

JACEK BANASZAK

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Politechnika Poznańska, Poznań

Analiza jakościowa materiałów suszonych mikrofalowo

Wprowadzenie

W wielu gałęziach przemysłu (np. ceramicznym, drzewiar skim, spożywczym, farmaceutycznym) wykorzystuje się na coraz szerszą skalę suszenie mikrofalowe [1–5]. W porównaniu z suszarniami konwekcyjnymi, mikrofalowe są mniej energochłonne w trakcie samego użytkowania, lecz koszty ich zakupu są znacznie wyższe niż konwekcyjnych. Ich konstrukcje pozwalają z reguły na suszenie małych partii materiału. Mimo, że są one trudniejsze do technologicznego wdrożenia to pozwalają znacząco skrócić czas przebywania wyrobu w suszarni w porównaniu z suszeniem konwekcyjnym. Niestety produkty suszone mikrofalowo są bardziej narażone na deformacje i pęknięcia, niż te suszone w suszarniach konwekcyjnych. Wymagane jest zatem stosowanie precyzyjnego dozowania mocy mikrofalowej w trakcie procesu, aby zapewnić wysoką jakość końcową produktu.

W zależności od mocy dostarczanych mikrofal można uzyskać finalny wyrób bardzo szybko wysuszony, gdy działa się silnym polem dielektrycznym, bądź proces suszenia będzie trwał wolno w przypadku wykorzystywania małej mocy magnetronu. Jednak, gdy suszenie odbywa się przy zbyt dużej mocy mikrofalowej, to w produktach uwidocznią się wady obniżające ich końcową jakość.

Podczas suszenia mikrofalowego nagrzewanie ciała do temperatury wrzenia wody zachodzi na tyle intensywnie, że szybkość parowania cieczy wewnątrz ciała znacznie przewyższa prędkość jej przenoszenia do powierzchni. W rezultacie wewnątrz ciała powstaje nadciśnienie, które jest główną siłą napędową ruchu wilgoci w trakcie suszenia [6, 7].

W przypadku dostarczenia zbyt dużej porcji energii materiał może ulec zniszczeniu wewnątrz próbki. W efekcie jakość materiałów suszonych mikrofalowo nie zawsze można prawidłowo ocenić jedynie na podstawie stanu powierzchni. Często próbka nie wykazująca żadnych spękań powierzchniowych wewnątrz posiada wady struktury (np. wypalone wewnątrz drewno, powstałe mikropory w masach ceramicznych wywołane gwałtownym wzrostem ciśnienia pary wodnej) [8, 9].

W pracy przeprowadzono doświadczalną analizę wpływu działania mikrofal na suszony materiał. Do badań wykorzystano próbkę wykonaną z kaolinu KOC, który jest wykorzystywany w przemyśle ceramicznym do produkcji ceramiki stołowej. Cylindryczna kaolinowa próbka o średnicy 60 mm i wysokości 60 mm spoczywała na trzpieniu wykonanym z ceramiki korundowej, transparentnej dla mikrofal. Całość została umieszczona w laboratoryjnej komorze mikrofalowej aparatu firmy *Plazmatronika* o maksymalnej mocy magnetronu 600 W.

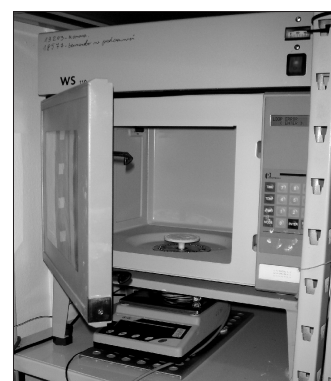
Przeprowadzono suszenie przy zastosowaniu różnych mocy magnetronu. W trakcie procesu monitorowano temperaturę

i wilgotność panującą w komorze oraz ubytek masy próbek i temperaturę jej górnej powierzchni.

Po wysuszeniu próbki badano stan jakości jej powierzchni pod względem powstałych spękań i deformacji. Przeanalizowano także kiedy i w których miejscach próbki dochodzi do destrukcji. W celu pogłębienia analizy w wybranych chwilach czasowych przerywano suszenie, próbkę przecinano i rejestrowano za pomocą kamery podczerwieni rozkład temperatury na powstałym przekroju próbki oraz za pomocą aparatu fotograficznego stan powierzchni przekroju.

