

# Zastosowanie tytanu i wybranych stopów tytanu w lotnictwie

Łukasz Dudek, Tadeusz Hryniewicz, Krzysztof Rokosz

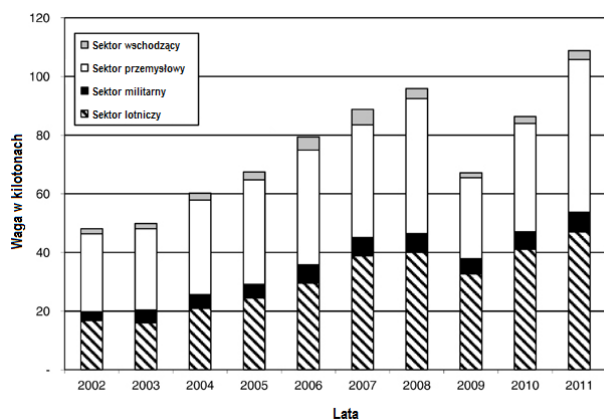
**Słowa kluczowe:** tytan, stopu tytanu, przemysł lotniczy, fazy krystaliczne tytanu, materiały konstrukcyjne

## Streszczenie

Niniejszy artykuł przedstawia zagadnienia związane z zastosowaniem tytanu i stopów tytanu do budowy samolotów. Pokazano oraz opisano stopy tytanu z podziałem na ich rodzaje ze względu na strukturę krystaliczną: fazy  $Ti-\alpha$ ,  $Ti-\alpha+\beta$ ,  $Ti-\beta$ , wraz z ich aplikacjami. Ponadto zaprezentowano wybrane ważniejsze stopy tytanu takie jak  $Ti6Al4V$ ,  $Ti8Al1Mo1V$  i inne.

## Wstęp

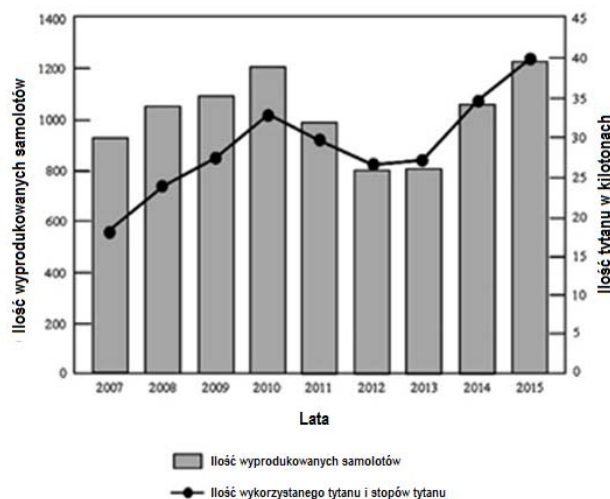
Tytan i jego stopy używane są do budowy elementów konstrukcji lotniczych od blisko 60 lat [1]. W ostatnich latach można obserwować tendencję wzrostową w ilości wykorzystywanego tytanu w komercyjnym przemyśle lotniczym. Na rysunku 1 [2] przedstawiono ilość produkowanych materiałów tytanowych przez jedną z największych firm w USA, Titanium Metals Corporation, dla różnych sektorów w latach 2002–2011, z wykluczeniem rynku chińskiego i rosyjskiego. W analizie uwzględniono sektory przemysłu lotniczego, militarnego oraz inne.



Rys. 1. Produkcja wyrobów tytanowych przez firmę Titanium Metals Corporation w latach 2002–2011 [2]

Rysunek 2 [3] ilustruje ilość produkowanych samolotów przez firmy Boeing oraz Airbus w latach 2007–2015 oraz wykorzystanie materiałów na bazie tytanu. Zużycie tytanu w produkcji samolotów wzrosło wraz z wprowadzeniem nowych

modeli: Airbus 380 oraz Boeing 787, gdzie 12–15% konstrukcji jest wykonane z tytanu i jego stopów. Poprzednie modele zawierały 4–5% tytanu w swojej konstrukcji.

