy zastosowaniu smarowania minimalną ilością, najlepsze są te, które wykazują się bardzo dobrą smarownością i wysoką odpornością termiczną. W produkcji przemysłowej są używane syntetyczne oleje estrowe i alkohole tłuszczowe o korzystnych właściwościach parowania i wysokiej temperaturze zapłonu [2].

#### 3.1 Podział środków smarujących MQL

Estry syntetyczne są preferowane we wszystkich procesach, w których efekt smarowania między narzędziem, przedmiotem obrabianym a oddzielaniem się wiórow ma kluczowe znaczenie (zapobieganie zużyciu ściernemu). Przykładami tego są gwintowanie, wiercenie, rozwiercanie i toczenie. Estry syntetyczne mają tę zaletę, że pomimo niskiej lepkości mają wysoką temperaturę wrzenia i temperaturę zapłonu. Oznacza to, że w miejscu pracy emitowane jest znacznie mniej oparów w porównaniu do konwencjonalnych olejów mineralnych. Oprócz tych właściwości, oleje estrowe wykazują bardzo dobrą biodegradowalność, a ze względu na niską toksyczność zaliczane są do kategorii zanieczyszczenia wody 1 (WPC 1) [2]. Przez to, iż nanoszona ilość środka jest tak mała, części są nadal uważane za suche (tzn. mniej niż 2% środka smarnego jest obecne na wiórach) [3].

Alkohole tłuszczowe charakteryzują się mniejszą smarownością, ale ze względu na ich niższą temperaturę zapłonu, oferują lepsze chłodzenie. Są one przydatne, gdy chłodzenie jest cechą bardziej pożądaną niż smarowność. Taka sytuacja jest często spotykana w przypadku materiałów, które mają pewną naturalną smarowność. Jeśli nie można znaleźć odpowiedniej dawki przy użyciu syntetycznego estru, a na narzędziu tworzy się narost, alkohol tłuszczowy może wystarczająco pomóc w zapewnieniu dodatkowego chłodzenia. Alkohole tłuszczowe mają bardzo dobrą podatność na biodegradację oraz są nieszkodliwe pod względem toksykologicznym i środowiskowym. Alkohole tłuszczowe są również bardziej zużywane w procesie niż syntetyczne estry, więc części wychodzące z procesu charakteryzują się niewielką lub żadną pozostałością środka smarnego.

Może to być ważne, gdy na częściach będą wykonywane operacje wtórne [3]. Podstawowe różnice pomiędzy wymienionymi powyżej typami środków smarnych przedstawia tabela 1.

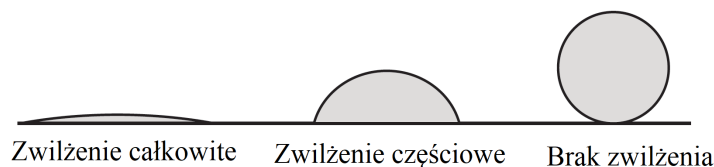
Tabela 1. Podstawowe różnice między estrami i alkoholami tłuszczowymi [2]

	Estry	Alkohole tłuszczowe
Waporyzacja (parowanie)*	wolna	szybka
Pozostałość na przedmiocie obrabianym	niska	"suchy"
Smarność	wysoka	niska
Temperatura zapłonu*	wysoki	niski
Kategoria zanieczyszczenia wody	nhw/1	nhw/1
* w oparciu o tę samą lepkość		

### 3.2 Kryteria doboru środków smarujących MQL

Doświadczenia wynikające z zastosowań przemysłowych pokazują, że wybór środka powinien być dostosowany do procesu i specyficzny dla danego zastosowania. Przy wyborze odpowiedniego środka, użytkownik powinien wziąć pod uwagę poniższe kryteria[2].

- Właściwości zwilżające. Im lepsze właściwości zwilżające, tym środek smarujący działa lepiej. Aerosol, który rozprzestrzenia się na powierzchniach skrawających, łatwiej dociera do przestrzeni między narzędziem a przedmiotem obrabianym. Zwilżenie (Rysunek 2) musi nastąpić zarówno na narzędziu jak i na obrabianym przedmiocie, dlatego należy wziąć pod uwagę oba materiały.