Stanowisko badawcze

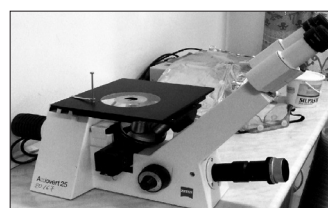
W celu dokładniejszej charakterystyki wysuszonych mikrofalowo próbek przeprowadzono analizę makroskopową i mikroskopową na podstawie dokumentacji zdjęciowej. Fotografowano zarówno powierzchnię zewnętrzną próbek, która została wykorzystana do standardowej oceny jakości materiału, jak również jej przekroje. Analiza mikroskopowa pozwoliła na zbadanie charakteru pęknięć i dostarczyła dodatkowe informacje o stanie materiału suszonego. W celu pogłębienia ana-



Rys. 1. Suszarka mikrofalowa PLAZMATRONIKA WS 110 wraz z wagą RADWAG WPS 2100



Rys. 2. Maszyna wytrzymałościowa KOGEL FGP 7/18 - 100



Rys. 4. Mikroskop optyczny ZEISS AXIOVERT 25



Rys. 3. Kamery termowizyjna THERMA CAM B2

lizej wykonano również zdjęcia połówek próbek w technice podczerwieni. Uzyskane dane wzbogaciły wiedzę na temat rozkładu temperatur w suszonym materiale. Kończącym elementem badań jakości wysuszonych próbek dla różnych mocy mikrofal była zbadanie ich wytrzymałości na ściskanie.

Badania pozwalające na dokonanie analizy jakości materiałów ceramicznych zostały przeprowadzone na następujących aparatach: suszarce mikrofalowej PLAZMOTRONIKA WS 110 o mocy 600 W wraz z wagą RADWAG WPS 2100 (Rys. 1), uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej FGP 7/18 – 100 firmy *Koegel* (Rys. 2) oraz za pomocą kamery termowizyjnej THERMA CAM B2 (Rys. 3) i mikroskopu optycznego ZEISS AXIOVERT 25 (Rys. 4).

Przygotowanie próbek do badań

Badanym materiałem był kaolin KOC wydobywany przez firmę *Surmin-Kaolin* [10]. Materiał do badań umieszczono w naczyniu hermetycznym. Kaolin został zarobiony z wodą i szczelnie zamknięty na 48 godzin w celu wyrównania zawartości wilgoci w całej jego objętości. Analizę wykonano dla surowca o wilgotności zawartej w przedziale od 43 do 46%. Tak przygotowana masa została wykorzystana do uformowania próbek. Proces formowania próbek został przeprowadzony z wykorzystaniem formy walcowej o wysokości 60 mm i średnicy 60 mm.

Metodyka badań

Podstawowym celem pracy jest ukazanie, na jakie wady materiałowe narażone są wyroby ceramiczne suszone przy różnej mocy pola mikrofalowego. Wykonano cztery cykle pomiarowe, odpowiednio dla 20, 30, 40 i 50% mocy mikrofal. Dla wyższych mocy tj. powyżej 50% badań nie można było przeprowadzić dla tej wielkości próbek, gdyż tzw. moc odbita mikrofal była zbyt duża i suszarka wyłączała się aby chronić magnetron przed zniszczeniem. Moc promieniowania dozowana była w sposób ciągły, tzn. jeżeli magnetron był ustawiony na 50% (300 W) to przez cały czas procesu magnetron generował mikrofałe o tej mocy. Wyszuszone cztery próbki dla 30% mocy mikrofal oraz po dwie próbki dla pozostałych warunków suszarniczych. Wyznaczono krzywe suszenia i temperaturowe, a następnie próbki poddawano analizie stanu powierzchni: makro- i mikrostruktury. Na zakończenie tej części badań próbki zostały poddane próbie wytrzymałościowej na ściskanie. W drugiej części badań przeanalizowano strukturę wewnętrzną suszonych próbek. I tak dla kolejnych trzech próbek suszonych przy określonej mocy mikrofal wykonano suszenie do zadanych momentów czasowych: środek okresu podgrzewania, okresu stałej szybkości suszenia oraz na zakończenie procesu suszenia. Po wysuszeniu do zadanego czasu próbki przekrojono wzdłuż na dwie połowki i zrobiono fotografie w świetle widzialnym i podczerwonym w celu uzyskania informacji o tym, co zachodzi we wnętrzu materiału w poszczególnych etapach suszenia.

