

Finishing processes of additively manufactured metallic parts

Wykańczające procesy wyrobów metalowych wytwarzanych technikami przyrostowymi

WIT GRZESIK
JOËL RECH*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.10.18>

This review paper highlights some important finishing processes used in fabricating additively manufactured metallic parts, mainly using SLM (selective laser melting). In practice, there are applied hybrid processes which integrate additive and subtractive componential processes (AM + SM type) or additional finishing processes, mainly based on the electrochemical polishing such as ECP (electrochemical cavitation polishing) and PEMEC (electrochemical-mechanical polishing) ones. For conformal cooling (CC) channels AFM (abrasive flow machining) is predominantly recommended. Some conclusions and future trends in the implementation of hybrid processes are outlined.

KEYWORDS: additive machining, conventional finishing, hybrid finishing, surface quality

W artykule dokonano przeglądu procesów wykańczającego kształtowania złożonych wyrobów metalowych wytwarzanych techniką przyrostową, głównie poprzez selektywne topienie laserowe (SLM). W praktyce stosuje się kombinację kształtowania przyrostowego i ubytkowego (AM + SM) lub dodatkową obróbkę wykańczającą złożonych geometrycznie wyrobów z użyciem procesów konwencjonalnych i hybrydowych w celu uzyskania żądanych jakości powierzchni i właściwości użytkowych, m.in. przetłaczanie ściernie (AFM) do wykańczania powierzchni zewnętrznych oraz polerowanie elektrochemiczne wspomagane ultradźwiękami (ECP) i polerowanie elektrochemiczno-mechaniczne (PEMEC) do wykańczania konforemnych układów chłodzących.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka przyrostowa, obróbka wykańczająca konwencjonalna, obróbka wykańczająca hybrydowa, jakość powierzchni

Wprowadzenie

Artykuł jest kontynuacją publikacji autora w *Mechaniku* [1] poświęconej integracji obróbki przyrostowej (addytywnej, ang. *additive manufacturing* – AM) i końcowej/wykańczającej obróbki skrawaniem (subtraktywnej) wraz z automatyczną kontrolą wymiarową. Obróbka addytywna jest zwykle określana terminem „drukowanie 3D” (ang. *3D printing*).

Jak pokazano na rys. 1a, obróbka przyrostowa zapewnia uzyskanie dużej złożoności kształtu, ale jest mało wydajna. Z kolei obróbka hybrydowa w wariacie (AM + SM) jest kompromisem między dużą złożonością konstrukcji wyrobu, właściwą dla kształtowania przyrostowego, i dużą produktywnością uzyskiwaną w obróbce CNC. Z tych względów do uzyskania odpowiedniej jakości powierzchni elementów wytwarzanych przyrostowo, np. przez selektywne topienie laserowe (SLM – ang. *selective laser melting*), niezbędne jest przeprowadzenie kolejnej obróbki wykańczającej w trybie *post-process*.

Jak wynika z rys. 1b, na powierzchni części pozostają wyraźne nierówności – określane jako schodkowatość [2], o wielkości zależnej od wydajności procesu, czyli

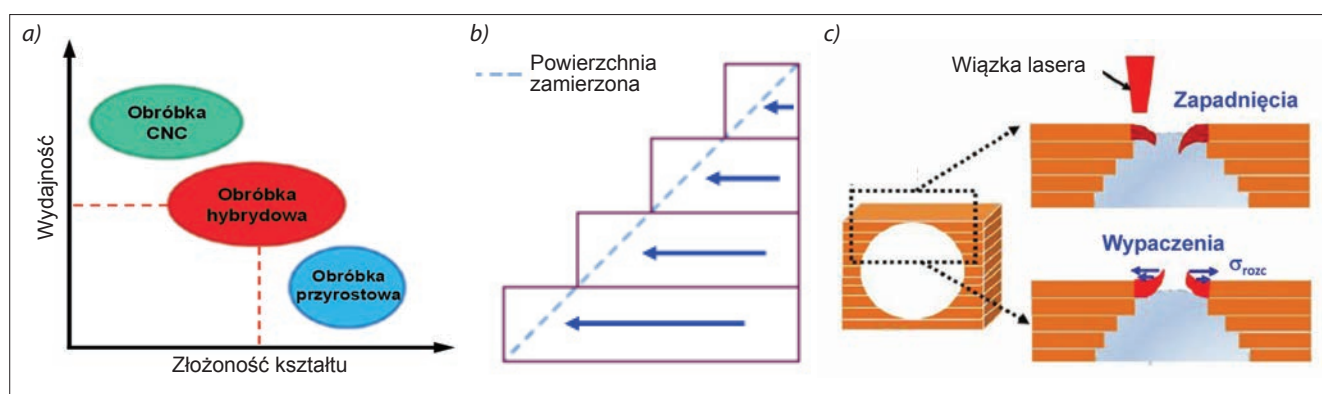


Fig. 1. Characteristic features of manufacturing processes (a), external surface state after additive shaping (b), defects in LPBF fabricating of cooling channels (c) [1, 3, 12]

