

## 1 Streszczenie

Słowa kluczowe: „powłoki PVD”, „mechanizmy kosmiczne”, „tubular boom”, „kwalifikacja kosmiczna”, „DLC”, „powłoki ochronne”

Praca skupia się na badaniu powłok w kontekście zastosowania ich w mechanizmach kosmicznych. Jest to opis prac zrealizowanych w ramach programu „doktorat wdrożeniowy” w związku z czym głównym celem jest rozwiązanie pewnych problemów technicznych z mniejszym naciskiem na głębokie, naukowe zbadanie poszczególnych zagadnień czy zaobserwowanych zjawisk. Nie oznacza to jednak pominięcia metody naukowej w dochodzeniu do rozwiązania, lecz zastosowanie jej w sposób możliwie optymalny, tak pod kątem dojścia do finalnego rezultatu jak i ekonomicznego traktowania dostępnych zasobów.

W ramach tej pracy zrealizowano i opisano dwie ścieżki badań- kwalifikacyjną oraz badawczo-rozwojową. Obie skupiają się na powłokach wytwarzanych na podłożu z brązu berylowego, z którego taśmy są formowane rury o przekroju otwartym, zwane „tubular boom”. Pierwsza ze ścieżek prowadziła od wstępnego rozpoznania rozwiązań dostępnych na rynku, poprzez serię badań wybranej powłoki aż do zastosowania jej na antenach, które w najbliższej przyszłości rozpoczną swoją drogę w dalekie zakątki Układu Słonecznego. Badania były realizowane w celu kwalifikacji powłoki typu DLC (*Diamond-Like Carbon*) do zastosowania w funkcji ochronnej oraz regulującej właściwości termo-optyczne na antenach urządzenia RWI (*Radio Wave Instrument*). Jest to jeden z instrumentów pomiarowych, tworzonych przez firmę Astronika, który wraz z całą sondą JUICE (*Jupiter ICy moon Explorer*) w kwietniu 2023r. wystartuje, by po kilku latach badać m. in. Galileuszowe księżycy Jowisza i ich otoczenie. W ramach badań należało udowodnić, że zarówno wybrana powłoka jak i pokryte nią anteny, wykonane w technologii „tubular boom”, przetrwają zarówno wymagający start rakiety jak i nieprzyjazne, kosmiczne środowisko. Ponadto czynniki te nie mogą spowodować utraty niezbędnych cech- w tym wypadku dobrej przewodności elektrycznej, odpowiednich właściwości termo-optycznych oraz odporności na zużycie mechaniczne. Aby potwierdzić, że wybrana powłoka DLC jest dobrym wyborem, została poddana serii ekspozycji na czynniki odzwierciedlające całe jej przyszłe życie. Od wytworzenia, przez testy na Ziemi, po koniec misji w ciemnych i zimnych pustkach przestrzeni kosmicznej wokół Jowisza. Testy środowiskowe uwzględniały: obróbkę plastyczną i cieplną taśm CuBe<sub>2</sub>, wystawienie na wysoką wilgotność, cykle termiczno-próżniowe w szerokim zakresie temperatur (-230 °C ÷ +190°C), ekspozycje na radiację oraz zużycie mechaniczne. Wpływ tych czynników na powłokę i anteny był kontrolowany poprzez pomiary krytycznych parametrów: przewodnictwa powierzchniowego oraz parametrów termo-optycznych, tj. absorpcji i emitancji. Wszystkie testy zakończone zostały sukcesem- udowodniono, że powłoka DLC zapewni odpowiednią ochronę oraz właściwości powierzchniowe tubular boomów w całym przebiegu misji. W związku z tym, można ją było użyć na finalnych antenach, a co za tym idzie, stała się częścią misji JUICE. Pierwszy cel pracy został w pełni osiągnięty.

Na bazie doświadczeń z powyżej opisanej części, zdecydowano, aby poszerzyć wiedzę o stosowalności także innych powłok w mechanizmach kosmicznych, ze szczególnym uwzględnieniem tubular boomów wykonanych z brązu berylowego. W ten sposób rozpoczęła się druga ścieżka- kampania R&D. Objęła ona nie tylko powtórzenie zakresu badań

Mgr inż. Kamil Bochra

z poprzedniej części, ale i ich poszerzenie. Poza wyborem kilku powłok do przetestowania, wprowadzono także czynnik wstępnej obróbki mechanicznej podłoża, aby zmienić jego właściwości- przede wszystkim uzyskać możliwie równomierną topografię powierzchni.