Suszenie mikrofalowe

Po wcześniejszym przygotowaniu kaolinu, uformowano z niego próbki w kształcie walca i umieszczono na ceramicznym trzpieniu neutralnym dla pola mikrofalowego. Całość została wprowadzona do komory suszarki mikrofalowej. Każda próbka była suszona przy zastosowaniu innej, mocy mikrofal, tj. 20% (120W), 30% (180W), 40% (240W) i 50% (300W). W

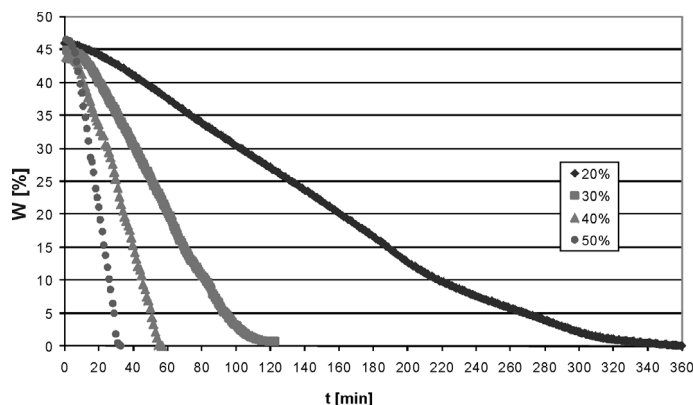
trakcie suszenia mierzono zmiany masy próbki związaną z utratą wilgoci, za pomocą wagi *Radwag WPS 2100* oraz odczytywano temperaturę z górnej powierzchni walca, dzięki pirometrowi umieszczonemu w górnej pokrywie obudowy suszarki.

Pomiary masy próbki i temperatury w czasie, posłużyły do sporządzenia krzywych suszenia i krzywych temperaturowych.

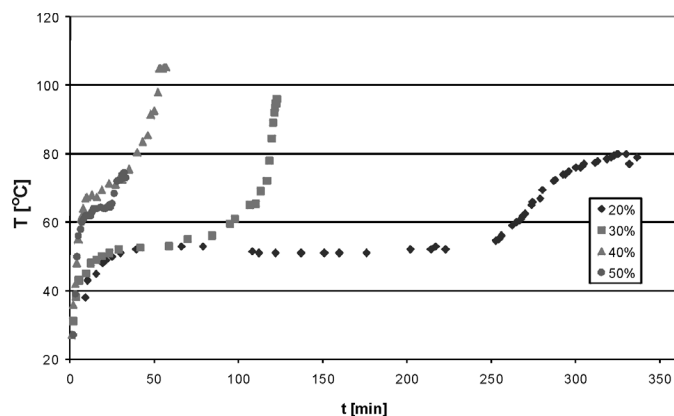
Krzywe suszenia przedstawiają zależność zawartości wilgoci od czasu procesu. Na rys. 5 zamieszczono krzywe suszenia charakteryzujące poszczególne badania.

Z analizy otrzymanych wykresów wynika, że w początkowym etapie procesu następuje wydzielanie wilgoci swobodnej. Okres podgrzewania materiału dla poszczególnych próbek jest różny. Zauważono, że im większa moc suszenia tym czas podgrzewania znacznie się skraca, od 50 minut przy 20% mocy suszenia do 8 minut w przypadku 50%. Po upływie tego czasu na wykresach pojawia się prostoliniowa zależność związana ze stałą szybkością suszenia. Stwierdzono, że nachylenie tego odcinka wykresu do osi czasu jest różne, zależne od mocy suszenia. I tak, w przypadku próbki kaolinu suszonej 30, 40 i 50% mocą mikrofal nastąpiła gwałtowna utrata wilgoci, w krótkim przedziale czasu. Inaczej przedstawia się sytuacja przy 20%, ubytek wody następował stopniowo i mniej intensywnie, dlatego nachylenie tej części krzywej jest bardziej łagodne w porównaniu do pozostałych.

Po etapie stałej szybkości suszenia następuje drugi okres suszenia. Rozpoczyna się on w momencie, kiedy zostanie przekroczony punkt wilgotności krytycznej. W tym momencie dochodzi do przerwania ciągłej warstwy filmu cieczy, na po-



Rys. 5. Krzywe suszenia charakteryzujące przeprowadzone badania



Rys. 6. Krzywe temperaturowe charakteryzujące przeprowadzone badania

wierzchni pojawiają się pierwsze suche miejsca. Wpływa to na znaczne ograniczenie transportu wilgoci, dlatego ostatni odcinek krzywych suszenia charakteryzuje się dużą łagodnością spadku i dąży do wilgotności równowagowej. Dla procesów przebiegających w ostrych warunkach suszarniczych: 40 i 50% mocy mikrofal, niemożliwe jest określenie wilgotności krytycznej na podstawie krzywych suszenia. Pomocna w tym celu staje się analiza krzywych temperaturowych (Rys. 6).