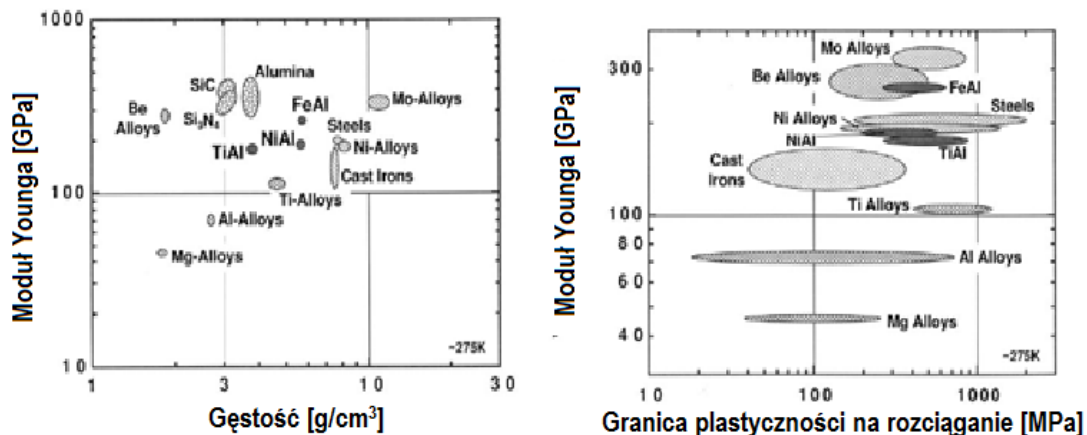


Rys. 2. Produkcja Airbus i Boeing w latach 2007–2015 [3]

## 1. Powody zastosowania stopów opartych na tytanie

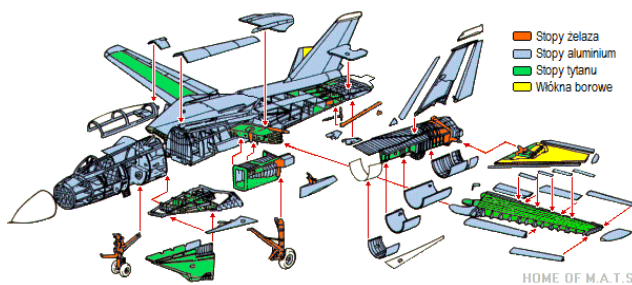
Materiały używane do budowy samolotów powinny posiadać odpowiednie właściwości, tj. niską gęstość (ograniczenie ciężaru konstrukcji), wysoką wytrzymałość mechaniczną, odporność cieplną, odporność na pękanie w niskich temperaturach, niską rozszerzalność cieplną, odporność na procesy korozyjne w warunkach eksploatacji. Cechy te można przypisać stopom tytanu, powszechnie używanym w lotnictwie [4].

Na rysunku 3 [5] przedstawiono parametry wybranych typów materiałów w odniesieniu do istotnej własności materiału, jakim jest moduł Younga. Po lewej stronie zestawiono zależność pomiędzy gęstością poszczególnych typów materiałów a modułem Younga, po prawej pokazano moduł Younga w zależności od granicy plastyczności na rozciąganie.



Rys. 3. Moduł Younga w zależności od gęstości materiału oraz granicy plastyczności wybranych materiałów [5]

Stopy na bazie tytanu charakteryzują się wysoką granicą plastyczności na rozciąganie wynoszącą powyżej 1150 MPa, dla stopów Ti-( $\alpha+\beta$ ) i Ti- $\beta$  przy stosunkowo niskiej gęstości, ok. 4,6 g/cm<sup>3</sup>. Stale niskostopowe o wysokiej wytrzymałości charakteryzują się gęstością ok. 7,8 g/cm<sup>3</sup> przy granicy plastyczności na rozciąganie wynoszącej około 1000 MPa. Stosowanie stopów tytanu pozwala na zwiększenie wytrzymałości konstrukcji, oraz obniżenie jej masy dzięki blisko 1,7-krotnie niższej gęstości stopów tytanu w porównaniu ze stalami o wysokiej wytrzymałości. Na rysunku 4 [6] przedstawiono schemat konstrukcji myśliwca serii F-41 z wyszczególnionymi materiałami konstrukcyjnymi: stopami żelaza, stopami aluminium, stopami tytanu oraz włóknami borowymi.



