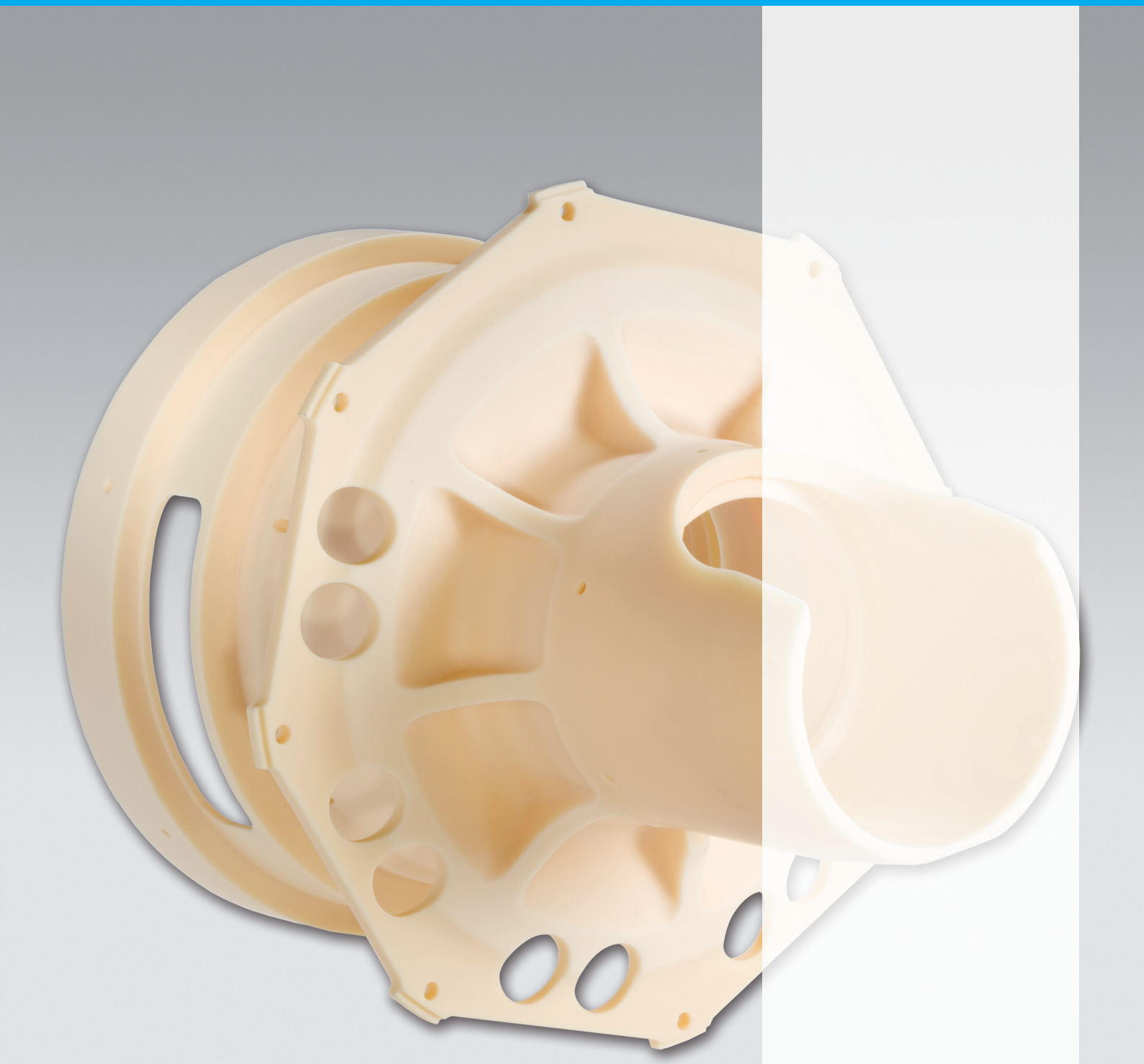
Dokument techniczny | Czerwiec 2014
Dipl.-Min. Helmut Mayer

FRIALIT®-DEGUSSIT®
Ceramika Tlenkowa

Konstrukcje z ceramiki - produkcja i dokładność wymiarów bez obróbki wykańczającej