Rys.1. Cechy procesów wytwarzania (a), stan powierzchni zewnętrznej po obróbce przyrostowej (b) i defekty występujące w wytwarzaniu kanałów chłodzących metodą LPBF (c) [1, 3, 12]

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik, em. prof. zw. Politechniki Opolskiej – wge103@wp.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Opole, Polska
Prof. DSc Eng. Joel Rech – joel.rech@enise.fr, <https://orcid.org/0000-0002-8433-5566> – University of Lyon – ENISE, France

grubości nakładanej warstwy. Z praktyki wiadomo [3], że chropowatość powierzchni wewnętrznych kanalików chłodzących w formach wtryskowych z konforemnym systemem chłodzenia [11, 12] (rys. 1c) jest w takich przypadkach większa od $Ra = 10 \mu\text{m}$, a wymagania użytkowe powodują konieczność jej zmniejszenia nawet do $1 \mu\text{m}$. Obok wygładzania powierzchni, istotnym efektem jest wprowadzanie w warstwie podpowierzchniowej ścisających naprężeń własnych, które spowalniają propagację pęknięć zmęczeniowych [8].

Ważnym czynnikiem jest radykalne zmniejszenie odpadów, co wiąże się nierozdzielnie z minimalizacją nadmiaru na wykańczającą obróbkę ścierną lub hybrydową. Należy dodać, że w przypadku kształtowania złożonych elementów monolitycznych z aluminium i tytanu w lotnictwie usuwa się nawet do $80 \div 90\%$ objętości materiału wyjściowego [4].

Wraz z rozwojem wytwarzania części metodami addytywnymi pojawiają się propozycje zastosowania metod obróbki wykańczającej – tak konwencjonalnych, np.: toczenia, frezowania i polerowania mechanicznego, jak i niekonwencjonalnych/hybrydowych, np.: wytrawiania chemicznego, tribo-finiżu, polerowania laserowego, elektro-polerowania, ultradźwiękowego kawitacyjnego wygładzania ściernego, wygładzania wspomaganego polem magnetycznym i nagniatania kulkowego [3, 5, 11, 12]. W fazie wdrożenia jest hybrydowy proces polerowania elektrochemiczno-mechanicznego (PEMEC – *electrochemical-mechanical polishing*), który łączy ścierny mechanizm oddziaływania kształtek ściernych w pojemniku z dodatkowym roztworzeniem elektrochemicznym [7]. Jest rozszerzeniem procesu polepowania elektrochemicznego (*electrochemical polishing*) [5]. Z kolei ze względu na niemożliwość zastosowania tych metod do wykańczania powierzchni wewnętrznych i wnęk rozwija się metodę przetłaczania ściernego (AFM – *abrasive flow machining*) [3, 6]. Ponieważ metody konwencjonalne i hybrydowe są opisane w książkach [2, 4] i licznych artykułach tematycznych (wykazy literatury w poz. [3, 6, 7]), w niniejszym opracowaniu autorzy przybliżą najbardziej efektywne – ich zdaniem – metody wykańczającej obróbki powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych części kształtowanych przyrostowo metodą SLM.

Wykańczająca obróbka powierzchni zewnętrznych metodą polerowania elektrochemicznego wspomaganego energią drgań US (ECP/USAACP) i elektrochemiczno-mechanicznego (PEMEC)

Zasada i kinematyka procesu PEMEC oraz zastosowane urządzenie zostały przedstawione na rys. 2. W eksperymentalnym urządzeniu (rys. 2b) zbiornik z mieszaniną elektrolitu i kształtek ściernych wiruje z prędkością ω_1 , a wrzeczono z zamocowanym przedmiotem wiruje w tym samym kierunku z prędkością ω_2 (odpowiednio 0,5 i ok. 500 l/min). W rezultacie powstaje duża prędkość względna

