

Grawerowanie za pomocą lasera CO₂ form gipsowych do odlewania ceramiki ozdobnej i specjalistycznej

MGR INŻ. ROMAN GEBEL, MGR INŻ. BARBARA SYNOWIEC,
DR INŻ. AGNIESZKA ANTOSIK

ZAKŁAD DOŚWIADCZALNY ŚRODKÓW ZDOBNICZYCH, ODDZIAŁ CERAMIKI I BETONÓW
INSTYTUTU CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH, UL. POSTĘPU 9, 02-676 WARSZAWA

mgr inż. Roman Gebel



Absolwent Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej na kierunku Technologia Chemiczna w 1995 r. Obecnie kierownik Zakładu Środków Zdobniczych Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Zajmuje się m.in. opracowywaniem technologii pigmentów ceramicznych do barwienia szkliv, emalii i mas gresowych. Pełni także funkcję Technologa i Specjalisty ds. Badań i Kontroli Jakości.
e-mail: r.gebel@icimb.pl

1. Wstęp

Gips, dzięki swym właściwościom znalazł szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach, takich jak budownictwo, przemysł czy medycyna [1]. W przyrodzie spotykamy go pod postacią alabastru, gipsu włóknistego, łuskowego, ścisłego i kamienia gipsowego [2]. Każda z tych postaci ma różnego rodzaju zanieczyszczenia, które wpływają na właściwości uzyskanego z niej gipsu. Do przygotowania form gipsowych wykorzystuje się gips przemysłowy [3], uzyskiwany z kamienia gipsowego zawierającego 20,93% krystalicznie związanej wody, 32,56% tlenku wapnia i 46,51 % bezwodnika kwasu siarkowego VI. Jest to uwodniony siarczan wapnia o wzorze chemicznym CaSO₄ • 2H₂O. Wydobywa się go w kopalniach głębinowych i odkrywkowych, a następnie rozdrabnia, praży i miele na drobny proszek w celu otrzymania gipsowego spoiwa. Jego właściwością wykorzystywaną w wielu dziedzinach jest możliwość ponownego łączenia się z wodą. Po nawodnieniu gipsu następuje jego rekrytalizacja z ponownym utworzeniem zwartej masy. Po wysuszeniu gips jest porowaty i może wchłoniąć do 40% wody w stosunku do swojej masy, co wykorzystuje się przy odlewaniu wyrobów ceramicznych w formach gipsowych [4].

W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu stworzenie alternatywy dla powszechnie stosowanych metod otrzymywania wyrobów ceramicznych z wypukłym wzorem na powierzchni (takich jak: uzyskanie ustrukturyowanych form gipsowych przez formę „matkę” [5] czy mechaniczną obróbkę gotowych form np. obrabiarkami CNC [6]), poprzez grawerowanie form gipsowych do odlewów ceramicznych za pomocą lasera CO₂.



Rys. 1. Połowy formy gipsowej do odlewania ceramiki z zaznaczoną powierzchnią przeznaczoną do zdobienia za pomocą lasera (formy Ceramiki Artystycznej w Bolestawcu).

SŁOWA KLUCZOWE

ceramika, formy gipsowe, zdobienie laserem

KEYWORDS

ceramic, plaster mold, laser decoration

STRESZCZENIE

Zbadano możliwość uzyskania grawerowanych form gipsowych do odlewania ceramiki, przez wykorzystanie rozkładu termicznego dwuwodnego siarczanu wapnia za pomocą lasera CO₂ model C firmy Coherent. Efektem zamierzonym miała być możliwość szybkiego uzyskania grawerowanych form gipsowych z komputerowych projektów przygotowanych programami grafiki wektorowej 2D lub 3D typu CAD, pozwalająca na natychmiastowe reagowanie na potrzebę szybkiego otrzymania wyrobów w zależności od potrzeb klienta. Wstępnie zakładano opracowanie przynajmniej jednego projektu 3D z rozłożeniem na warstwy względem osi Z i przynajmniej jednego projektu, w którym głębokość w osi Z będzie reprezentowana przez odcienie szarości obrazu. Jednak właściwości materiału pozwoliły na grawerowanie tylko w jednym przebiegu lasera. W wyniku otrzymano reliefy jednowarstwowe.

Opracowana metoda może być upowszechniana wśród producentów stosujących formy gipsowe w swoich technologiach. Dotyczy to np. producentów naczyń stołowych i producentów kafli piecowych.

SUMMARY

Application of laser CO₂ to obtain a relief plaster mold for decorative and specialized ceramics casting

The paper presents results concerning the application of far infrared laser with a wavelength of 10600 nm to prepare the relief plaster molds for ceramic casting. The goal of the work was to obtain the relief plaster molds from 2D and 3D computer projects prepared in CAD allowing for immediately response to customer needs.