FRIATEC

1. Wstęp

Kształtki wykonane z ceramiki technicznej często stosowane są jako komponenty maszyn i urządzeń specjalnych, tam gdzie wymagana jest wyjątkowa odporność mechaniczna, termiczna i chemiczna. W rezultacie, konstruktorzy i projektanci spotykają się z materiałami, z którymi wciąż mają niewielkie doświadczenie. Dokument ten zawiera informacje, które mogą być pomocne w poszerzaniu wiedzy o materiałach przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach. Technologia produkcji ceramiki może być porównywana do technologii metalurgii proszków, przebiega ona jednak w bardziej niekorzystnych warunkach dla otrzymywanych dokładności i tolerancji wymiarowych. W dokumencie tym przedstawiono podstawowe ograniczenia dla tolerancji wymiarowych i kształtów elementów wykonanych z różnych materiałów ceramicznych, przy wykorzystaniu różnych metod ich formowania.

2. Zadania i cele dokumentu

W ciągu ostatnich dziesięcioleci nastąpił istotny wzrost zastosowania materiałów ceramicznych. Dzięki swoim ponadprzeciętnym właściwościom ceramika techniczna spełnia nawet najwyższe oczekiwania użytkowników. Są to m.in.: wysoka twardość, doskonała odporność na ścieranie i erozję materiału, odporność na korozję, duża pojemność cieplna przy jednocześnie dobrej dostępności niezbędnych do produkcji surowców. Ceramika techniczna stosowana jest w budowie maszyn i aparatury technologii medycznej oraz w zaawansowanej elektronice.
Dokument ten nie omawia szczegółowo właściwości ceramiki ani procesu jej produkcji. Celem tego dokumentu jest dostarczenie niezbędnych informacji do konstruowania elementów ceramicznych dla użytkowników a w szczególności dla projektantów. Dodatkowo wyszczególniono wszelkie ograniczenia jakie można napotkać przy konstruowaniu części ceramicznych i przyczyny ich występowania.

Omówiono następujące aspekty:

- produkcja i stabilność wymiarowa elementów ceramicznych bez obróbki wykańczającej
- osiągalne kształty i tolerancje wymiarowe ceramiki przy wykorzystaniu procesów obróbki wykańczającej
- zasady projektowania ceramiki biorąc pod uwagę proces produkcji oraz kruchość i propagacje pęknięć
- wytyczne normowe projektowania elementów ceramicznych

3. Komponenty ceramiczne

W zastosowaniach technicznych komponenty ceramiczne, by móc spełnić swoje funkcje, muszą być odpowiednio zintegrowane z całym systemem. Przykładami takimi są: świece zapłonowe w silnikach spalinowych, izolatory w rozdzielnicach lub obudowach elektrycznych, ceramiczne prowadnice nici w maszynach włókienniczych, płytki uszczelniające w kranach, endoprotezy (bioceramika) w ciele ludzkim itd.. Znajomość tolerancji wymiarów i kształtów dla różnych materiałów ceramicznych, bez odwoływania się do konkretnych technik łączenia i warunków technologicznych, ma fundamentalne znaczenie przy projektowaniu podzespołów ceramicznych. Dlatego tak ważna jest znajomość tolerancji wymiarowych dla elementów w stanie wypalonym, bez późniejszej obróbki na twardo. Elementy ceramiczne mogą być obrabiane po wypaleniu (spiekaniu), ale bardzo często, jest to możliwe wyłącznie przy użyciu narzędzi diamentowych. Proces ten jest w dodatku bardzo czasochłonny, pracochłonny i kosztowny [2-4]. Dlatego należy unikać obróbki na twardo wypalonych elementów ceramicznych lub utrzymywać ją na możliwie minimalnym poziomie.
Projektant powinien wziąć to pod uwagę w fazie projektowania części ceramicznej. Może on to jednak zrobić poprawnie tylko wtedy, gdy zna możliwości i granice tolerancji dla różnych materiałów i procesów ich formowania.

4. Technologie produkcji

Tabela 1 zestawia terminy używane w technikach produkcyjnych metali i ceramiki. Założono, że znaczenia tych terminów są znane (wyjaśnienie najważniejszych terminów stosowanych w technice wytwarzania komponentów ceramicznych, patrz Rozdział 7 i [1, 10-12]). Produkcja elementów ceramicznych wymaga znacząco innego podejścia niż w przypadku materiałów metalowych. Poniżej zebrano te różnice i wynikające z nich ograniczenia w odniesieniu do różnorodności form, tolerancji wymiarowych i tolerancji kształtów.