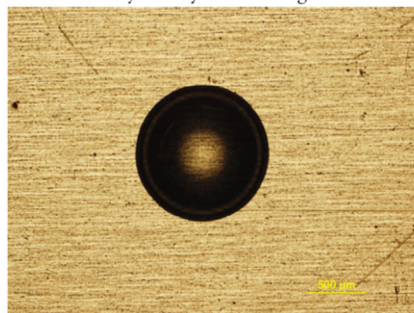


Rysunek 2. Stopnie zwilżenia

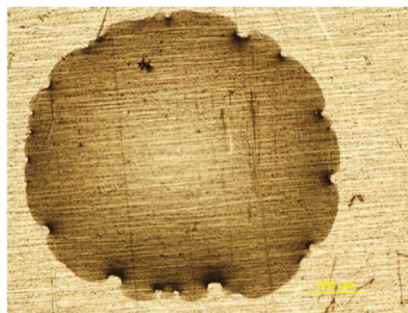
Szybkim sposobem na porównanie, jak płyn zachowa się na materiale jest naniesienie kropli płynu na materiał i sprawdzenie, jak dobrze się rozprowadza.

Im bardziej się rozprowadza, tym lepiej nawilża. Dodatki smarne typu EP, takie jak siarka, mogą znacznie zmienić właściwości zwilżające różnych materiałów, dlatego najlepiej jest przeprowadzić próbę z konkretnym płynem, który będzie używany. Na rysunku 3 zostało przedstawione nawilżenie stali nierdzewnej przy użyciu dwóch różnych płynów o tej samej wielkości kropli: wody i 2210 EP [3].

Photos courtesy of Wayne NP Hung



0.25 µL Woda



0.25 µL 2210 EP

Rysunek 3. Przykład zwilżenia powierzchni stali nierdzewnej[3]

- Zakres lepkości. Doświadczenie praktyczne pokazuje, że najlepsze wyniki z użyciem estrów lub alkoholi tłuszczowych osiąga się przy lepkości w zakresie od 15 do 50 mm<sup>2</sup>/s, a w niektórych przypadkach do 100 mm<sup>2</sup>/s w temperaturze 40 °C.

- Niska emisja środka smarującego. Orientacyjne wartości przydatne przy wyborze środka o niskiej emisji (tabela 2).

Tabela 2. Wartości orientacyjne przy wyborze niskoemisyjnego środka smarującego[2]

Lepkość w 40 °C DIN 51 562 część 1	Temperatura zapłonu CoC DIN EN ISO 2592	Straty w wyniku parowania w 250 °C wg. do Noacka DIN 51 581 część 1
> 10 mm <sup>2</sup> /s	> 150 °C	< 65 %

- Zdolność do rozpylania. Środek powinien łatwo się rozpryskiwać i, szczególnie w przypadku systemów jednokanałowych, być w stanie wytworzyć stabilny aerozol.

- Dodatki. Dodatki powinny być dostosowane do wymagań procesu, szczególnie przy obróbce metali nieżelaznych i trudnoskrawalnych stali.

- Pozostałości na częściach maszyn. Pomimo małych ilości rozpylanych środków smarujących i stosowania urządzeń odciągowych, mogą one pozostawać na obrabianych przedmiotach i częściach maszyn. Środek nie powinien „żywicować” i powinien być łatwy do usunięcia w razie potrzeby [2].

Wybór pomiędzy olejem estrowym a alkoholem tłuszczowym zależy od rodzaju procesów i obrabianych materiałów. Badania pokazują, że przy frezowaniu hartowanej stali przy niższych prędkościach, środek na bazie estrów okazał się lepszy niż alkohol tłuszczowy. Inaczej było przy wyższych prędkościach gdzie powstawał narost i zastosowanie alkoholu dało znacznie lepsze wyniki. Wybór powinien być dokonany w oparciu o materiał obrabiany, materiał pokrycia narzędzia skrawającego oraz prędkości posuwów procesu skrawania [3]. W tabeli 3 przedstawiono środki

smarujące, które są dostępne w ofercie jednej z firm zajmującej się produkcją jednokanałowych systemów przeznaczonych do smarowania minimalną ilością.

