

Grzegorz Służalek, email: grzegorz.sluzalek@us.edu.pl  
Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach

Piotr Duda, email: piotr.duda@us.edu.pl  
Uniwersytet Śląski, Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach

## WIZUALIZACJA WYBRANYCH MODELI WARSTW TLENKOWYCH Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU SOLIDWORKS

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono przegląd wybranych modeli anodowej warstwy tlenkowej. Na podstawie modeli literaturowych i badań własnych autorzy zaproponowali model 3D warstwy tlenkowej. Modele te mogą być wykorzystane do analizy warstw metodami symulacji komputerowej (FEM). Warstwa tlenkowa została wytworzona na stopie EN-AW- 5251 i zamodelowana w programie SolidWorks.

**Słowa kluczowe:** anodowa warstwa tlenkowa, model 3D, SolidWorks

## VISUALIZATION OF SELECTED MODELS OF OXIDE LAYERS USING SOLIDWORKS

**Abstract:** This paper presents an overview of selected models of anodic oxide layer. Based on models of the literature and our own authors proposed a 3D model of the oxide layer. These models can be used to analyze the layers of a computer simulation method (FEM). Oxide layer was formed on the alloy EN-AW-5251 and modeled in SolidWorks.

**Keywords:** anodic oxide layer, 3D model, SolidWorks

### 1. WSTĘP

Jednym z ważnych tworzyw konstrukcyjnych jest aluminium i jego stopy. Procentowy udział aluminium w gospodarce [1] zawiera tabela 1. Modyfikacja składu chemicznego stopów aluminium i ich obróbka cieplna wpływa na właściwości tak otrzymanych tworzyw konstrukcyjnych. Wyróżnić można stopy: do przeróbki plastycznej EN-AW (wrought) oraz stopy odlewnicze EN-AC (cast). W procesie utleniania anodowego aluminium i jego stopów powstaje anodowa powłoka twarda predysponowana do współpracy tribologicznej.

Przedmiotem niniejszej pracy jest model tlenku aluminium otrzymany na stopie aluminium z magnezem: EN-AW-5251 (EN-AW-AMg2 dawniej PA2) o bardzo dobrej podatności na utlenianie (tabela 2.).

Anodowe powłoki twarde otrzymywane na stopach aluminium w procesie ich utleniania, posiadają amorficzną budowę, dobrą adhezję, wysoka twardość oraz

posiadają bardzo dużą odporność na ścieranie predysponujące je do współpracy tribologicznej.

Tabela 1. Wykorzystanie aluminium w gospodarce [1]

Gospodarka	Udział [%]
transport i komunikacja	24
budowa maszyn	22
budownictwo	20
elektrotechnika	12
gospodarstwa domowe	12
opakowania	2
inne	8

Tabela 2. Skład chemiczny stopu EN-AW-5251 [4]

Pierwiastek chemiczny	Udział [%]
Mg	1,7-2,4
Mn	0,10-0,50
Si	0,40
Fe	0,50
Cr = Cu= ZN = Ti	0,15
Inne max	0,15

Utlenianie może być prowadzone w elektrolitach: jednoskładnikowych lub dwu i wieloskładnikowych, przy zastosowaniu stałego lub zmiennego prądu anodowania, różnej wartości gęstości prądu anodowania i różnej wartości temperatury elektrolitu [6-13]. Różne warunki utleniania implikują zróżnicowaną budowę warstwy anodowej. Wyróżnić można elektrolity kwaśne i zasadowe dające w wyniku utleniania anodową powłokę twardą (APT) o różnej grubości [7]. Warstwy tlenkowe otrzymywane na potrzeby przemysłowe np. do współpracy tribologicznej charakteryzują się dużą twardością, małą porowatością i grubością od 30 do 100 i więcej nm.