Proces produkcyjny	Powszechne zastosowanie w ceramice	Dotyczy
Kształtowanie wstępne	Stosowane, ale wymagany jest późniejszy proces wypalania	Wszystkie produkty ceramiczne
Kształtowanie wtórne	Niemożliwe ze względu na brak plastyczności	-------
Obróbka kształtująca	Piłowanie, szlifowanie, przecinanie, polerowanie, docieranie, gładzenie, honowanie	Zawsze konieczna gdy wymagana jest dokładność wymiarowa. Częstość stosowania obróbki rośnie w ceramice krzemianowej, tlenkowej i beztlenkowej.
Łączenie [5-7]	W stanie zielonym ceramiki (ozdabianie) tylko ceramika z ceramiką (spójne wiązanie) Po wypaleniu (spójne wiązanie) pasowanie termokurczliwe, klejenie, lutowanie, połączenie kołkowe	Ceramika krzemianowa (uchwyty w kubkach, dzbankach), korki uszczelniające do rur, lutowanie twarde ceramiki tlenkowej kompozyty: ceramika -metal ceramika – inne materiały
Powlekanie	Tak	Szkliwienie ceramiki, utlenianie ceramiki SiC
Zmiana właściwości materiału	W rzadkich przypadkach	Na-ß-tlenek glinu, wyżarzanie w atmosferze tlenowej [9], częściowo stabilizowany tlenek cyrkonu [13]

Tabela 1: Procesy produkcyjne w przemyśle ceramicznym

Technologia produkcji komponentów ceramicznych, jest bardzo podobna do technologii metalurgii proszków. Główne etapy procesu produkcyjnego ceramiki to: przygotowanie surowca, formowanie, suszenie, ewentualne wypalanie wstępne, zasadnicze wypalanie (spiekanie) i obróbka wykańczająca.

W produkcji komponentów ceramicznych często przeprowadza się wypalanie wstępne, w wyniku czego następuje kompresja i zagęszczenie materiału. Ceramika w tej postaci może być jeszcze stosunkowo łatwo obrabiana prostymi narzędziami (biała obróbka) lub dodatkowo pokryta (szkliwiona). Następnie zachodzi proces zasadniczego wypalania komponentów (spiekanie) gdzie ma miejsce dalsza kompresja i zestalenie materiału oraz zwiększenie wytrzymałości mechanicznej ceramiki wynikające ze skurczu. Wypalone części ceramiczne mogą być później wykańczane przez piłowanie, szlifowanie, polerowanie, docieranie, honowanie.

Ze względu na kruchość ceramiki, jej kształt nie może być modyfikowany w trakcie procesu produkcyjnego tj. po uformowaniu. Po wypaleniu ceramiki, oprócz obróbki wykańczającej, wyczerpane są inne możliwości zmiany konturów elementu ceramicznego. Obróbka na twardo jest czasochłonna i możliwa tylko przy użyciu narzędzi diamentowych. Dlatego już na etapie projektowania i konstrukcji istotne jest szukanie takich rozwiązań, które unikają potrzeby stosowania obróbki wykańczającej.

Jest to jeden z powodów małej różnorodności kształtów elementów ceramicznych w porównaniu z częściami metalowymi. Dobrze znane są natomiast techniki łączenia ze sobą elementów ceramicznych, w szczególności jeszcze w stanie zielonym (przed spiekaniem), jak również już po spiekaniu. Techniki te mają coraz większe znaczenie w przemyśle ceramiki specjalnej [5-8].

Etap produkcji określany jako „ zmiany właściwości materiału" ma zdecydowanie mniejsze znacznie w przypadku ceramiki niż w technologii produkcji metali. Występuje on tylko przy wytwarzaniu stałych elektrolitów jak Na-β-Al2O3 [9] oraz materiałów wielofazowych, takich jak częściowo stabilizowany tlenek cyrkonu [13].