Primary, the author assumed to prepare at least one 3D project with layers divided by the Z axis and at least one project in which the depth in the Z axis will be represented by shades of gray image. However, the properties of material allowed for relief in only one laser run. As a result, the one-layer reliefs were obtained.

The developed method can be disseminated among the producers applying the plaster molds in their technologies e.g. producers of tableware and stove tiles.

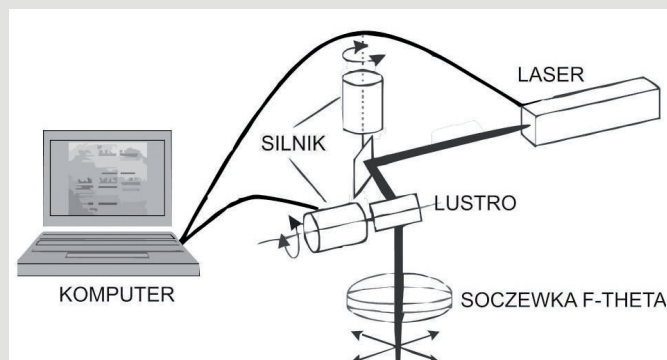
W literaturze naukowej znaleźć można przykłady zastosowania lasera do zdobienia zarówno ceramiki, jak i szkła poprzez laserowe nanoszenie mineralnych warstw barwnych na ich powierzchnię [7–13] lub też do obróbki różnego typu materiałów, takich jak: metal [14–15], drewno [16] czy ceramika [17–18]. Producenci urządzeń do grawerowania laserowego wymieniają również grawerowanie prefabrykowanych tynków gipsowych, umożliwiające uzyskanie specyficznych efektów światłocienia. Natomiast producenci wyrobów ceramicznych wykorzystujący formy gipsowe, nie odnoszą się do możliwości zastosowania lasera CO₂ do pośredniego wykańczania swoich wyrobów.

Prezentowane wyniki badań mają aspekt aplikacyjny. Zastosowanie lasera CO₂ do grawerowania form gipsowych pozwala na natychmiastowe reagowanie na potrzeby klienta i szybkie otrzymanie wyrobów. Dotyczy to szczególnie zamówień na wytwarzanie wyrobów w małej skali. Za pomocą metod laserowych można w sposób opłacalny wytwarzać nawet pojedyncze wyroby.

2. Badanie właściwości gipsu ceramicznego

Prace były prowadzone przy zastosowaniu lasera CO₂ model C firmy Coherent o mocy do 40 W i długości fali 10600 nm (pracujący w zakresie „dalekiej” podczerwieni), ze skanerem galwanometrycznym RLA-1504 niemieckiej firmy Raylase.

System służący do dekoracji składał się z: komputera sterującego pracą urządzeń, tj. lasera i skanera galwanometrycznego, skanera kierującego wiązkę na soczewkę F-theta i dalej na obrabiany obiekt. Położenie powierzchni roboczej względem płaszczyzny ogniskowej soczewki mogło być płynnie regulowane w osi Z (stół śrubowy).



Rys. 2. Schematyczny rysunek przedstawiający system laserowy wykorzystywany w pracy.

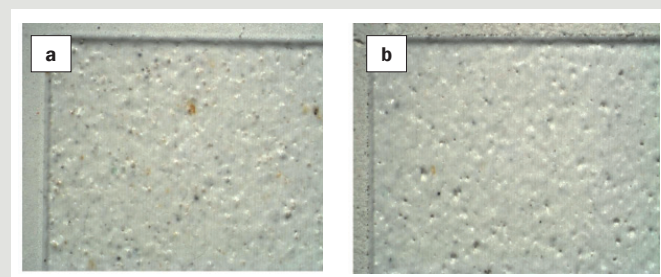
Do sterowania procesem obróbki laserowej w obu systemach wykorzystano skanery optyczne typu galwanometrycznego pracujące na bazie dwóch lusterek opartych na wzajemnie do siebie prostokątnych osiach obrotu. Za pomocą dedykowanego oprogramowania możliwe jest sterowanie wychodzącą ze skanera wiązką, a tym samym przeniesienie dowolnych wzorów na płaszczyznę pod skanerem.