Tabela 3. Wpływ rodzaju elektrolitu na grubość warstwy tlenkowej [7]

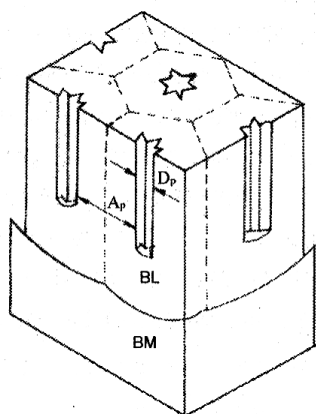
Rodzaj elektrolitu	Grubość warstwy tlenkowej [nm]
Elektrolity kwaśne:	
kwas siarkowy	10-20
kwas szczawiowy	15-25
kwas chromowy	24
kwas fosforowy	25-35
Elektrolit zasadowy:	
broaks	13-235

Tak powstałą anodowa warstwę można modyfikować w różnych procesach technologicznych otrzymując warstwę o jeszcze lepszych właściwościach, które

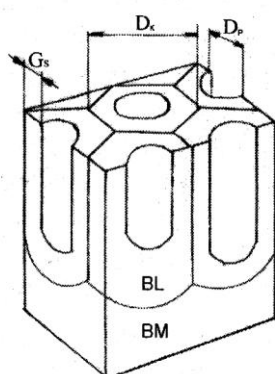
dobrze byłoby przewidywać jeszcze przed jej otrzymaniem. W tym celu można zastosować trójwymiarowe modele warstwy tlenkowej zamodelowane w programach CAD 3D typu SolidWorks.

## 2. PRZEGLĄD WYBRANYCH MODELI APT

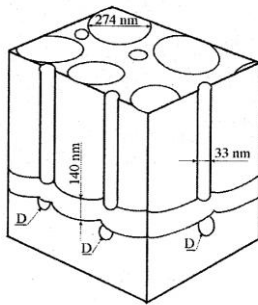
Technologia otrzymywania warstw tlenkowych jest znana od wielu lat. W literaturze spotykane są różne modele warstw tlenkowych. Najstarsze to modele komórkowe elektrolitycznej cienkiej warstwy tlenkowej zaproponowane przez Kellera (pory mają kształt gwiazdzisty Rys.1.) oraz Tomashova (w którym pory komórek warstw tlenkowych są zbliżone do walca Rys. 2.). Kolejne modele to model micelarny Bogojawleńskiego (Rys. 3.) oraz model włóknisty Dorsey'a (Rys. 4.). Ostatnie wymienione modele lepiej opisują warstwę tlenkową wykorzystywaną do produkcji nanorurek węglowych. Kolejnym odzwierciedleniem warstwy tlenku aluminium jest występującym w literaturze model Skonecznego (Rys. 5.).



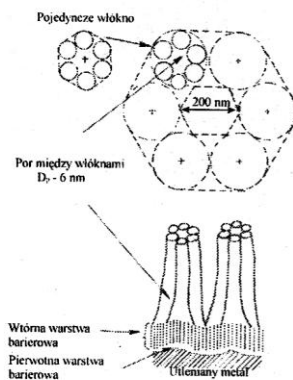
Rys. 1. Model komórkowy według Kellera Hantera Robinsona [5]



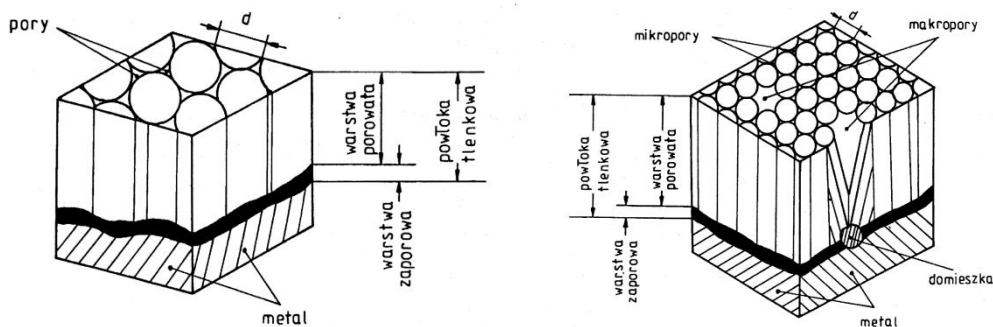
Rys. 2. Model komórkowy według Tomashova [14]



Rys. 3. Model micelarny według Bogojawleńskiego [2]



Rys. 4. Model komórkowy wg Dorsey'a [3]



Rys. 5. Model tlenku aluminium wg Skonecznego a) model idealnego tlenku, b) rzeczywistego [9, 10]

### 3. METODYKA BADAN

Pierwszym etapem pracy było otrzymanie APT. Proces anodowania był prowadzony przy stałym ładunku elektrycznym 120 A×min, stosując gęstość prądową 1 A/dm<sup>2</sup>. Temperatura elektrolitu (7% roztworu kwasu szczawowego) podczas całego procesu była stała i wynosiła 290 K.

