

Małgorzata GRABOWSKA, Jarosław Robert MIKOŁAJCZYK

PRÓBA ZASTOSOWANIA TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ CAT DO OKREŚLANIA STRUKTURY GRAFITU NATURALNEGO W ZALEŻNOŚCI OD ROZMIARU ZIARNA

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań zrealizowanych z wykorzystaniem tomografu komputerowego Somatom Definition AS firmy Siemens. Celem przeprowadzonych analiz było określenie struktury badanego materiału w zależności od rozmiaru ziarna. Jako materiał próbek zastosowano następujące gatunki grafitu naturalnego: grafit wielkopłatkowy FG 595, grafit wielkopłatkowy FG 192 oraz grafit drobnopłatkowy MG 192. Materiał próbek (grafit) dostarczyła firma Sinograf.

Słowa kluczowe: tribologia, stan warstwy wierzchniej, własności i właściwości warstwy wierzchniej, tomografia komputerowa CAT, tomograf

1. WPROWADZENIE

Tomografia komputerowa (TK) jest nową i nowoczesną dziedziną, której powstanie oraz rozwój są niejako zintegrowane z innymi naukami, np. matematyką, informatyką, elektroniką, fizyką, medycyną czy elektroniką. Umożliwia ona za pomocą tomografów wykonywanie zdjęć warstwowych, czyli tomogramów. Z wykonanych zdjęć warstwowych możliwe jest zbudowanie trójwymiarowego modelu badanego obiektu. Główna zasada tomografii mówi, że zdjęcia warstwowe uzyskuje się wówczas, gdy dwa z trzech zasadniczych elementów układu – lampa/źródło promieniowania, film/układ detektorów, przedmiot badany – w czasie ekspozycji znajdują się w ruchu, przy czym kierunek ruchu każdego z elementów jest przeciwny, lecz tory ich ruchu są homotetyczne. Obecnie produkowane tomografy mogą być wyposażone w kilka źródeł promieniowania i w kilka układów detektorów, a każdy z układów – w kilkadziesiąt/kilkaset detektorów. Podział metod tomograficznych ze względu na sposób obrazowania oraz ich zastosowanie został omówiony m.in. w pracy [3].

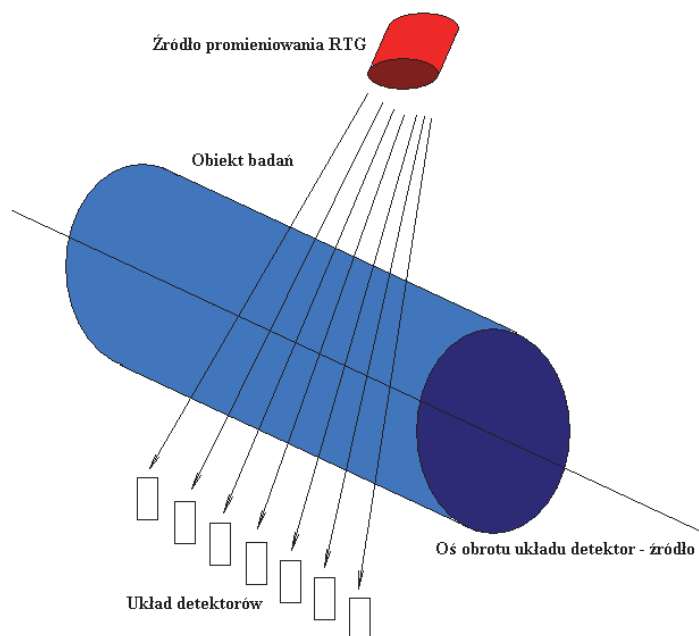
W technice TK spiralnej wiązka promieniowania X ma kształt wachlarza. To nie jest korzystne, ponieważ czas skanowania jest relatywnie długi, a dawka promieniowania względnie duża – ok. 2000 μSv [13, 14]. Uzyskana jakość obrazu z wykorzystaniem wokseli anizotropowych nie jest duża. Najmniejszym elementem tworzącym obraz jest woksel. Im mniejsza jest wielkość wokseli, tym obraz cechuje się większą rozdzielczością (podobnie jak to jest w przypadku