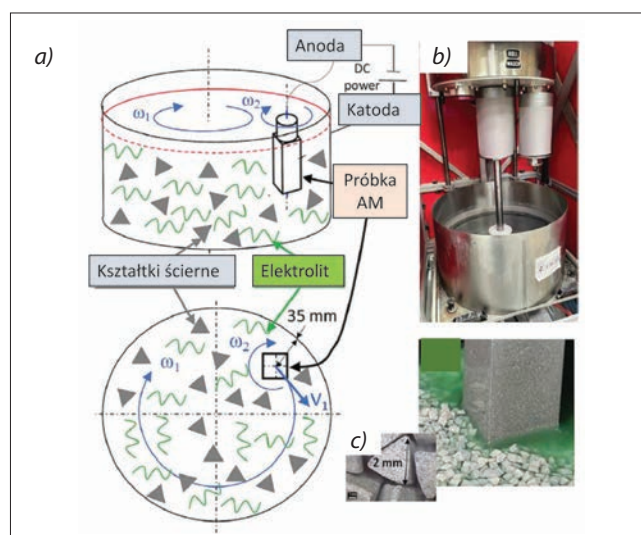


Fig. 2. Kinematics of PEMEC process (a), the experimental set-up (b) and view of the machining zone consisting of abrasive media and electrolyte (c) [7]

Rys. 2. Kinematyka procesu PEMEC (a), schemat urządzenia (b) i widok strefy obróbki (c) [7]

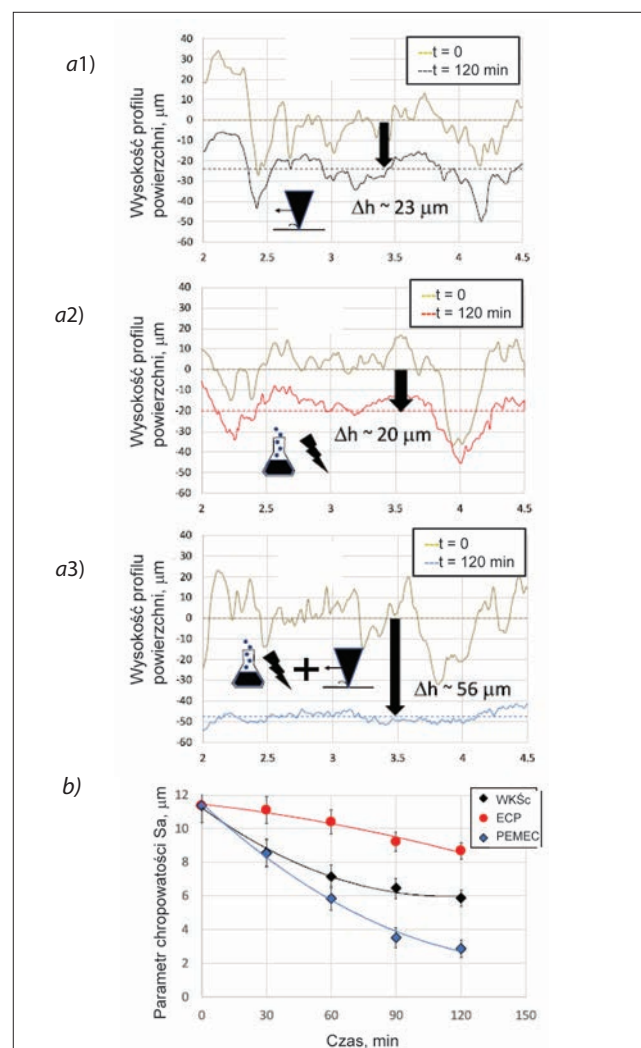


Fig. 3. Schematic illustration of the evolution of reference surface profiles after 120 min finishing using componential processes and hybrid process (a1–a3) and roughness parameter Sa (b) [7]. Symbols: a1) drag finishing, a2) ECP, a3) PEMEC

Rys. 3. Poglądowe przedstawienie zmiany referencyjnego profilu powierzchni po 120 min wygładzania w procesach składowych i procesie hybrydowym (a1–a3) oraz parametru chropowatości Sa (b) [7]. Oznaczenia: a1) wygładzanie kształtkami ściernymi (WKŚc), a2) ECP, a3) PEMEC

mieszaniny elektrolitu i kształtek ściernych. Wstępnie badano przydatność procesu do części płaskich i walcowych, ale docelowym zadaniem jest obróbka powierzchni swobodnych 3D. Stosowano ceramiczne kształtki ściernie z Al_2O_3 w kształcie graniastosłupa trójkątnego o wymiarze 2 mm (rys. 2c) i elektrolit z mieszaniny kwasu fosforowego H_3PO_4 (85 wt%) i dejonizowanej wody. Próbkę ze stali kwasoodpornej 316L przygotowano przez frezowanie i piaskowanie, co pozwoliło uzyskać wstępną chropowatość powierzchni ok. 11 μm .