Pomiary grubości tlenku (Rys. 6.) wykonano wykorzystując metodę prądów wirowych, wartość średnia ze 160 pomiarów  $g=34,6 \pm 0,6 \mu\text{m}$ .



Rys. 6. Przyrząd do pomiaru grubości warstwy Dualscope

Badania profilografometryczne zrealizowano metodą stykową za pomocą profilografometru firmy Taylor Hobson PGI 830 (Rys. 7.).



Rys. 7. Profilografometr firmy Taylor Hobson PGI 830

Morfologię APT określono przy pomocy mikroskopu skaningowego firmy PHILIPS XL30 ESEM środowiskowy (Rys. 8.).



Rys. 8. Mikroskop skaningowy firmy PHILIPS XL30 ESEM

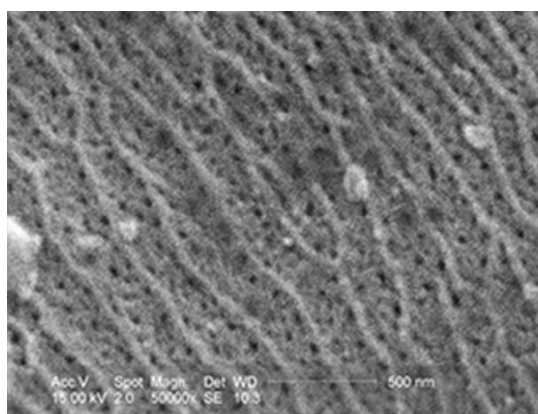
#### 4. WYNIKI BADAN

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni pozwoliły na zestawienie wybranych parametrów wysokościowych powierzchni (tabela 4.).

Tabela 4. ISO 25178 Parametry wysokościowe powierzchni

Parametr	Wartość
Sq - Wysokość średniokwadratowa	0,820 $\mu\text{m}$
Ssk - Asymetria	-1,69
Sku - Kurtzoza	8,63
Sp - Maksymalna wysokość piksu	3,13 $\mu\text{m}$
Sv - Maksymalna wysokość wgłębienia	5,02 $\mu\text{m}$
Sz - Maksymalna wysokość	8,16 $\mu\text{m}$
Sa - Średnia arytmetyczna wysokość	0,582 $\mu\text{m}$

Morfologia warstwy tlenkowej została zamieszczona na Rys. 9



Rys. 9. Powierzchnia tlenku aluminium w skali mikro

Komputerowa analizę wybranych parametrów warstwy tlenkowej przeprowadzono w programie ImageJ. Zastosowanie komputerowej analizy obrazu (KAO) pozwoliło na wyznaczenie średniej wielkości porów w warstwie tlenkowej i pozostałych wybranych parametrów wykorzystanych przy budowie semi rzeczywistego modelu mikro-makro APT (tabeli 5.).

Następnie wykonano trójwymiarowe modele w aplikacji typu CAD i analizy metodą elementów skończonych (MES) w programie SolidWorks, celem późniejszego wydruku w technologii 3D modelu warstwy tlenkowej (APT).

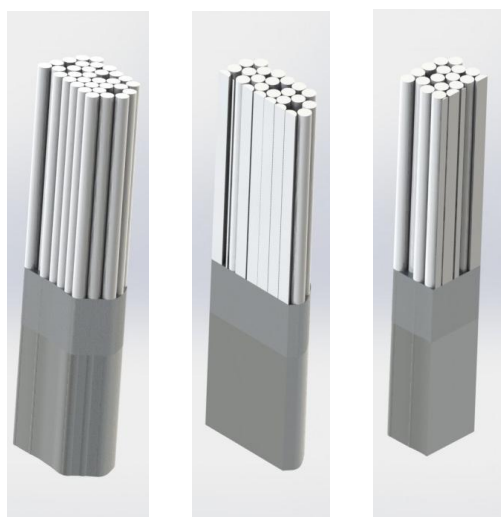
Tabela 5. Zestawienie wybranych parametrów otrzymanych z KAO zdjęć z mikroskopu skaningowego