¹ mgr Małgorzata GRABOWSKA, Zakład Rezonansu Magnetycznego, Wojewódzki Szpital Zespolony w Toruniu, e-mail: gragosa@op.pl

² dr inż. Jarosław Robert MIKOŁAJCZYK, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. S. Staszica w Pile, e-mail: jmikolajczyk@pwsz.pila.pl

pikseli na obrazie 2D monitora komputera lub odbiornika TV) i tym samym – większą dokładnością obrazowania struktur. Dla przykładu układ skanujący jednoźródłowego tomografu komputerowego (CAT) przedstawiono na rysunku 1. Dla danego kąta pochylenia wokół stałej osi obrotu, np. 30° , układ źródło – zespół detektorów przemieszcza się liniowo (w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu), dokonując odczytów natężenia promieniowania X przechodzącego przez obiekt. Liniowy układ detektorów rozmieszczonych równolegle do osi obrotu pozwala na rejestrowanie niezależnych przekrojów obiektu. Dla tak otrzymanych obrazów rentgenowskich kontrast obrazów badanego obiektu zależy od wartości współczynnika absorpcji danego materiału obiektu, przez który przechodzi promieniowanie X [2, 7, 8, 13].

W pracy podjęto próbę scharakteryzowania tomografii komputerowej CAT – wykorzystywanej w diagnostyce medycznej – w inżynierii materiałowej, a dokładniej do grafitu naturalnego, który jest często stosowany sam lub też jako dodatek do środków smarnych i charakteryzujący się dobrymi właściwościami przeciwciernymi.

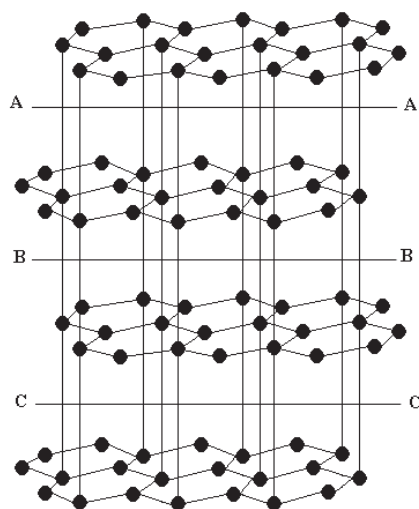


Rys. 1. Układ skanujący przykładowego jednoźródłowego tomografu komputerowego CAT
Fig. 1. Scanning system of a typical single-source computer tomograph CAT

Badania wykonano z wykorzystaniem tomografu komputerowego Somatom Definition AS firmy Siemens. Jako materiał próbek zastosowano grafit wielkopłatkowy FG 595, grafit wielkopłatkowy FG 192 oraz grafit drobnopłatkowy MG 192.

Grafit ma strukturę pośrednią pomiędzy strukturą kowalencyjną a molekularną. W graficie atomy węgla C tworzą warstwy, w których każdy atom węgla C związany jest trzema wiązaniami kowalencyjnymi (czyli bardzo mocnymi) z trzema sąsiadującymi z nim innymi atomami węgla. Między warstwami działają natomiast słabe siły międzycząsteczkowe, które powodują, że kryształy grafitu są miękkie [1]. Na rysunku 2 przedstawiono strukturę grafitu z zaznaczonymi płaszczyznami łatwych poślizgów.

Grafit płatkowy (wielko- lub drobnopłatkowy) jest odmianą grafitu naturalnego charakteryzującego się wysoko uporządkowaną strukturą krystaliczną. Powstał w wyniku metamorfizmu bogatych w węgiel substancji organicznych. Jak wspomniano wcześniej budowa przestrzenna grafitu powoduje łatwość zrywania wiązań pomiędzy sąsiednimi płaszczyznami, warstwami. Cecha ta występuje nawet wówczas, gdy grafit rozdrobni się do wielkości ziarna poniżej $8\ \mu\text{m}$. Twardość, wytrzymałość, przewodnictwo cieplne i elektryczne grafitu w kierunku równoległym do osi krystalitów są inne niż w kierunku prostopadłym do osi krystalitów [1].