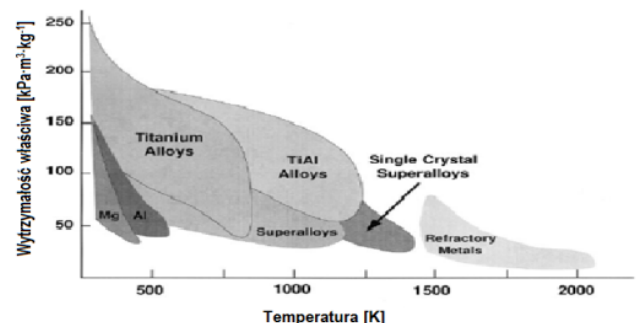
Rys. 4. Schemat konstrukcji myśliwca serii F-41 [6]

Największym elementem tytanowym w konstrukcji F-41 jest keson skrzydła. Konstrukcja kesonu była jedną z największych części, łączonych poprzez spawanie. Zastosowanie tytanowego kesonu pozwoliło na redukcję masy o blisko 410 kg, jeśli zastosowany byłby materiał alternatywny – stal. W tabelicy 1 [4] przedstawiono niektóre stopy tytanu stosowane przy budowie samolotów oraz ich zastosowanie.

Tabela 1. Przykładowe zastosowanie wybranych stopów tytanu w konstrukcji samolotu [4]

Materiał	Przykładowe zastosowania
Ti-6Al-4V	Ramy okienne w kokpicie, keson, łączniki
Ti-3Al-2.5V	Przewody hydrauliczne
Ti-10V-2Fe-3Al	Podwozie, podpory
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Przewody wydechowe, ogon stożkowy
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	Przewody

Niezwykle istotnym parametrem przy doborze materiałów w konstrukcji samolotów jest ich wytrzymałość w wysokich temperaturach. Stopy tytanu cechują się największą wytrzymałością właściwą do temperatury ok. 600 K biorąc pod uwagę najczęściej używane materiały. Na rysunku 5 [5] przedstawiono zależność pomiędzy wytrzymałością właściwą, a temperaturą dla popularnych typów materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym.

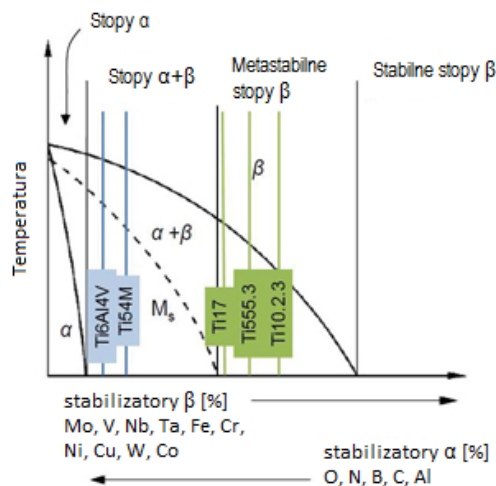


Rys. 5. Wytrzymałość właściwa w zależności od temperatury wybranych materiałów [5]

## 2. Wybrane typy stopów tytanu używanych w lotnictwie

Jedną z właściwości metalurgicznych stopów tytanu wpływającą na własności mechaniczne, m.in. na: moduł Younga, moduł jednostkowy, wytrzymałość właściwą, granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, jest odmiana alotropowa tytanu. Najważniejsze odmiany alotropowe tytanu to odmiana  $\alpha$  oraz odmiana  $\beta$ . Różnice we właściwościach mechanicznych odmian alotropowych wynikają z różnej struktury krystalicznej materiału. Tytan- $\alpha$  krystalizuje w temperaturze do 882,5 °C, występuje struktura heksagonalna gęsto upakowana (hcp). Tytan- $\beta$  krystalizuje w temperaturze 882,5 – 1662 °C, struktura Ti- $\beta$  charakteryzuje się układem regularnym przestrzennie centrowanym (bcc) [7]. Rys. 6 [3] przedstawia układ Ti- $\alpha+\beta$ , w zależności od temperatury

z uwzględnieniem wpływu dodatków stopowych, na formowanie się odmian alotropowych w stopach tytanu.