Wykresy te przedstawiają jak zmieniała się temperatura na górnej powierzchni walca w funkcji czasu. Jak można zauważyć, krzywe sporządzone dla poszczególnych mocy suszenia mają podobny przebieg. Zmiana temperatury spowodowała, że na wykresach można wyznaczyć tzw. okres podgrzewania. Występuje on w pierwszych minutach suszenia. Dla próbki kaolinu suszonego 20 i 30% mocą mikrofalii zaobserwowano, że te części krzywych są do siebie bardzo zbliżone, niemalże nakładają się. Podobną zależność zauważono w przypadku krzywych dotyczących 40 i 50% mocy suszenia, z tym wyjątkiem, że tutaj czas podgrzewania jest znacznie krótszy, trwa około 10 minut.

Po okresie podgrzewania, kolejnym etapem jest tzw. okres stałej prędkości suszenia, który charakteryzuje się stałą temperaturą suszenia. Wywołane to zostało stałymi parametrami czynnika suszącego, który spowodował wyrównanie się temperatury w całej objętości suszonego materiału.

Utrata wilgoci w materiale powoduje gwałtowny wzrost temperatury na jego powierzchni, aż do osiągnięcia stałej wartości, jaką jest temperatura mokrego termometru. Temperatura ta nie ulega zmianie, aż do osiągnięcia wilgotności krytycznej, stąd też odpowiada ona pierwszemu okresowi suszenia.

Analizując otrzymane krzywe zauważono, że dla 20 i 30% mocy suszenia wartość stałej temperatury oscyluje w tych samych granicach, jest to około 50°C. Natomiast wartość tego samego parametru dla 40 i 50% jest znacznie większa, mieści się w przedziale 60–70°C.

Czas przebiegu procesu związanego ze stałą szybkością suszenia jest różny w zależności od zastosowanej mocy suszarki mikrofalowej. Jak zaobserwowano na krzywych, rozbieżności między nimi są duże. Najdłuższy okres stałej szybkości suszenia występuje w przypadku próbki kaolinu ogrzewanego 20% mocą mikrofalii, trwa on około 210 minut. Przy suszeniu 40 i 50% mocą czas ten uległ znacznemu skróceniu. Zawarty jest w granicach 10–15 minut.

Po okresie stałej szybkości suszenia, zaobserwowano gwałtowny wzrost temperatury. Ten odcinek krzywej związany jest z ogrzewaniem wysuszonej powierzchni ciała (okres malejącej szybkości suszenia). Gwałtowny wzrost temperatury do ponad 100°C następował w przypadku suszenia próbek kaolinu już od zastosowanej 30% mocy mikrofalii. Natomiast dla 20% parametr ten rósł stopniowo, dążąc do około 80°C.

Analiza jakości powierzchni wysuszonych próbek

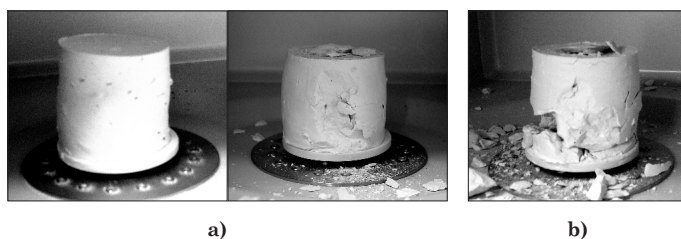
Na tym etapie badań dokonano makroskopowej oceny jakości materiału. Poniżej zamieszczono zdjęcie przedstawiające próbki charakteryzujące poszczególne cykle pomiarowe, zaczynając od 20% mocy suszenia kończąc na 50% intensywności promieniowania (Rys. 7).

Przeprowadzając analizę kaolinu suszonego 20% mocą mikrofalii nie zauważono żadnych wyraźnych zmian w strukturze powierzchni próbek.



Rys. 7. Charakterystyka kaolinu suszonego mocą z zakresu od 20 do 50% intensywności promieniowania

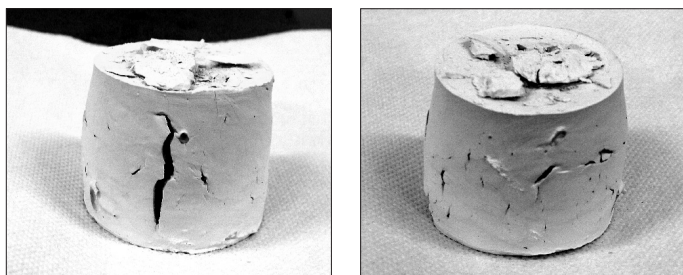
W próbkach suszonych z 30% mocy mikrofalowej magnetronu zaobserwowano różną jakość wysuszonej powierzchni. Z czterech suszonych próbek w tych warunkach suszarniczych dwie odznaczały się dobrym jakościowo stanem powierzchni, a w pozostałych dwu doszło do powstania wad suszarniczych (spękania, odłupanie kawałków próbki na obwodzie walca) (Rys. 8a). Zauważono również niewielką deformację kształtu – beczułkowatość.