Rys. 2. Struktura grafitu, A-A, B-B, C-C – płaszczyzny poślizgu. Układ warstw w kryształach [6]

Fig. 2. A structure of the graphite, A-A, B-B, C-C – slip planes. Layer layout in a crystal [6]

Grafit wielkopłatkowy FG 595 charakteryzuje się zawartością węgla C minimum 95%, rozmiarem ziarna powyżej $0,5\ \text{mm}$ oraz gęstością nasypową ok. $0,6\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (dane na podstawie [5]).

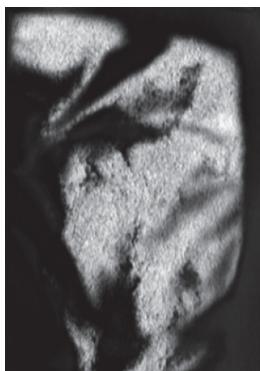
Grafit wielkopłatkowy FG 192 charakteryzuje się zawartością węgla C minimum 92%, rozmiarem ziarna powyżej $0,15\ \text{mm}$ oraz gęstością nasypową ok. $0,5\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (dane na podstawie [5]).

Grafit drobnopłatkowy MG 192 charakteryzuje się zawartością węgla C minimum 92%, rozmiarem ziarna poniżej $0,15\ \text{mm}$ oraz gęstością nasypową ok. $0,5\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (dane na podstawie [5]).

2. WYNIKI BADAŃ

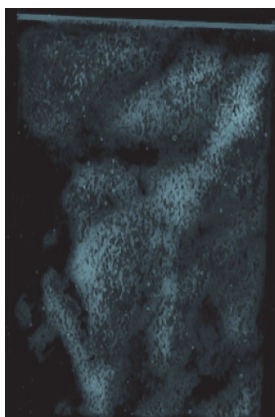
Poniżej przedstawiono tylko mały fragment z ponad tysiąca tomogramów wykonanych dla ww. gatunków grafitu naturalnego (ze względu na ograniczenia objętościowe dotyczące pracy). Jednak nie umniejsza to znaczeniu wniosków płynących z przeprowadzonych badań.

Na rysunku 3 przedstawiono rekonstrukcję obrazu badania tomograficznego grafitu wielkopłatkowego mineralnego FG 595 przy powiększeniu 1,31x. Widoczne: falistość powierzchni próbki grafitu oraz ziarna rozsypane na powierzchni folii polipropylenowej. Podobny obraz otrzymano dla nieznacznie mniejszego powiększenia przedstawionego na rysunku 4 z widocznymi granicami ziarn. Dla tej odmiany grafitu wykonano tomogramy warstw o grubości 0,6 mm przez usypaną warstwę próbki grafitowej. Osiem przykładowych kolejnych tomogramów otrzymanych w ten sposób przedstawiono na rysunku 5. Niestety trudno jest na ich podstawie określić budowę lub wady/zanieczyszczenia struktury dla tego gatunku grafitu. O ile struktura grafitu powinna być zbliżona dla wszystkich gatunków tego minerału, o tyle stopień jego zanieczyszczenia oraz rodzaj tego zanieczyszczenia zależą wyłącznie od miejsca jego wydobywania na kuli ziemskiej. Ewentualnie też – od sposobu jego wydobywania. Podobny obraz otrzymano dla tomogramu zaprezentowanego na rysunku 6. Płatki grafitu są wymieszane, czyli ułożone przypadkowo (równolegle, prostopadle i po skosie względem siebie), dlatego otrzymany obraz przedstawia strukturę niejednorodną.



