(19) URZĄD PATENTOWY RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

(10) **PL 249558 B1**

(12) # Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **440911**
(22) Data zgłoszenia: **2022.04.11**
(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.10.16 BUP 42/2023**
(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2026.05.11 WUP 19/2026**

(51) MKP:
C22C 14/00 *(2006.01)*
C22C 1/02 *(2006.01)*
C22F 1/00 *(2006.01)*

(73) Uprawniony z patentu:
KGHM POLSKA MIEDŹ SPÓŁKA AKCYJNA, Lubin, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:
PIOTR KWAŚNIAK, Warszawa, PL
MAREK MUZYK, Warszawa, PL

(54) Tytuł:
Trójskładnikowy stop tytanu, sposób jego wytwarzania i zastosowanie

PL 249558 B1

Opis wynalazku

Wynalazek dotyczy trójskładnikowego stopu tytanu, krzemu i renu oraz sposobu wytwarzania trójskładnikowego stopu tytanu, krzemu i renu, pozwalającego uzyskać wysoką wytrzymałość lub plastyczność i jego zastosowań.

Obecnie wytwarzane stopy tytanu podlegają klasyfikacji uwzględniającej ich strukturę fazową (faza – jednorodna część metalu lub stopu o konkretnej i periodycznej budowie atomowej), która kształtuje właściwości mechaniczne i fizyko-chemiczne materiału, są to [1–3]:

- stopy jednofazowe alfa – posiadające strukturę (fazę) heksagonalną,
- stopy jednofazowe beta – o strukturze regularnej, przestrzennie centrowanej,
- stopy dwufazowe alfa + beta – będące mieszaniną powyższych faz,
- stopy metastabilne – materiały posiadające metastabilną strukturę wyjściową, która w warunkach pracy może ulegać przemianom na wskutek czynników zewnętrznych np. naprężenie, temperatura,
- stopy uporządkowane – materiały, w których dominujący udział pełnią fazy uporządkowane (składniki stopowe zajmują określone pozycje w sieci krystalicznej), np. TiNi.

Optymalizacja wymaganych cech poszczególnych układów doprowadziła do dalszego rozwoju składu chemicznego i budowy nowych materiałów. Jednym z głównych przykładów nowoczesnych stopów Ti są stopy pseudo-alfa, które są zasadniczo stopami dwufazowymi jednak udział fazy alfa jest dominujący – pozostałe elementy struktury stanowią najczęściej kilka procent w ujęciu objętościowym [1–3]. Stopy pseudo-alfa zostały zaprojektowane do pracy w wysokich temperaturach i charakteryzują się rozwiniętym składem chemicznym, np. stop Ti-6-2-4-2-5 o składzie: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si, TIMETAL 1100: Ti-6Al-2.7Sn-4Zr-0.4Mo-0.4Si, TIMTETAL 685: Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si, TIMETAL 834 Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.5Mo-0.7Nb-0.35Si-0.06C [2,5]. Składniki stopowe o największym udziale to Al, Sn i Zr, pełniące rolę stabilizatorów fazy alfa, natomiast pozostałe pierwiastki są odpowiedzialne za wydzielanie dodatkowych faz – fazy beta i wydzieleń międzymetalicznych. Ponadto, szczególną rolę pełni dodatek krzemu, który bardzo silnie umacnia materiał, zmniejsza dyfuzję objętościową istotnie hamuje pełzanie materiału w wysokich temperaturach oraz zmniejsza oksydację [1-3,5]. Główną wadą stopów pseudo alfa jest bardzo rozwinięty skład chemiczny, utrudniający dalsze ich doskonalenie oraz niska ciągliwość, najczęściej nie przekraczająca 12% wydłużenia do zerwania, przez co stopy te nie mogą być swobodnie kształtowane w niskich temperaturach.

Dokument FR2213986B1 przedstawia stop tytanu z dodatkami: 0.05-0.1% Re, 6-7.5% Al, 0.2-2% Zr, 0.5-2% Sn, 1.5-2.7% Mo, 0.2-1.2% W, 0.1-0.35% Si, 0.2-0.5% Cr. Stop ten wykazuje dużą wytrzymałość i stabilność cieplną w temp. 500°C, dużą wytrzymałość zmęczeniową i odpornością na pełzanie. Znajduje zastosowanie m.in. w łopatkach turbin gazowych i parowych. Stop ten ma bardzo rozwinięty skład chemiczny – zawiera dużo dodatków stopowych.