Poza wcześniej wymienionymi badaniami, wykonano także poszerzony zakres służących charakteryzacji samych powłok. Obejmował on pomiary mikrotwardości, rozwinięcia powierzchni, odporności na zimne zgrzewanie, zginanie oraz testy adhezji. Uwzględniono także zbadanie wpływu obróbki plastycznej i cieplnej brązu berylowego oraz cykli termicznych (w zakresie  $-196^{\circ}\text{C} \div 150^{\circ}\text{C}$ ) na najważniejsze parametry. Ponadto na bazie tych wyników, wybrano zestaw trzech najbardziej interesujących powłok oraz trzech wersji podłoża różniących się obróbką mechaniczną. Na tak wybranym zestawie dziewięciu kombinacjach przeprowadzono testy zmęczeniowe powłok, aby wykazać, że ich żywotność jest nie gorsza niż wymagana w standardowych projektach kosmicznych. Pozwoliło to także na sprawdzenie wpływu zmęczenia na właściwości termo-optyczne.

Ponadto, aby dalej poszerzyć wiedzę i potencjalne obszary zastosowań, niektóre powłoki zostały naniesione na tubular boomy wykonane z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem węglowym (CFRP). Próbkę te wykorzystano do badań odporności kompozytu na tlen atomowy, a więc czynnik powodujący silną degradację polimerów na niskiej orbicie Ziemi.

Na podstawie wyników tej części pracy, wykazano że dzięki powłokom można uzyskać szeroki zakres właściwości termo-optycznych, a co za tym idzie, pasywną kontrolę nad zakresami temperatur do jakich będą się nagrzewać, bądź wychładzać odsłonięte elementy satelitów czy sond kosmicznych. Dodatkowo, zachowane są inne niezbędne cechy, jak ochrona taśm CuBe2 przed zimnym zgrzewaniem, zużyciem ściernym czy zapewnienie wysokiej przewodności powierzchniowej. Wykazano również, że wprowadzenie wstępnych obróbek mechanicznych podłoża pozwala na zwiększenie żywotności samych powłok, oraz uzyskanie bardziej izotropowych właściwości termo-optycznych niż w przypadku stanu wyjściowego. Ponadto udowodniono pozytywny wpływ obróbki cieplnej tubular boomów na adhezję powłok. Testy wykonywane na podłożu CFRP, wykazały także wysoką skuteczność cienkich powłok ceramicznych i metalicznych w roli ochrony przed tlenem atomowym.

Pomimo napotkanych wielu trudności, również drugą część projektu należy uznać za zakończoną sukcesem. Wykazano użyteczność szerszej gamy powłok oraz obróbek mechanicznych w kontekście zastosowań ich w mechanizmach kosmicznych, ze szczególnym uwzględnieniem tubular boomów. Bazując na wynikach z obu ścieżek badawczych, przedstawiono kilka hipotez odnośnie występujących w nich korelacji pomiędzy czynnikami środowiskowymi i otrzymanymi rezultatami testów. Ponadto zaprezentowano serię pomniejszych wniosków, wyciągniętych na podstawie obserwacji poczynionych w trakcie badań. Nie wszystkie niepewne kwestie udało się rozwiązać i niektóre z nich pozostawiono w formie otwartych pytań z komentarzem w jaki sposób można przeprowadzić badania, konieczne do udzielenia odpowiedzi na nie.

*Kamil Bochra*

## **Abstract**

Keywords: "PVD coatings", "space mechanisms", " tubular boom", "space qualification", "DLC", "protective coatings"

The work focuses on the study of coatings in the context of their use in space mechanisms. This is a description of the work carried out under the "implementation doctorate" program, therefore the main goal is to solve certain technical problems with less emphasis on deep, scientific examination of particular issues or observed phenomena. However, this does not mean omitting the scientific method in finding a solution, but using it in the best possible way, both in terms of reaching the final result and economical use of available resources.

