

Kazimierz JAKUBIUK\*  
Mirosław WOŁOSZYN\*

## ZABURZENIA SŁABEGO POLA MAGNETYCZNEGO PRZEZ ZANIECZYSZCZONE MAGNETYCZNIE TWORZYWA SZTUCZNE

Badanie słabych pól magnetycznych wymaga zastosowania precyzyjnych magnetometrów pracujących w układzie różnicowym. Dwa magnetometry pompowane optycznie pracujące w układzie różnicowym pozwalają na pomiary zaburzeń modułu indukcji magnetycznej rzędu 10pT. Dla tak precyzyjnych pomiarów pola magnetycznego niezbędne jest zastosowanie odpowiednich materiałów wchodzących w skład budowy systemu magnetometrycznego. Przedstawiono wyniki analizy zaburzenia pola magnetycznego spowodowane przez amagnetyczne elementy statywu pomiarowego systemu magnetometrycznego, które zostały zanieczyszczone w trakcie produkcji lub obróbki mechanicznej drobinami i opiłkami o właściwościach ferromagnetycznych. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych zaburzeń pola magnetycznego wywołanych przez elementy z tworzyw sztucznych.

SŁOWA KLUCZOWE: pole magnetyczne, magnetometr pompowany optycznie, tworzywa sztuczne, zaburzenie pola magnetycznego

### 1. WSTĘP

Każdy obiekt zbudowany z materiałów ferromagnetycznych, znajdujący się w ziemskim polu magnetycznym, powoduje zaburzenie równomierności tego pola. Zaburzenie to zależy od kształtu, rozmiarów i właściwości ferromagnetycznych obiektu oraz jego położenia względem wektora indukcji magnetycznej Ziemi. Współczesne magnetometry pompowane optycznie, nazywane dalej magnetometrami skalarnymi, umożliwiają pomiar modułu indukcji magnetycznej z czułością rzędu 4 pT/Hz<sup>0,5</sup> [1]. Realna czułość magnetometrów pracujących w układzie różnicowym zamontowanych na ruchomych platformach wynosi kilkadziesiąt pT/Hz<sup>0,5</sup> [1, 3]. Dla pomiarów tak słabych pól magnetycznych istotne znaczenie ma właściwy dobór materiałów zastosowanych do budowy systemu magnetometrycznego, w tym zwłaszcza odpowiedniego statywu pomiarowego do mocowania magnetometrów. Aby sam statyw nie wprowadzał zaburzenia rozkładu

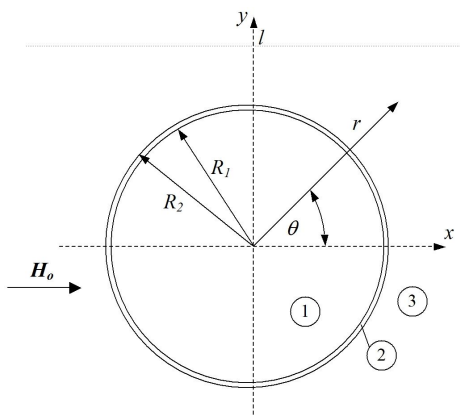
---

\* Politechnika Gdańska.

pola magnetycznego powinien być wykonany z materiałów amagnetycznych. W praktyce, w procesie wytwarzania i obróbki mechanicznej poszczególnych materiałów lub elementów z tych materiałów, zostają one zanieczyszczone drobinami lub opiłkami o właściwościach ferromagnetycznych. W przypadku ekranów elektromagnetycznych zbudowanych z kompozytów specjalnie wprowadza się w strukturę tworzywa sztucznego materiały przewodzące prąd elektryczny oraz materiały magnetyczne [5, 6]. W pracy przedstawiono wyniki badań zaburzenia pola magnetycznego Ziemi spowodowane przez cienką warstwę magnetyczną na powierzchni amagnetycznego walca oraz przez pojedynczy opiłek ferromagnetyczny. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych zaburzeń pola amagnetycznego wywołane przez elementy z tworzyw sztucznych.