Podobnie, w dokumencie EP2687615B1 opisano stop tytanu o dobrej odporności na utlenianie, charakteryzujący się wysoką wytrzymałością w podwyższonych temperaturach. Stop może zawierać od 4,5 do 7,5% Al, od 2 do 8% TiN, od 1,5 do 6,5% Nb, 01-2,5% Mo, od 0,1 do 2,5% Mo, od 0,1 do 0,6% Si, do 0,2% O oraz do 0,10% C. W skład tego stopu nie wchodzi ren, ponadto stop zawiera dużo dodatków stopowych.

Dokument US10183331B2 ujawnia metodę wytwarzania stopu tytanu metodą SPS czyli iskrowego spiekania plazmowego z proszków tytanu. Stop zawiera 42% do 49% aluminium, od 0,05% do 1,5% boru co najmniej 0,2% co najmniej jednego pierwiastka wybranego z grupy składającej się z wolframu, renu i cyrkonu, ewentualnie 0% do 5% co najmniej jednego pierwiastka wybranego z grupy składającej się z chromu, niobu, molibdenu, krzemu i węgla, a pozostałą część stanowi tytan.

Dokument CN106119603A przedstawia stop odporny na korozję, zawierający następujące składniki: 6–7 części wagowych miedzi, 6–7 części wagowych tantalu, 5–6 części wagowych chromu, 6–7 części wagowych wolframu, 1,5–2 części masowych renu, 0–1,5 części wagowych krzemu, 7–8 części masowych kobaltu i 26–38 części masowych tytanu.

Trójskładnikowy stop tytanu według wynalazku zawiera tytan, od 0,4 do 0,6% wagowych krzemu, od 0,2 do 1% wagowych renu oraz ewentualne zanieczyszczenia tlenem, azotem, węglem i żelazem, korzystnie w sumarycznej ilości poniżej 1.05% wag.

Korzystnie, zawartość krzemu wynosi 0,45% wag.

Najlepiej, gdy zawartość renu wynosi od 0,5 do 1% wag., korzystnie 1% wag.

Sposób wytwarzania trójskładnikowego stopu tytanu według wynalazku zawiera następujące etapy:

(i) przygotowuje się mieszaninę, zawierającą tytan, krzem i ren, przy czym mieszanina zawiera tytan, 0,4–0,6% wagowych krzemu, od 0,2 do 1% wagowych renu oraz ewentualne zanieczyszczenia tlenem, azotem, węglem i żelazem, korzystnie w sumarycznej ilości poniżej 1.05% wag.

(ii) mieszaninę co najmniej jednokrotnie przetapia się w temperaturze co najmniej równej temperaturze topnienia Re;

(iii) odlewa się stop;

(iv) przeprowadza się wyżarzanie homogenizujące w temperaturze co najmniej równej temperaturze przemiany $\alpha \rightarrow \beta$ stopu;

(v) stop chłodzi się w wodzie z fazy β do fazy α;

(vi) przeprowadza się obróbkę plastyczną stopu;

(vii) przeprowadza się wyżarzanie rekrystalizujące;

(viii) chłodzi się otrzymany materiał.

Korzystnie, w etapie (ii) temperatura przetapiania jest wyższa od temperatury topnienia Re i niższa od temperatury parowania Ti.

Przetapianie mieszaniny w etapie (ii) można przeprowadzić metodą topienia łukowego.

Przetapianie mieszaniny w etapie (ii) przeprowadza się korzystnie pięć razy.

Korzystnie, wyżarzanie homogenizujące w etapie (iv) przeprowadza się w temperaturze co najmniej 882°C, korzystnie co najmniej 900°C.

Opcjonalnie, wyżarzanie homogenizujące w etapie (iv) przeprowadza się w czasie co najmniej 30 minut.