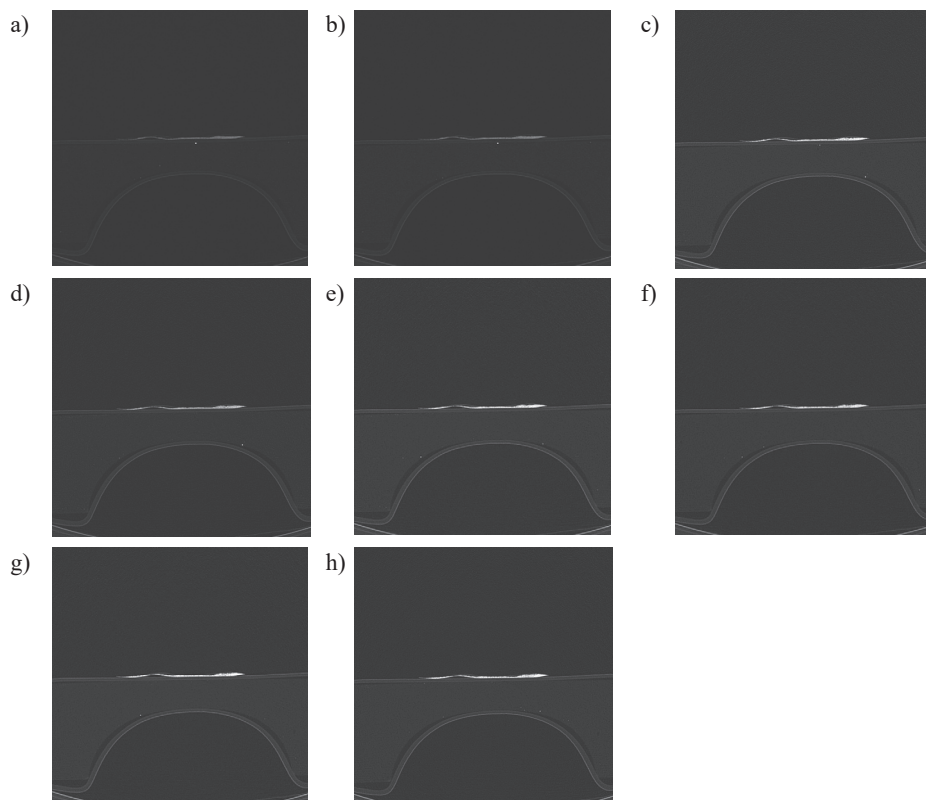
Rys. 3. Rekonstrukcja obrazu badania tomograficznego grafitu mineralnego płatkowego FG 595.
Pow. 1,31x

Fig. 3. A reconstruction of the image of tomographic examination of the mineral graphite FG 595.
Zoom 1.31x



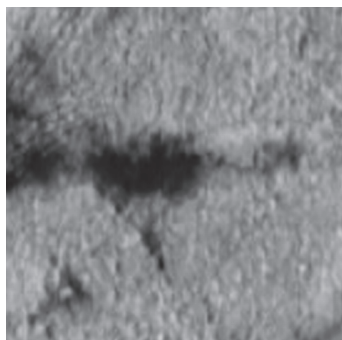
Rys. 4. Rekonstrukcja obrazu badania tomograficznego grafitu mineralnego płatkowego FG 595.
Pow. 1,08x

Fig. 4. A reconstruction of the image of tomographic examination of the mineral graphite FG 595.
Zoom 1.08x



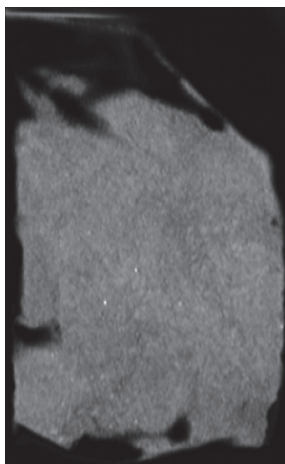
Rys. 5a)–h). Przykładowe kolejne 8 tomogramów ze 100 wykonanych dla grafitu mineralnego płatkowego FG 595. Grubość skanowanych warstw $\neq 0,6$ mm

Fig. 5a)–h). A sample of 8 out of 100 tomograms for the mineral graphite FG 595. Scanned layers thickness 0.6 mm

