

Czynniki wpływające na jakość powierzchni barwnych farb ceramicznych utrwalanych techniką laserową na podłożu szklanym

DR INŻ. DANUTA CHMIELEWSKA¹, MGR INŻ. ROMAN GEBEL¹, PROF. DR HAB. INŻ. ANDRZEJ OLSZYNA¹,
MGR INŻ. BARBARA SYNOWIEC¹, DR HAB. INŻ. JAN MARCZAK², PROF. WAT,
DR INŻ. ANTONI SARZYŃSKI¹, DR INŻ. MAREK STRZELEC¹

1. INSTYTUT CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANÝCH

2. WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA – INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI

WPROWADZENIE

W ostatnich kilkunastu latach w przemyśle szklarskim i ceramicznym nastąpiły znaczące zmiany w technologii zdobienia szkła i ceramiki. Konwencjonalny proces dekoracji wyrobów ceramicznych i szklanych farbami ceramicznymi jest czasochłonny i wysoce energochłonny, a uzyskiwany efekt ekonomiczny w dużym stopniu zależy od wielkości realizowanego nakładu dekoracji. Technika druku cyfrowego zrewolucjonizowała zdobnictwo płytek ceramicznych i powierzchni płaskich szkła. Stosowane w obu przypadkach atramenty ceramiczne wymagają procesu wypalania w temperaturze min. 800°C. W przypadku płaskich powierzchni szklanych stosuje się również drukarki wykorzystujące atramenty organiczne, które utwardza się następnie promieniowaniem UV. W każdym przypadku zdobienie ogranicza się do powierzchni płaskich.

W poszukiwaniu metod obniżenia energochłonności i kosztów produkcji zwrócono uwagę na technikę laserową [1–4]. Znakowanie laserowe cechuje wysoka jakość, trwałość, powtarzalność i wysoka

dr inż. Danuta Chmielewska



Absolwentka Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej. Od 1976 r. pracownik Instytutu Szkła i Ceramiki, współtwórcza Zakładu Środków Zdobniczych i wieloletni kierownik tego Zakładu.

Współtwórcza technologii farb ceramicznych do zdobienia wyrobów ceramicznych, szklarskich i emalierskich. W ramach Zakładu zorganizowała pracownię laserową i kierowała opracowaniem technologii laserowego zdobienia powierzchni ceramicznych i szklanych.

Aktualnie kierownik Zakładu Realizacji Projektu Pol-Nor, zajmuje się opracowaniem technologii zagospodarowania różnego rodzaju szkła odpadowego.

e-mail: d.chmielewska@icimb.pl

STRESZCZENIE

Praca prezentuje wyniki badań prowadzonych w ramach projektu pt. „Innowacyjna technologia barwnego, laserowego zdobienia szkła płaskiego środkami ceramicznymi”.

Badania prowadzono z użyciem dwóch laserów o działaniu ciągłym: lasera światłowodowego SP-100 C o mocy do 100 W i długości fali 1070 nm oraz lasera światłowodowego GLPM o mocy do 10 W i długości fali 532 nm. Podłożem stanowiły tafle szklane szkła hartowanego. Materiałem do badań były farby ceramiczne na bazie topników ołowiowych i bezolowiowych.

Wykazano wpływ parametrów pracy lasera (gęstość mocy, geometria układu) na jakość powierzchni barwnej poprzez wyznaczenie parametrów chropowatości R_a i R_z oraz zależność tych parametrów od składu chemicznego badanych farb. Badano wpływ rodzaju wypełnienia (kropkowe, krzyżowe, liniowe) na jakość powierzchni i intensywność barwy. W badaniach wykazano zależność grubości warstwy dekoracji od dawki promieniowania laserowego, jak również zależność parametru chropowatości R_a od konfiguracji naświetlania laserowego (oddziaływanie promieniowania bezpośrednio na warstwę barwną i przez szkło). Przykłady tak wykonanych dekoracji prezentują zamieszczone zdjęcia.

SUMMARY

Factors affecting the quality of ceramic colour layers, laser fused on glass substrate

This paper presents the results of a research conducted within the framework of the project titled “Innovative technology of colour, laser decoration of flat glass with ceramic agents”.

The tests were performed with two permanent operating lasers: fibre laser SP-100 C with the capacity of 100 W and the wavelength of 1070 nm and the fibre laser GLPM with the capacity of 10 W and the wavelength of 532 nm. Hardened glass panes were used as a substrate. The materials tested in the study were ceramic colours based on lead and lead-free fluxes.