W pierwszym etapie pracy wytworzono z gipsu ceramicznego zaczyn gipsowy przy stosunku 42% H₂O i 58% gipsu i zalano nim formy stalowe o kształcie płaskich dysków i średnicy 30 cm. Grubość warstwy gipsu wynosiła 15 mm. Formy z zaczynem były wibrowane przez 2 minuty na wytrząsarce laboratoryjnej w celu usunięcia zawartych w nim pęcherzyków powietrza. Następnie, formy z gipsem pozostawiono do jego związania. Po 24 godzinach gotowe gipsowe krążki zostały wyjęte z form. Powierzchnią roboczą dysków była ta, kontaktująca się z formą. Tym samym była ona gładka i nie wymagała dodatkowego przygotowania.

W celu sprawdzenia jakości uzyskanych kształtek, przeprowadzono porównanie przy zastosowaniu gotowych form gipsowych uzyskanych z zakładu Ceramika Artystyczna w Bolesławcu.

Parametrami krytycznymi była tu obecność zanieczyszczeń (wtrącenia o innych niż gips parametrach termicznych, takich jak przewodnictwo cieplne i ciepło właściwe, mogą wytwarzać wady reliefu) i nasiąkliwość gipsu, która w przypadku form gipsowych wytwarzanych przemysłowo, była niższa. Obecność wad i wtrąceń oceniono też za pomocą lasera poprzez wypalenie kwadratowego wzoru.

Na gipsie używanym do badań zaobserwowano obecność drobnych czarnych wtrąceń innego materiału, prawdopodobnie mielników z produkcji gipsu, oraz brązowe plamki pochodzące od żelaza. W gipsie przemysłowym jest mniej zanieczyszczeń, natomiast laser „otworzył” większą liczbę zamkniętych porów (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie próbek gipsu po obróbce laserowej: a) gips użyty w pracy doświadczalnej, b) gips z zakładu Ceramika Artystyczna w Bolesławcu.

Nasiąkliwość gipsu zbadano przez zanurzenie zważonej próbki w zimnej wodzie, przetrzymanie w niej 10 minut i ponowne zważenie. Otrzymane wyniki to: 33,30% dla form użytych w tych badaniach i 24,27% dla form przemysłowych.

3. Opracowanie parametrów obróbki gipsu laserem CO₂

Drugi etap pracy stanowiło opracowanie parametrów żłobienia gipsu ceramicznego za pomocą lasera CO₂. Niezbędny był dobór stosowanej gęstości mocy lasera, odległości ogniska wiązki laserowej od powierzchni obrabianego detalu i prędkości skanowania.

Próby przeprowadzono przez skanowanie płyt gipsowych wiązką laserową ze zmieniającą się mocą w zakresie 10–38 W (ze zmianą co 2 W) i prędkością skanowania w zakresie 20–320 mm/s (ze zmianą co 20 mm/s). Otrzymuje się w ten sposób tzw. siatkę gęstości mocy (rys. 4). Skanowanie jest terminem związanym z ruchem zwierciadeł skanera. Jest to tzw. skaner galwanometryczny, w którym promień lasera jest rzutowany kolejno na dwa zwierciadła o prostokątnych do siebie osiach obrotu. Kąt obrotu zwierciadeł jest sterowany oprogramowaniem dedykowanym do lasera.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono otrzymane wartości głębokości zagłębień powstałych po obróbce laserem i odpowiadające im krzywe trendu, w zależności od mocy i prędkości skanowania.

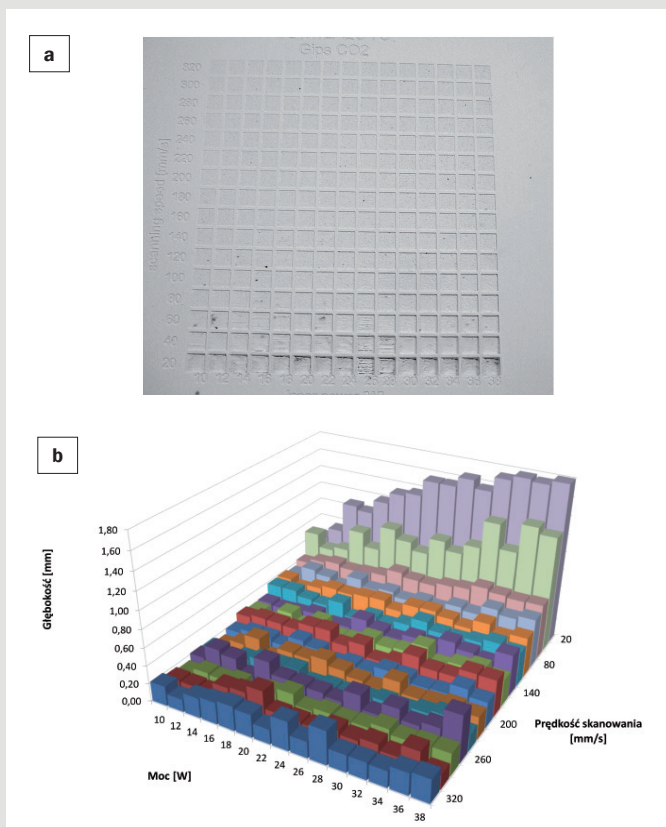
Wraz ze spadkiem szybkości skanowania, przy zachowaniu stałej wartości mocy, rośnie dawka energii przypadająca na jednostkę powierzchni, a co za tym idzie także głębokość reliefu.