Powyższe pokazuje, że większość decydujących kroków w produkcji elementów ceramicznych, należy podjąć przed spiekaniem. Elementy ceramiczne w stanie zielonym (przed spiekaniem) mają jeszcze niewielką twardość i dzięki temu mogą być łatwo obrabiane. Natomiast mała wytrzymałość mechaniczna elementów w stanie zielonym stanowi drugi powód, obok niemożliwości modyfikacji kształtu w trakcie procesu produkcji, stosunkowo małej różnorodności kształtów elementów ceramicznych.

Komponenty ceramiczne kurczą się podczas procesów formowania, suszenia i spiekania. Wielkość skurczu jest funkcją wielu parametrów produkcyjnych, takich jak: wielkość ziaren, gęstość ceramiki w stanie zielonym, zawartość wilgoci, temperatura i czas procesu, szybkość nagrzewania itp.. Poziom skurczu w większości przypadków oceniany jest nadal empirycznie tzn. w serii ustalonych eksperymentów. Wartość skurczu liniowego w zależności od materiału i stosowanej metody produkcji może wynosić do około 30%.

Najlepiej gdy element ceramiczny kurczy się w trakcie suszenia i spiekania według przekształcenia afinicznego gdzie warunki wymiarowe, kąty i zbieżności pozostają niezmienne. Przekształcenie takie jest jednak praktycznie nieosiągalne ze względu na niejednorodność struktury materiału oraz zmiany rozdrobnienia substancji rozproszonej w czasie procesów formowania i spiekania. Przejaskrawiając można nawet powiedzieć, że odkształcenia w spiekanych elementach są niekontrolowalne. Dlatego wąskie tolerancje wymiarów i kształtu są nieosiągalne bez zastosowania dodatkowego procesu wykańczania.

W tabeli 2 przedstawiono typowe procesy formowania elementów ceramicznych z uwzględnieniem częstości ich stosowania. W produkcji seryjnej ceramiki krzemianowej najczęściej używa się prasowanie jednoosiowe na mokro, wytłaczanie oraz odlewanie z gęstwy. Natomiast ceramika tlenkowa wytwarzana jest za pomocą prasowania jednoosiowego na sucho, wytłaczania i formowania wtryskowego. Odnotowuje się również coraz większe zapotrzebowanie i stale rosnącą liczbę zastosowań ceramiki beztlenkowej. W tej grupie materiałów wysokiej jakości panuje rosnący trend produkcji przez prasowanie izostatyczne w suchej matrycy oraz HIP (prasowanie izostatyczne na gorąco).

Formowanie	Ceramika krzemianowa (porcelana, kamionka)	Ceramika tlenkowa (Al_2O_3, ZrO_2)	Ceramika beztlenkowa (SiC, Si_3N_4)
Prasowanie na mokro	XXX		
Odlewanie	XXX	XX	XX
Prasowanie na sucho } z sypkim granulatem	X	XXX	XX
Prasowanie izostatyczne } z sypkim granulatem	X	XXX	XX
Wytłaczanie	XXX	XXX	X
Formowanie wtryskowe	X	XXX	XX
Prasowanie na gorąco (w tym izostatyczne prasowanie na gorąco)*		X	XX

Tabela 2: Procesy formowania ceramiki

Legenda:
X = rzadko stosowany
XX = powszechnie stosowany
XXX = stosowany w produkcji seryjnej
* łącznie ze spiekaniem (wypalaniem)

Oprócz samego procesu formowania, na właściwości komponentu ceramicznego znacząco wpływa skurcz spowodowany procesem spiekania (patrz Tabela 4). Ceramikę tlenkową i krzemianową wypala się dzisiaj w ekonomicznych w eksploatacji piecach gazowych. Ceramika krzemianowa wypalana jest w temperaturze maksymalnej 1500 °C, natomiast ceramika tlenkowa w 1800 °C. W odróżnieniu, ceramika beztlenkowa spiekana jest zawsze w piecach elektrycznych w atmosferze redukcyjnej przy użyciu gazu ochronnego (wodór, azot, argon) lub w próżni. Proces ten przebiega w temperaturze 2400 °C z częściowym spiekaniem pod wysokim ciśnieniem. W grupie ceramiki beztlenkowej istnieją materiały, które nie kurczą się w procesie spiekania, dzięki czemu możliwe jest osiągnięcie wysokich tolerancji wymiarowych i kształtu bez dodatkowej obróbki wykańczającej.