Tabela 3. Tabela środków smarujących MWM EMFLUID [4]

EMFLUID	Kod MWM Schmieranlagen	Baza	Przeznaczenie	Uwagi
BL-FA1	LWBLFA1	Alkohol tłuszczowy	Aluminium, żeliwo szare, mosiądz, tytan	ALUMINIUM-MOSIĄDZ-ŻELIWO-TI. Nie nadaje się do twardych metali. W porównaniu do FA2 ma niższą temperaturę zapłonu i dlatego jest bardziej lotny niż FA2.
BL-SE1	LWBLFSE1	Ester syntetyczny (z dodatkiem siarki)	Stal, stal stopowa, aluminium, tytan, mosiądz.	STAL. Nie nadaje się do twardych metali. Dyskretne parowanie, niska przyczepność.
BL-FA2	LWBLFA2	Alkohol tłuszczowy	Najbardziej uniwersalny. Aluminium, mosiądz, materiały żelazne, żeliwo szare, stale węglowe i ulepszone cieplnie, tytan	UNIWERSALNY Stosowany w produkcji na centrach obróbczych Przeznaczony do „bieżących” zastosowań, a nie szczególnie „wymagających”
BL-HD1	LWBLFHD1	Ester syntetyczny (z dodatkami EP i 16% siarki)	Trudne materiały/ trudna obróbka. Stal, stopy stali i twarde stale, żeliwa wysokostopowe.	TWARDE STALE Odpowiedni do twardych stali i ciężkiej obróbki (frezowanie, przecinanie, wiercenie).
BL-SE3	LWBLFSE3	Ester syntetyczny (bez dodatków, lekko lotny)	Stopy lekkie, aluminium	Specjalne zastosowania, które należy ocenić odpowiednio wcześniej

#### 4. Narzędzia używane w minimalnym smarowaniu

Narzędzie oraz jego odpowiednia budowa jest kolejnym istotnym elementem całego systemu. Narzędzia, które zostały wybrane w oparciu o warunki występujące w obróbce z użyciem tradycyjnego chłodziwa, mogą nie być najlepsze do stosowania w minimalnym smarowaniu. MQL opiera się na zmniejszonym wytwarzaniu się ciepła oraz jego szybkim odprowadzaniu przez wióry zamiast szybkiego chłodzenia

cieczą. Narzędzia kompatybilne z MQL powinny być zaprojektowane do pracy przy wyższych poziomach ciepła, a geometria narzędzia powinna być tak zoptymalizowana, aby odprowadzać wióry tak szybko jak to tylko możliwe. Jest to przeciwieństwo narzędzi zaprojektowanych do obróbki na mokro, które muszą być zoptymalizowane do utrzymania krawędzi skrawającej przy powtarzających się cyklach termicznych [3]. Profesjonalne podejście podczas projektowania narzędzi przeznaczonych do chłodzenia MQL, pozwala obecnie znacznie zwiększyć wydajność przy zachowaniu stabilności procesu obróbki. Dlatego też, wszystkie elementy narzędzi zapewniające efektywność i stabilność procesu obróbki, poczynając od jakości krawędzi skrawającej, poprzez rowek wiórowy, aż po końcówkę chwytu narzędzia są przystosowywane do specyficznych wymogów chłodzenia MQL. Oprócz rodzaju węgla, dotyczy to również specjalnej geometrii narzędzia, jego pokrycia oraz kształtu końcówki części chwytowej [5].