$$E = \frac{P}{v} \left[\frac{J}{cm^2} \right] \quad (1)$$

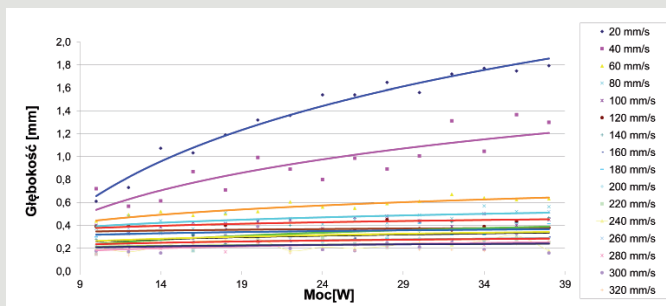
gdzie E – dawka energii [J/cm²]; P – moc promieniowania [W]; v – prędkość skanowania [cm/s]; d – średnica wiązki padającej na obrabianą powierzchnię [cm].

Podobnie dzieje się w przypadku wzrastającej mocy lasera. Przy czym największe różnice w zmianie głębokości reliefu obserwuje się w przypadku zastosowania małych prędkości skanowania. Na rysunku 6 przedstawiono wybrane zdjęcia mikroskopowe powstałych zagłębień.

Efektem zwiększającej się gęstości mocy (dawki energii), przy



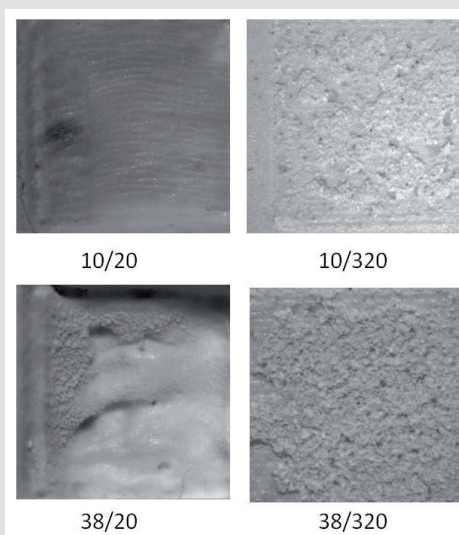
Rys. 4. Matryca zagłębień w powierzchni gipsu ceramicznego: a) widok ogólny powstałej matrycy oraz b) jej trójwymiarowa interpretacja.



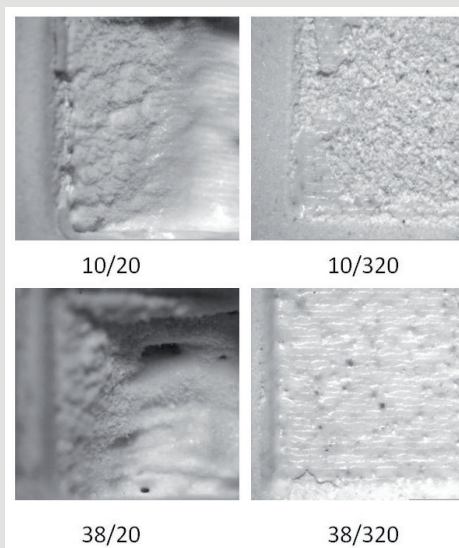
Rys. 5. Zależność tendencji zmian głębokości zagłębień od parametrów obróbki (wzrosty nie oczyszczone z produktów reakcji).

zachowaniu małej szybkości skanowania, jest powstanie coraz bardziej zwartej i zeszkłonej (w wyniku przetopienia działaniem lasera) warstwy produktów reakcji rozkładu dwuwodnego gipsu. Jeśli przy małych gęstościach mocy produkty reakcji o stosunkowo niewielkiej masie są w kontakcie z resztą materiału gipsowego, to podlegają natychmiastowemu schłodzeniu i tworzą luźny proszek. Przy większych gęstościach mocy, a co za tym idzie większej głębokości rowków, proszkowe produkty reakcji stają się izolacją termiczną dla powierzchniowych warstw proszku, podgrzewanych do bardzo wysokiej temperatury. Powstaje w ten sposób przetopiona warstwa szklawa składająca się głównie z bezwodnego siarczanu wapnia. Fazą topiącą się w najniższej temperaturze jest tu bezwodny siarczan wapnia o temperaturze topnienia 1460°C.