Z rys. 3b wynika, że parametr S_a chropowatości powierzchni uzyskanej po procesie PEMEC zmniejsza się do 3 μm , natomiast efekty wygładzania samymi kształtkami ściernymi i w procesie ECP to odpowiednio: 6 i 8,7 μm . Należy zauważyć, że w procesie hybrydowym PEMEC (a3) usuwane są wszystkie duże mikronierówności generowane w procesach wyjściowych.

W przypadku procesu ECP (*electrochemical cavitation peeing*) opisanego w pracy [5] wytwarzane są dodatkowe drgania ultradźwiękowe wywołujące efekt dynamicznego umacniania kawitacyjnego (*cavitation peeing*) – podobny efekt można uzyskać w sposób hydrodynamiczny, stosując wysokociśnieniową strugę wody. Zgodnie z zasadą hybrydyzacji proces ten może być oznaczony symbolem USAECP (*ultrasonically assisted electrochemical polishing*) [2]. Powoduje to, że wartości parametrów chropowatości powierzchni S_a i S_z zmierzone na próbkach wykonanych przyrostowo ze stali 316L AM zmniejszają się z 11,5 i 92,9 μm do odpowiednio: 4,2 i 53,7 μm , jak na rys. 4 [5]. Jednak w odróżnieniu od procesu PEMEC pozostają na powierzchni większe wgłębienia, jako rezultat wytworzenia kawitacji przez drgania US.

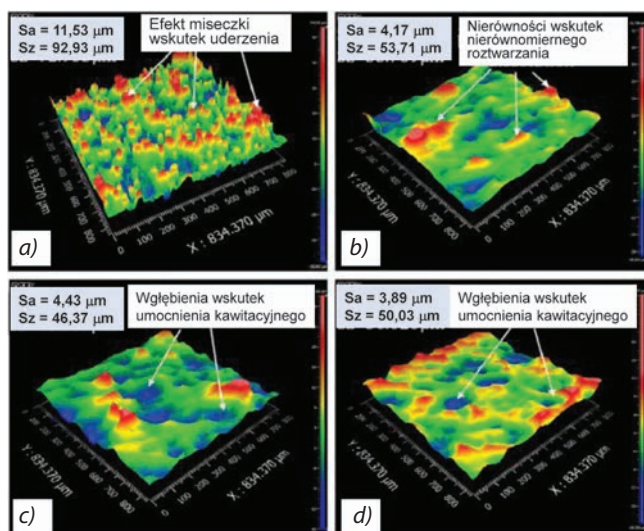


Fig. 4. Changes in surface topography before and after post-processing: a) as-built surface, b) treated by ECP for 10 min, c) treated by sequential process including ECP and cavitation peeing for 10 min each, and d) treated by hybrid process for 10 min. US amplitude – 56 μm [5]

Rys. 4. Zmiana topografii powierzchni wyjściowej: a) po procesie ECP w czasie 10 min, b) po procesie sekwencyjnym obejmującym ECP, c) po umacnianiu kawitacyjnym, każdy po 10 min, oraz d) po procesie hybrydowym w czasie 10 min. Amplituda drgań ultradźwiękowych (US) – 56 μm [5]

Wykańczająca obróbka powierzchni wewnętrznych metodą przetłaczania ściernego (AFM)

Przykładem efektywnego zastosowania metody przetłaczania ściernego są tzw. konforemne (czyli dopasowane do zarysu komory formy i rdzenia) układy chłodzenia o bardzo skomplikowanym systemie kanałków mających różne kształty i przekroje.

