

MAREK TOMALCZYK
ANDRZEJ HEIM

Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Łódź

Wytrzymałość statycznie niewyznaczalnych wałów mieszadeł stosowanych w suszarkach fluidalnych

Wstęp

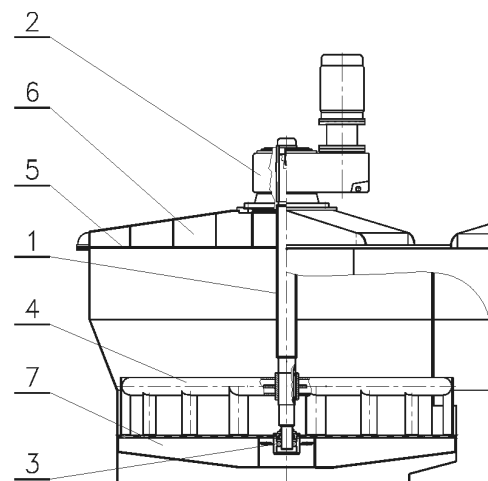
Suszenie materiałów ziarnistych w suszarkach fluidalnych wymaga w wielu przypadkach wspomaganie procesu fluidyzacji mieszadłem umieszczonym w warstwie fluidalnej. Ma to na ogół miejsce w pierwszej fazie procesu, w której suszony materiał ma jeszcze dużą wilgotność i cechuje go skłonność do tworzenia aglomeratów ziaren. Mieszadło umieszcza się nad początkową częścią sita fluidalnego, przy wlocie materiału suszonego. Przykładem omawianego urządzenia jest fluidalna kaskadowa suszarka cukru typu SF2M-1200 skonstruowana w Politechnice Łódzkiej [1, 2] wyposażona w dwa mieszadła trójramienne o średnicy 2,2 m z pionowymi łopatkami mocowanymi do dolnej powierzchni ramion.

Różne wersje tej suszarki, ale z tym samym układem napędu mieszadeł, zostały wdrożone w trzech cukrowniach: w Cukrowni Wróblin (w 2005 roku), w Cukrowni Nakło (w 2006 roku) i w Cukrowni Kruszwica (w 2006 roku).

Jednym z zadań mieszadła umieszczonego w warstwie fluidalnej jest rozgarnianie cukru zalegającego na sicie. Ma to szczególne znaczenie w momencie dostarczenia do suszarki kolejnej porcji wilgotnego materiału. Wielkość tej porcji jest w cukrowni uzależniona od pojemności zastosowanych wirówek i obecnie wynosi około jednej tony. Przebiecie się łopatek mieszadła przez taką ilość usypanego cukru wymaga znacznej siły, stąd stosowane są mieszadła wolnoobrotowe o mocnej konstrukcji, napędzone motoreduktorami o momencie kilku lub nawet kilkunastu tysięcy niutonometrów.

Duży moment obrotowy, któremu towarzyszy w praktyce asymetryczne obciążenie ramion mieszadła wywołuje w wale nie tylko skręcanie, ale również zginanie wału. Konieczność zachowania koniecznej ze względu na proces fluidyzacji dużej przestrzeni nad sitem pociąga za sobą znaczną długość wału, co z kolei skutkuje potrzebą podparcia wału w rejonie piasty mieszadła pod, lub nad nim. Zastosowanie klasycznej konstrukcji układu napędowego z wałem podpartym na końcach i sprzęgłem nie przenoszącym momentu zginającego istotnie podnosi wysokość maszyny i jest stosunkowo drogie. Dlatego w wymienionych powyżej suszarkach (Rys. 1) zastosowano motoreduktory tulejowe – 2 i wały – 1 podparte dolnym końcem w ruszcie sita – 7. Zaletami tego typu konstrukcji jest jej zwartość i eliminacja zawodnego w wielu przypadkach sprzęgła, wadami – statyczna niewyznaczalność układu i wynikająca z niej wrażliwość na niedokładny montaż. W omawianym układzie napędu mieszadła (Rys.1) konstrukcja posadowienia obudowy dolnego łożyska – 3 wału – 1 umożliwia jego montaż w położeniu wyznaczonym przez koniec wału mieszadła, już po jego umieszczeniu w tulei motoreduktora.

