

Ryszard MOSZUMAŃSKI  
Politechnika Krakowska

## **BADANIA EKSPERYMENTALNE I SYMULACJA NUMERYCZNA KSZTAŁTOWANIA DOKŁADNYCH KÓŁ ZĘBATYCH Z PRASOWANYCH I SPIEKANYCH METALICZNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH**

Przeprowadzono badania doświadczalne procesu kształtowania metodami obróbki plastycznej kół zębatach pompy gerotorowej (małe koło – 4 zęby zewnętrzne, duże koło – 5 zębów wewnętrznych) z metalicznych materiałów sypkich. Ciąg technologiczny zaczynał się od prasowania dwustronnego siłą quasi-statyczną i – alternatywnie – pulsującą (do 500 Hz), wywierającą naciski do 1100 MPa. Uzyskano gęstość powyżej 7,5 g/cm<sup>3</sup>. Operację obróbki cieplnej stanowiło spiekanie w warunkach standardowych. Operację wykańczającą stanowiło kalibrowanie przez przepychanie. Uzyskano dokładność wymiarowo-kształtową w zakresie 3 µm i chropowatość powierzchni odpowiadającą operacji polerowania. Eksperyment laboratoryjny został poprzedzony symulacją komputerową kształtu wyrobów. Badania symulacyjne zostały wykorzystane do projektowania elementów roboczych narzędzi doświadczalnych: matryc, stempli i rdzeni. Do realizacji procesów na skalę przemysłową przygotowano konstrukcje typoszeregów pulsacyjnych pras hydraulicznych i mechanicznych oraz pieców tunelowych i komorowych.

**Słowa kluczowe:** prasowanie quasi-statyczne, prasowanie pulsacyjne, materiał sypki, pompa gerotorowa, symulacja komputerowa

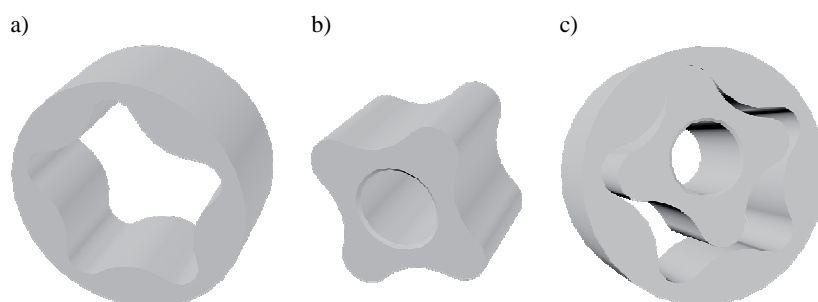
### **Wprowadzenie**

Udział metalicznych materiałów sypkich wśród innych ich postaci, tj.: odlewów – 60%, walcówki – ok. 28% i prasówki – ok. 12%, w racjonalnie prowadzonej gospodarce opartej na wiedzy i wolnej od monopolu, wzrośnie z jednego promila do kilkunastu czy nawet dwudziestu kilku procent, wypierając zwłaszcza materiały odlewane i walcowane. Stanie się to wtedy, gdy pozahutnicza obróbka plastyczna materiałów sypkich zajmie należne miejsce wśród technik wytwarzania części maszyn. Podstawowym argumentem są potencjalnie znikomo małe koszty wytwarzania surowca, polegające głównie na rozpylaniu wodą lub powietrzem ciekłego metalu bez ponownego grzania wsadu, oraz mało energochłonne rozdrabnianie, przesiewanie i mieszanie frakcji. Przemawia za tym również bezkonkurencyjność prasowanych i spiekanych części maszyn z postaci

sypkiej lub wysoka ich konkurencyjność z uwagi na: znikomo małe koszty robocizny (R) i niską materiałochłonność (M).