Przeprowadzono dodatkowo próbę dwukrotnego skanowania wiązką lasera. Niestety, jakość powstałych w ten sposób zagłębień pozostawiała wiele do życzenia. Wszelkie defekty powstałe w pierwszym skanowaniu były tylko intensyfikowane przez drugie. Poza tym, wspomniany wcześniej izolujący efekt produktów



Rys. 6. Morfologia powierzchni zagłębień powstałych po jednokrotnym skanowaniu wiązką laserową przy zróżnicowanej mocy i prędkości skanowania (oznaczenia: moc [W]/prędkości skanowania [mm/s]).

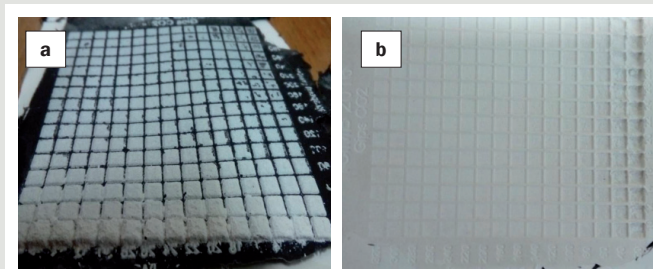


Rys. 7. Morfologia powierzchni zagłębień powstałych po dwukrotnym skanowaniu wiązką laserową przy zróżnicowanej mocy i prędkości skanowania (oznaczenia: moc [W]/prędkości skanowania [mm/s]).

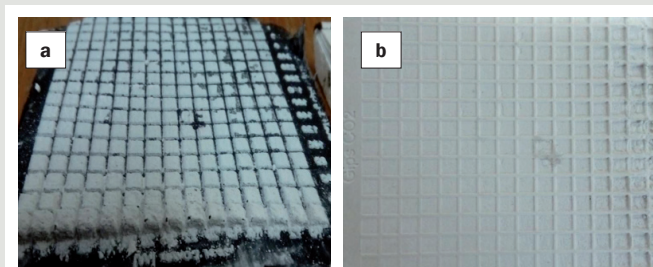
reakcji sprawia, że drugie skanowanie jedynie nieznacznie pogłębia miejsce po pierwszym.

Drugie skanowanie oddziałuje szczególnie na położoną na warstwie proszku płytkę powstałą przy pierwszym skanowaniu. Zintensyfikowane efekty cieplne powodują wręcz ablację materiału uwidocznioną przez wykwyty zestalonych gazowych produktów na brzegach zagłębienia (rys. 7). Szacowane temperatury przy największych gęstościach mocy mogą osiągać 2850°C (temperatura wrzenia tlenu wapnia). Widać wyraźnie, że nie można zastosować tak grawerowanych form bez wstępnego ich oczyszczenia. Niezależnie od parametrów obróbki w gotowym reliefie pozostają odwodniony gips, tlenek wapnia w postaci proszku i w postaci przetopionej. Istnienie zestalonego stopu świadczy o temperaturze, jaka chwilowo występuje w miejscu obróbki.

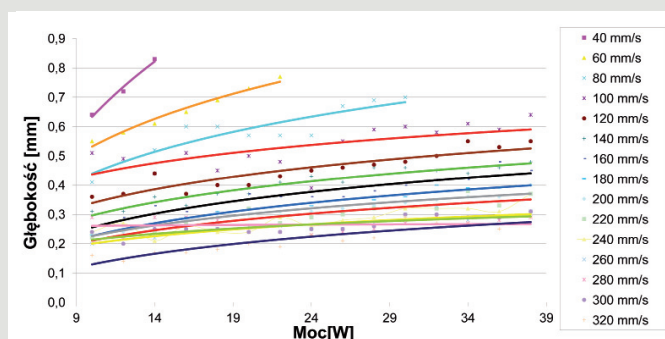
Dla lepszego uwidocznienia produktów rozkładu gipsu i jednocześnie usunięcia produktów reakcji z zagłębień, wykonano odciski silikonowe wykonanych reliefów. Słabo związane z podłożem części przywarły do powierzchni silikonu i wraz z nim zostały usunięte.