Celem pracy jest prezentacja przykładowych obliczeń wytrzymałościowych statycznie niewyznaczalnego wału mie-



Rys. 1. Schemat konstrukcji napędu ze statycznie niewyznaczalnym wałem mieszadła: 1 – wał, 2 – motoreduktor tulejowy, 3 – łożysko baryłkowe, 4 – mieszadło, 5 – pokrywa, 6 – wzmocnienie pokrywy, 7 – ruszt sita fluidalnego

szadła zastosowanego w wymienionych suszarkach fluidalnych.

Obliczenia naprężeń w wale

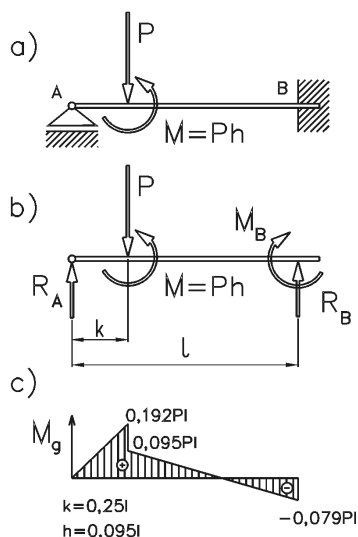
Wał mieszadła wykonano z rury zakończonej pełnymi czopami, przy czym wymiary rury dobrano tak, aby momenty bezwładności przekroju poprzecznego rury i przekroju czopów były w przybliżeniu równe.

Do obliczeń przyjęto następujące założenia upraszczające:

1. Pokrywa komory oparów (pozycje 5 i 6 na rys. 1), na której posadowiono kołnierzyowy motoreduktor tulejowy i ruszt sita (pozycja – 7) są nieodkształcalne.
2. Moment bezwładności przekroju poprzecznego wału względem osi przechodzącej przez środek ciężkości tego przekroju jest stały na całej długości wału.
3. Maksymalną wartość siły zginającej wał mieszadła można wyznaczyć przyjmując, że w krańcowo niekorzystnej sytuacji maksymalna, wynikająca z możliwości motoreduktora, wypadkowa siła oporu ruchu mieszadła w warstwie jest przyłożona tylko do jednego z trzech ramion mieszadła, w połowie jego długości, w punkcie położonym na połowie wysokości łopatek.

Obliczenia momentu gnącego wał mieszadła przeprowadzono w oparciu o schemat obciążenia przedstawiony na rys. 2.

Moment gnący w przedziale I ($0 < x < k$) określa następujące równanie:



Rys. 2. Schemat obciążenia wału i wykres momentu gnącego

$$M_{g1} = R_A x \quad (1)$$

Moment gnący w przedziale II ($k < x < l$) wynosi:

$$M_{g2} = R_A x - P(x - k) - Ph \quad (2)$$

Energia sprężysta od zginania skumulowana w wale:

$$V = \frac{1}{2EJ_z} \left\{ \int_0^k (R_A x)^2 dx + \int_k^l [R_A x - P(x - k) - Ph]^2 dx \right\} \quad (3)$$

Pochodna cząstkowa energii sprężystej względem reakcji R_A

$$\frac{dV}{dR_A} = \int_0^k 2(R_A x) x dx + \int_k^l 2[R_A x - P(x - k) - Ph] x dx \quad (4)$$

Ugięcie wału w punkcie określonym współrzędną $x = l$ równa się 0, zatem zgodnie z twierdzeniem *Castigliana*:

$$\int_0^k 2(R_A x) x dx + \int_k^l 2[R_A x - P(x - k) - Ph] x dx = 0 \quad (5)$$