As part of this work, two research paths were implemented and described - qualification and research and development. Both focus on coatings produced on a beryllium bronze substrate, from which tape are formed into open-section tubes, called " tubular booms". The first of the paths led from the initial recognition of solutions available on the market, through a series of tests of the selected coating, to its application on antennas, which in the near future will start their way to the far corners of the Solar System. The tests were carried out in order to qualify the DLC (Diamond-Like Carbon) coating for use in the protective function and regulating the thermo-optical properties on the RWI (Radio Wave Instrument) antennas. It is one of the measuring instruments developed by the Astronika company, which together with the entire JUICE (*Jupiter Icy moon Explorer*) spacecraft in April 2023 will start to, after a few years journey, research Jupiter's Galilean moons and their surroundings. As part of the research, it was necessary to prove that both, the selected coating and the antennas covered with it, made in the "tubular boom" technology, would survive the demanding launch of the rocket and the hostile space environment. In addition, these factors cannot cause the loss of the necessary features - in this case, good electrical conductivity, appropriate thermo-optical properties and resistance to mechanical wear. To confirm that the selected DLC coating was a good choice, it was subjected to a series of environmental exposure tests, reflecting its entire future life. From fabrication, through testing on Earth, to the end of the mission in the dark and cold voids of space around Jupiter. Environmental tests include: forming and heat treatment of CuBe<sub>2</sub> tapes, exposure to high humidity, thermal-vacuum cycles in a wide range of temperatures (-230°C ÷ +190°C), exposure to radiation and fatigue . The influence of these factors on the coating and antennas was controlled by measuring the critical parameters: surface conductivity and thermo-optical parameters: absorbance and emittance. All tests have been successfully completed - it has been proven that the DLC coating will provide adequate protection and surface properties of tubular booms throughout the entire mission. Therefore, it could be used on the final antennas, and thus became part of the JUICE mission. The first goal of the work has been fully achieved.

Based on the experience from the above-described part, it was decided to expand the knowledge about the applicability of other coatings in space mechanisms, with particular emphasis on tubular booms made of beryllium bronze. Thus began the second path - the R&D campaign. It included not only repeating the scope of research from the previous part, but also extending it. In addition to the selection of several coatings to be tested, a factor of

## **Mgr inž. Kamil Bochra**

mechanical pre-treatment of the substrate was also introduced to change its properties - primarily to obtain the most even possible surface topography.

In addition to the previously mentioned tests, an extended range of characterization of the coatings themselves was also performed. It included measurements of microhardness, surface development, resistance to cold welding, bending and adhesion tests. The study of the impact of forming and heat treatment of beryllium bronze and thermal cycles (in the range of  $-196^{\circ}\text{C}$  to  $+150^{\circ}\text{C}$ ) on the most important parameters was also included. In addition, based on these results, a set of three most interesting coatings and three versions of the substrate with different mechanical treatment were selected. On a selected set of nine combinations, fatigue tests of the coatings were carried out, to show that their service life is not worse than that required in standard space projects. It also allowed to check the effect of fatigue on thermo-optical properties.

In addition, to further expand knowledge and potential application areas, some coatings were applied to tubular booms made of carbon fiber reinforced polymer (CFRP). These samples were used to test the composite's resistance to atomic oxygen, a factor that causes strong degradation of polymers in low Earth orbit.

Based on the results of this part of the work, it was shown that thanks to the coatings it is possible to obtain a wide range of thermo-optical properties, and thus, passive control over the temperature ranges to which they will heat up or cool down the exposed elements of satellites or spacecrafts. In addition, other necessary features are retained, such as protection of CuBe2 strips against cold welding, abrasive wear or ensuring high surface conductivity. It was also shown that the introduction of preliminary mechanical treatments of the substrate allows to increase the life of the coatings themselves, and to obtain more isotropic thermo-optical properties than in the case of the initial state. In addition, the positive effect of the heat treatment of tubular booms on the adhesion of coatings has been proven. Tests performed on the CFRP substrate also showed the high efficiency of thin ceramic and metallic coatings in the role of protection against atomic oxygen.

Despite many difficulties encountered, the second part of the project should also be considered a success. The usefulness of a wider range of coatings and mechanical treatments has been demonstrated in the context of applications in space mechanisms, with particular emphasis on tubular booms. Based on the results from both research paths, several hypotheses were presented regarding the correlations between environmental factors and the obtained test results. In addition, a series of smaller conclusions were presented based on observations made during the research. Not all uncertainties were resolved and some were left as open-points with comments on how to conduct the research necessary to solve them.

*Kamil Bochra*