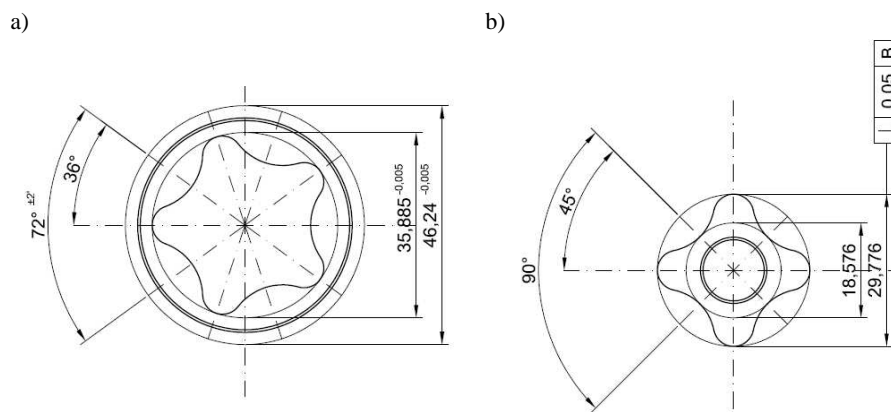
### Symulacja komputerowa dokładnych kół zębatych

Z uwagi na duży stopień komplikacji narzędzi: matryc, stempli i rdzeni, przeprowadzono weryfikację kształtu [4] poszczególnych kół zębatych (zewnątrznego i wewnętrznego) i sprawdzono poprawność ich współpracy metodą symulacji komputerowej (rys. 1.). Na tej podstawie określono z dużą dokładnością wymiary liniowe i kątowe oraz ich tolerancje (rys. 2.). W podobny sposób sprawdzono poprawność współpracy matryc rdzeni ze stemplami w przypadku prasownika i kalibrownika.



Rys. 1. Symulacja zarysu dokładnych kół zębatych: dużego (a) i małego (b) z materiału sypkiego oraz zespołu pompy (c)

Fig. 1. Simulated outline of the high-accuracy toothed wheels made from loose material: large wheel (a), small wheel (b) and of pump assembly (c)



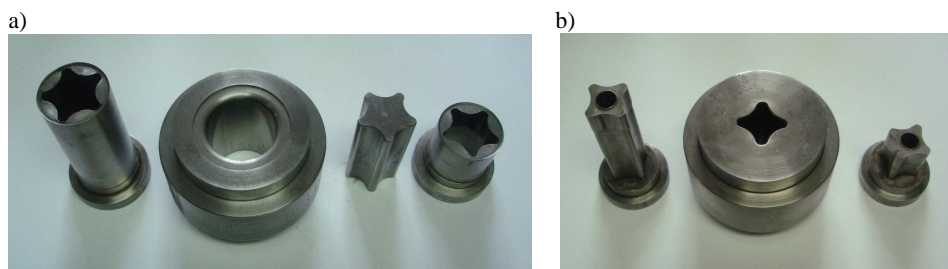
Rys. 2. Zweryfikowane rysunki kół zębatych: dużego (a) i małego (b) z materiału sypkiego

Fig. 2. Verified drawing of the toothed wheels made from loose material: large wheel (a), and small wheel (b)

## Badania procesu prasowania dokładnych kół zębatach z materiałów sypkich

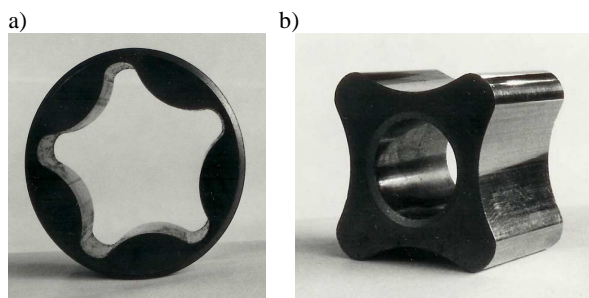
Klasyczne procesy wytwarzania kół zębatach bazują głównie na metodach obróbki skrawaniem i wycinania elektroerozyjnego [4]. Półfabrykatami są najczęściej średniodokładne odkuwki i odlewy. Odpad stanowi od kilku do kilkunastu procent materiału półfabrykatu, a czas obróbki wynosi od kilkudziesięciu sekund do kilku minut. Wysoce konkurencyjną metodą kształtowania jest prasowanie i spiekanie materiału sypkiego [1, 3]. Do badań własnych wytypowano proszek o następującym składzie chemicznym: Fe + 0,6% C + 4,0% Cu + 1,0% stearynian cynku, jako środek poślizgowy. Wybrano proszek Fe gatunku NC.100.24. Składniki mieszanki zostały poddane operacji ujednordniania w mieszalniku dwustożkowym przez 30 sek. Nacisk prasowania przyjęto jako wielkość wejściową na poziomie  $850 \pm 250$  MPa. Temperaturę i czas spiekania przyjęto jako wielkości stałe, równe odpowiednio  $1150^\circ\text{C}$  i 8 h.