Najlepiej gdy chłodzenie w etapie (v) przeprowadza się w wodzie, korzystnie o temperaturze pokojowej.

W etapie (vi) obróbkę plastyczną można przeprowadzić poprzez walcowanie na zimno schłodzonego stopu.

Korzystnie, walcowanie na zimno w etapie (vi) przeprowadza się do momentu uzyskania redukcji co najmniej 50% grubości materiału, korzystnie 50–80% grubości materiału.

Korzystnie, wyżarzanie rekrystalizujące w etapie (vii) przeprowadza się w temperaturze między 810 a 830°C, korzystnie 820°C, a chłodzenie przeprowadza się zgodnie z etapem (viii) z piecem korzystnie z szybkością co najmniej 1°C/min albo na powietrzu, korzystnie w temperaturze pokojowej.

Alternatywnie, wyżarzanie rekrystalizujące w etapie (vii) przeprowadza się w temperaturze wyższej od 882°C, korzystnie około 950°C, a chłodzenie przeprowadza się zgodnie z etapem (viii) w wodzie.

Korzystnie, wyżarzanie rekrystalizujące w etapie (vii) przeprowadza się w czasie co najmniej 10 minut, korzystnie w czasie 10 minut.

W etapie (vi) obróbkę plastyczną można przeprowadzić poprzez kucie na gorąco powyżej temperatury przemiany $\alpha \rightarrow \beta$.

Zastosowanie trójskładnikowych stopów według wynalazku do wytwarzania elementów nośnych konstrukcji lekkich i/albo elementów krytycznych pracujących w wysokich temperaturach, korzystnie zaworów, korbowodów, wałów i/albo elementów strukturalnych, korzystnie korpusów, kolektorów odprowadzania spalin i/albo elementów poszycia silnika i/albo napędów i/albo łopat i/albo kierownic turbin gazowych.

Należy zaznaczyć, że temperatura przemiany $\alpha \rightarrow \beta$ stopu wynosi 882°C, temperatura topnienia renu wynosi 3185°C, a temperatura parowania tytanu wynosi około 3287°C.

Przedmiot wynalazku przedstawiono w przykładzie wykonania na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia mikrostrukturę stopu Ti-Si-1Re w stanie równowagowym tzn. po powolnym chłodzeniu z 820°C (obróbka A) z widocznymi wydzieleniami międzykrystalicznymi – typ I, i zlokalizowanymi wewnątrz ziaren – typ II (transmisyjna mikroskopia elektronowa); Fig. 2 przedstawia mikrostrukturę stopu Ti-Si-Re po szybkim chłodzeniu z 950°C (obróbka B) z oznaczonymi płytkami martenzytu i wydzieleniami faz Ti-Si (transmisyjna mikroskopia elektronowa i dyfrakcja elektronowa); Fig. 3 przedstawia właściwości mechaniczne czystego tytanu, stopów Ti-Re, Ti-Si (komercyjny stop Timetal XT oznaczony jako TiXT) i stopów Ti-Si-Re, materiały w stanie znormalizowanym po obróbce cieplnej typu A tj. powolnym chłodzeniu z 820°C (statyczna próba rozciągania), Fig. 4 przedstawia strukturę (a) i właściwości mechaniczne (b) czystego tytanu, stopów Ti-Re, Ti-Si (komercyjny stop Timetal XT oznaczony jako

TiXT) i stopów Ti-Si-Re – materiały w stanie metastabilnym po przesycaniu z temperatury 950°C tj. po obróbce B (obrazy EBSD mikrostruktur wybranych układów i statyczna próba rozciągania).

Przykład wykonania:

Stopy trójskładnikowe Ti-Si-Re zostały wykonane z użyciem komercyjnego stopu Timetal XT, zawierającego 0,45% wag. krzemu. Materiał ten był przetapiany z dodatkiem renu wykorzystując poniższą procedurę:

(i) Przygotowanie mieszaniny komercyjnego stopu Timetal XT z dodatkiem renu, przy czym mieszanina zawierała 0,5% i 1% wagowych renu, a resztę stanowił tytan oraz ewentualne zanieczyszczenia, przy czym maksymalne sumaryczne stężenie zanieczyszczeń O, N, C i Fe nie przekraczało 1,05% wagowych.