Rys. 6. Diagram fazowy  $\alpha$ - $\beta$  dla stopów tytanu [3]

W tabelicy 2 [8] przedstawiono zestawienie najpopularniejszych typów materiałów stosowanych przy budowie samolotów. Stopy Ti- $\alpha$  charakteryzują się: stosunkowo niską wytrzymałością, dobrą udatnością, dobrą plastycznością, oraz doskonałymi właściwościami mechanicznymi w niskich temperaturach (temperaturach kriogenicznych). Stopy Ti- $\alpha$ + $\beta$  charakteryzują się:

- średnią do wysokiej wytrzymałości
- mniejszą odpornością na pełzanie w wysokich temperaturach, która nie jest taka dobra, jak w przypadku stopów Ti- $\alpha$ , oraz
- ograniczoną możliwością obróbki plastycznej na zimno.

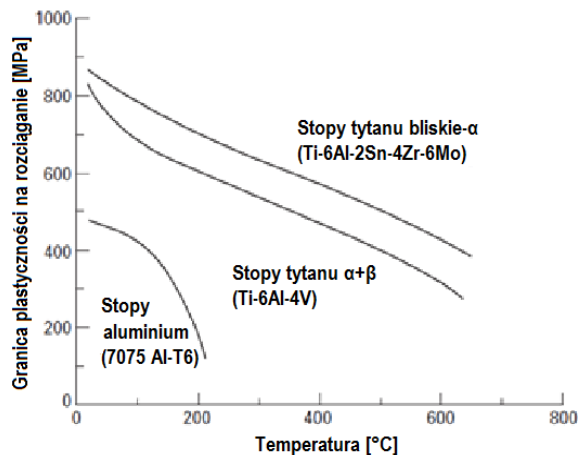
Stopy tytanu w formie alotropowej  $\beta$  cechują się: dobrą spawalnością, możliwością obróbki na gorąco, dużą wytrzymałością, dobrą odpornością na pełzanie w temperaturach pośrednich [9].

Tablica 2. Właściwości mechaniczne tytanu i stopów tytanu oraz innych materiałów używanych w przemyśle lotniczym [8]

Material	Gęstość [g·cm <sup>-3</sup> ]	Moduł Younga [GPa]	Moduł jednostkowy [MPa·m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	Granica plastyczności na rozciąganie [MPa]	Wytrzymałość właściwa [kPa·m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]
Tytan	4,6	103	22,4	170-480	37-104
Stopy $\alpha$ -Ti	4,6	100-115	21,7-25,1	800-1000	174-217
Stopy $\beta$ -Ti	4,6	100-115	21,7-25,1	1150-1300	180-282
Stopy $\alpha$ + $\beta$ -Ti	4,6	100-115	21,7-25,1	1150-1300	180-282
Stop aluminium (2024-T6)	2,7	70	25,9	385	142
Stop aluminium (7075-T76)	2,7	70	25,9	470	174
Magnez	1,7	45	26,5	200	115
Stale niskostopowe o wysokiej wytrzymałości	7,8	210	26,9	1000	128

Na rysunku 7 [8] zestawiono zależność granicy plastyczności na rozciąganie w funkcji temperatury dla stopów tytanu bliskiego- $\alpha$  (Ti6Al2Sn4Zr6Mo),  $\alpha$ + $\beta$  (Ti6Al4V) oraz stopu aluminium 7075.

Stopy o znacznej przewadze Ti- $\alpha$  w swojej strukturze wykazują bardzo dobre właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach. W tabelicy 3 [8] zestawiono wybrane właściwości mechaniczne przykładowych stopów Ti- $\alpha$ .



Rys. 7. Granica plastyczności na rozciąganie stopów tytanu bliskiego- $\alpha$ ,  $\alpha$ + $\beta$  oraz stopów aluminium w zależności od temperatury [8]

Tablica 3. Wybrane właściwości mechaniczne stopów tytanu  $\alpha$  [8]

Typ stopu	Oznaczenie	Moduł Younga [GPa]	0,2% granicy plastyczności na rozciąganie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
Super- $\alpha$	Ti-5Al-2,5Sn	103	780	930
Bliskie- $\alpha$	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	114	862	930
	Ti-5,5Al-3,5Sn-3Zr-1Nb	120	860	960
	Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr-0,7Nb	120	910	1030
	Ti-2,25Al-11Sn-5Zr-1Mo	115	900	1000
	Ti-6Al-4Zr-2Mo	115	960	1030

Stopy  $\alpha$  charakteryzują się niższą wytrzymałością na rozciąganie, niższą granicą plastyczności w porównaniu do stopów przejściowych  $\alpha$ + $\beta$ , oraz stopów  $\beta$ . Jednak jak się okazuje, dzięki swoim właściwościom w zakresie wysokich temperatur znalazły zastosowanie przy konstrukcji samolotów.