Rys. 8. Wygląd zewnętrzny próbek kaolinu dla: a) 30%; b) 40% intensywności suszenia

Dla próbek suszonych przy 40% zauważono duży stopień naruszenia struktury powierzchni, wystąpiło zjawisko rozsadzania materiału (Rys.8b). Część suszonej próbki została oddzielona od głównego szkieletu. Zwiększenie mocy mikrofalii spowodowało wzrost intensywności promieniowania. Woda, która występowała w porach suszonego materiału wykazała zdolność absorbowania promieniowania mikrofalowego, stanowiąc w ten sposób objętościowe źródło ciepła. Temperatura wody w wolnych przestrzeniach osiąga wartość wrzenia, a pojawiająca się para stanowi lokalne źródła ciśnienia, które nie znajdując ujścia na zewnątrz próbki, rozsadzają materiał od wewnątrz. Odłupywanie fragmentów próbki następowało głównie w dolnej części próbki na całym jej obwodzie. Zjawisko to zaobserwowano odnośnie próbek dla 40% mocy suszenia oraz niektórych próbek suszonych w 30%. Ciekawe jest pojawienie się lejkowatego odłupania fragmentów próbki na jej górnej powierzchni. Dotychczas obserwowano je jedynie dla próbek suszonych konwekcyjnie i związane jest z układem naprężeń suszarniczych wokół górnej powierzchni [11]. Deformacje w postaci beczułkowatości próbki jest znacznie wyraźniejsza niż dla próbek suszonych w niższych mocach magnetronu.

Analiza zdjęć materiału suszonego przy 50% mocy mikrofalii przedstawiła zaskakujące efekty (Rys. 9). Można było przypuszczać, że przy tak dużej intensywności suszenia próbka ulegnie znacznie większej destrukcji niż to miało miejsce w przypadku 30 i 40%. Jednak obraz końcowy przedstawiał się zupełnie inaczej. W ścianie walca zaobserwowano pęknięcie w postaci szczeliny powstałe w początkowym okresie suszenia (około 10 minuty), gdy wilgotny materiał łatwo się de-



Rys. 9. Zdjęcia przedstawiające próbkę kaolinu przy 50% intensywności suszenia

formował. Na tej podstawie stwierdzono, że to właśnie tą drogą wydostała się nagromadzona para i nie nastąpiła dalsza destrukcja materiału. Dodatkowo beczułkowaty kształt próbki może świadczyć o procesie rozsadzania materiału od wewnątrz.

Analiza jakości wnętrza materiału

Ten etap badań oparty był na wykonaniu zdjęć przekrojów próbek w podczerwieni i świetle widzialnym. Do przeprowadzenia tej analizy konieczne było ponowne przygotowanie próbek kaolinu KOC i poddaniu ich suszeniu mikrofalowemu, przy określonej mocy suszenia. Z tym wyjątkiem, że założono czas suszenia, po upływie, którego następowała analiza. Materiał po wysuszeniu został rozpolowiony i poddany badaniu.

Zdjęcia próbek suszonych przez 30 minut, ale przy różnej mocy mikrofal: 20, 30 i 40% zamieszczono na rys. 10. Analizując wyniki zauważono, że wartości temperatur różnią się od siebie, mimo iż czas suszenia był jednakowy. Sytuacja ta zależy od intensywności suszenia. Im mniejsza moc mikrofal tym woda zawarta w porach materiału wolniej absorbowała emitowane promieniowanie i tym samym wolniej się ogrzewała. Dlatego dla 20% mocy suszenia zaobserwowano, że po 30 minutach maksymalna wartość temperatury, jaka została osiągnięta to 32°C, gdzie w przypadku 40% mocy wartość ta wyniosła 77°C. Temperatura w środku ciała jest najwyższa natomiast na brzegach jest niższa, co jest charakterystyczne dla przedmiotów suszonych mikrofalowo.

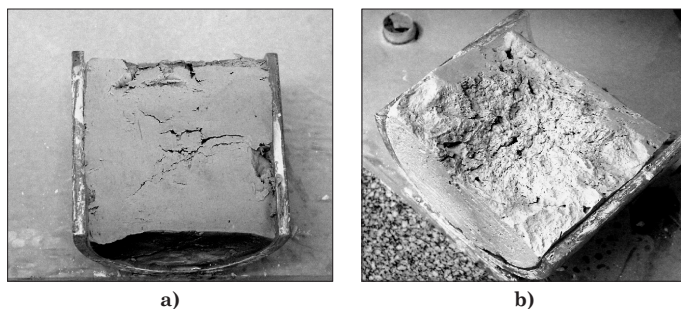
Zdjęcie przekroju próbki kaolinowej suszonej 50% mocą mikrofal w 5. minucie procesu zaprezentowano na rys. 11. W tak krótkim czasie i przy tak wysokiej intensywności pro-

mieniowania otrzymano wewnątrz średnią temperaturę równą 67°C.