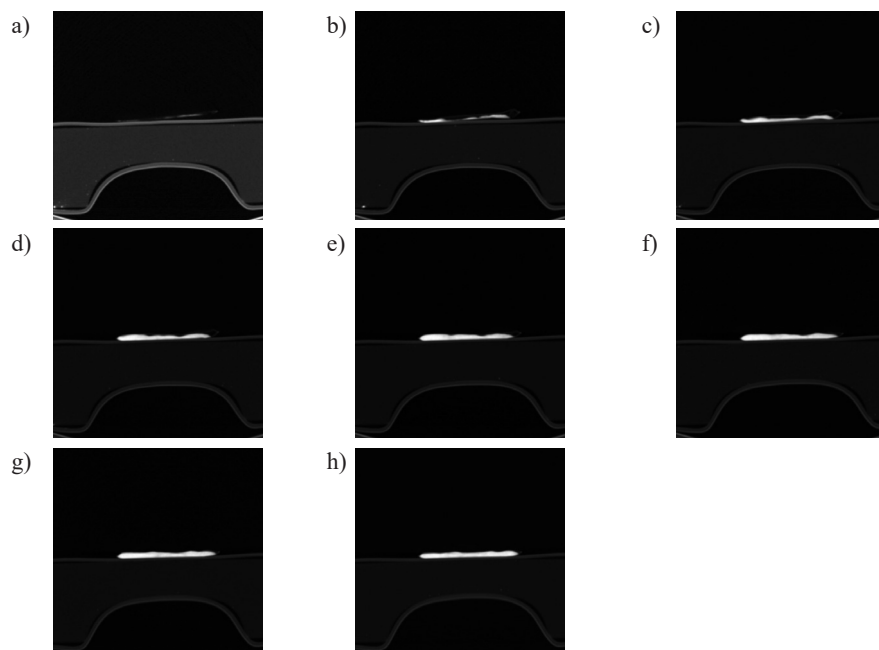


Rys. 6. Tomogram grafitu FG 595 przy powiększeniu 3,09x
Fig. 6. A tomogram of the graphite FG 595 at zoom 3.09x

Na rysunku 7 przedstawiono rekonstrukcję obrazu badania tomograficznego grafitu FG 192 przy powiększeniu 1,08x, natomiast na rysunku 8 – przykładowe kolejne 8 tomogramów ze 100 wykonanych dla grafitu FG 192. Przekroje warstw są znacznie jaśniejsze niż dla grafitu FG 595 mimo mniejszej procentowej zawartości węgla C. Oznacza to, że dla mniejszej granulacji ziarna atomy węgla są bardziej upakowane i tym samym bardziej pochłaniają promieniowanie X. Granulacja ziarna w tym przypadku ma większy wpływ na upakowanie atomów węgla niż procentowa zawartość węgla. Różnica ilości węgla w tych dwóch przypadkach wynosi 3%.



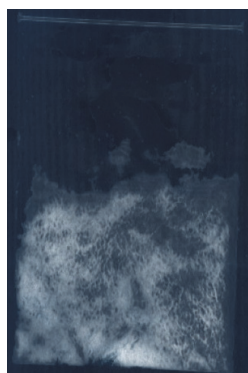
Rys. 7. Rekonstrukcja obrazu badania tomograficznego grafitu FG 192. Powiększenie 1,08x
Fig. 7. A reconstruction of the image of tomographic examination of the mineral graphite FG 192.
Zoom 1.08x



Rys. 8 a)–h). Przykładowe kolejne 8 tomogramów ze 100 wykonanych dla grafitu mineralnego wielopłatkowego FG 192. Grubość skanowanych warstw $\neq 0,6$ mm