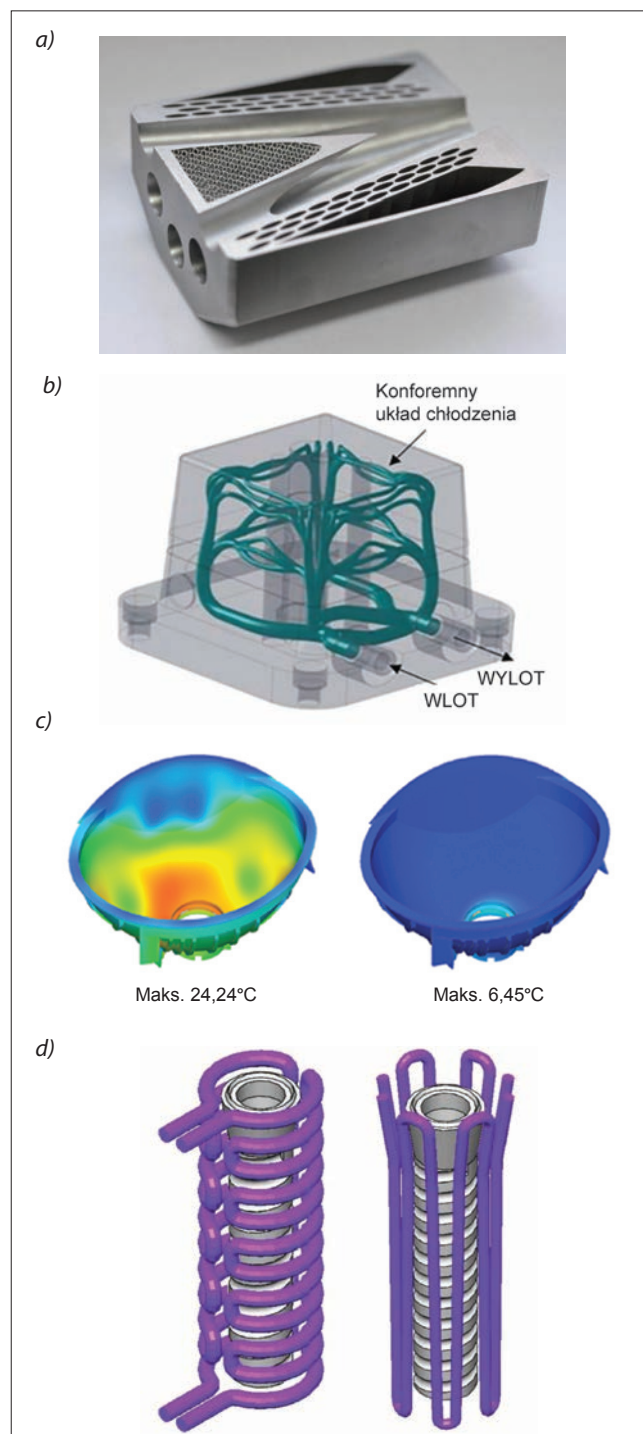


Fig. 5. Examples of injection moulds with conformal cooling channels: a) a flow mixing part, b) visualization of the cooling system, c) part temperature deviation, d) examples of channel shapes – zigzag systems [9, 10, 11]

Rys. 5. Przykłady elementów form wtryskowych z konforemnym układem chłodzenia: a) część do mieszania przepływu, b) widok systemu chłodzenia, c) rozkład odchylek w rozkładzie temperatury, d) przykłady zarysu kanałków – systemy zigzag [9, 10, 11]

Zarys takiego układu wytwarzanego metodą druku 3D (rys. 1c, 5a i 5b) tworzą odcinki prostoliniowe – często z rozgałęzieniami, krzywoliniowe, w tym spiralne (rys. 5d). Zastosowanie druku 3D zwiększa wydajność produkcji form wtryskowych do tworzyw sztucznych o 30÷50%. Korzyści z użycia konforemnego systemu chłodzenia w formie do wytwarzania części z rys. 5c to np. [11]:

- skrócenie czasu cyklu o 17% (z 40,3 s do 33,4 s),
- zmniejszenie wypaczeń o 62%,
- zmniejszenie różnic w rozkładzie temperatury o 73% (rys. 5c),
- zmniejszenie śladów zapadnięć/zagłębień o 50%.