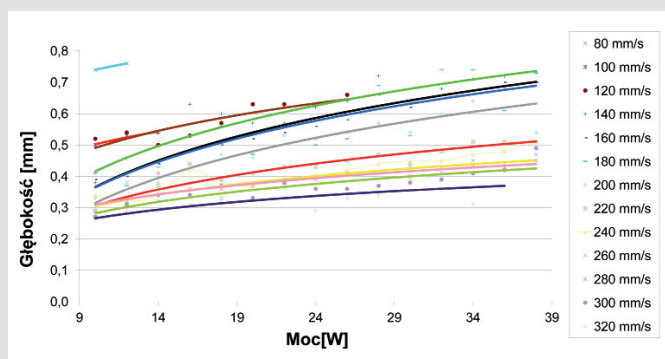
Rys. 8. a) widok warstwy silikonu zdjętego z formy po jednokrotnym przejściu wiązki lasera oraz b) widok oczyszczonej formy.



Rys. 9. a) widok warstwy silikonu zdjętego z formy po dwukrotnym przejściu wiązki lasera oraz b) widok oczyszczonej formy.



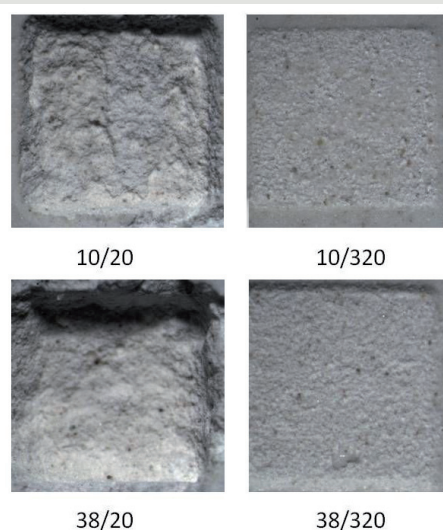
Rys. 10. Zależność tendencji zmian głębokości zagłębienia od parametrów obróbki po jednokrotnym przejściu lasera (wgłębienia oczyszczone z produktów reakcji).



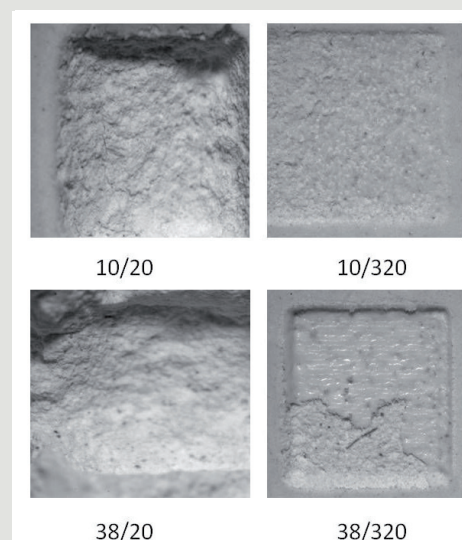
Rys. 11. Zależność tendencji zmian głębokości zagłębienia od parametrów obróbki po dwukrotnym przejściu promienia lasera (wgłębienia oczyszczone z produktów reakcji).

Po zdjęciu warstwy silikonu z formy i oczyszczeniu rowków sprężonym powietrzem dokonano pomiaru ich głębokości. Wyniki dla jedno- i dwukrotnego skanowania wiązką lasera zestawiono na rysunkach 10–11.

Przeprowadzone prace wykazały, że otrzymaną metodą nie uzyskuje się dużych różnic w głębokości wytwarzanych zagłębień. Mało prawdopodobne jest więc, by było możliwe wykonanie w pełni



Rys. 12. Morfologia powierzchni czyszczonych zagłębienia powstałych po jednokrotnym skanowaniu wiązki laserowej przy zróżnicowanej mocy i prędkości skanowania (oznaczenia: moc [W]/prędkości skanowania [mm/s]).

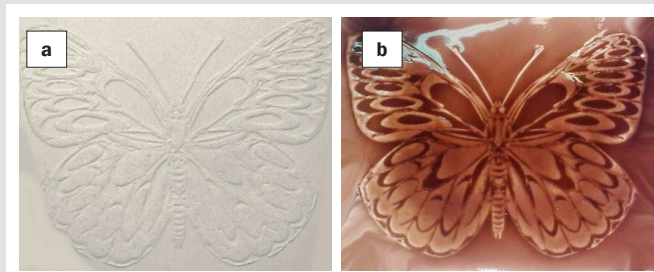


Rys. 13. Morfologia powierzchni czyszczonych zagłębienia powstałych po dwukrotnym skanowaniu wiązki laserowej przy zróżnicowanej mocy i prędkości skanowania (oznaczenia: moc [W]/prędkości skanowania [mm/s]).

trójwymiarowych płaskorzeźb na powierzchni wyrobów ceramicznych. Realnie możliwe do wykonania zagłębienia (bez utraty jakości) nie przekraczają 0,6 mm. Ze względu na intensyfikację wad powierzchni, wielokrotne skanowanie nie może być w tym przypadku brane pod uwagę. Warto zauważyć, że każda wada powierzchni, jak zresztą i sam relief, zwiększają przyleganie odlewanego wyrobu do gipsowej formy. Może to powodować trudności z wyjęciem wyrobu z formy. Wykonano zdjęcia mikroskopowe oczyszczonych zagłębień. Ze względu na dużą ilość otrzymanych wyników badań na rysunkach 12 i 13 przedstawiono jedynie wybrane fotografie.