Grupa materiałów	Ogrzewanie	Temperatura maksymalna	Skurcz liniowy	Charakterystyka spiekania	Właściwość
Ceramika krzemianowa	Głównie gaz	1500 °C	do 20 %	ciągłe wypalanie (piec tunelowy) partia (piec komorowy)	
Ceramika tlenkowa	Głównie gaz	1800 °C	od 20% do 30% w ekstremalnych przypadkach	jak wyżej	HIP przy komponentach wysokiej jakości
Ceramika beztlenkowa	Elektryczne	2400 °C	do 20 % ale również możliwe 0 %	spiekanie w próżni lub gazie ochronnym całych partii	spiekanie reakcyjne bez skurczu azotku krzemu (RBSN) spiekanie reakcyjne bez skurczu przy infiltracji krzemu w SiSiC

Tabela 3: Metody spiekania ceramiki

5. Tolerancje wymiarów i kształtów

Tolerancje wymiarów i kształtów elementów ceramicznych determinowane są przez skurcz w procesach formowania, suszenia i spiekania. Im wyższy jest stopień skurczu tym trudniej zapewnić wąskie tolerancje wymiarowe. Można wskazać następujące decydujące o tolerancjach czynniki (patrz Tabela 3):

Formowanie	Tolerancje	
	Standardowo	Obecnie możliwe przy użyciu metod precyzyjnych
Odlewanie z gęstwy	± 5% do ±3%	±0,5%
Prasowanie na sucho z użyciem sypkiego granulatu	±2% do ±1%	±0,5%
Prasowanie izostatyczne z użyciem sypkiego granulatu	±3%	±0,5%
Wytłaczanie	±5% do ±3%	±1,5%
Formowanie wtryskowe	±3%	±1,5%
Obróbka wstępna i wykańczająca	±3%	±0,5%

Tabela 4: Tolerancje wypalonych komponentów ceramicznych

5.1. Surowiec, masa czy granulat

Istotne czynniki to czystość, jednolity rozkład wielkości ziaren również w mieszankach oraz ich powtarzalność. Wąskie tolerancje ± 0,5% podczas prasowania na sucho osiągnięto dopiero po udanej produkcji rozpylanego granulatu o jednolitych granulkach.

5.2 Tolerancje narzędzi i procesy kompresji w narzędziach

Nierówna kompresja powoduje większe tolerancje.

5.3 Suszenie

Nierównomierne suszenie (w szczególności części wytłaczanych) powoduje wygięcie ceramiki w stanie zielonym.

5.4. Obróbka w stanie białym i zielonym

Rodzaj obróbki i stabilność części wpływają na dokładność procesu. (Parametry 5.1 i 5.4 determinują wymiary i ciężar właściwy ukształtowanego elementu przed spiekaniem)

5.5. Spiekanie

Regulacja temperatury wewnątrz pieca w znacznym stopniu wpływa na tworzenie się mikrostruktury ceramiki (porowatość, rozkład faz krystalicznych i amorficznych) oraz na wielkość skurczu. Różnice w zaprogramowanej temperaturze mogą powodować wypaczenie elementów ceramicznych.

Standardowe definicje i granice tolerancji dla ceramiki określone zostały w normie DIN 40680 [14]; dotyczy ona w szczególności materiałów ceramicznych używanych w elektrotechnice (patrz także DIN 40685 [15]), ale może być również stosowana do innych materiałów. Norma DIN 40680 zawiera ogólne tolerancje dla wymiarów i kształtów, bez wykańczania, ułożone według materiału, metody produkcji i stopnia dokładności.