## 2. ZABURZENIE POLA MAGNETYCZNEGO ZIEMI PRZEZ WALEC I ELIPSOIDĘ OBROTOWĄ

Zanieczyszczenie powierzchniowe ferromagnetykiem nieskończenie długiego, amagnetycznego walca zamodelowano jako cienką warstwę magnetyczną o względnej przenikalności magnetycznej  $\mu_r$  w warstwie przypowierzchniowej walca (rys. 1). Walec umieszczony jest w równomiernym, stacjonarnym polu magnetycznym o natężeniu  $H_0$ . W analizowanym układzie nie występują prądy, wobec czego pole magnetyczne jest polem bezwirowym. W układzie współrzędnych walcowych pole magnetyczne zależy tylko od współrzędnych  $r$  i  $\theta$  (rys. 1).



Rys. 1. Amagnetyczny walec z cienką warstwą ferromagnetyczną: 1 – podobszar wewnętrzny amagnetycznego walca, 2 – warstwa o właściwościach ferromagnetycznych, 3 – podobszar zewnętrzny

W poszczególnych podobszarach walca skalarny potencjał magnetyczny  $V_m$  spełnia równanie Laplace'a, które w układzie współrzędnych walcowych wyraża się wzorem:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V_m}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_m}{\partial \theta^2} = 0 \quad (1)$$

Ogólne rozwiązania równania (1) w trzech podobszarach (rys. 1) mają postać [4]:

$$V_{m1} = A_1 r \cos \theta \quad 0 \leq r \leq R_1 \quad (2)$$

$$V_{m2} = \left( A_2 r + \frac{A_3}{r} \right) \cos \theta \quad R_1 < r \leq R_2 \quad (3)$$

$$V_{m3} = \left( -H_o r + \frac{A_4}{r} \right) \cos \theta \quad r > R_2 \quad (4)$$

Składowe wektora natężenia pola magnetycznego na zewnątrz walca ( $r > R_2$ ) wynoszą:

$$H_r = \left( H_o + \frac{A_4}{r^2} \right) \cos \theta \quad (5)$$

$$H_\theta = \left( -H_o + \frac{A_4}{r^2} \right) \sin \theta \quad (6)$$

Składowe natężenie pola magnetycznego  $H_\theta$  i  $H_r$  spełniają następujące warunki brzegowe na granicach poszczególnych podobszarów:

$$H_\theta|_{R1-} = H_\theta|_{R1+} \quad (7)$$

$$\mu_o H_r|_{R1-} = \mu H_r|_{R1+}$$

$$H_\theta|_{R2-} = H_\theta|_{R2+} \quad (8)$$

$$\mu H_r|_{R2-} = \mu_o H_r|_{R2+}$$

Założono, że względna, zastępcza przenikalność magnetyczna warstwy tworząca zanieczyszczonego cząstkami o właściwościach ferromagnetycznych zależy od przenikalności magnetycznej materiału tych cząstek oraz od ich liczby w jednostce objętości (gęstości). Z tego względu przyjęto względną gęstość warstwy magnetycznej na powierzchni walca o promieniu  $R_1$  na jednostkę długości:

$$f = \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_2^2} 100\% \quad (9)$$

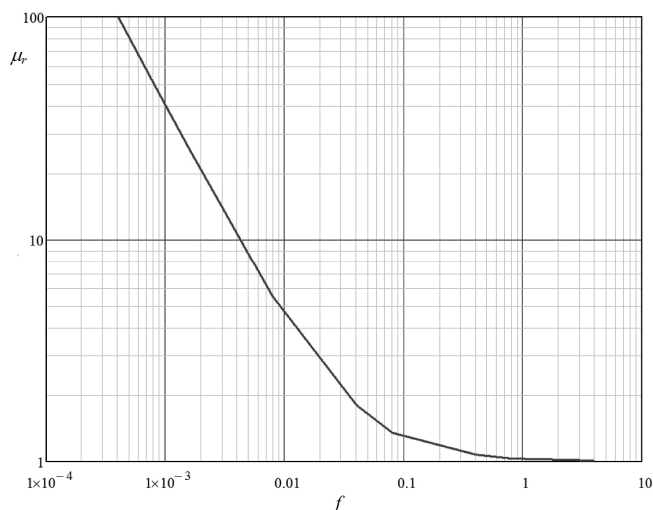
oraz bezwymiarową odległość  $l_b$  linii od środka walca (rys.1), wzdłuż której obliczone zostało zaburzenie pola magnetycznego Ziemi:

$$l_b = \frac{l}{R_1} \quad (10)$$

Na rysunku 2 przedstawiono obliczoną zależność względną, zastępczej przenikalności magnetycznej warstwy magnetycznej od parametru  $f$  (dla  $l_b = 10$  i zaburzenia pola magnetycznego równego  $1.2 \cdot 10^{-6}$  indukcji magnetycznej Ziemi, co równoważne jest wartości zaburzenia równej 60 pT w podanej odległości  $l_b$ ).