#### 4.1. Wpływ kąta natarcia na temperaturę

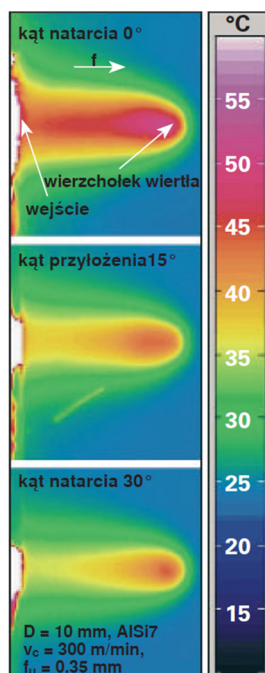
W celu sprawdzenia wpływu kąta natarcia na temperaturę, jedna z firm zajmująca się technologią minimalnego smarowania przeprowadziła testy wiercenia narzędziami o śr. 10 mm na głębokość 100 mm. Testowane narzędzia miały te same wymiary, jednakże różniły się kątem spirali rowków wiórowych a tym samym kątem natarcia. Narzędzia testowane miały odpowiednio: 0° (tj. z prostymi rowkami), 15° i 30° kąt natarcia. Średnica wewnętrznych kanałów chłodzących w narzędziach była identyczna. Używając kamery termowizyjnej dokumentowano w czasie rzeczywistym proces wytwarzania ciepła podczas obróbki otworu w stopie aluminium AlSi7. Materiał dostarczony do testów miał grubość 14,0 mm i był wiercony od czoła w taki sposób, że pozostająca ścianka pomiędzy czujnikiem termograficznym, a powierzchnią miała grubość 2,0 mm. Wykonując powyższy test było możliwe przeprowadzenie bardzo wiarygodnej analizy ilości ciepła generowanego przez poszczególne narzędzia testowe.

Obraz termowizyjny wierzchołka narzędzia (rysunek 4) wyraźnie pokazuje wpływ kąta natarcia na ilość wytwarzanego ciepła. Dodatni kąt natarcia powoduje generowanie wyraźnie niższej temperatury w strefie powstawania wióra, ponieważ narzędzie z kątem spirali 30° odgina wiór tylko o 60° (efekt ścinania ostrym ostrzem), podczas gdy w narzędziu z prostymi rowkami wiórowymi odchylany jest o kąt 90° (efekt ścinania tępym ostrzem).

Ciepło generowane w strefie tworzenia wiórów jest głównym ciepłem w procesie skrawania. Krótsze wióry przekazują do narzędzia mniej ciepła spowodowanego tarciem ze względu na mniejszą powierzchnię styku z rowkiem wiórowym, wpływając tym samym na poprawę warunków termicznych.

Przy parametrach skrawania:  $V_c = 300$  m/min i  $f = 0,35$  mm/obr., pojawiły się wyraźne różnice w ewakuacji wiórów i temperaturze skrawania. Ewakuacja wiórów, tj. warunki usuwania wiórów z otworu, poprawiały się kiedy wzrastał kąt spirali rowków wiórowych. Jest to głównie spowodowane dodatnim kątem natarcia i w efekcie lepszym łamaniem wiórów - krótsze wióry. Zapewnia to ich łatwiejszą ewakuację, zapobiega zakleszczaniu się ich w otworze, w wyniku czego uzyskujemy lepszą powierzchnię obrabianą. Lepszą ewakuację wióra, a w efekcie większą stabilność procesu obróbki, można uzyskać stosując również pokrycia najbardziej odpowiednie dla chłodzenia minimalną ilością. Jeden z producentów zajmujący się

technologią MQL opracował specjalne podwójne pokrycia, składające się z powłoki twardej oraz dodatkowej warstwy miękkiej. Skutkowało to znacznie szybszą ewakuację wiórów w narzędziach do obróbki MQL z podwójnym pokryciem w porównaniu do narzędzi konwencjonalnych [5].



Rysunek 4. Obraz termowizyjny narzędzi o różnej wartości kąta natarcia[5]