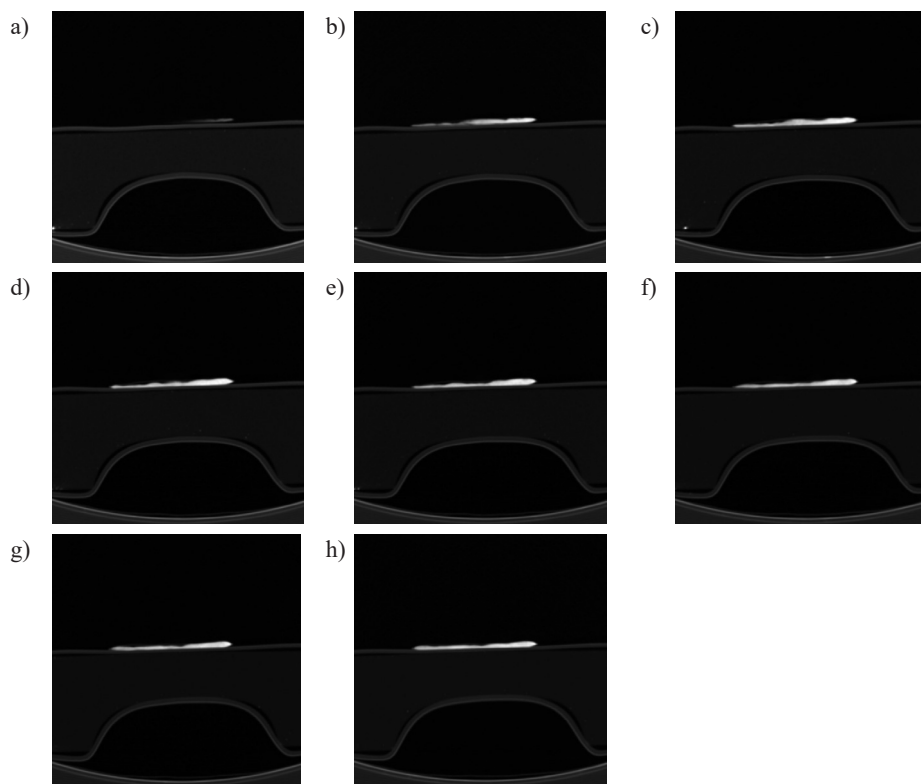
Fig. 8 a)–h). A sample of 8 out of 100 tomograms for the mineral graphite FG 192. Scanned layers thickness 0.6 mm

Ostatnim gatunkiem grafitu naturalnego, który poddano badaniom z wykorzystaniem tomografii komputerowej, jest grafit drobnopłytkowy MG 192 o rozmiarze ziarna poniżej 0,15 mm, przedstawiony na rysunku 9 oraz 10. Grubsze warstwy pyłu grafitowego dobrze pochłaniają promieniowanie X (białe obszary). Cienkie warstwy pyłu zawierają natomiast mniejsze ilości atomów węgla, więc promieniowanie X przenika je z pewnymi stratami (szare obszary). Czarny obszar to brak grafitu.



Rys. 9. Rekonstrukcja obrazu badania tomograficznego grafitu drobnopłytkowego MG 192. Powiększenie 1,08x

Fig. 9. A reconstruction of the image of tomographic examination of the mineral graphite MG 192. Zoom 1.08x



Rys. 10 a)–h). Przykładowe kolejne 8 tomogramów ze 100 wykonanych dla grafitu mineralnego drobnopłatkowego MG 192. Grubość skanowanych warstw $\approx 0,6$ mm

Fig. 10 a)–h). A sample of 8 out of 100 tomograms for the mineral graphite MG 192. Scanned layers thickness 0.6 mm

3. PODSUMOWANIE

Próba zastosowania tomografii komputerowej CAT do określania struktury grafitu naturalnego w zależności od rozmiaru ziarna w przedstawionych badaniach dała wynik negatywny. Otrzymane rozdzielczości tomogramów są zbyt małe do wyciągnięcia konstruktywnych wniosków. Niewątpliwą zaletą metody CAT jest możliwość otrzymywania obrazów wewnątrz danego obiektu, czego nie można zrealizować np. za pomocą metod mikroskopowych. Jednak nawet badania TK grafitu wielkopłatkowego nie zwiększyły czytelności otrzymanych tomogramów.

Badane próbki grafitu charakteryzowały się określonym przez producenta stopniem zanieczyszczenia. Na otrzymanych tomogramach trudno jest jednak się ich doszukiwać, mimo że 8% (FG 192, MG 192) lub 5% (FG 595) zanieczyszczeń to są względnie duże wartości. Tym samym nie można nic powiedzieć np. o rodzaju tych zanieczyszczeń, ich rozmieszczeniu w strukturze czy też ewentualnym wpływie ich umiejscowienia na własności smarne grafitu.