Bazując na wymiarach kół: zewnętrznego i wewnętrznego pompy gerotorowej, określonych w dokumentacji technicznej, i oszacowanych odkształceniach sprężystych, zaprojektowano i wykonano dwa zespoły prasowników i kalibrowników złożonych z matryc, stempli i rdzeni (rys. 3.). Skrajnie wysoką dokładność wykonania poszczególnych części prasowników i kalibrowników, gwarantującą zachowanie szczeliny o wielkości poniżej  $3\text{ }\mu\text{m}$ , uzyskano przez zastosowanie wielokrotnego docierania. Proces prasowania dwustronnego prowadzono w warunkach quasi-statycznych i – alternatywnie – pulsacyjnych przy częstotliwości  $330 \pm 150$  Hz. Próbkę (rys. 4.) poddano badaniom dokładności wymiarowo-kształtowej, gęstości i twardości (wartości średnie i lokalne) oraz właściwości mechanicznych. Stwierdzono wysoką efektywność zastosowania nacisku pulsującego, umożliwiającego osiągnięcie gęstości powyżej  $7,5\text{ g/cm}^3$  przy nacisku jednostkowym obniżonym o 18%. Tak znaczne odciążenie narzędzi umożliwia przedłużenie trwałości i eliminuje niebezpieczeństwo awarii.



Rys. 3. Narzędzia prasowania dokładnych kół zębatach: zewnętrznego (a) i wewnętrznego (b) z materiału sypkiego

Figs. 3. Tools used for pressing from loose powdered material the high-accuracy toothed wheels: external (a), and internal (b)

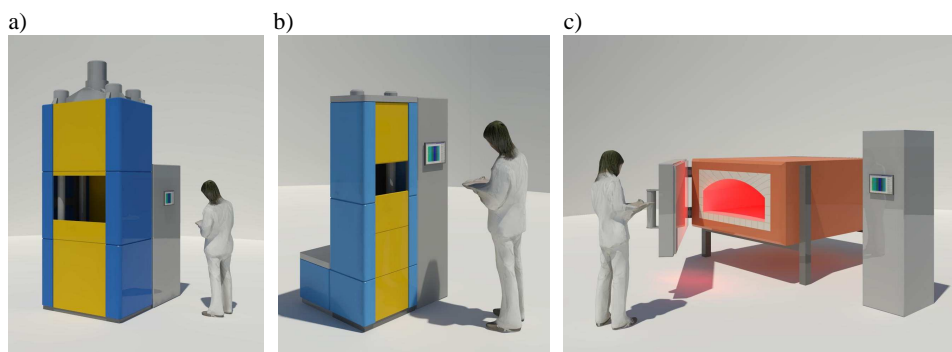


Rys. 4. Dokładne koła zębate: zewnętrzne (a) i wewnętrzne (b) z materiału sypkiego

Fig. 4. High-accuracy toothed wheels made from loose material: external wheel (a) and internal wheel (b)