Dla względnej przenikalności cząstek ferromagnetycznych  $\mu_r = 100$  zaburzenie indukcji magnetycznej wynosi 60 pT dla parametru  $f = 4 \cdot 10^{-4}\%$ , co odpowiada grubości warstwy ferromagnetyka rzędu 10  $\mu\text{m}$  dla walca o promieniu  $R_l = 5\text{mm}$ . Im grubsza jest warstwa magnetyczna tym mniejsza jej wartość względnej, zastępczej przenikalności magnetycznej powodująca to samo zaburzenie pola magnetycznego Ziemi. Dla parametru  $f > 1\%$  właściwości magnetyczne materiału warstwy na powierzchni walca odpowiadają właściwościom paramagnetyków. Na przykład, dla aluminium grubość warstwy wynosi 12 mm, czyli dla  $f = 91\%$  (dla walca o promieniu  $R_l = 5\text{mm}$ ). Z przeprowadzonej analizy wynika, że jeżeli tworzywo sztuczne jest zanieczyszczone magnetycznie przez znikome ilości ferromagnetyka, to powoduje istotne zaburzenie pola magnetycznego Ziemi w przypadku pomiaru bardzo słabych pól magnetycznych.



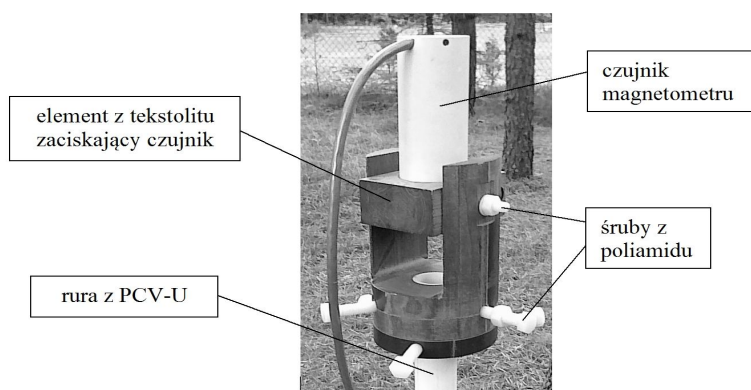
Rys. 2. Obliczona zależność zastępczej, względnej przenikalności zanieczyszczonej magnetycznie warstwy walca amagnetycznego od względnej gęstości zanieczyszczenia magnetycznego (dla początkowej wartości  $\mu_r = 100$  i  $f = 5 \cdot 10^{-4}$ )

Jako kolejny przykład zaburzenia rozkładu pola magnetycznego Ziemi przyjęto pojedynczy opiłek ferromagnetyczny ( $\mu_r = 100$ ) w kształcie wydłużonej elipsoidy o stosunku długości do średnicy równy 10 i kierunku osi wzdłużnej zgodnej osią pionową, znajdujący się w środku amagnetycznego walca. Przyjmując model pola magnetycznego opiłka w postaci dipola magnetycznego otrzymano analityczne zależności dla zaburzenia pola magnetycznego [3]. Zaburzenie o tej samej wartości, jakie przyjęto w przypadku analizy zaburzenia pola magnetycznego przez walec, w odległości  $l_b = 10$ , wywołuje opiłek o długości  $0.35R_l$ . Wynika z tego, że w odległości 5 cm od opiłka o długości 1.75 mm (odległość około 28 razy większa od długości opiłka) i średnicy 0.175 mm zaburzenie indukcji magnetycznej Ziemi wynosi około 60 pT.



### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

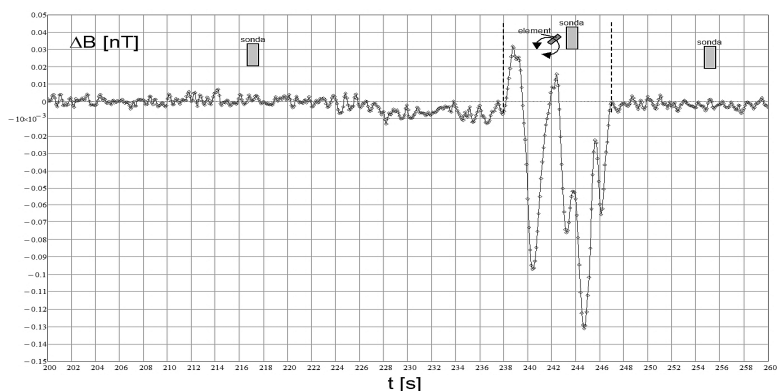
Magnetometry skalarne posiadają tzw. błąd kierunkowy, który zależy od położenia czujnika magnetometru względem wektora indukcji magnetycznej Ziemi [1, 2]. Błąd ten w przypadku magnetometrów zbudowanych na bazie cezu wynosi  $\pm 150$  pT [1]. W celu przeprowadzenia kompensacji błędu kierunkowego magnetometru zbudowano specjalny obrotowy statyw z materiałów amagnetycznych. Statyw obrotowy wykonany został z tekstolitu, rur PVC oraz śrub z poliamidu (rys. 3). Elementy statywu zostały wykonane na obrabiarkach. Wstępne badania magnetometru umieszczonego w statywie wykazały duże zaburzenia pola magnetycznego występujące podczas obrotu czujnika. Z tego względu przeprowadzono badania wpływu poszczególnych elementów obrotowego statywu na wyniki pomiarów zaburzenia rozkładu pola magnetycznego Ziemi.



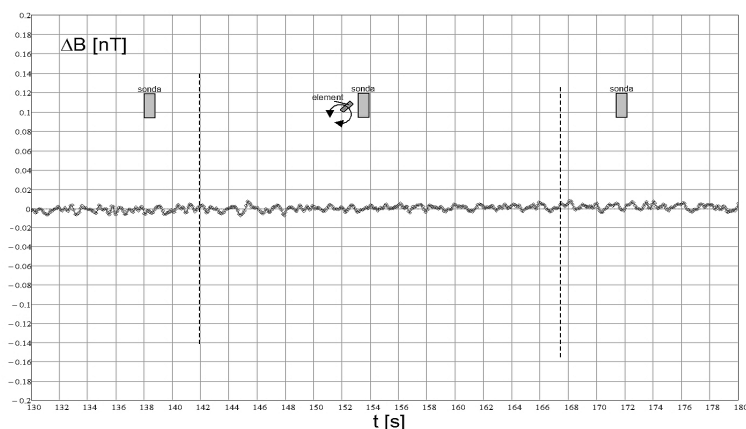
Rys. 3. Obrotowy statyw do badania rozkładu zaburzenia pola magnetycznego

Badania elementów obrotowego statywu wykazały istotny ich wpływ na zaburzenie pola magnetycznego Ziemi. W celu zminimalizowania wpływu tych elementów poddano je wytrawianiu w 10% roztworze kwasu solnego, w celu usunięcia z tych elementów zanieczyszczeń ferromagnetycznych, nazywane dalej „oczyszczeniem magnetycznym”. Na rys. 4 i rys. 5 pokazano wyniki pomiaru zaburzenia modułu indukcji magnetycznej wywołane przez zmianę położenia śruby z poliamidu (rys. 6) około 5 cm od czujnika magnetometru przed i po oczyszczeniu magnetycznym.

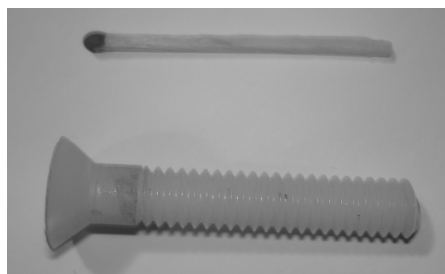
Zaburzenie modułu indukcji magnetycznej Ziemi wywołane przez zanieczyszczoną śrubę wyniosło około 160 pT (rys. 4). Oczyszczenie magnetyczne śruby okazało się skuteczne (rys. 5). Brak zaburzenia pola magnetycznego po wytrawieniu śruby z poliamidu w rozcieńczonym kwasie solnym oznacza, że zanieczyszczenie magnetyczne miało charakter powierzchniowy i zostało skutecznie wytrawione przez kwas.