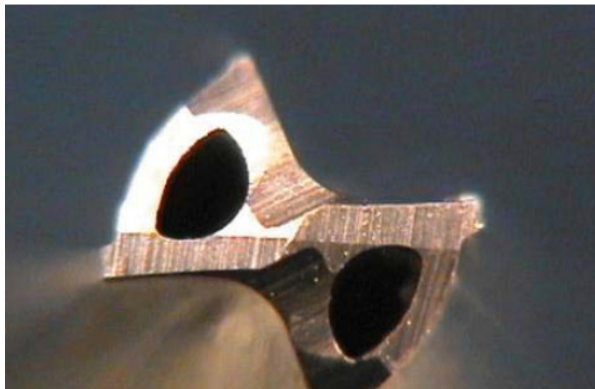
Dzięki wyraźnie lepszej ewakuacji wiórów i relatywnie niższej temperaturze procesu skrawania, narzędzia ze skrętnymi rowkami wiórowymi przyczyniają się do wzrostu stabilności procesu, przy zastosowaniu obróbki „na sucho” lub z chłodzeniem mgłą olejową (MQL). Jednakże, zastosowanie wiertel z prostymi rowkami wiórowymi może być korzystne podczas obróbki aluminium i materiałów odlewanych, gdzie wymagania dotyczące jakości otworu są wysokie (dokładny kształt i zmniejszone bicie). Dzieje się tak dlatego, że wiertła z prostymi rowkami wiórowymi posiadają cztery łysinki prowadzące. Ponadto, wzrost temperatury pracy w wiertłach z prostymi rowkami wiórowymi może zostać obniżony poprzez zoptymalizowanie kształtu kanałków chłodzących, tak aby niekorzystny rozkład temperatur w porównaniu do wiertel krętych był w znacznym stopniu skompensowany [5].

#### 4.2. Kanały smarujące w narzędziach MQL

Narzędzia użyte w technologii minimalnego smarowania muszą posiadać odpowiednią budowę. Optymalna średnica kanałów przepływu aerozolu wynosi na ogół 0,2-1,8 mm; w praktyce 0,5 - 2,2 mm. Otwory wylotowe aerozolu o większej średnicy (np. 3-4 mm) nie powodują optymalnego wzrostu prędkości przepływu (im



większy przekrój, tym mniejsza prędkość) i tym samym może to prowadzić do powstawania oleistej mgły wewnątrz narzędzia: przy mniej skutecznym smarowaniu i niepotrzebnym marnowaniu oleju. Przykłady: ostrze  $\varnothing 2$ , d 0,26 x 2; ostrze  $\varnothing 4$ , d 0,55 x 2; ostrze  $\varnothing 7$ , d 1,25 x 2; ostrze  $\varnothing 12$ , d 1,55 x 2; frez trzpieniowy  $\varnothing 8$ , d 1,2 x 4 [6]. Otwory smarujące (rysunek 5) powinny być zaprojektowane tak, aby jednorodnie pokrywały krawędź skrawającą i nie powodowały tworzenia się martwych punktów. Eliptyczny kanał zwiększający powierzchnię przekroju jest często pożądaną [3].



Rysunek 5. Eliptyczne kanały smarujące[2]

## 5. Podsumowanie

Technologia minimalnego smarowania staje się nowym standardem w środowisku przemysłowym aczkolwiek nadal jest zbyt mało docenianą alternatywą dla tradycyjnego chłodzenia zalewowego. Odpowiednie dopasowanie aparatury dozującej, narzędzia oraz środka smarującego pod dany proces umożliwia jego sprawne przeprowadzenie przy zachowaniu wysokiej jakości powierzchni obrabianej i niższych kosztach. Wybór środka smarującego zależy od kilku czynników, dlatego bardzo ważne jest określenie materiału obrabianego oraz dokładne prześledzenie warunków procesu. Optymalna budowa narzędzia przeznaczonego do minimalnego smarowania, dostosowana do rodzaju obróbki, obejmuje m.in.: właściwy kąt natarcia, odpowiedni kształt rowka wiórowego oraz jego pokrycie, właściwą średnicę kanałów smarujących. W celu właściwej implementacji technologii minimalnego smarowania wskazane jest korzystanie z wiedzy oraz doświadczenia przedsiębiorstw, które zajmują się tą technologią już od dłuższego czasu i posiadają cenną pozycję na rynku.

## LITERATURA

1. MWM Schmieranlagen. Minimum Quantity Lubrication technology for tools with internal feed, 29.05.2020.
2. DGUV: Minimum quantity lubrication for machining operations, DGUV 2010.
3. WALKER T.: The MQL Handbook, Unist, 2015.

4. Tabella riassuntiva oli MWM EMFLUID BL, 20.04.2021.
5. Sekcja techniczna. Gühring, 08.10.2008.
6. Materiały firmy MWM Schmieranlagen udostępnione 12.10.2021.