(ii) Pięciokrotne przetapianie materiałów wsadowych przy użyciu metody topienia łukowego. Maksymalna temperatura procesu nie przekraczała temperatury parowania Ti i jednocześnie była niższa od temperatury topnienia Re.

Wielokrotne przetapianie stosowane jest w przypadku mieszania metali o znacznej różnicy temperatur topienia i sprzyja równomiernej dystrybucji składników stopowych. Prace przeprowadzone zostały na maszynie BOHLER Arc Melting System AM 500 w warunkach wysokiej próżni (10^{-3}–10^{-5} mbar), a przetapianie przeprowadzono w temperaturze nie przekraczającej temperatury parowania Ti i jednocześnie wyższej od temperatury topnienia Re.

Możliwe było stosowanie mniejszej liczby przetopień (co najmniej jedno przetopienie), ale minimalna liczba cyklów przetapiania substratów powinna pozwalać na uzyskanie jednorodnego chemicznie stopu.

(iii) Odlewanie stopu

(iv) Wyżarzanie homogenizujące

Wyżarzanie homogenizujące przeprowadzono w temperaturze powyżej temperatury przemiany $\alpha \rightarrow \beta$ stopu, tj. powyżej 882°C. W przykładzie wykonania, wyżarzanie przeprowadzono w temperaturze 900°C i w czasie 30 min. Etap ten miał na celu ujednorodnienie mikrostruktury (eliminację niekorzystnej morfologii zawierającej strefy ziaren zamrożonych, ziaren kolumnowych, i dendryty o zmiennej wielkości) i składu chemicznego.

(v) Chłodzenie w wodzie

Chłodzenie w wodzie z temperatury roztworu jednofazowego, z fazy β do fazy α, uniemożliwiło powstanie wydzieleń, mogących utrudniać dalszą obróbkę. Dzięki zastosowaniu wody materiał studzony był w kilka sekund, przez co nie było czasu na działanie dyfuzji – powstrzymywany był w ten sposób proces tworzenia wydzieleń i/lub nukleacji nowych faz (aby one powstały, konieczne jest co najmniej kilkuminutowe studzenie „z piecem" lub powolne studzenia na powietrzu).

(vi) Walcowanie na zimno

Walcowanie na zimno schłodzonego stopu przeprowadzano do momentu uzyskania redukcji 50–80% grubości materiału. Obróbka plastyczna pozwoliła na wprowadzenie znacznej liczby defektów strukturalnych stanowiących zarodki rekrystalizacji, które były niezbędne do przeprowadzenia kolejnego etapu.

(vii) Wyżarzanie rekrystalizujące i

(viii) Chłodzenie

Ostatni etap obróbki cieplnej przeprowadzono w dwóch wersjach A i B.

Obróbka A: Wyżarzanie rekrystalizujące w temperaturze 820°C, minimalny czas 10 min, chłodzenie na powietrzu lub z piecem. Ten etap obróbki był prowadzony w temperaturze bliskiej końca stabilności fazy α-Ti skutkujący pełną rekrystalizacją materiału i uzyskaniem jednorodnej, równoosiowej mikrostruktury (stan odniesienia dla materiałów komercyjnych).

Obróbka B: Wyżarzanie rekrystalizujące w temperaturze 950°C, minimalny czas 10 min, chłodzenie w wodzie. Ta wersja obróbki prowadzona była w temperaturze stabilności fazy β. Po szybkim chłodzeniu w wodzie uzyskano metastabilną, przesyconą renem strukturę α-Ti z minimalną ilością wydzieleń.

W celach porównawczych przygotowano również dwuskładnikowe stopy Ti-Re. Materiały wsadowe Ti o czystości 99,98% wag. oraz 99,9% wag. (zgodnie z otrzymaną kartą materiałową) zostały pocięte oraz oczyszczone chemicznie i ultradźwiękowo. Sporządzone zostały cztery kompozycje/mieszaniny substratów o następujących stężeniach Re: 0 (czysty Ti), 0,2% wag., 0,5% wag. 1% wag., które stanowiły wsad do produkcji materiałów litych. Stopy dwuskładnikowe zostały przygotowane sposobem jak stopy trójskładnikowe jednak z zastosowaniem wyłącznie obróbki A w etapie (vii).