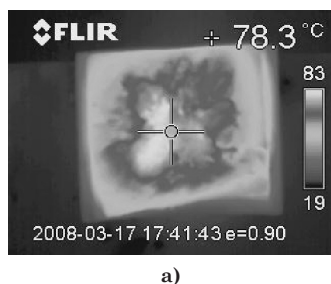
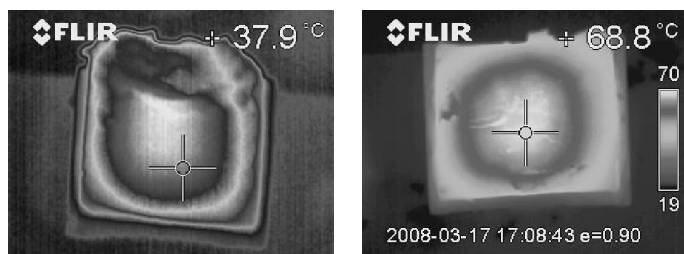
Na rys. 11 widać wyraźnie „gorące punkty” uzyskane kamerą termowizyjną. Są to miejsca niejednorodności materiału, a więc pory, w których dochodzi pod wpływem mikrofal do przemiany wody w parę. Stąd panująca w nich temperatura jest znacznie wyższa niż w materiale. W trakcie przemian woda-para cząsteczki wody znacznie powiększają swoją objętość i stąd dochodzi do gwałtownego rozrostu małych porów w duże szczeliny, które można nawet zobaczyć na zewnątrz materiału (Rys. 9).

Po analizie termowizyjnej sporządzono kilka zdjęć zwykłym aparatem fotograficznym w celu zbadania wpływu suszenia mikrofalowego na jakość wewnętrzną próbek.

W przypadku próbki dla 40% mocy różnice temperaturowe są niewielkie w 10 i 30 minucie, natomiast budowa wewnętrzna znacznie się różni. Po 10 minutach suszenia zaobserwowano niewielkie pęknięcia w centralnej części (Rys. 12a), natomiast po 30 minutach było ich znacznie więcej i zauważono brak jednolitej struktury materiału (Rys. 12b). Podobną sytuację zaobserwowano w próbce suszonej z 30 i 50% intensywnością mocy mikrofal.



Rys. 12. Wygląd wewnętrzny próbki kaolinu suszonego 40% mocą, przez okres a) 10 min b) 30 min

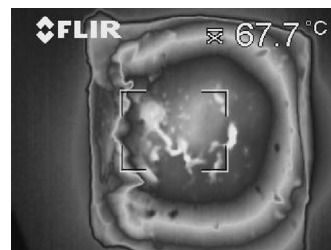


Rys. 10. Porównanie wartości temperaturowych we wnętrzu próbki w 30 minucie suszenia przy różnej mocy mikrofal: a) 20%; b) 30%; c) 40%

Do kompleksowego zobrazowania wpływu mocy suszenia na jakość wewnętrzną materiału, na rys. 13 zamieszczono próbki suszone w 20%. Mimo, że próbka została wykonana specjalnie z dużą ilością porów wewnętrznych, to nie widać ich rozrostu spowodowanego przemianą woda – para pod wpływem ogrzewania wywołanego polem mikrofalowym. Oznacza to, że w tym przypadku moc mikrofal została dobrana prawidłowo.

Analiza mikroskopowa

Badanie wysuszonych próbek za pomocą mikroskopu optycznego (*Carl Zeiss Axiovert 25*) pozwoliło na dokładniejszą ocenę powierzchni wysuszonego materiału. Otrzyma-



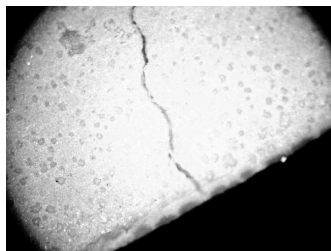
Rys. 11. Mapa temperaturowa przekroju próbki w piątej minucie suszenia z 50% mocą mikrofal



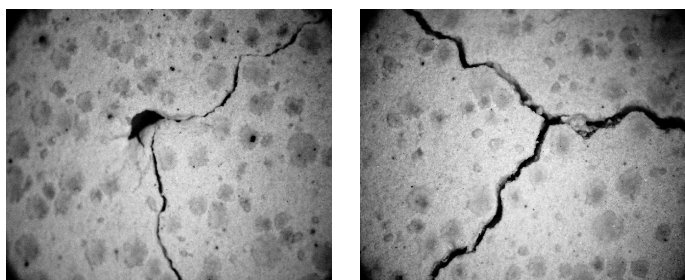
Rys. 13. Struktura wewnętrzna próbki kaolinu w 30 minucie, suszonej przy 20% intensywności promieniowania

nie obrazu próbki w powiększeniu umożliwiło dokonanie analizy, która ujawniła nowe szczegóły.