Wyróżniono różne trzy stopnie dokładności: „gruba", „średnia", „drobna". Elementy o tolerancjach wymiarów i kształtów odpowiadających stopniom dokładności „gruba" i „średnia" przeważnie nie są odpowiednie do zastosowań w inżynierii mechanicznej. Producenci ceramiki zazwyczaj są w stanie osiągnąć węższe tolerancje wymiarowe bez dodatkowego wykańczania po spiekaniu niż tolerancje podane w normie DIN 40680. Jednak istotne zawężenie tolerancji wymiarowych może być osiągnięte jedynie przez obróbkę wykańczającą. Podobnie jak dla materiałów elektro ceramicznych, norma DIN17410 odnosi się do ceramicznych magnesów stałych, zwanych twardymi ferrytami, określając dopuszczalne tolerancje dla elementów prasowanych w kierunku nacisku prasy i w kierunku prostopadłym. Osiągnięcie węższych tolerancji wymiarowych możliwe jest tylko poprzez szlifowanie. W Tabeli 4 przedstawiono powszechne i osiągalne dzisiaj tolerancje wymiarowe dla elementów ceramicznych bez procesu wykańczania, podzielone według najważniejszych procesów kształtowania. Tolerancje dla standardowych procesów są na ogół znacznie wyższe niż ± 1%. Coraz częściej stosuje się nowe, bardziej precyzyjne metody kształtowania elementów pozwalające na osiągnie tolerancji do ± 0,5%. Tendencja ta sprawia, że komponenty ceramiczne znajdują atrakcyjne funkcje poza tradycyjnym obszarem zastosowań, takim jak: budowa maszyn i inżynieria mechaniczna. Do tego rozwoju przyczyniły się również badania nad alternatywnymi materiałami o odporności na wysoką temperaturę i / lub o dobrej odporności na ścieranie i korozję [16,17].

6. Wnioski do planowania konstrukcji

Technologia wytwarzania elementów ceramicznych wymaga większych tolerancji wymiarowych i kształtu niż w przypadku części metalowych. Tolerancje przy produkcji seryjnej bez obróbki wykańczającej wynoszą często około ± 1% (patrz Tabela 4). Wartość tolerancji możliwych do osiągniecia zależy od materiału i sposobu produkcji danego elementu ceramicznego. Nie ma możliwości ustalenia ogólnie przyjętych zasad dotyczących tolerancji dla ceramiki. Dane te muszą być dostarczone przez producenta, ponieważ nie istnieją żadne ustandaryzowane specyfikacje osiąganych tolerancji w zależności od ceramicznych materiałów. Istnieją jedynie ogólne niezbędne informacje. Obserwuje się dwa kierunki w rozwoju elementów ceramicznych i materiałów ceramicznych: wzrasta ilość elementów z ceramiki tlenkowej wykańczanych po spiekaniu pomimo wysokich kosztów tego procesu, gdzie w przypadku ceramiki beztlenkowej proces obróbki wykańczającej był zawsze istotny w procesie produkcyjnym. Wprowadzone zostają również, przetestowane już metody produkcji umożliwiające osiągniecie tolerancji wymiarowych ± 1% do ± 0,5%. Pozwoli to na osiągnięcie wystarczających tolerancji dla wielu zastosowań i stworzy warunki do bardziej ekonomicznego procesu obróbki wykańczającej

7. Załącznik

Definicje wybranych, istotnych terminów stosowanych w technologii produkcji ceramicznej.

7.1 Materiały surowe

7.1.1 Przetwarzanie sproszkowanego surowca

Surowce, czyli materiały wyjściowe dla wyrobów ceramicznych są na ogół stosowane w postaci granulatu lub proszku. Mogą one pochodzić ze złóż naturalnych, gdzie uprzednio są czyszczone i przygotowywane, jak również mogą być syntetyzowane. W przypadku surowców syntetycznych czystość chemiczna, struktura (krystalograficzna), rozkład i wielkość ziaren są powtarzalne, dlatego zakres właściwości materiału może być utrzymywany w wąskich granicach.

7.1.2 Przygotowanie

Metody wytwarzania masy ceramicznej z surowca to: mielenie, granulowanie, mieszanie i suszenie rozpyłowe.

7.1.3 Skład partii materiału

Skład partii stosowanej do wytwarzania materiałów ceramicznych określa rodzaj i procent użytych surowców ceramicznych, ilość niezbędnych dodatków (woda, specyficzne spoiwa, itp.) oraz czas ich przetwarzania.

7.1.4 Masa ceramiczna

Mieszanina, która została przygotowana z partii surowca dla określonego procesu formowania.

7.1.5 Granulat

Ciecz w postaci zawiesiny proszku lub porowatej masy, którą przekształca się do stanu sypkiego. Proces ma na celu utworzenie granulatu, odpowiedniego do metod produkcji, takich jak prasowanie na sucho, o dobrej zdolności swobodnego przepływu i stałej gęstości nasypowej z jednocześnie najmniejszą możliwą objętością nasypową. Najlepszy możliwy rozkład wielkości ziaren granulatu zależy od procesu formowania i kształtu elementu; typowy rozkład wielkości mieści się w zakresie od 100 µm do 2 mm. Najważniejsze sposoby przygotowania granulatu obejmują suszenie rozpyłowe zawiesin proszkowych i granulowanie tj. dalsza granulacja suchego proszku.