### Konstrukcja maszyn technologicznych do części z materiałów sypkich

W celu zapewnienia dostaw know how techniki wytwarzania części maszyn o skomplikowanych kształtach i specjalnych właściwościach z materiałów sypkich, opracowano konstrukcje podstawowych maszyn technologicznych. Typo-szereg pulsacyjnych pras hydraulicznych typu PXPh (rys. 5a) obejmuje 7 wielkości o nacisku nominalnym  $250 \div 4000$  kN, natomiast mechanicznych typu XPm (rys. 5b) – 5 wielkości o nacisku  $25 \div 160$  kN. Urządzeniem towarzyszącym wstępnej obróbce cieplnej wyprasek „zielonych” z materiałów sypkich z ostatecznie gotowych kształtek jest piec komorowy typu PK-1200/1600 (rys. 5c) do prowadzenia procesów w atmosferze wodoru/próżni. Przewidziano również wersje tunelowe pieców z atmosferą ochronną typu PT.



Rys. 5. Prasa hydrauliczna PXPh-040 (a), prasa mechaniczna XPm-0063 (b) i piec komorowy PK 1200/1600 (c)

Fig. 5. PXPh-040 hydraulic press (a), XPm-0063 mechanical press (b), and PK 1200/1600 chamber furnace (c)

## Wnioski

Współczesny proszek pozwala na uzyskanie gęstości powyżej  $7,4 \text{ g/cm}^3$  w stanie „zielonym” przy jednokrotnym prasowaniu z naciskiem powyżej 1000 MPa. Możliwe jest istotne zwiększenie dopuszczalnych obciążeń elementów spiekanych. Materiał ten jest obecnie również testowany z pozytywnym wynikiem w przypadku kół zębatych niższych biegów (do 3) w przekładniach samochodowych i łańcuchowych kół rozrzędu. Już tylko te zastosowania mogą prowadzić do zwielokrotnienia zużycia proszków. Wysoko obciążone koła zębate zastępują elementy obrabiane wiórowo. Zamiana wyrobów kutech na spiekane, z zachowaniem co najmniej tego samego poziomu wymaganych charakterystyk eksploatacyjnych, da oszczędności na poziomie 20%. Efekt końcowy realizacji pracy stanowi przygotowany do wdrożenia zespół podstawowych maszyn technologicznych i narzędzi do wytwarzania przedmiotów o specjalnych właściwościach i skomplikowanych kształtach z prasowanych i spiekanych materiałów sypkich.

## Literatura

- [1] Cyunczyk A.: Podstawy inżynierii spieków metalowych, OW PRz, Rzeszów 2000.
- [2] Moszumański R., Struktura części maszyn o złożonym kształcie z prasowanych proszków żelaza, Acta Mechanica Slovaca, 10 (2006), 241-246.
- [3] Nowacki J.: Spiekane metale i kompozyty z osnową metaliczną, WNT, Warszawa 2004.
- [4] Stryczek J.: Koła zębate maszyn hydraulicznych, OW PWr, Wrocław 2007.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND NUMERICAL SIMULATION OF SHAPING THE HIGH-ACCURACY TOOTHED WHEELS MADE FROM PRESSED AND SINTERED LOOSE METALLIC MATERIALS

Experiments were carried out on the process of shaping by plastic working from loose metallic materials the toothed wheels for gerotor pump (small wheel with 4 external teeth, large wheel with 5 internal teeth). The sequence of technological operations started with bilateral pressing with quasistatic force and – alternatively – pulsating force (up to 500 Hz), exerting pressures of up to 1100 MPa. The densities above  $7.5 \text{ g/cm}^3$  were obtained. The heat treatment operation included sintering under standard conditions. The finishing operation consisted in calibration by push broaching. The dimensional and shape accuracies of  $3 \mu\text{m}$  and surface finish corresponding to that produced by polishing were obtained. The laboratory experiment was preceded by computer simulation of the casting design. The results of the simulation were used in designing the working parts of the test tools, i.e. die, punch and inserts. To implement the process in industry, the type series of hydraulic and mechanical pulsation presses and of tunnel and chamber furnaces were designed.

**Keywords:** quasistatic pressing, pulsating pressing, loose material, gerotor pump, computer simulation

*Złożono w Redakcji w listopadzie 2009 r.*