Przeprowadzając wizualną ocenę próbki kaolinu dla 20% mocy suszenia nie stwierdzono obecności defektów w postaci pęknięć. Jednak analiza mikroskopowa dowiodła, że w strukturze walca, na ścianie bocznej wystąpiła niewielka szczelina (Rys. 14). Podobne pęknięcia, tylko w większej skali oraz szersze wystąpiły w przypadku próbki kaolinu dla 30% mocy promieniowania (Rys. 15).

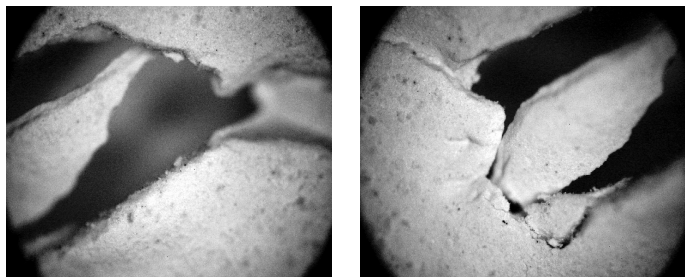


Rys. 14. Analiza mikroskopowa powierzchni zewnętrznej próbki suszonej przy 20% intensywności promieniowania



Rys. 15. Analiza mikroskopowa powierzchni zewnętrznej próbki suszonej przy 30% intensywności promieniowania

W przypadku próbki kaolinu dla 50% mocy (Rys. 16), podczas analizy wizualnej zauważono szczelinę. Badanie pod mikroskopem umożliwiło dokładniejsze scharakteryzowanie pęknięcia. Sięgało ono znacząco w głąb materiału. Brzegi tej szczeliny są postrzępione, co wskazuje na gwałtowną genezę jej powstania.



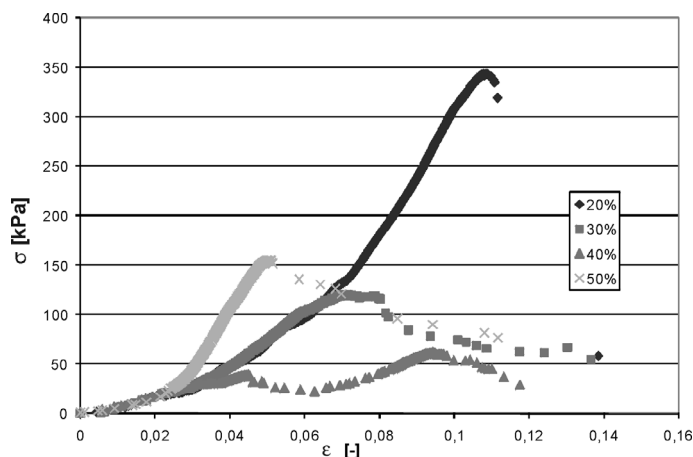
Rys. 16. Analiza mikroskopowa powierzchni zewnętrznej próbki suszonej przy 50% intensywności promieniowania

Analiza wytrzymałościowa

Jednym z celów procesu suszenia przemysłowego jest to, aby wysuszone wyroby charakteryzowały się wystarczającą wytrzymałością materiału pozwalającą na ich magazynowanie oraz transport.

Badanie wytrzymałości materiałów na ściskanie zostało przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej *Koegel FGP 7/18*. Przyrost siły ścisającej wynosił 1[N/s]. Uzyskane dane posłużyły do wykreślenia zależności naprężenia od odkształcenia i zostały przedstawione na rys. 17.