W przeprowadzonych badaniach [3, 6] zastosowano urządzenie firmy Extrude Hone Corp. (produkuje takie urządzenia od 1960 r.) do dwustronnego przetłaczania (rys. 6a). Przetestowano siedem różnych konfiguracji kanałków prostoliniowych i spiralnych, wszystkie o średnicy $\varnothing 3$ mm – ich modele CAD przedstawiono na rys. 6b. Próbkę wykonano metodą SLM ze stali starzonej Maraging 300. Jako medium obróbkowe zastosowano mieszaninę polimeru poliboroksanowego o ultra-niskiej lepkości (ULV) z ziarnami węgla krzemu (SiC) o koncentracji 50% wt. o symbolu ULV50%-54. Wygładzanie każdego układu obejmowało 10 cykli. Przeprowadzone pomiary topografii powierzchni kanałów wykazały, że obróbka AFM wpływa wyraźnie na zmianę wartości takich parametrów

chropowatości 3D, jak: Sa/Sz , Sdq (RMS – pochylenie profilu), Sdr (współczynnik rozwinięcia powierzchni w [%]), Spk (zredukowana wysokość piku) i Ssk (skośność).

Generalna uwaga dotycząca kierunku zmian parametrów chropowatości jest taka, że większe zmiany zostały udokumentowane dla kanałków prostoliniowych, co się wiąże z uzyskaniem większych prędkości przetłaczania medium obróbkowego. Przykładowo: dla jednego prostoliniowego kanałka (przypadek Ia z rys. 6b) wartość parametru Sa zmniejszyła się z 7,6 μm do 1,3 μm [6]. Natomiast dla jednego kanałka śrubowego (poz. IIc z rys. 6b) parametr Sa zmniejszył się z ok. 9 μm do ok. 3 μm . Z kolei zmniejszenie parametru Sz jest związane z redukcją wysokości piku – parametru Spk na rys. 7a. Z tego też względu skośność Ssk zmienia się z dodatniej (ok. 1 przed obróbką) na ujemną (ok. -0,5 ÷ -1,5 po obróbce). Bardzo wyraźne zmniejszenie parametru Sdr , jak na rys. 7b, jest sygnałem o generowaniu po przetłoczeniu masy ścierniej powierzchni typu *plateau*.

Ponieważ wyroby kształtowane addytywnie podlegają z reguły obróbce cieplnej, uzasadnione jest ustalenie jej wpływu na końcową jakość powierzchni oraz właściwości mechaniczne i stan naprężeń własnych [3]. Badaną stal Maraging 300 poddano starzeniu, które obejmowało cykl nagrzewania do temperatury 490°C, wygrzewania w tej temperaturze przez 3 godz.