The tests demonstrated that the laser parameters (power density, layout of the test setup) influence the quality of the coloured surface. The method applied for the test was determining the roughness parameters R_a and R_z and their dependence on the chemical composition of the tested colours. The influence of the filling type (dots, cross-form, linear) on the surface quality and colour intensity has been examined. The tests proved the dependence of the thickness of the decorative layer on the laser irradiation dose, as well the dependence of the R_a roughness parameter on the configuration of the laser exposition (irradiation on the coloured layer directly and through glass). The pictures enclosed are examples of decorations done with the use of the discussed methods.

SŁOWA KLUCZOWE

laserowe zdobienie szkła, zastosowanie lasera 532 nm – 1070 nm, technika laserowa w technologii zdobienia szkła

KEYWORDS

laser glass decoration, 532 nm and 1070 nm, laser use, laser technology in glass decorating

rozdzielczość obrazu. Dodatkowym atutem jest brak kontaktu narzędzia z powierzchnią, elastyczność procesu (programowanie), czystość procesu wynikająca z braku odpadów, a także możliwość dekorowania powierzchni o dowolnym kształcie [5–7]. Najszerzej stosowana jest bezpośrednia ablacja cienkiej powierzchniowej warstwy materiału, często z użyciem dodatkowej warstwy zwiększającej kontrast otrzymywanych wzorów.

Aktualnie w Polsce wykorzystuje się technikę laserową do bezbarwnego zdobienia szkła, nie jest natomiast nigdzie w kraju stosowana technologia zdobienia szkła przez utrwalanie (wypalanie) laserowe nałożonych ceramicznych środków barwnych. Na rynku europejskim oferuje ją innowacyjna firma francuska CERINNOV.

Zespół Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, wspólnie z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej i Zakładem Ceramika Tubądzin II, w ramach Programu Badań Stosowanych zrealizował projekt pt. „Innowacyjna technologia barwnego, laserowego zdobienia szkła płaskiego środkami ceramicznymi”. Istotą prowadzonych badań było ustalenie warunków stapiania wiązką laserową ceramicznych środków barwnych z podłożem szklanym.

Celem publikacji jest prezentacja wyników badań, które są wskazówką dla zainteresowanych wdrożeniem technologii laserowej do zdobienia powierzchni szklanych, jakie czynniki decydują o powodzeniu takiego przedsięwzięcia.

Opis przedmiotu badań i zastosowanych metod badawczych

Przedmiotem badań był wpływ czynników towarzyszących technice laserowej na jakość utrwalonej, ceramicznej powierzchni barwnej, określanej parametrami chropowatości R_a i R_z . Obejmowały one:

- wpływ rodzaju lasera i składu chemicznego środków ceramicznych poddawanych działaniu promieniowania laserowego,
- wpływ dawki energii promieniowania laserowego,
- wpływ położenia płaszczyzny zdobionego szkła i gęstości energii,
- wpływ rodzaju wypełnienia,
- wpływ położenia płaszczyzny zdobionego szkła i różnych odstępów linii (fill),
- wpływ konfiguracji naświetlania powierzchni barwnej (bezsrednio na warstwę barwną i przez szkło).

Zastosowane źródła promieniowania laserowego i sposób przygotowania próbek

Badania prowadzono przy udziale dwóch laserów: lasera włóknowego SP-100C-0020 firmy SPI Lasers UK Limited Anglia o mocy do 100 W i długości fali 1070 nm, ze skanerem galwanometrycznym RCL-1004 Raylase-Niemcy i lasera włóknowego GLMP 10 SPI, firmy IPG, USA o mocy do 10 W i długości fali 532 nm, ze skanerem galwanometrycznym MS10 D1 Raylase, Niemcy

Materiałem zastosowanym do badań była grupa 10 farb produkcji Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, w których te same pigmenty znalazły się w identycznej ilości w topnikach ołowiowych i bezołowiowych. Miało to na celu ustalenie wpływu obecności ołowiu na jakość powierzchni barwnej farb ceramicznych na bazie topników ołowiowych i bezołowiowych.

Wszystkie farby charakteryzował parametr średnicy zastępczej $D(v,0.9) > 5\mu\text{m}$, oznaczany metodą dyfrakcji laserowej i parametr procesu topliwości farb wyrażony temperaturą półkuli $T_{pk} < 830^\circ\text{C}$.

Podłoże stanowiły tafle szklane ze szkła hartowanego i galanteria szklana (wazony).

Próbki farb były zawieszoną wodną o stałej, ustalonej w wyniku badań 44% koncentracji fazy stałej. Parametr średnicy zastępczej $D(v,0.9) < 5\mu\text{m}$ został ustalony w wyniku badań sedymentacji zawiesiny farbowej i zapewnia eliminację zjawiska sedymentacji.