4. Praktyczne próby wykorzystania opracowywanej metody

Przeprowadzone badania pokazały, że jedyną metodą, która przy obecnym stanie badań możliwa jest do zastosowania, jest wytworzenie grawerowanej formy gipsowej w jednym przebiegu lasera przy głębokości reliefu ok. 0,5 mm i oczyszczenie wzoru za pomocą silikonu. Opierając się na takich zasadach przeprowadzono kilka wstępnych prób otrzymania zdobionych detali, a następnie



Rys. 14. Grawerowany wyrób w formie a) biskwitu i b) poszkliony transparentnym szkliwem manganowym.

próbę grawerowania gotowej formy wyrobu ceramicznego z zakładu Ceramika Artystyczna w Bolesławcu. Parametry mocy i prędkości skanowania dla otrzymanych wzorów ustalono korzystając bezpośrednio z otrzymanej wcześniej „siatki mocy”. Ostatecznie próby wykonano przy ustawieniach prędkości skanowania 160 mm/s i mocy lasera 36 W. Na rysunku 14 przedstawiono otrzymany relief na powierzchni formy gipsowej, wykonany za pomocą lasera CO₂.

Do końcowej próby grawerowania gotowej formy wyrobu ceramicznego bez użycia tzw. przystawki obrotowej, konieczna była pewna modyfikacja wzoru, polegająca na kompresji tych fragmentów, które będą nanoszone na pochyle powierzchni. Wzór, który ma mieć na wyrobie jednolite odstępy, musiał być nanoszony tym bardziej gęsto, im większe jest zakrzywienie powierzchni (rys. 15).

Opracowaną metodą grawerowano gładką formę gipsową przy ustawieniach: prędkość skanowania 120 mm/s, moc lasera 36 W. Proces dla dwustronnej formy trwał około 5 minut. W otrzymanej formie wykonano odlew z lejnnej masy porcelitowej. Wyrób poszkliono barwnym transparentnym szkliwem. Wzory uzyskane opracowaną metodą w formie gipsowej przed i po procesie wypalania przedstawiono na rysunku 16.

5. Podsumowanie

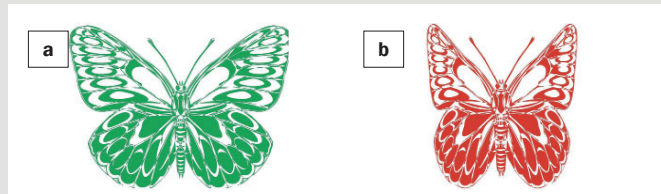
Przeprowadzone badania działania lasera na płaskich dyskach wykonanych z gipsu ceramicznego wykazały możliwość otrzymywania w ten sposób form do produkcji zdobionych wyrobów ceramicznych i umożliwiły wytypowanie optymalnych nastaw mocy i prędkości dla posiadanego przez Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych lasera. Prace z użyciem pojedynczych rysunków wektorowych przy wytypowanych nastawach mocy i prędkości skanowania pozwoliły na otrzymanie początkowo form do zdobień na płaskich elementach, a w późniejszym etapie na wyrobie o zakrzywionej powierzchni.

Zakładano opracowanie przynajmniej jednego projektu 3D z rozłożeniem na warstwy względem osi Z i przynajmniej jednego projektu, w którym głębokość w osi Z będzie reprezentowana przez odcienie szarości obrazu. Jednak właściwości materiału pozwoliły na grawerowanie tylko w jednym przebiegu lasera. W wyniku otrzymano reliefy jednowarstwowe.

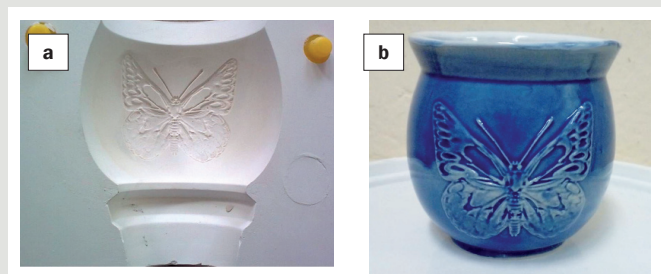
Opracowana metoda może być upowszechniana wśród producentów stosujących formy gipsowe w swoich technologiach. Dotyczy to np. producentów naczyń stołowych i producentów kafli piecowych.