7.2 Procesy formowania

7.2.1 Prasowanie na sucho

Do formy podawana jest masa w postaci swobodnie opadającego, niezbrylającego granulatu, gdzie ściskana jest z przeciwległych stron (prasowanie jednoosiowe) aż do osiągnięcia wymaganej gęstości.
Zaleta: Odpowiednie do dużych ilości, jeżeli stosowane są prasy automatyczne.
Wada: ciśnienie jednoosiowe umożliwia jedynie wystarczające zagęszczanie jeżeli stosunek wysokości do średnicy prasowanej mieszanki mieści się w dopuszczalnych granicach.

7.2.2 Prasowanie izostatyczne

W najprostszym przypadku forma z elastycznymi ścianami (np. gumowa) zostaje napełniona masą ceramiczną i szczelnie zamknięta. Forma następnie umieszczana jest w zbiorniku z cieczą. Masa ceramiczna prasowana jest równomiernym ciśnieniem ze wszystkich stron.
Zalety: najlepsze możliwe zagęszczanie również dla elementów o dużej objętości, gwarancja braku pęknięć i wypaczania elementów w wyniku skurczu powstałego w procesie późniejszego spiekania.
Wady: często skomplikowane kształty form i długie czasy cyklu; zawsze wymagana obróbka biała i zielona (małe elementy wytwarzane są automatycznie w dużych seriach stosując tzw. suchy system prasowania ze zintegrowaną z formą suchą matrycą).

7.2.3 Wytłaczanie

Plastyczna, łatwo formowalna masa tworzona jest poprzez mieszanie proszku ceramicznego z płynem (zwykle wodą) lub, o ile to konieczne, innymi spoiwami. Masa przeciskana jest przez formę i kształtowana w rury lub pręty.
Zaleta: produkcja długich symetrycznych osiowo części.
Wada: tylko proste kształty z dość wysokimi tolerancjami.

7.2.4 Odlewanie z gęstwy

Proszek miesza się z cieczą (głównie wodą) i zawiesina wlewana jest do porowatej formy, która absorbuje wodę. Proszek osadza się na ściankach formy (głównie gipsowej) tworząc ciało stałe.
Zaleta: produkcja szczególnie skomplikowanych i dużych elementów w postaci odlewu pustego i substancji stałej
Wada: skomplikowany proces dla dużych partii (automatyzacja tylko w nielicznych przypadkach).

7.2.5 Formowanie wtryskowe
Poprzez zmieszanie w wysokiej temperaturze proszku ceramicznego z tworzywami sztucznymi i domieszkami uplastyczniającymi tworzy się łatwo formowalną i odporną termicznie masę. Masa ta wtryskiwana jest pod ciśnieniem do metalowej formy a po ostudzeniu uformowany element ekstrudowany jest z formy.
Zaleta: produkcja skomplikowanych, bardzo małych elementów oraz produkcja w dużych ilościach., ograniczona grubości ścian od 5 do 10 mm.
Wada: niemożliwa produkcja elementów o dużej objętości

7.2.6 Zielona ceramika
Określenie "zielona" stosuje się w technologii wytwarzania ceramiki dla części ukształtowanych, ale jeszcze niewypalonych.

7.2.7 Gęstość zielona
Gęstość ceramiki w stanie zielonym, przed wypalaniem.

7.3 Suszenie / Spiekanie

7.3.1 Suszenie
Usunięcie wilgoci (głównie wody) z ukształtowanego elementu.

7.3.2 Wypalanie wstępne
Ogrzewanie ukształtowanego elementu do temperatury, w której rozwija się struktura ceramiczna.

7.3.3 Spiekanie
Podgrzewanie ukształtowanego elementu do takiej temperatury, w której następuje odpowiednie zagęszczenie materiału pozwalające na wymagane dalej przetwarzanie.

7.3.4 Prasowanie na gorąco
Jednoczesne podgrzewanie i stosowanie ciśnienia pozwala na zagęszczenie materiału już w niższej temperaturze w porównaniu z podgrzewaniem bez ciśnienia. Dla niektórych, specjalnych wyrobów ceramicznych jest to jedyna metoda pozwalająca na osiągniecie wysokiej gęstości końcowej.