Wyniki:

Efektem obróbki cieplnej A było uzyskanie jednorodnej, równoosiowej struktury materiału, składającej się z fazy heksagonalnej nasyconej renem i krzemem oraz dwóch typów wydzieleń o wielkości sub-mikrometrycznej, znajdujących się wewnątrz ziaren i na ich granicach, co zobrazowano na Figurze 1. Efektem obróbki cieplnej B było ukształtowanie rozdrobnionej struktury martenzytycznej (przesycony roztwór heksagonalny Ti), grubość płytek martenzytu na poziomie 200 nm z większymi ziarnami alfa oraz wydzieleniami TiSi – Fig 2 i 4,

Odmienna morfologia stopu Ti-Si-Re, uzyskana na drodze dwóch obróbek cieplnych skutkowała istotnie odmiennymi właściwościami materiału, które zostały przedstawione na Figurach 3 i 4. Obróbka typu A pozwoliła uzyskać wysoką wytrzymałość i bardzo wysoką plastyczność – granica plastyczności wyższa o około 100 MPa i wydłużenie do zerwania większe o 11% w stosunku do komercyjnego stopu Timetal XT o składzie Ti-0.5Si (0.5% wag. Si). W ujęciu względnym wzrost granicy plastyczności i wydłużenia do zerwania wyniósł kolejno 20% i 40%. W odniesieniu do czystego Ti granica plastyczności wzrosła o 225%, a stop Ti-Si-Re zachował ponad 80% plastyczności czystego Ti, co było niespotykane w dotychczasowych rozwiązaniach.

Zastosowanie obróbki typu B zwiększyło wytrzymałość stopu Ti-Si-Re do poziomu 950 MPa – wytrzymałość na rozciąganie zmniejszając plastyczność stopu do poziomu 17% wydłużenia do zerwania. W kontekście rozwiązań komercyjnych uzyskiwany został 40% i 147% wzrost wytrzymałości dla kolejno stopu Timetal XT (Ti-05Si) i czystego Tytanu.

Główne korzystne skutki uzyskane w wyniku stosowania wynalazku:

- Uproszczony skład chemiczny stopu względem powszechnych rozwiązań komercyjnych ułatwiający kontrolę struktury materiału.
- Niska, całkowita zawartość składników stopowych na poziomie 1.5% wag.
- Możliwość kontroli właściwości mechanicznych materiału w szerokim zakresie w zależności od zastosowanej obróbki – bardzo dobra plastyczność i wysoka wytrzymałość (obróbka A) lub bardzo wysoka wytrzymałość z zachowaniem 17% wydłużenia do zerwania (obróbka B), co przekracza możliwości innych stopów pseudo alfa.

Literatura:

[1] R. Boyer, G. Welsch, E.W. Codings, Materials Properties Handbook : Titanium Alloys, 1994, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.

[2] C. Leyens, M. Peters, Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications, 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 3-527-30534-3.

[3] G. Luthering, J.C. Williams, Titanium 2nd ed. 2007 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-540-71397-5.

[4] D. Banerjee, J.C. Williams, Perspectives on Titanium Science and Technology, Acta Materialia 61 (2013) 844.

[5] Stopy TIMETAL 685, TIMETAL 834, TIMETAL 1100, https://www.timet.com/literature/datasheets.html

Zastrzeżenia patentowe

1. Trójskładnikowy stop tytanu, **znamienny tym**, że zawiera tytan, od 0,4 do 0,6% wagowych krzemu, od 0,2 do 1% wagowych renu oraz ewentualne zanieczyszczenia tlenem, azotem, węglem i żelazem, korzystnie w sumarycznej ilości poniżej 1.05% wag.
2. Stop według zastrz. 1, **znamienny tym**, że zawartość krzemu wynosi 0,45% wag.
3. Stop według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że zawartość renu wynosi od 0,5 do 1% wag., korzystnie 1% wag.
4. Sposób wytwarzania trójskładnikowego stopu tytanu, **znamienny tym**, że zawiera następujące etapy:
   (i) przygotowuje się mieszaninę, zawierającą tytan, krzem i ren, przy czym mieszanina zawiera tytan, 0,4–0,6% wagowych krzemu, od 0,2 do 1% wagowych renu oraz ewentualne zanieczyszczenia tlenem, azotem, węglem i żelazem, korzystnie w sumarycznej ilości poniżej 1,05% wag;