Po obliczeniu całek w równaniu (5) otrzymuje się:

$$R_A = \frac{3}{2} P \left[\frac{2}{3} - \frac{k}{l} + \frac{h}{l} + \frac{1}{3} \left(\frac{k}{l} \right)^3 - \frac{h}{l} \left(\frac{k}{l} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Uwzględnienie wyrażenia (6) w równaniu (2) prowadzi do:

$$M_{g2} = \frac{3}{2} P \left[-\frac{k}{l} + \frac{h}{l} + \frac{1}{3} \left(\frac{k}{l} \right)^3 - \frac{h}{l} \left(\frac{k}{l} \right)^2 \right] x + P(k - h) \quad (7)$$

Dla zastosowanego w suszarce SF2M-1200 układu napędowego mieszadła nominalny moment M_s wynosił 6276 Nm, co określa wartość siły P na 11410 N. Odpowiednie długości wy-

nosiły: $l = 1577$ mm, $k = 395$ mm, $h = 150$ mm. Średnicę czopów wału równą 105 mm dobrano na podstawie obliczeń wstępnych i dotychczasowej praktyki. Naprężenia zredukowane obliczono na podstawie hipotezy *Hubera* według następującego wzoru:

$$\sigma_z = \frac{32}{\pi d^3} \sqrt{M_g^2 + 0,75 M_s^2} \quad (8)$$

Warunek wytrzymałościowy jest spełniony, jeśli:

$$\sigma_z \leq z_{rc} \quad (9)$$

W obliczeniach, ze względu na wygodę obliczeń, zastosowano pochodne jednostek podstawowych układu SI – co jest metodą powszechnie stosowaną przez praktyków.

Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych występuje w miejscu mocowania piasty mieszadła i obliczona na podstawie wzoru (8) wynosi 56,7 MPa. Wał w całości był wykonany z niskostopowej stali manganowej o minimalnych wartościach: granicy plastyczności $R_e = 345$ MPa, wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 450$ MPa, wytrzymałości zmęczeniowej na obustronne rozciąganie $Z_{rc} = 158$ MPa, wytrzymałości zmęczeniowej na jednostronne zginanie $Z_{go} = 176$ MPa i wytrzymałości zmęczeniowej na jednostronne skręcanie $Z_{sj} = 282$ MPa. Przyjęto współczynnik bezpieczeństwa $x = 2,3$, wtedy naprężenia dopuszczalne $z_{rc} = 68,7$ MPa, zatem warunek wytrzymałościowy (9) jest spełniony.

Oznaczenia

- d – średnica czopów wału, [mm];
- E – moduł *Younga*, [MPa];
- h – połowa wysokości łopatek mieszadła, [mm];
- J_z – moment bezwładności przekroju poprzecznego wału mieszadła względem osi z , [mm⁴];
- k – odległość pomiędzy środkami geometrycznymi piasty mieszadła i łożyska dolnego, [mm];
- l – odległość pomiędzy środkiem geometrycznym łożyska dolnego i czołem tulei motoreduktora, [mm];
- M_B – moment reakcji w punkcie B , [N·mm];
- M_g – moment gnący, [N·mm];
- M_s – moment skręcający wał mieszadła, [Nmm];
- P – maksymalna siła zginająca wał mieszadła przy skrajnej asymetrii obciążenia ramion, [N];
- R_A – reakcja łożyska dolnego w punkcie A , [N];
- R_B – reakcja tulei motoreduktora w punkcie B , [N];
- V – energia wewnętrzna od zginania, [J].

LITERATURA

1. *M. Tomalczyk i współautorzy*: Urządzenie do suszenia i/lub chłodzenia materiałów ziarnistych. Zgłoszenie patentowe numer P 378744 z 18.01.2006.
2. *M. Tomalczyk, A. Heim*: Polish Journal of Food and Nutrition Sciences 57, 2(A), s.183 (2007).

Praca w całości finansowana z funduszu na działalność statutową W-10/1/2008/Dz.St.