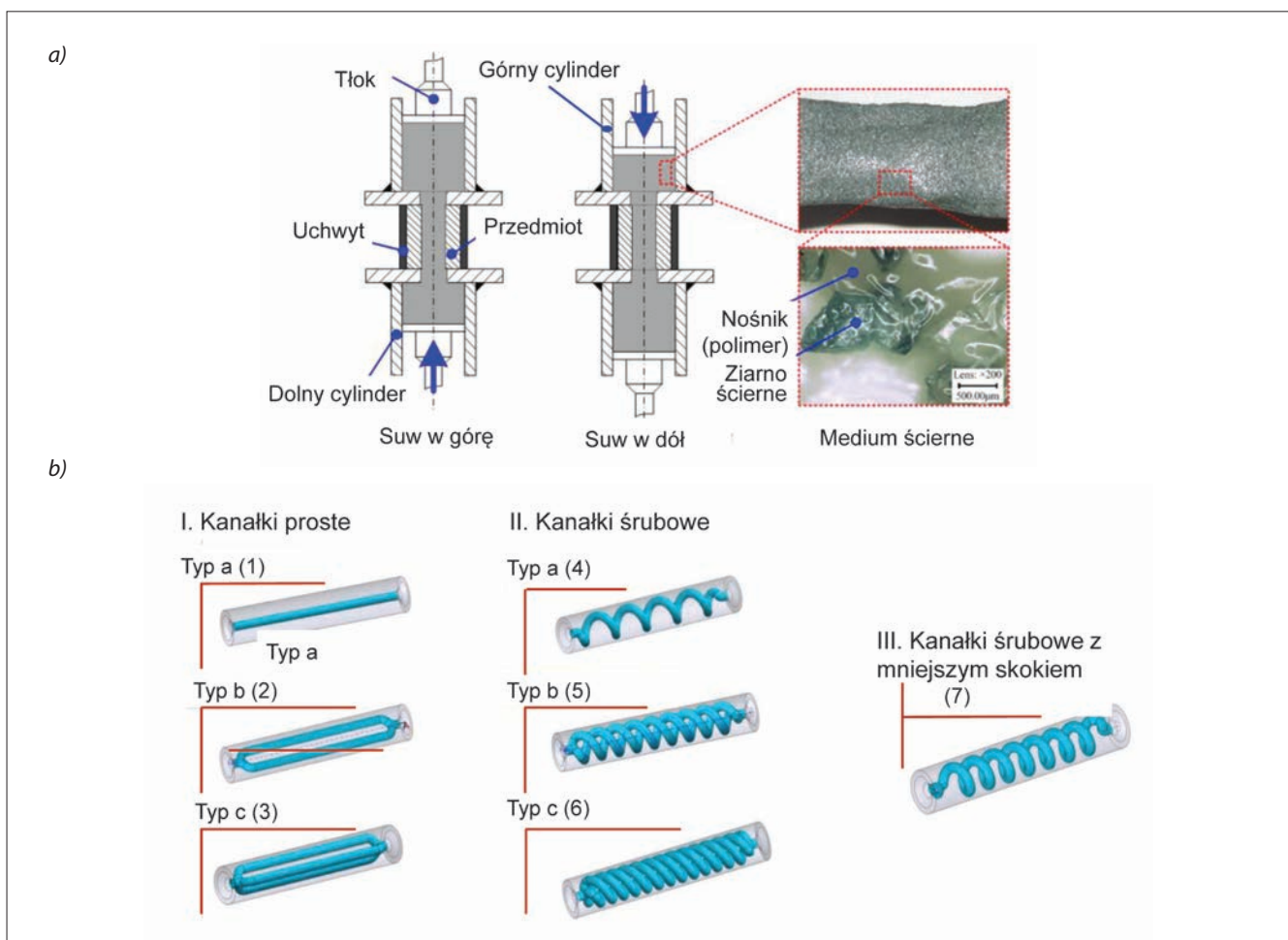


Fig. 6. A scheme of a two-way (up- and down-stroke) AFM equipment (a) and CAD models of various types of cooling channels tested (b) [3, 6, 13]
Rys. 6. Schemat urządzenia do przetłaczania ściernego (a) i modele CAD różnych typów testowanych układów chłodzących (b) [3, 6, 13]

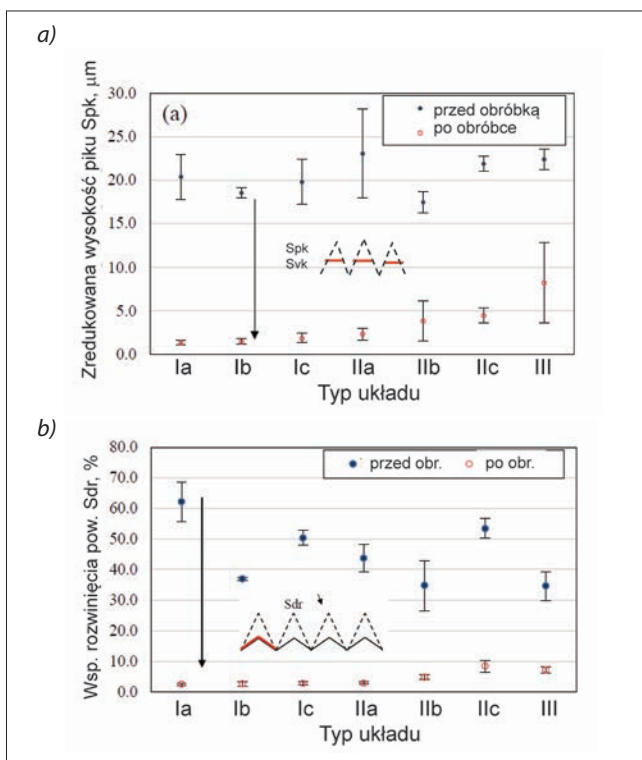


Fig. 7. Changes of a) S_{dq} and b) S_{dr} areal roughness parameters for different types and configurations of SLM conformal cooling channels [6]

Rys. 7. Zmiany parametrów chropowatości powierzchni a) S_{dq} i b) S_{dr} dla różnych typów testowanych konformalnych kanałków chłodzących [6]

i chłodzenia. Ustalono, że wartości parametrów S_a i S_q zmniejszają się wyraźnie wraz ze wzrostem liczby cykli przetłaczania, osiągając minimalne wartości po 150 cyklach – odpowiednio $S_a = 3 \mu m$ i $S_q = 3,5 \mu m$, niezależnie od stanu materiału. Lepsze efekty uzyskuje się dla nośnika polimerowego o średniej lepkości (MV) i większej koncentracji ziaren ściernych (65%). Również dla tego przypadku wyznaczono największe wartości ściskających naprężeń własnych w kierunku prostopadłym i równoległym do kierunku ruchu medium ściernego.