(ii) mieszaninę co najmniej jednokrotnie przetapia się w temperaturze co najmniej równej temperaturze topnienia Re;
(iii) odlewa się stop;
(iv) przeprowadza się wyżarzanie homogenizujące w temperaturze co najmniej równej temperaturze przemiany $\alpha \rightarrow \beta$ stopu;
(v) stop chłodzi się w wodzie z fazy β do fazy α;
(vi) przeprowadza się obróbkę plastyczną stopu;
(vii) przeprowadza się wyżarzanie rekrystalizujące;
(viii) chłodzi się otrzymany materiał.

5. Sposób według zastrz. 4, **znamienny tym**, że w etapie (ii) temperatura przetapiania jest wyższa od temperatury topnienia Re i niższa od temperatury parowania Ti.
6. Sposób według zastrz. 4 albo 5, **znamienny tym**, że przetapianie mieszaniny w etapie (ii) przeprowadza się metodą topienia łukowego.
7. Sposób według zastrz. 6, **znamienny tym**, że przetapianie mieszaniny w etapie (ii) przeprowadza się pięć razy.
8. Sposób według któregokolwiek z zastrz. od 4 do 7, **znamienny tym**, że wyżarzanie homogenizujące w etapie (iv) przeprowadza się w temperaturze co najmniej 882°C, korzystnie co najmniej 900°C.
9. Sposób według któregokolwiek z zastrz. od 4 do 8, **znamienny tym**, że wyżarzanie homogenizujące w etapie (iv) przeprowadza się w czasie co najmniej 30 minut.
10. Sposób według któregokolwiek z zastrz. od 4 do 9, **znamienny tym**, że chłodzenie w etapie (v) przeprowadza się w wodzie, korzystnie o temperaturze pokojowej.
11. Sposób według któregokolwiek z zastrz. od 4 do 10, **znamienny tym**, że w etapie (vi) obróbkę plastyczną przeprowadza się poprzez walcowanie na zimno schłodzonego stopu.
12. Sposób według zastrz. 11, **znamienny tym**, że walcowanie na zimno w etapie (vi) przeprowadza się do momentu uzyskania redukcji co najmniej 50% grubości materiału, korzystnie 50–80% grubości materiału.
13. Sposób według zastrz. 11 albo 12, **znamienny tym**, że wyżarzanie rekrystalizujące w etapie (vii) przeprowadza się w temperaturze między 810 a 830°C, korzystnie 820°C, a chłodzenie przeprowadza się zgodnie z etapem (viii) z piecem korzystnie z szybkością co najmniej 1°C/min albo na powietrzu, korzystnie w temperaturze pokojowej.
14. Sposób według zastrz. 11 albo 12, **znamienny tym**, że wyżarzanie rekrystalizujące w etapie (vii) przeprowadza się w temperaturze wyższej od 882°C, korzystnie około 950°C, a chłodzenie przeprowadza się zgodnie z etapem (viii) w wodzie.
15. Sposób według zastrz. 13 albo 14, **znamienny tym**, że wyżarzanie rekrystalizujące w etapie (vii) przeprowadza się w czasie co najmniej 10 minut, korzystnie w czasie 10 minut.
16. Sposób według któregokolwiek z zastrz. od 4 do 10, **znamienny tym**, że w etapie (vi) obróbkę plastyczną przeprowadza się poprzez kucie na gorąco powyżej temperatury przemiany $\alpha \rightarrow \beta$.
17. Zastosowanie trójskładnikowych stopów według zastrz. od 1 do 3 do wytwarzania elementów nośnych konstrukcji lekkich i/albo elementów krytycznych pracujących w wysokich temperaturach, korzystnie zaworów, korbowodów, wałów i/albo elementów strukturalnych, korzystnie korpusów, kolektorów odprowadzania spalin i/albo elementów poszycia silnika i/albo napędów i/albo łopat i/albo kierownic turbin gazowych.