Rys. 4. Przebieg zaburzenia modułu indukcji magnetycznej wywołany w czasie zmian położenia śruby z poliamidu w odległości 5 cm od czujnika magnetometru przed oczyszczeniem magnetycznym

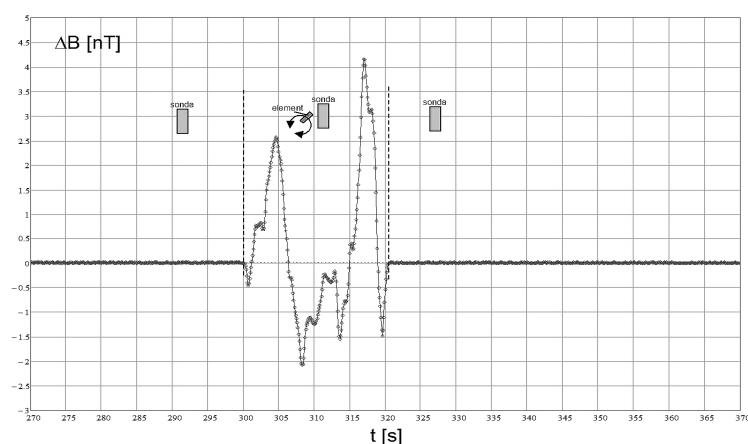


Rys. 5. Przebieg zaburzenia modułu indukcji magnetycznej wywołany w czasie zmian położenia śruby z poliamidu w odległości 5 cm od czujnika magnetometru po oczyszczeniu magnetycznym

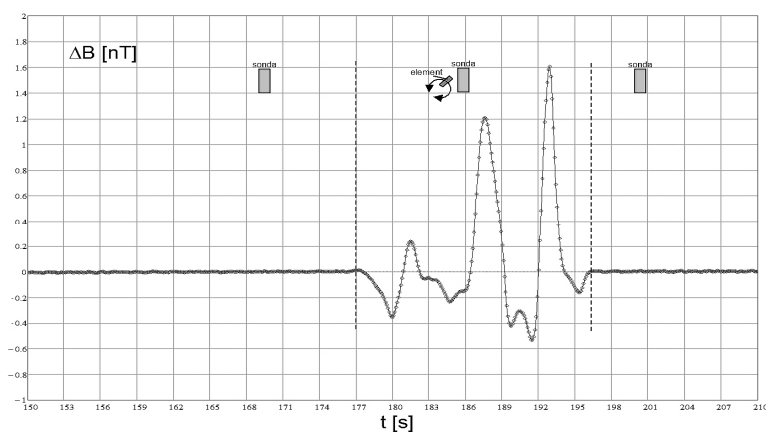


Rys. 6. Śruba z poliamidu (porównanie rozmiarów śruby z rozmiarem zapalki)

Na rys. 7 i rys. 8 pokazano zaburzenia modułu indukcji magnetycznej wywołane przez zmianę położenia elementu zaciskającego czujnik wykonanego z tekstolitu (rys. 9) około 5 cm od czujnika magnetometru przed i po oczyszczeniu magnetycznym. Zaburzenie modułu indukcji magnetycznej Ziemi wywołane przez zanieczyszczony magnetycznie tekstolit wyniosło około 6000 pT (rys. 7). Wytrawienie elementu w kwasie solnym spowodowało jedynie oczyszczenie jego powierzchni. Zaburzenie modułu indukcji magnetycznej zmniejszyło się do około 2000 pT (rys. 8).