Parametr	Wartość	Wymiar
Średnica porów	36±3	nm
Współczynnik kształtu porów	0,89±0,02	
Udział powierzchniowy porów	2,8±0,4	%
Odległość między porami	74±19	nm
Odległość między pasmami	167±21	nm

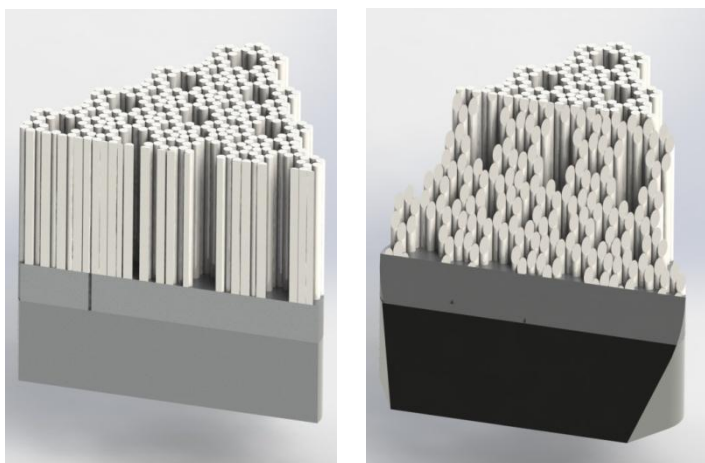
## 5. MODEL MIKRO-MAKRO APT

W programie SolidWorks autorzy wykonali trójwymiarowe modele warstwy tlenkowej. Warstwa ta może być poddana dalszej modyfikacji poprzez wypełnienie porów materiałem w różnych opatentowanych procesach technologicznych [11-13]. Zaproponowany w pracy model „mikro-makro” warstwy tlenkowej do współpracy ślizgowej oparto o analizę wcześniejszych modeli historycznych (Dorseya), propozycję Skonecznego oraz badania własne [11-13].

Założono, że struktura warstwy tlenkowej ma budowę kolumnowo włóknistą natomiast wielkość i kształt porów są zależne od materiału utlenianego i warunków procesu anodowania. Model stochastyczny warstwy tlenkowej 3D (rys. 10.) wykonany przez autorów na w oparciu o model Skonecznego

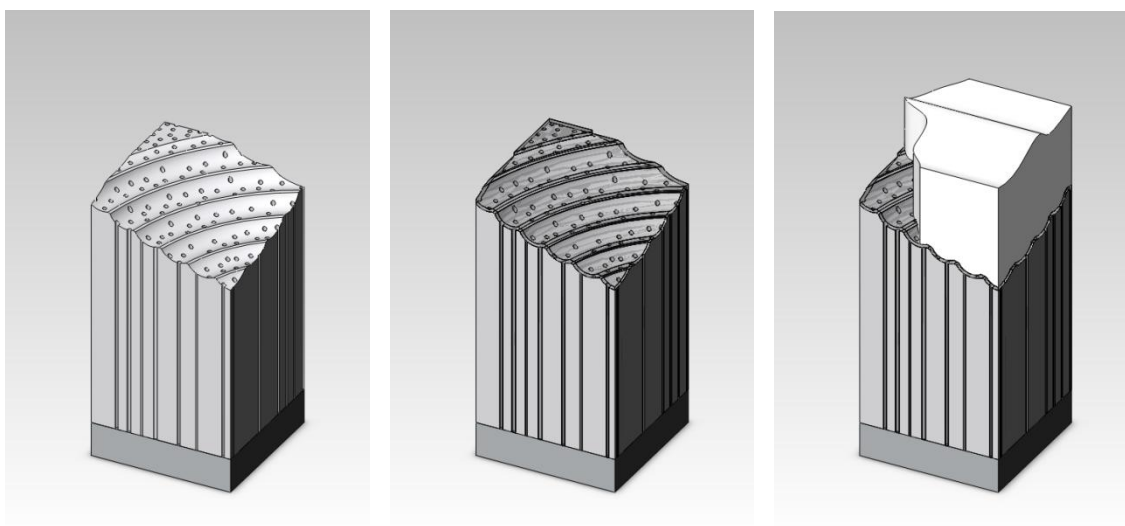


Rys. 10. Model stochastyczny warstwy tlenkowej 3D  
Propozycja autorskiego modelu „mikro-makro” warstwy tlenkowej 3D została pokazana na rys 11.