Badanie rozkładu ziarnowego farb ceramicznych

Analizę rozkładu ziarnowego wykonywano metodą dyfrakcji laserowej, stosując analizator wielkości cząstek Mastersizer Microplus f-my Malvern. Oznaczone wartości średnic zastępczych $D(v,0.1)$, $D(v,0.5)$, $D(v,0.9)$, określają wielkość wymiaru cząstki, poniżej której występuje określony (10, 50, 90)% objętości populacji badanej próbki. Próbki farb były badane w 0,1% roztworze pirofosforanu sodowego, w warunkach recyrkulacji.

Badanie przebiegu procesu topliwości farb ceramicznych

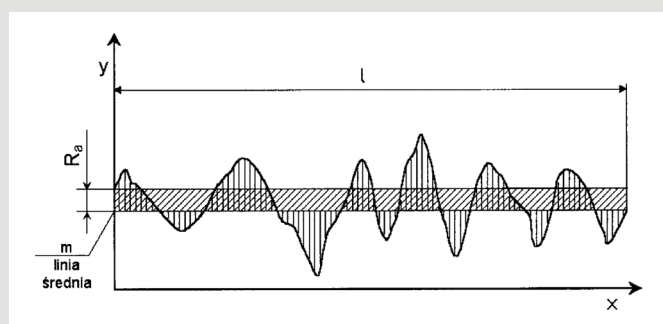
Pomiar poszczególnych punktów procesu prowadzono metodą pastylkową, zgodnie z normą BN-81/7001-01 Ceramika. Metody badań. *Oznaczenie topliwości.* Do badań zastosowano piec z kamerą wizyjną PR-37/1300K. Określano następujące punkty: T_r – temperatura punktu rogów, T_b – temperatura punktu becзки, T_k – temperatura punktu kuli, T_{pk} – temperatura punktu półkuli, T_{roz} – temperatura punktu rozplywu.

Badanie parametrów chropowatości

Przyjęto, że chropowatość, przy braku pęknięć, jest decydującym parametrem określającym wpływ poszczególnych czynników na jakość otrzymywanych powierzchni farbowych po naświetlaniu promieniowaniem laserowym.

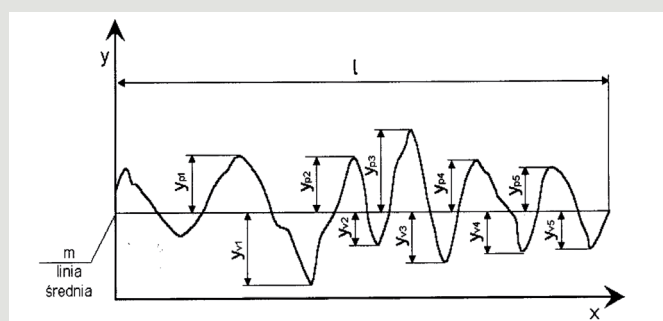
Oceniano tylko dwa podstawowe parametry chropowatości: R_a i R_z . przy pomocy profilometru (stożek diamentowy) TOPO 01Pv3D z kształtografem TOPO 01Kv3D

Parametr R_a – definiujący średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości. Wartość tego parametru wyliczana jest z wartości bezwzględnych odchylen profilu y od linii średniej m w przedziale odcinka elementarnego l (Rys. 1a).



Rys. 1a. Graficzne przedstawienie parametru R_a .

Parametr R_z – określający wysokość nierówności profilu powierzchni wg 10 punktów. Do obliczenia wykorzystuje średnią arytmetyczną wartości bezwzględnych wysokości pięciu najwyższych wzniesień i głębokości pięciu najniższych wgłębien profilu w przedziale odcinka elementarnego l (Rys. 1b).

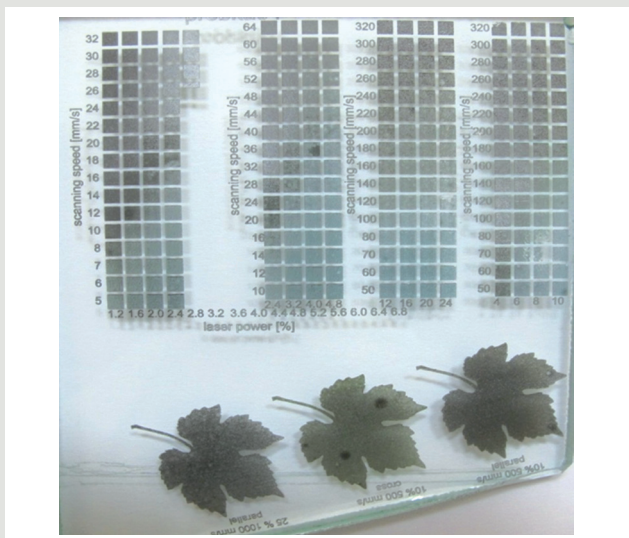


Rys. 1b. Graficzne przedstawienie parametru R_z .