Podsumowanie

- Części wytworzone metodami addytywnymi, np. SLM, DED (*directed energy deposition*) czy LPBF (*laser powder bed fusion*), wymagają wykańczania w celu uzyskania chropowatości R_a (S_a) rzędu $1 \mu m$ i/lub wprowadzenia do warstwy wierzchniej ściskających naprężeń własnych. Możliwe jest stosowanie procesów konwencjonalnych lub hybrydowych.
- Spośród wielu możliwych metod obróbki wykańczającej powierzchnie zewnętrzne duże perspektywy mają hybrydowe procesy polerowania ECP i PEMEC, wykorzystujące jako proces bazowy polerowanie elektrochemiczne oraz polerowanie mechaniczne lub drgania ultradźwiękowe jako procesy pomocnicze. Wymagane jest jednak rozszerzenie tych metod na powierzchnie swobodne 3D.
- Obróbka powierzchni wewnętrznych, np. kanałków w konforemnych układach chłodzenia w formach wtryskowych do tworzyw sztucznych, jest najbardziej

efektywna w przypadku stosowania przetłaczania ściernego (AFM). Należy jednak przeprowadzić wnikliwą analizę warunków przepływu medium przetłaczającego z uwagi na jego hamowanie w kanałkach spiralnych w celu uzyskania wymaganej topografii powierzchni.

- Obróbka cieplna części wytwarzanych addytywnie nie wpływa w znaczący sposób na chropowatość powierzchni (parametry S_a i S_q) oraz wartości generowanych naprężeń własnych. W tym przypadku decydującymi czynnikami są liczba cykli przetłaczania, lepkość nośnika polimerowego i koncentracja ziaren ściernych w medium obróbkowym.

LITERATURA

- [1] Grzesik W. "Hybrid manufacturing of metallic parts integrated additive and subtractive processes". *Mechanik*. 91, 7 (2018): 468–475, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.58>.
- [2] Grzesik W., Ruszaj A. „*Hybrydowe metody obróbki materiałów konstrukcyjnych*”. Warszawa: PWN (2021).
- [3] Han S., Salvatore F., Rech J., Bajolet J. "Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM)". *Precision Engineering*. 64 (2020): 22–30; <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.006>.
- [4] Grzesik W. „*Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*”. Warszawa: PWN (2018).
- [5] Wang B., Castellana J., Melkote S.N. "A hybrid post-processing method for improving the surface quality of additively manufactured metal parts". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 70, 1 (2021): 175–178, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.03.010>.
- [6] Duval-Chaneac M.S., Han S., Salvatore F., Claudin C., Bajolet J., Rech J. "Experimental study on finishing of internal laser melting (SLM) surface with abrasive flow machining (AFM)". *Precision Engineering*. 54 (2018): 1–6, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.03.006>.
- [7] Rech J., Krzak D., Roy F., Salvatore F., Gidon A., Guerin S. "A new hybrid electrochemical-mechanical process (PE-MEC) for polishing complex and rough parts". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 71, 1 (2022): 173–176, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.03.011>.
- [8] Grzesik W. „Wpływ chropowatości powierzchni na trwałość zmęczeniową elementów maszyn – postęp w dziedzinie badań i symulacji”. *Mechanik*. 5–6 (2019): 307–313, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.5-6.39>.
- [9] "Conformal cooling: How AM is increasing efficiency and quality in the injection moulding industry". *Metal AM*, <https://www.metal-am.com/articles/how-3d-printing-is-increasing-efficiency-and-quality-in-the-injection-moulding-industry/>
- [10] "How to minimize injection molding cycle times and boost part quality with 3D Systems' conformal cooling solution", www.3dsystems.com.
- [11] Feng S., Kamat A.M., Pei Y. "Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: review and progress updates". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 171 (2021): 121082, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082>.
- [12] Tan Ch., Wang D., Ma W., Chen Y., Yang Y., Zhou K. "Design and additive manufacturing of novel conformal cooling systems". *Materials and Design*. 196 (2020): 109147, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109147>.
- [13] Fu Y., Gao H., Yan Q., Wang X., Wang Xu. "An efficient approach to improving the finishing properties of abrasive flow machining with the analyses of initial surface texture of workpiece". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 107 (2020): 2417–2432, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05173-5>.