7.3.5 Prasowanie izostatyczne na gorąco HIP
Ciśnienie wywierane jest przez gaz podgrzany do żądanej temperatury. Technologia HIP stosowana jest do zagęszczania komponentów wstępnie spiekanych bezciśnieniowo (pod warunkiem, że nie występuje porowatość otwarta).

7.4 Obróbka

7.4.1 Obróbka zielona
Obróbka po uformowaniu półfabrykatów, przed spiekaniem.

7.4.2 Obróbka biała
Obróbka po wypalaniu wstępnym (spiekanie na biskwit), po osiągnięciu minimalnej stabilności i twardości materiału pozwalającej na jego obróbkę

7.4.3 Wykańczanie
Obróbka po ostatecznym wypalaniu (wypalanie w wysokiej temperaturze, spiekanie). Do wykończania ceramiki stosowane są narzędzia z końcówkami diamentowymi, z węglika krzemu lub boru.

Literatura

[1] Willmann, G.: Konstruieren mit Keramik – Werkstoffkennwerte. Fachber. f. Metallbearbeitung 62 (1985) 44 und Sprechsaal 117 (1984) 914
[2] Pfeifer, K.: Bauteile aus Al2O3-Keramik und ihre Nachbearbeitung mit Diamantwerkzeugen. Industrie Diamanten Rdsch. 17 (1983) 222
[3] Heimke, G.: Oxidkeramik in der Medizin. Industrie Diamanten Rdsch. 17 (1983) 49
[4] Röttenbacher, R., Willmann, G.: Bearbeitung von Bauteilen aus reaktionsgebundenem SiSiC für den Wärmetauscher eines Sonnenkraftwerkes. Industrie Diamanten Rdsch. 15 (1981) 140
[5] Erz, M., Hennicke, W.: Fügen von Keramik, Grundbegriffe. Science of Ceramics 11 (1981) 15
[6] Fügen von Keramik. Internat. Koll. Baden-Baden, Dez. 1980. DVS-Bericht, Bd. 66, Dt. Verlag für Schweißtechnik
[7] Popper, P.: The joining of industrial ceramics to metals. In (P. Vincenzini, ed.): Energy and Ceramics, S. 569, Elsevier Sci. Publ. Comp., 1980
[8] Mayer, H.: Fügen von Oxidkeramik, cfi/Ber. DKG 85 (2008), No. 12, D23
[9] Produktionsnahe Elektrolytentwicklung für Na/S-Batterien. a) G. Heimke, G. Willmann: BMFT-FB-T 79-57, Mai 1978; b) G. Heimke, H. Mayer, A. Reckziegel: BMFT-FB-T 82-065, Mai 1982
[10] Salmang, H., Scholze, H.: Keramik, Bd. 2: Keramische Werkstoffe. Springer Verlag, 1983
[11] Handbuch der Keramik, Verlag Schmid GmbH, Freiburg
[12] Heuschkel, H., Müche, K.: ABC-Keramik. VEB Verlag für Grundstoffindustrie, 1975
[13] Heuer, A.H. Hobbs, L.W. (ed.): Science and technology of zirconia: Advances in ceramics, Vol. 3. Amer. Ceram. Soc., Columbus, Ohio, 1981
[14] DIN 40680: Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik. Teil 1: Allgemeintoleranzen für Maße. Teil 2: Allgemeintoleranzen für Form
[15] DIN 40685: VDE-Bestimmungen für keramische Isolierstoffe. Blatt 1: Einteilung, Anforderungen, Typen. Blatt 2: Prüfverfahren.
[16] Popper, P.: Industrial Ceramics-Special, Technical or Engineering. Trans. J. Brit. Ceram. Soc. 82 (1982) 187
[17] Altenpohl, D.: Materials in World Perspective. Springer Verlag, 1980

FRIATEC Aktiengesellschaft
Ceramics Division
Dipl.-Min. Helmut Mayer
Head of Development
Steinzeugstraße 50
68229 Mannheim
Germany
Tel: +49 621 486-1406
Fax: +49 621 486-251406
helmut.mayer@friatec.de
www.friatec.de

FRIATEC
an Aliaxis company