Stopy  $\alpha$ + $\beta$  łączą cechy stopów typu  $\alpha$  oraz  $\beta$  przyjmując zwykle właściwości pośrednie pomiędzy nimi. Charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu do stopów  $\alpha$ , jednak posiadają gorsze właściwości w wyższych temperaturach. W tabelicy 4 [8] przedstawiono przykładowe stopy  $\alpha$ + $\beta$ . Obecność stopu Ti6Al2Sn4Zr6Mo, zarówno w grupie bliskiego- $\alpha$  jak i  $\alpha$ + $\beta$ , spowodowana jest innymi warunkami procesu wytwarzania tego stopu.

Tablica 4. Wybrane właściwości mechaniczne stopów tytanu  $\alpha$ + $\beta$  [8]

Oznaczenie	Moduł Younga [GPa]	0,2% granicy plastyczności [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
Ti-6Al-4V	114	830	900
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	114	1100	1170
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo	114	1055	1125
Ti-10V-2Fe-3Al	103	11000	1170
Ti-2Al-2Sn-4Mo-0,5Si	114	1000	1100
Ti-6Al-6V-2Sn	114	1170	1275

Stopy  $\beta$  cechują się lepszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu do powyższych. Tablica 5 [8] przedstawia wybrane stopy Ti- $\beta$  znajdujące zastosowanie w lotnictwie.

**Tablica 5.** Wybrane właściwości mechaniczne stopów tytanu  $\beta$  [8]

Oznaczenie	Modul Younga [GPa]	0.2% granica plastyczności na rozciąganie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
Ti-13V-11Cr-3Al	103	1200	1280
Ti-8V-6Cr-4Mo-4Zr-3Al	103	1130	1225
Ti-11.5Mo-6Zr-4Sn	103	1315	1390
Ti-10V-2Fe-3Al	103	1250	1320
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	103	966	1000
Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si	103	1170	1240

### 3. Przykładowe stopy tytanu stosowane w przemyśle lotniczym

Czysty tytan stosowany jest w elementach niebędących bezpośrednią konstrukcją samolotu. Dzięki dużej odporności korozyjnej i dobrej plastyczności znalazł zastosowanie w systemach zaopatrzenia wody na potrzeby sanitarne oraz w kuchniach pokładowych, w rurociągach i przewodach.

Stop Ti6Al4V cechuje się zbalansowanymi właściwościami. Od dziesięcioleci jest on dobrze poznany i opisany, dzięki temu znajduje szerokie zastosowanie przy budowie samolotów. Przystosowany jest do pracy w stosunkowo niskich temperaturach do ok. 300 °C. Głównie używa się go do wytwarzania elementów w płatowcach, częściach silników. Wykorzystywany jest on w ogólnej konstrukcji kadłuba tj. śrub, szyn siedzenia. Ze względu na wymóg pracy w niskich temperaturach tworzy się z niego łopatkę w silnikach, obudowy wentylatorów w części wlotowej, gdzie panują niższe temperatury. W tablicy 6 [10] przedstawiono skład chemiczny stopu Ti6Al4V wg normy ASTM F1108. Jego własności mechaniczne zawarto w tablicy 4 [8], oraz na rysunku 7 [8].

**Tablica 6.** Skład chemiczny stopu Ti-6Al-4V [10]

Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
5.5-6.75	4.5-5.5	<0.1	<0.3	<0.2	<0.05	<0.015	reszta

Stop Ti6Al2Sn4Zr2Mo jest materiałem żaroodpornym do temperatury około 450 °C. Zawiera niższy udział fazy  $\beta$  w porównaniu do stopu Ti6Al4V. Dodatek stopowy w postaci krzemu (Si) poprawia odporność na działanie wysokich temperatur do około 500 °C. Zmodyfikowany stop Ti6Al2Sn4Zr2Mo0.1Si stosowany jest do tarcz sprężarek, gdzie górna temperatura pracy wynosi maksymalnie 500 °C. Tablica 7 [11] przedstawia skład chemiczny stopu Ti6Al2Sn4Zr2Mo.