Badanie przedziałów użytecznych zmian dawki energii laserowej

Materiał do badań przygotowywano, nanosząc aerograficznie wodne zawiesiny farb o jednakowej koncentracji fazy stałej na podłożu szklane.

Dla każdej badanej farby wyznaczano parametry pracy lasera (P – moc/ v –prędkość skanowania [J/mm]), korzystając z szablonu utrwalanych jednakowych kwadratów. Wyznaczony stosunek P/v określał dawkę energii laserowej dostarczanej do warstwy środka ceramicznego utrwalanego na podłożu szklanym.

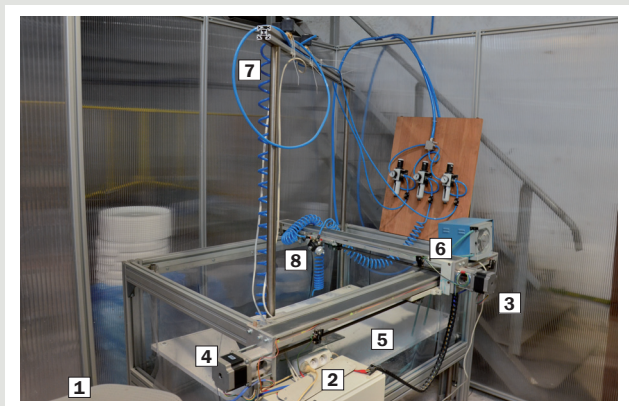


Rys. 2. Wzór szablonu do testowania.

Badanie warunków nanoszenia warstw środków ceramicznych na podłoża szklane

Dla opracowania sposobu nanoszenia warstw barwnych przygotowano wodną zawiesinę farby zielonej 62HZ3 o parametrze ziarnowym $D(v,0.9) < 5\mu m$ i wstępnej koncentracji 30%, 40%, 50% stałej masy. W badaniu wykorzystano kolejno technikę natrysku pistoletem, nanoszenie warstwy barwnej z zastosowaniem saneczek i w fazie końcowej aerograf. Grubość naniesionej warstwy barwnej badano przy użyciu cyfrowego mikroskopu 3D Hirox KH 8700. Określano średnią grubość i zakres zmian warstwy przed operacją naświetlania laserem. Po naświetleniu powierzchnię oceniano organoleptycznie. Najkorzystniejsze wyniki uzyskano przy nanoszeniu aerografem zawiesiny o koncentracji 44% fazy stałej.

Stanowisko do aerograficznego nanoszenia farb przedstawia Rys. 3.



Rys. 3. Zestaw służący do automatyzacji procesu napylenia farby na podłożu. 1 – komputer sterujący z oprogramowaniem MACH3; 2 – sterownik CNC; 3 – napęd osi Y; 4 – napęd osi X; 5 – stół roboczy; 6 – pompa perystaltyczna; 7 – instalacja pneumatyczna; 8 – platforma do mocowania pistoletu.

Stanowisko do badań zbudowano na bazie plotera XY oraz automatycznego pistoletu lakierniczego SAGOLA 4200.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

Wpływ rodzaju lasera i składu chemicznego środków ceramicznych poddawanych działaniu promieniowania laserowego

Dla wybranych 10 farb, stosując szablon do testowania, wyznaczono optymalną dawkę energii, przy której jest dobra przyczepność warstwy barwnej (warstwa nie daje się usunąć pod działaniem sił zewnętrznych) i największe w ocenie organoleptycznej wyblyszczanie powierzchni. Tabela 1 podaje wyniki średnich wartości R_a i R_z dla tych powierzchni, uzyskane przy naświetlaniu dwoma rodzajami laserów.

Tab. 1. Średnie wyniki wartości R_a i R_z dla powierzchni wybranych 10 farb.