Rys. 11. Model „mikro-makro” warstwy tlenku aluminium

Zaproponowany i wykonany model 3D APT (anodowej powłoki twardej) może być wykorzystany do obliczeń wytrzymałościowych modyfikowanej i niemodyfikowanej warstwy tlenkowej oraz z do wizualizacji procesów tribologicznych (rys. 12.).



Rys. 12. Model warstwy tlenkowej przed i podczas współpracy tribologicznej.

Wydruk zamodelowanej warstwy tlenkowej można zrealizować na przykład za pomocą drukarki 3D Mojo firmy Stratasys, która umożliwia budowanie modeli 3D z wykorzystaniem tworzywa sztucznego ABSplus w kolorze kremowym w technologii FDM. Zastosowanie warstwy przyrostowej 0,178 mm pozwala drukować modele z najwyższą precyzją przy zachowaniu wytrzymałości i trwałości wydrukowanych elementów. Dzięki temu wydruki stają się nie tylko doskonałą pomocą dydaktyczną ale również narzędziem umożliwiającymi poznanie i wizualizację procesu powstawania i zużywania niemodyfikowanej i modyfikowanej warstwy tlenku aluminium.



## 6. PODSUMOWANIE

Zaproponowany i wykonany w programie SolidWorks model tlenku aluminium może posłużyć do:

- wizualizacji otrzymanych w procesie anodowania warstw tlenku aluminium,
- przeprowadzenia obliczeń wytrzymałościowych zarówno samego tlenku aluminium jak i po jego modyfikacji warstwy tlenkowej modyfikowanej nanomateriałami na przykład w procesie duplex, oraz pozwolić na wyjaśnienie mechanizmów współpracy i zużywania pary tribologicznej.

## LITERATURA

- [1] Adamie P., Dziubiński J.: Wybrane zagadnienia materiałów konstrukcyjnych i technologii wytwarzania pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998
- [2] Bogojawlenski A., F.: O mechanizmach obrazowania anodnej oksyjnej pleny na aluminium, Moskwa, Maszynostrojenie 1964
- [3] Dorsey G. A.: The characterization of anodic aluminas. 1. Composition of films from acid electrolytes. Journal of Electrochemical Society, No 113, 1966 169-172
- [4] <http://aluminium.matter.org.uk>. 2001 MATTER Project. European Aluminium Association and The University of Liverpool. Liverpool 2001.
- [5] Keller F., Hunter M.S., Robinson D.L.: Structural features of oxide coatings on aluminium. Journal of Electrochem. Society, No 9., 100, 411-419, 1953
- [6] Kubica M., Skoneczny W.: The finite element method in tribological studies of polymer materials in tribo-pair with oxide layer. Tribol. Lett. (2013) 52, 381–393
- [7] Posmyk A.: Warstwy powierzchniowe aluminiumowych tworzyw konstrukcyjnych. Wydawnictwo Pol. Śl. Gliwice, 2010
- [8] Posmyk A.: Kształtowanie właściwości tribologicznych warstw wierzchnich tworzyw konstrukcyjnych na bazie aluminium. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 62, 2002.
- [9]. Skoneczny W.: Kształtowanie właściwości warstw wierzchnich aluminium i jego stopów metodą anodowania twardego. Wydawnictwo politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2001
- [10] Skoneczny W.: Kształtowanie wybranych właściwości warstw powierzchniowych na bazie tlenku aluminium. ATH, Bielska-Biała 2009
- [11] Służalek G., Duda P., Wistuba H.: Tribological characteristic of AOC modified with carbon particles and nano-pipes; Diagnostyka; 3/2011; 9 - 12; 2011
- [12] Służalek G., Duda P., Wistuba H.: Właściwości anodowej powłoki twardej modyfikowanej polimerem w zastosowaniach do węzłów o ruchu posuwisto-zwrotnym; Tribologia; 3/2012; 185 - 192; 2012
- [13] Służalek G., Duda P., Wistuba H.: Tribological Characteristics of Anodic Oxide Coat (AOC) Modified - Sealed up the Polymer; Czasopismo: Solid State of Phenomena; 199; 209 - 216; 2013
- [14] Tomashov N. D., Tyukina N.N, Zalivalov F.P.: Tolstosloinoe anodirovanie aluminiya i ego splavov. Mashinostroenie, Moscow 1968