**Tablica 7.** Skład chemiczny stopu Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo [11]

Al	Sn	Zr	Mo	Fe	C	N	H	O	Inne	Ti
5.5-6.5	1.8-2.2	3.6-4.4	1.8-2.2	0.25	<0.5	0.04	0.015	0.15	0.30	reszta

Stop Ti8Al1Mo1V, podobnie jak stop Ti6Al2Sn4Zr2Mo0.1Si, posiada większą odporność na działanie wysokich temperatur, przy czym maksymalna temperatura eksploatacji nie powinna przekraczać 400 °C. Z tego powodu znalazł on zastosowanie przy konstrukcji łopatek sprężarki. W tablicy 8 [12] przedstawiono skład chemiczny stopu Ti8Al1Mo1V.

Materiał Ti-17 (Ti5Al2Sn2Zr4Cr4Mo) charakteryzuje się niższą odpornością na działanie wysokich temperatur, wykazuje właściwości żaroodporne do temperatury 350 °C. Wykonywane są z niego wał oraz wentylator silnika w formie jednego elementu, w celu redukcji ciężaru, na potrzeby silników samolotów komercyjnych.

**Tablica 8.** Skład chemiczny stopu Ti-8Al-1Mo-1V [12]

Al	Mo	V	C	Fe	N	O	H	Ti
7.35-8.35	0.75-1.25	0.75-1.75	<0.08	<0.3	<0.05	<0.12	<0.0125	reszta

Ponadto charakteryzuje się on doskonałym rozwojem pęknięć dzięki czemu łatwiej jest określać tolerancję uszkodzeń. Jego właściwości zestawiono z innymi stopami typu  $\alpha+\beta$  w tablicy 4 [8]. Skład chemiczny tego stopu zaprezentowano w tablicy 9 [13].

**Tablica 9.** Skład chemiczny stopu Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo [13]

Al	Cr	Mo	Zr	Sn	Fe	O	N	H	Ti
4.5-5.5	3.5-4.5	3.5-4.5	1.5-2.5	1.5-2.5	<0.3	0.08-0.13	<0.04	<0.0125	reszta

Stop z grupy  $\alpha + \beta$ , Ti6Al2Sn4Zr6Mo cechuje dobra odporność na działanie wysokich temperatur do 450 °C, wysoka wytrzymałość, oraz doskonała charakterystyka pełzania. Jego skład chemiczny pokazano w tablicy 10 [14], natomiast właściwości mechaniczne zawarto w tablicy 4 [8].

**Tablica 10.** Skład chemiczny stopu Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo [14]

Al	Sn	Zr	Mo	O	N	C	H	Fe	Inne	Ti
5.5-6.5	1.75-2.25	3.5-4.5	5.5-6.5	<0.15	<0.04	<0.04	<0.125	<0.15	<0.4	reszta

Stop tytanowy Ti15V3Cr3Sn3Al należy do grupy stopów  $\beta$ . W formie cienkich blach wykorzystywany jest do budowy kadłubów, spawanych rur, przewodów. Jego właściwości mechaniczne przedstawione zostały w tablicy 5 [8]. W zestawieniu jest materiałem o najgorszych właściwościach mechanicznych z przedstawionych stopów Ti –  $\beta$ . W tablicy 11 [15] pokazano skład chemiczny tego stopu.

**Tablica 11.** Skład chemiczny stopu Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al [15]

V	Cr	Sn	Al	C	N	O	Fe	H	Ti
14-16	2.5-3.5	2.5-3.5	2.5-3.5	<0.05	<0.03	<0.13	<0.3	<0.15	reszta

Stop Ti10V2Fe3Al jest stopem typu  $\beta$ , posiada najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz wysoką granicę plastyczności w porównaniu do zestawionych materiałów, ponadto cechuje się doskonałą hartownością. Dane o stopie zostały przedstawione w tablicy 5 [8]. Ze względu na jego właściwości, znalazł on zastosowanie w podwoziu, w częściach odpowiedzialnych za start i lądowanie samolotu. Skład chemiczny stopu Ti102Fe3Al zawarto w tablicy 12 [16].