Symbol farby	Optymalna dawka energii laserowej [J/mm]*		Wartość R_a [μm]		Wartość R_z [μm]	
	Laser 1070 nm	Laser 532 nm	Laser 1070 nm	Laser 532 nm	Laser 1070 nm	Laser 532 nm
62H-Cz1	0,15-0,25	0,0114	1,72	2,98	9,43	23,33
6FS-1500Cz	>0,03	0,0114	2,11	2,84	14,64	15,67
62H-N13	0,02-0,07	0,0114	1,71	3,17	10,81	16,40
6FS-1664N	>0,03	0,0114	1,88	2,14	9,88	12,61
7XV-R1	-	0,0114	-	2,36	-	13,27
6FS-1712R	-	0,0114	-	2,63	-	15,39
62HJ20	-	0,0114	-	2,15	-	11,54
6FS-2413J	-	0,0114	-	3,54	-	20,81
62HZ3	0,025	0,0114	8,81	2,58	41,92	11,96
6FS-2844Z	0,05	0,0114	7,22	3,64	33,50	17,10

*Optymalna dawka energii laserowej [J/mm] ze względu na przyczepność warstwy barwnej i parametry chropowatości.

Farby zaznaczone kolorem czerwonym zawierają w swoim składzie ołów. Parametry R_a i R_z zostały wyznaczone przy odstępnie linii (fill) 0,05 mm.

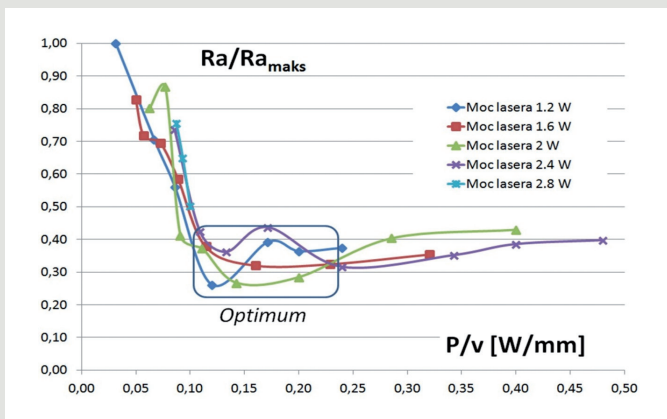
Uzyskane wyniki wskazują, że laser IPG o mocy do 10 W i długości fali 532 nm oddziałuje na pełny zakres kolorystyczny, podczas gdy laser SPI o mocy 100 W i długości fali 1070 nm działa jedynie na wybraną kolorystykę. Farby czerwona i żółta słabo absorbują to promieniowanie. Takie działanie lasera SPI dotyczy farb naniesionych na podłożu szklane. Stąd w przypadku zdobienia powierzchni szklanych techniką laserową celowe jest stosowanie lasera o długości fali 532 nm. Parametry chropowatości uzyskane dla poszczególnych powierzchni barwnych nie wskazują na preferencje farb z udziałem ołowiu lub jego braku, natomiast o ich wartości decyduje rodzaj i ilość pigmentów zawartych w farbach.

Wpływ dawki energii promieniowania laserowego na wartości parametrów R_a i R_z

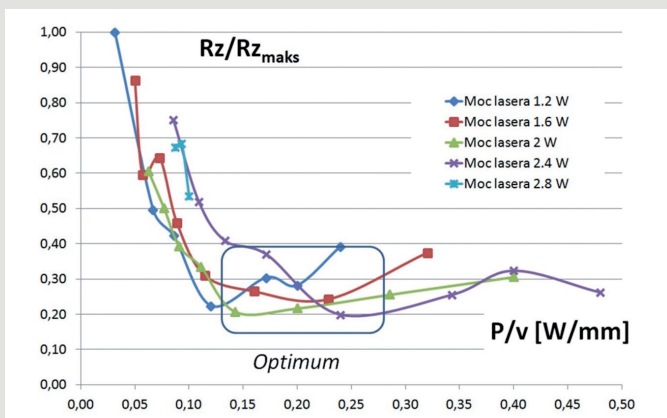
Wykresy na rys. 4 i 5 przedstawiają graficzne odwzorowanie tendencji zmian wartości parametrów R_a i R_z w zależności od dawki dostarczonej energii na przykładzie farby 62-HCz1 naświetlanej przy różnych mocach pracy lasera SPI. Rodzaj naświetlania był liniowy o odstępnie między liniami (fill) 0,07 mm.

Ocena organoleptyczna powierzchni dekoracji utrwalanej dla P/v poniżej przedziału 0,01–0,05 J/mm (w zależności od rodzaju farby) wykazała zanik minimalnego efektu utrwalania dekoracji.

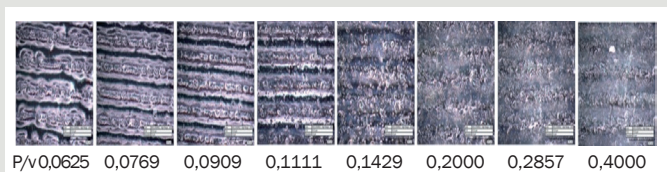
Jak wynika z wykresów, wartość optymalnej dawki energii P/v zawiera się w przedziale 0,1–0,27 J/mm . W zakresie wyższych P/v ponownie widoczny jest wzrost chropowatości, spowodowany zjawiskami fizycznymi towarzyszącymi oddziaływaniu promieniowania laserowego ze stopionym materiałem.