Krzywe przedstawiające wytrzymałość próbek wysuszonych charakteryzują się typowymi właściwościami materiałów kruchych, różnią się jedynie wielkością obciążenia, przy którym następowało zniszczenie. Dla próbki kaolinu suszonego przy 20% mocy występuje największa wartość naprężenia, przy którym następuje destrukcja, wynosi ono około



Rys. 17. Wykres naprężenie-odkształcenie dla próby jednoosiowego ściskania

350 kPa. Maksymalne wartości naprężeń dla pozostałych przypadków są znacznie mniejsze, zawierają się w przedziale od 40 do 150 kPa. Z otrzymanych krzywych wynika, że im bardziej jest naruszona struktura analizowanej próbki, tym jej wytrzymałość na ściskanie jest znacznie mniejsza. Przykładem jest krzywa charakterystyczna dla 40% mocy suszenia. Próbka wysuszona w 50% ma większą wytrzymałość niż próbki suszone w 30 i 40%. Związane jest to z tym, że w próbce (50%) istnieje jedna duża szczelina, poza którą materiał jest jednorodny. Natomiast próbki (30 i 40%) posiadają liczne pęknięcia obniżające właściwości wytrzymałościowe wyrobu.

Podsumowanie

- Analiza wyników eksperymentów pozwala stwierdzić, że:
- Moc suszenia mikrofalowego wywiera istotny wpływ na jakość suszonych materiałów.
 - Badanie wizualne i mikroskopowe próbki suszonej przy 20% mocy mikrofalowej dowiodło, że struktura materiału jest niemalże idealna, z wyjątkiem małego pęknięcia na powierzchni. Poza tym badanie wytrzymałościowe ukazało, że do zniszczenia tej próbki potrzebna była największa wartość siły ściskania. Analiza termowizyjna, krzywe suszenia i temperaturowe pokazały, że suszenie przy takiej mocy mikrofalowej jest procesem długotrwałym i stopniowym, jednak efekt końcowy jest znacznie lepszy niż w pozostałych przypadkach.
 - W przypadku próbek kaolinu suszonych przy 30% mocy magnetronu wystąpiło zjawisko rozsadzania materiału w dwóch z czterech badanych próbek. Pojawiły się liczne pęknięcia i deformacje, które były mniej lub bardziej widoczne. Struktura wewnętrzna we wszystkich próbkach była naruszona. Próbka mająca niewidoczne pęknięcia na zewnątrz i zniszczoną strukturę wewnątrz jest szczególnie trudna do standardowej oceny jakości polegającej tylko na opisie powierzchni materiału. Analiza wytrzymałościowa pokazała, że próbka suszona przy 30% intensywności promieniowania jest 3 razy mniej wytrzymała na ściskanie niż materiał suszony przy 20% mocy mikrofalowej.
 - Najgorszymi własnościami charakteryzuje się próbka suszona przy 40% mocy mikrofalowej. Analiza wytrzymałościowa wykazała, że zniszczenie próbki nastąpiło przy najniższych wartościach naprężeń. Poza tym obraz próbki uwieczniony na zdjęciach pokazał jak bardzo proces suszenia mikrofalowego naruszył strukturę wyjściową walca.

e) Próbka suszona w 50% mocy mikrofalii posiada jedno dużych rozmiarów pęknięcie, które powstało w pierwszej fazie suszenia, gdy gwałtownie zmieniająca się w parę woda rozsadziła próbkę, a wilgotny materiał był podatny na deformacje.

Pracę wykonano w ramach projektu N N208 020434 sponsorowanego przez Ministerstwo Edukacji i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

1. Cz. *Strumiłło*: Podstawy teorii i techniki suszenia, WNT, Warszawa (1983).
2. M. *Kordek*, M. *Raczyński*: Suszarnie i piece ceramiczne, WSiP, Warszawa (1987).
3. T. *Baysal*, F. *Icier*, S. *Ersus*, Y. *Hasan*: European Food Research and Technology **218**, nr 1, 68 (2003).
4. T. *Pilli*, R. *Giuliani*, A. *Derossi*, C. *Severini*: J. of the American Oil Chemists' Society, **85**, nr 9, 827 (2008).
5. M. *Araszkiewicz*, A. *Koziół*, A. *Lupinska*, M. *Lupinski*: Transport in Porous Media **66**, nr 1-2, 173 (2007).
6. Y. *Soysal*: Biosystems Engineering **89**, nr 2, 167 (2004).
7. S. *J. Kowalski*, K. *Rajewska*, A. *Rybicki*: Fizyczne podstawy suszenia mikrofalowego, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
8. M. *A.M. Khraishah*, W. *A.M. McMinn*, T. *R.A. Magee*: Food Research International **37**, nr 5, 497 (2004).
9. S. *J. Kowalski*, K. *Rajewska*, A. *Rybicki*: Drying Technology, **22** nr 10, 2291 (2004).
10. Kopalnia Surowców Mineralnych SURMIN-KAOLIN S.A. (25.05.2008): <http://www.surmin-kaolin.com.pl>, 25.05.2008.
11. S. *J. Kowalski*, A. *Rybicki*: Transport in Porous Media, **66**, nr 1-2, 43, (2007).