**Tablica 12.** Skład chemiczny stopu Ti-10V-2Fe-3Al [16]

V	Al	Fe	C	N	O	H	Y	Inne	Ti
9.0-11.0	2.6-3.4	1.6-2.22	<0.05	<0.05	<0.13	<0.015	<0.005	0.3	reszta

### Podsumowanie

Tytan i jego stopy znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle lotniczym, zarówno w zastosowaniach komercyjnych jak i militarnych. Wykorzystanie nowoczesnych technologii wytwarzania stopów pozwala na uzyskanie materiałów na potrzeby określonego zastosowania. Tendencję tę widać zwłaszcza gdy porównuje się trzy główne typy stopów tytanu:  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$ ,  $\beta$ . Charakteryzują się one różnymi parametrami, każdy stop posiada wady i zalety co pozwala na ich odpowiednie zastosowanie. Stopy  $\alpha$  cechują się gorszymi parametrami mechanicznymi, jednak ich odporność cieplna

umożliwia ich zastosowanie w elementach narażonych na działanie wysokich temperatur. Natomiast stopy z przewagą struktury  $\beta$  stosuje się w elementach szczególnie narażonych na obciążenia mechaniczne w niższych temperaturach. Doskonała odporność korozyjna stopów tytanu w porównaniu ze zwykłymi stalami stopowymi przekonuje konstruktorów do ich stosowania nie tylko w konstrukcjach o wysokich obciążeniach, ale również w instalacjach sanitarnych. Stosowanie stopów tytanu pozwala na ograniczenie masy konstrukcji samolotu jednak materiały te nie są tak powszechnie używane ze względu na ich cenę. W dużej mierze są one stosowane zamiennie ze stopami aluminium – tańszą alternatywą.

### Bibliografia

1. Vulcan T., Abundant Titanium's Import To Aerospace Well Known, But Other Industries Could Bring New Demand. ETF.com, 2013.
2. United States Securities and Exchange Commission: Commission file number 1-14368, Titanium Metals Corporation, 2011.
3. Arrazola P.J., Garay A., Sacristán I., Iriarte L. M., Soler D., Mecanizado de aleaciones de titanio empleadas en aeronáutica. 19 Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación, Donostia – San Sebastián, 2013.
4. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N., Features of Titanium for the Aerospace Industry. Technical report no. 106 July 2014.
5. Dimiduk D.M., Gamma titanium aluminide alloys—an assessment within the competition of aerospace structural materials. Materials Science and Engineering A263 (281–288) (1999).
6. <https://www.nationstates.net/page=dispatch/id=538900>
7. Motyka M., Kubiak K., Sieniawski J., Ziaja W., Hot Plasticity of Alpha Beta Alloys, Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications. Dr. A.K.M. Nurul Amin (Ed.), 2012.
8. Mouritz A., Introduction to Aerospace Materials. Wyd. Woodhead Publishing Limited, 2012.
9. Titanium Information Group: Titanium Alloys - Characteristics of Alpha, Alpha Beta and Beta Titanium Alloys. <http://www.azom.com/>, 2013.
10. Ti6Al4V Titanium Alloy, Technical Information. Arcam EBW system, 2016.
11. Titanium Alloy 6-2-4-2 /6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Technical Information. Aircraft Materials, 2016.
12. Titanium Alloys - Ti8Al1Mo1V, Technical Information. AZO Materials, 2013.
13. ATI Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo Alloy, Technical Data Sheet. ATI, 2011.
14. TITANIUM 6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti 6246, Technical Information. Titanium Engineers, 2016.
15. Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al (TIMETALR15.3), Technical Information. Stainless Steel World, 2016.
16. 10V-2Fe-3Al, Technical Information. Rolled Alloys, 2016.

### Autorzy:

Mgr inż. **Łukasz Dudek** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny

Prof. dr hab. inż. **Tadeusz Hryniewicz** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny

Prof. nadzw. dr hab. inż. **Krzysztof Rokosz** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny

---

### Application of titanium and selected titanium alloys in aerospace industry

*This paper explains the use of titanium and its alloys for aircraft construction. There are shown and described crystallographic phases of titanium alloys such as: Ti- $\alpha$ , Ti- $\alpha+\beta$ , Ti- $\beta$ , with their properties and applications. Moreover, the paper presents some major titanium alloys, such as: Ti6Al4V, Ti8Al1Mo1V and others, used for aerospace applications.*

---

**Key words:** titanium, titanium alloys, aerospace industry, titanium crystallographic phases, construction materials.