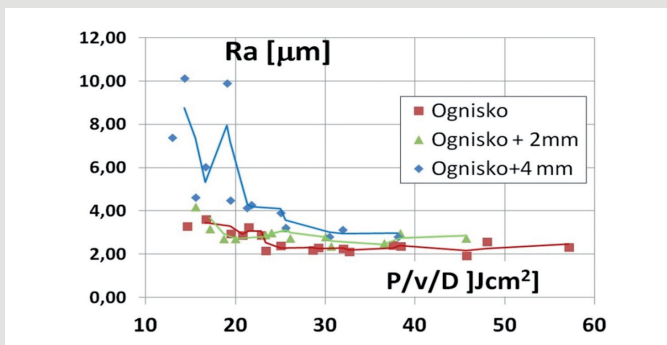
Rys. 4. Zmiana wartości parametru R_a w zależności od dawki dostarczonej energii.



Rys. 5. Zmiana wartości parametru R_z w zależności od dawki dostarczonej energii.



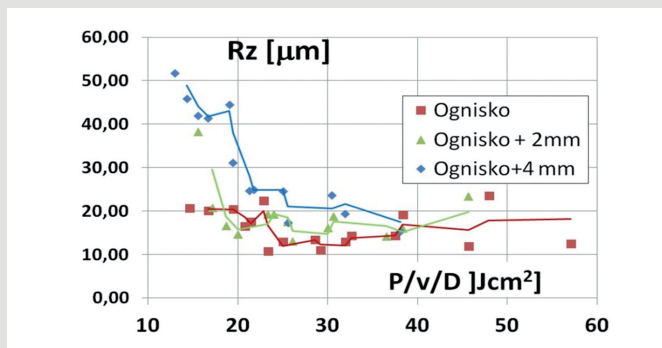
Rys. 6. Przykład mikroskopowych zdjęć powierzchni dla podanych wartości P/v .



Rys. 7. Badanie wpływu położenia płaszczyzny dekoracji i gęstości energii na parametr R_a .

Wpływ położenia płaszczyzny zdobionego szkła i gęstości energii na wartości parametrów R_a i R_z

Zależność parametrów chropowatości od gęstości energii przy różnych odległościach płaszczyzny szkła od płaszczyzny ogniskowej badano na przykładzie farby 6FS-1500Cz. Powierzchnie farbowe



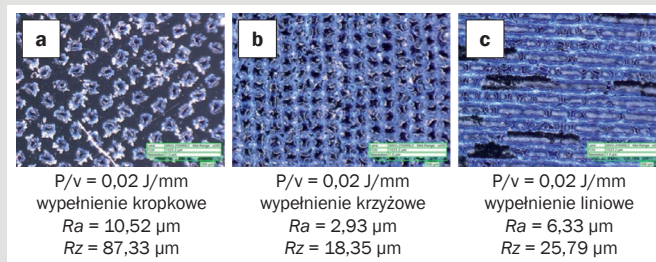
Rys. 8. Badanie wpływu położenia płaszczyzny dekoracji i gęstości energii na parametr R_z .

naświetlano laserem SPI przy różnych gęstościach energii w trzech różnych położeniach naświetlanej płaszczyzny w stosunku do odległości płaszczyzny obróbki od płaszczyzny ogniskowej. Otrzymane wyniki parametrów R_a i R_z ilustrują wykresy na rys. 7 i 8.

Dane na wykresie wskazują wyraźnie, że przy małych gęstościach energii wraz z odległością płaszczyzny obróbki od płaszczyzny ogniskowej rosną wartości parametrów chropowatości. Natomiast przy gęstości P/v w zakresie 38–40 J/cm^2 położenie płaszczyzny obróbki w stosunku do płaszczyzny ogniskowej nie ma wpływu na wartość parametrów R_a i R_z .

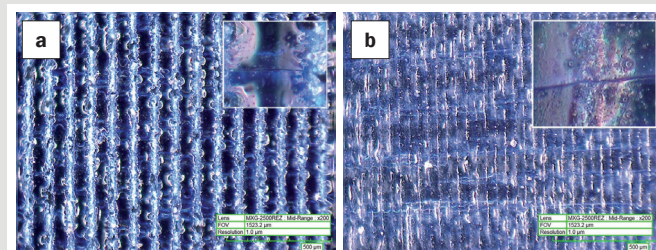
Wpływ rodzaju wypełnienia na wartości parametrów R_a i R_z

Wpływ gęstości i rodzaju wypełnienia na parametry chropowatości oceniano mikroskopowo przy pomocy optycznego mikroskopu cyfrowego 3D model KH8700 firmy Hirox. Wpływ rodzaju wypełnienia: kropkowy (a), krzyżowy (b), liniowy (c) przy analogicznej dawce energii ilustrują mikrofotografie powierzchni próbki utrwalonej laserem SPI farby 62H-N13.