Rys. 7. Przebieg zaburzenia modułu indukcji magnetycznej wywołany w czasie zmian położenia elementu zaciskającego czujnik z tekstolitu z odległości 5 cm od czujnika magnetometru przed oczyszczeniem magnetycznym



Rys. 8. Przebieg zaburzenia modułu indukcji magnetycznej wywołany w czasie zmian położenia elementu zaciskającego czujnik z tekstolitu z odległości 5 cm od czujnika magnetometru po oczyszczeniu magnetycznym

Wynika z tego, że tekstolit jest nieodpowiednim materiałem do budowy obrotowego statywu pomiarowego do badania magnetometrów skalarnych o wysokiej czułości. Materiał ten posiada zanieczyszczenia magnetyczne w całej objętości. Należy jednak podkreślić, że nie każdy tekstolit wykazuje takie właściwości. Badania tekstolitu z innej partii produkcji wykazały praktycznie brak jego wpływu na zaburzenie magnetyczne.



Rys. 9. Element zaciskający czujnik wykonany z tekstolitu (porównanie rozmiarów elementu z rozmiarem zapalki)

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza zaburzenia pola magnetycznego wywołanego przez walec z zanieczyszczoną magnetycznie warstwą powierzchniową wykazała, że zaburzenie modułu indukcji magnetycznej o wartości rzędu kilkudziesięciu pT w odległości 5 cm od czujnika magnetometru, powoduje bardzo cienka warstwa ferromagnetyka o względnej przenikalności magnetycznej  $\mu_r = 100$  o grubości rzędu dziesiątek  $\mu\text{m}$ . Podobne zaburzenie wywołuje ferromagnetyczny opilek o długości 2 mm i średnicy 0,2 mm. Wynika z tego, że bardzo ważny jest dobór materiału amagnetycznego do budowy obrotowego statywu oraz tzw. czyszczenie magnetyczne poszczególnych jego elementów. Podczas obróbki mechanicznej materiału zostają wgniecione w jego powierzchnię mikroskopijne drobiny ferromagnetyczne, np. z noża tokarskiego. Drobiny te lub też powierzchniowe zanieczyszczenia stalowym pyłem występującym w obrabiarce można skutecznie wyeliminować poprzez oczyszczenie magnetyczne, polegające na wytrawieniu wytworzonych elementów statywu w rozcieńczonym kwasie solnym. Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały dużą skuteczność tej metody. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że odpowiednimi materiałami do budowy stanowiska do badania magnetometrów skalarnych są: poliamid, polietylen i polioksymetylen (Derlin).

*Praca została sfinansowana w ramach projektu NCBiR  
nr DOBR/0062/R/ID1/2012/03.*



## LITERATURA

- [1] [www.geometrics.com](http://www.geometrics.com)
- [2] Wołoszyn M.: Kompensacja błędu kierunkowego magnetometru pompowanego optycznie. *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 12, s. 845–847, 2008.
- [3] Wołoszyn M.: Detekcja, lokalizacja i identyfikacja obiektów ferromagnetycznych z wykorzystaniem magnetometrów skalarnych. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2012.
- [4] Griffiths D.: *Podstawy elektrodynamiki*. PWN Warszawa 2001.
- [5] Colaneri N.F., Shacklette L.W.: EMI shielding measurements of conductive polymer blends. *IEEE Trans Instrumentation Measurement* 1992;41(2):291–7.
- [6] Yang S., Lozano K., Lomeli A., Foltz H., Jones R.: Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites. *Composites: Part A* 36 (2005) pp.691–697.

### **DISTURBANCES IN LOW MAGNETIC FIELD CAUSED BY MAGNETICALLY CONTAMINATED PLASTICS**

In the study of low magnetic fields precision magnetometers working in a differential system are used. In order to attain a high accuracy of magnetic field measurement, it is necessary to use appropriate materials for the construction of a magnetometric system. Practically during the manufacturing process and mechanical treatment of particular materials, they become contaminated with small particles or filings with ferromagnetic properties. These contaminations cause significant disturbances in the magnetic field in case of taking measurements of very low magnetic fields. An experimental study of the components used for the construction of a rotary support stand for measuring metrological parameters of the magnetometer confirmed that magnetic contaminations have a significant impact on the occurrence of disturbances in the Earth's magnetic field. Superficial contamination of the materials with steel dust that occurs in machine tools can be efficiently eliminated by magnetic cleaning which consists in pickling of the produced components in a bath of diluted sulphuric acid. Experimental studies confirmed high efficiency of the above method.