Przyczyn otrzymanego negatywnego wyniku badań należy doszukiwać się w zbyt małej, jak dla inżynierii materiałowej, rozdzielczości zastosowanego tomografu.

Ogólnym wnioskiem z przeprowadzonych badań dla warstw o grubości $\neq 0,6$ mm jest stwierdzenie, że wzrost drobnoziarnistości grafitu wpływa na zwiększenie upakowania atomów węgla C w pyłe grafitowym (obraz przekrojów jest coraz jaśniejszy).

Grafit nie jest metalem, dzięki czemu w tomografii komputerowej (TK) w sąsiedztwie krystalitów grafitu nie występują artefakty i zniekształcenia, które uniemożliwiają prawidłową ocenę otrzymanego obrazu, co zostało już zauważone m.in. w [2, 3, 7, 8]. Dlatego korzystne wydaje się kontynuowanie badań w tym kierunku, mimo obecnych niepowodzeń, z wykorzystaniem możliwie najmniejszych grubości warstw skanowanych i największej możliwej rozdzielczości.

LITERATURA

- [1] BIELAŃSKI A.: Podstawy chemii nieorganicznej, cz. 1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, 2007.
- [2] GODET M.: The third body approach: A mechanical view of wear. *Wear* 100, 1984, 437–452.
- [3] GRABOWSKA M., MIKOŁAJCZYK J.R.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w inżynierii materiałowej. *Czasopismo Naukowo-Techniczne: Postępy w inżynierii mechanicznej* 9(5), 2017, 15–26.
- [4] GRABOWSKA M., MIKOŁAJCZYK J.R., BASIAK S.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w nieniszczących badaniach złączy spawanych. *Czasopismo Naukowo-Techniczne: Postępy w inżynierii mechanicznej* 11(6), 2018, 31–44.
- [5] [http://www..sinograf.com.pl](http://www.sinograf.com.pl)
- [6] KRAWIEC S.: Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław, 2011.
- [7] KRUK A.: Tomografia elektronowa i jej zastosowanie w obrazowaniu i metrologii mikrostruktury materiałów. Wydawnictwo AGH Kraków, 2012.
- [8] LASS P.: Tomografia emisyjna fotonu. VIA MEDICA Gdańsk, 1998.
- [9] MIKOŁAJCZYK J.R.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2017.
- [10] MIKOŁAJCZYK J.R.: Maszyny tarciove. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2018.
- [11] MIKOŁAJCZYK J.R.: Tribotestery. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2019.
- [12] POLAKOWSKI K.: Tomograficzne obrazowanie lokalnych wartości parametrów przepływów produktów spalania w technice samochodowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa, 2011.
- [13] RIGNEY D.A., GLAESER W.A.: The significance of near surface mikrostruktury in the wear process. *Wear* 46(1), 1978, 241–250.
- [14] RÓŻYŁO-KALINOWSKA I.: Standardy Europejskiej Akademii Radiologii Stomatologicznej i Szczękowo-Twarzowej dotyczącej obrazowania wolumetrycznego (CBCT). *Magazyn Stomatologiczny* 5, 2009, 12–16.
- [15] RÓŻYŁO-KALINOWSKA I.: Rola tomografii wolumetrycznej w ortodoncji. *Forum Ortodontyczne* 7(1), 2011, 28–40.

AN ATTEMPT TO APPLY CAT SCANNING TO DETERMINE THE NATURAL GRAPHITE STRUCTURE DEPENDING ON THE GRAIN SIZE

Summary: The article presents the results of the study with the aid of computer tomograph Somatom Definition AS (Siemens). The examined probes were the following natural graphites: FG 595, FG 192, MG 192. The graphite material has been supplied by the firm Sinograf.

Key words: tribology, condition of surface layer, the properties and the quality of surface layer, Computer Axial Tomography, tomograph