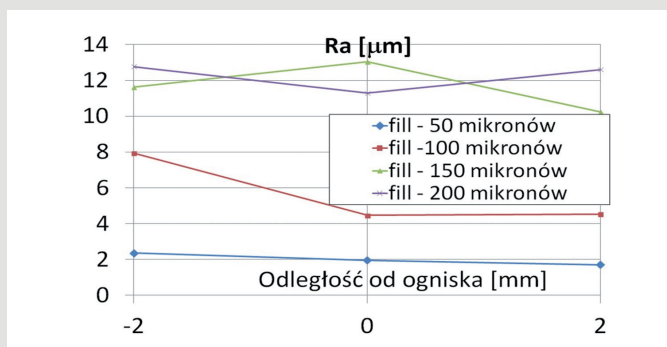
Rys. 9. Wpływ rodzaju wypełnienia: kropkowy (a), krzyżowy (b), liniowy (c).

Przyjmując wypełnienie krzyżowe jako najkorzystniejsze, porównano zależność intensywności barwy powierzchni od gęstości i rodzaju wypełnienia obrazu na przykładzie farby 62-HN13.



Rys. 10. Obrazy mikroskopowe farby 62HN13 utrwalonej promieniowaniem lasera SPI 1070 nm przy takiej samej dawce energii 0,02 J/mm : a) odległość między liniami skanowania 0,07 mm; b) 0,05 mm.

Intensywność barwy powierzchni zależy od rodzaju wypełnienia i odległości linii.



Rys. 11. Zależność parametru chropowości R_a od położenia płaszczyzny szkła przy różnych odstępach (fill).

Wpływ położenia płaszczyzny zdobionego szkła i różnych odstępów linii (fill) na wartość parametru R_a

Charakter zmian chropowości powierzchni testowych kwadratów przy zmianach geometrii wypełnienia i odległości płaszczyzny próbki od płaszczyzny ogniskowej systemu przedstawia rys. 11.

Wyniki wskazują, że najkorzystniejszy parametr chropowości uzyskuje się w przypadku ustawienia płaszczyzny szkła pokrytego warstwą farby ceramicznej w płaszczyźnie ogniskowej systemu i możliwie najmniejszych odstępach między liniami skanowania. Sensowny ekonomicznie wzrost odległości linii (szybsze skanowanie obszaru) prowadzi do drastycznego wzrostu chropowości powierzchni.

Wpływ konfiguracji naświetlania powierzchni barwnej (bezpośrednio na warstwę barwną i przez szkło) na parametr chropowości R_a

W przypadku oddziaływania promieniowania laserowego bezpośrednio na materiał barwny utrwalanie (stapianie) z podłożem następuje poprzez warstwę farby ceramicznej, a więc proces uzależniony jest od grubości tej warstwy. Od grubości zależą również dawki energii, optymalne ze względu na jakość dekoracji: gładkość – określaną parametrami chropowości, oraz ilość i wielkość defektów – ubytków w powłoce i pęknięć samej warstwy i podłoża szklanego.

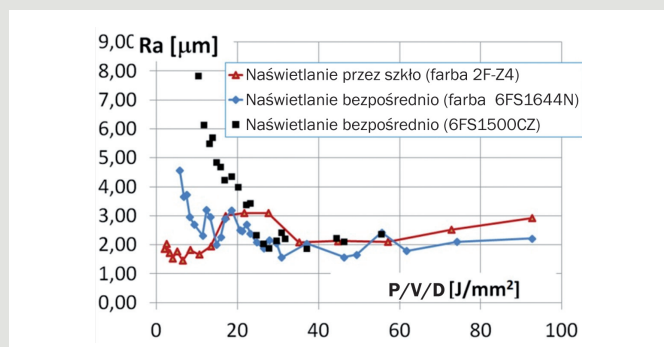
Wyniki badania parametru chropowości R_a naświetlania wybranej próbki farby przez warstwę szkła charakteryzowały się niską wartością przy małych dawkach energii, a więc w warunkach sprzyjających minimalizacji pęknięć dekoracji. Przy gęstości energii w przedziale 35–55 J/mm² konfiguracja nie ma większego wpływu na parametr chropowości R_a , natomiast oceny organoleptyczne próbek naświetlanych taką dawką energii były negatywne z uwagi na występujące pęknięcia warstwy barwnej.