LITERATURA

- [1] W. Brylicki, A. Derdacka-Grzymek, M. Gawlicki, J. Małolepszy, J. Olejarz, *Technologia budowlanych materiałów wiążących: wapno i gips*, cz. 1, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1986
- [2] O. Medenbach, C. Sussieck-Fornefeld, *Mineraly (Gips)*, Świat Książki, 1996
- [3] W. N. Jung, J. M. Butt, W. F. Żurawlew, S. D. Okorokow, *Technologia materiałów wiążących*, Budownictwo i Architektura, Warszawa, 1957



Rys. 15. Wektorowy wzór wykorzystany do praktycznych prób z formami gipsowymi: a) wersja dla powierzchni płaskiej i b) zakrzywionej.



Rys. 16. Wzory uzyskane opracowaną metodą w formie gipsowej a) przed i b) po procesie wypalania.

- [4] A. Kempf, *Cement wapno gips*, Polskie Wydawnictwa Gospodarcze, 1955
- [5] H. Fuld, *Ozdoby i sztukaterie z gipsu*, Wydawnictwo RM, 2006
- [6] D. Huson, S. Hoskins, P. Thirkell, *Photo Ceramic Relief Imaging*, Society for Imaging Science and Technology, Digital Fabrication 2005, Final Program and Proceedings, s. 39–42, (4) 2005
- [7] M. Strzelec, J. Marczak, D. Chmielewska, A. Sarzyński, A. Olszyna, K. Szamałek, *Activation of colour changes in ceramic glazer by means of the Nd:YAG picosecond laser*, „Photonics Letters of Poland”, s. 134–136, (5) 2013
- [8] D. Chmielewska, R. Gebel, J. Marczak, A. Olszyna, A. Sarzyński, M. Strzelec, B. Synowiec, *Laserowa dekoracja wyrobów ceramicznych*, „Szkło i Ceramika”, s. 13–16, (2) 2011
- [9] D. Chmielewska, A. Olszyna, K. Szamałek, R. Gebel, J. Marczak, A. Sarzyński, M. Strzelec, *Metody dekoracji wyrobów ceramicznych i szklanych za pomocą promieniowania laserowego*, „Inżynieria Materiałowa”, s. 464–467, (35) 2014
- [10] D. Chmielewska, R. Gebel, J. Marczak, A. Olszyna, A. Sarzyński, M. Strzelec, B. Synowiec, *Analiza zjawisk zachodzących w procesie laserowego zdobienia wyrobów porcelanowych*, „Materiały Ceramiczne”, s. 499–505, (63) 2011
- [11] A. Sarzyński, D. Chmielewska, J. Marczak, R. Gebel, M. Strzelec, K. Szamałek, *Aktywacja barwnego szkła ceramicznego za pomocą promieniowania laserowego*, *Prace Instytutu Elektrotechnik*, s. 115–126, (266) 2014
- [12] A. Sarzyński, D. Chmielewska, J. Marczak, M. Strzelec, A. Olszyna, R. Gebel, *Utrwalanie warstw barwnych na podłożach szklanych za pomocą promieniowania laserowego*, *Prace Instytutu Elektrotechnik*, s. 127–144, (266) 2014
- [13] A. Sarzyński, D. Chmielewska, R. Gebel, J. Marczak, A. Olszyna, M. Strzelec, S. Traczyk, *Laserowe nanoszenie mineralnych warstw barwnych na podłoża ceramiczne*, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, s. 319–338, (59) 2012
- [14] M. Paczkowska, *Wpływ parametrów obróbki laserowej na budowę warstwy powierzchniowej żeliwa sferoidalnego*, „Inżynieria Materiałowa”, s. 505–508, (30) 2009
- [15] E. Feldshtein, I. Koman, *Wycinanie laserowe elementów o dużej grubości w blachach ze stali nierdzewnej*, „Przegląd Mechaniczny”, s. 13–18, (4) 2010
- [16] G. Wieloch, W. Kalita, J. Hoffman, *Próba zastosowania lasera do cięcia drewna zmodyfikowanego styrenem*, „Krzepnięcie Metali i Stopów”, s. 275–280, (36) 1998
- [17] J. Borkowski, W. Piestrzyńska-Dziedziczko, *Wykorzystanie ablacji laserowej w zdobniczym grawerowaniu płytek ceramicznych*, „Inżynieria Materiałowa”, s. 39–44, (35) 2014
- [18] R. Józwicki, *Technika laserowa i jej zastosowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2009