Naświetlanie przez warstwę szkła zapewnia niższe, optymalne wartości dawki energii, a w konsekwencji minimalizację defektów (mikropęknięć, ubytków w powierzchni), wysoką gładkość utworzonej warstwy.

W porównaniu do konfiguracji naświetlania od strony pokrycia farbą, zależność parametru chropowości R_a od dawki energii ilustruje rys. 12.

PODSUMOWANIE

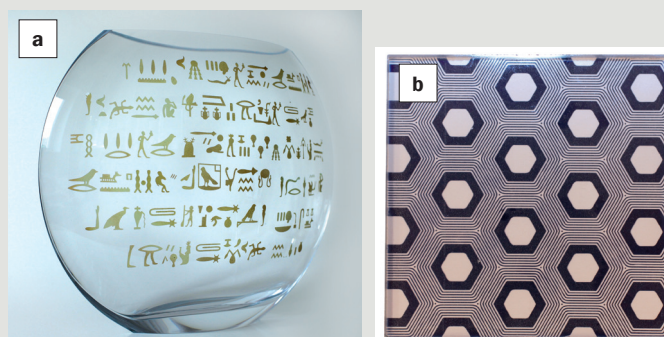
- Najkorzystniejsze wyniki parametrów chropowości R_a i R_z uzyskano przy zastosowaniu lasera pracującego na długości fali 532 nm.
- Jako ceramiczne środki barwne mogą być stosowane zarówno farby na bazie topników ołowowych, jak i bezolowowych (tabela 1).
- Analizy wykazały zanik minimalnego efektu utrwalania dekoracji dla P/v poniżej przedziału 0,01–0,05 J/mm, w zależności od rodzaju farby (tabela 1).
- Z uwagi na parametry chropowości nie opłaca się stosować



Rys. 12. Zależność parametru chropowości R_a od dawki energii i konfiguracji naświetlania.

dawek energii P/v większych niż wskazany przedział optymalny 0,1–0,23 J/mm. W zakresie wyższych P/v ponownie widoczny jest wzrost chropowości, spowodowany zjawiskami fizycznymi towarzyszącymi oddziaływaniu promieniowania laserowego ze stopionym materiałem (rys. 4 i 5).

- Przy małych gęstościach energii wraz z odległością płaszczyzny obróbki od płaszczyzny ogniskowej rosną wartości parametrów chropowości (rys. 7 i 8).
- Intensywność barwy powierzchni zależy od rodzaju wypełnienia i odległości linii (rys. 9 i 11).
- Naświetlanie przez warstwę szkła zapewnia niższe, optymalne wartości dawki energii i w ich zakresie niskie wartości parametru chropowości R_a (rys. 12).



Rys. 13. Utrwalone przez szkło na szkle hartowanym techniką laserową dekoracje opracowane przez Ceramikę Tubądzin II Sp. z o.o. i dekoracje na szkle gospodarczym utrwalone bezpośrednim oddziaływaniem promieniowania laserowego na powierzchnię barwną:

- a. warstwa barwna naświetlana bezpośrednio,
- b. warstwa barwna naświetlana przez szkło.

Badania wykonano w ramach projektu Programu Badań Stosowanych pt. „Innowacyjna technologia barwnego, laserowego zdobienia szkła płaskiego środkami ceramicznymi”.

LITERATURA

- [1] Wyres C. A., Jarvis A. N. D., Walker M. R., *Laser markable compositions*, Patent brytyjski GB 2447659A
- [2] Khan N., Walker R. M., *Laser -imageable marking compositions*, Patent WO200763339A3
- [3] Knell T. A., *Laser marking compositions and methods for producing bright oxidation resistant marks*, Patent europejski EP 1110660A2
- [4] Chmielewska D., Marczak J., Sarzyński A., Strzelec M. (2011), *Laserowe nanoszenie znaków barwnych na podłoża ceramiczne*, „Inżynieria Materiałowa”, nr 4, 368–371
- [5] Faust W. D. (2008), *Laser Marking Materials*, [w:] *64th Porcelain Enamel Institute Technical Forum: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 23 (5), Wiley, Ch. 5
- [6] Florian T. (2005), *Szkle pod działaniem lasera*, „Świat Szkła”, 2, 68–69
- [7] Fernandes-Pradas J. M., Restrepo J. W., Gomez M. A., Serra P., Morenza J. L. (2007), *Laser printing of enamels on tiles*, „Applied Surface Science”, 253, 7733–7737