Rysunki

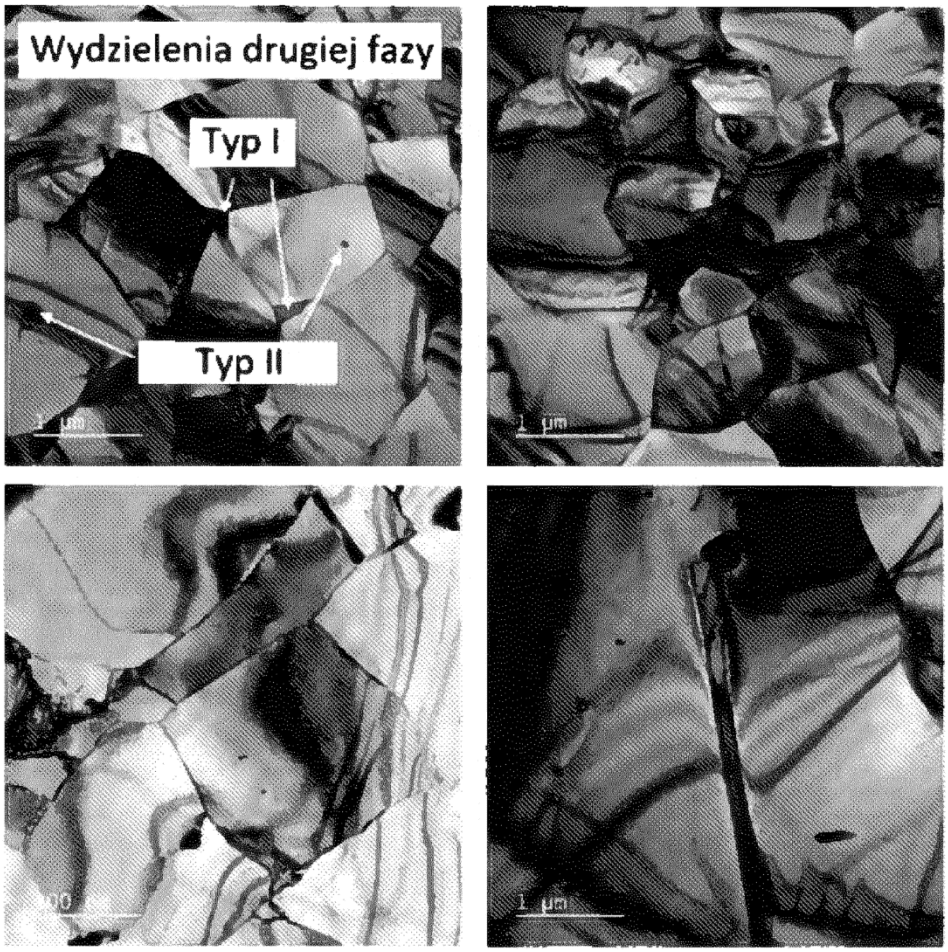


Fig. 1

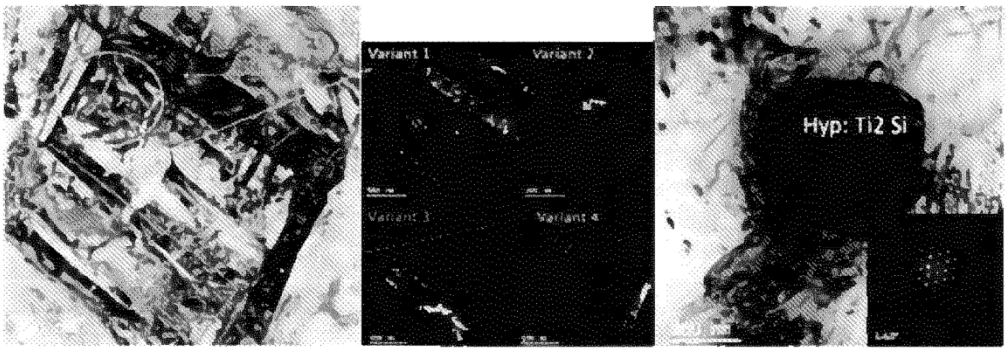


Fig. 2

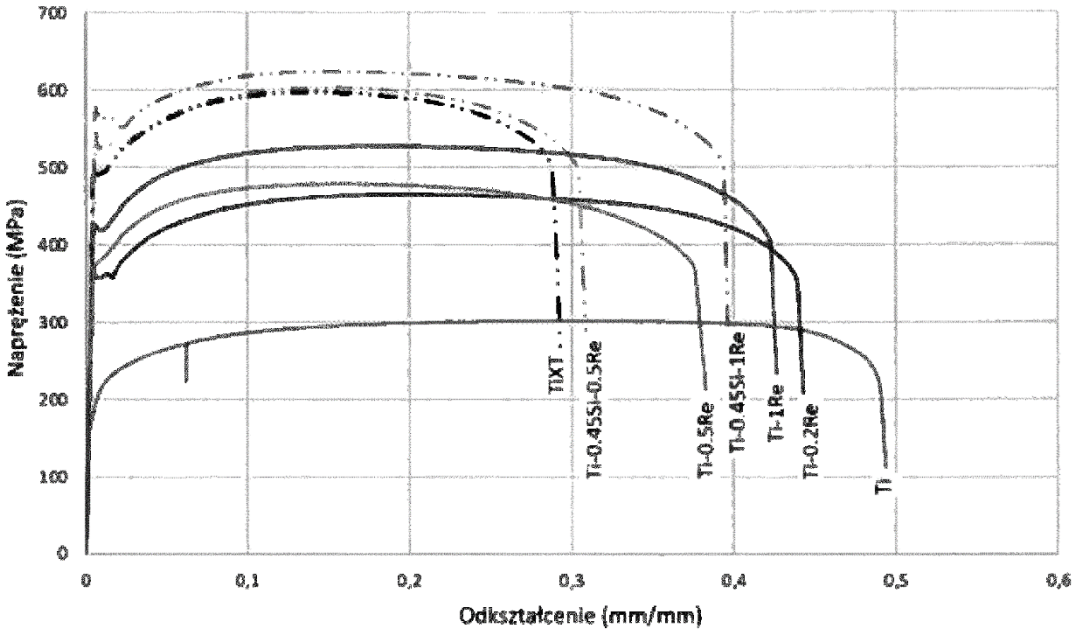
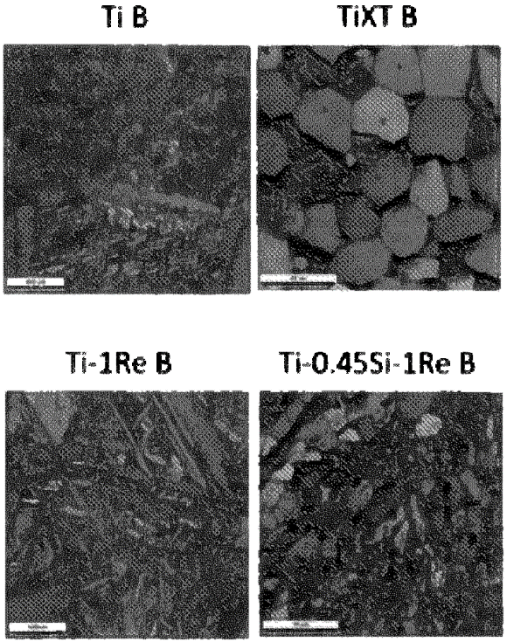

Naprężenie (MPa)
Odkształcenie (mm/mm)
0
100
200
300
400
500
600
700
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
TiXT
Ti-0.455i-0.5Re
Ti-0.5Re
Ti-0.455i-1Re
Ti-1Re
Ti-0.2Re
Ti

Fig. 3

a)


Ti B
TiXT B
Ti-1Re B
Ti-0.45Si-1Re B

b)

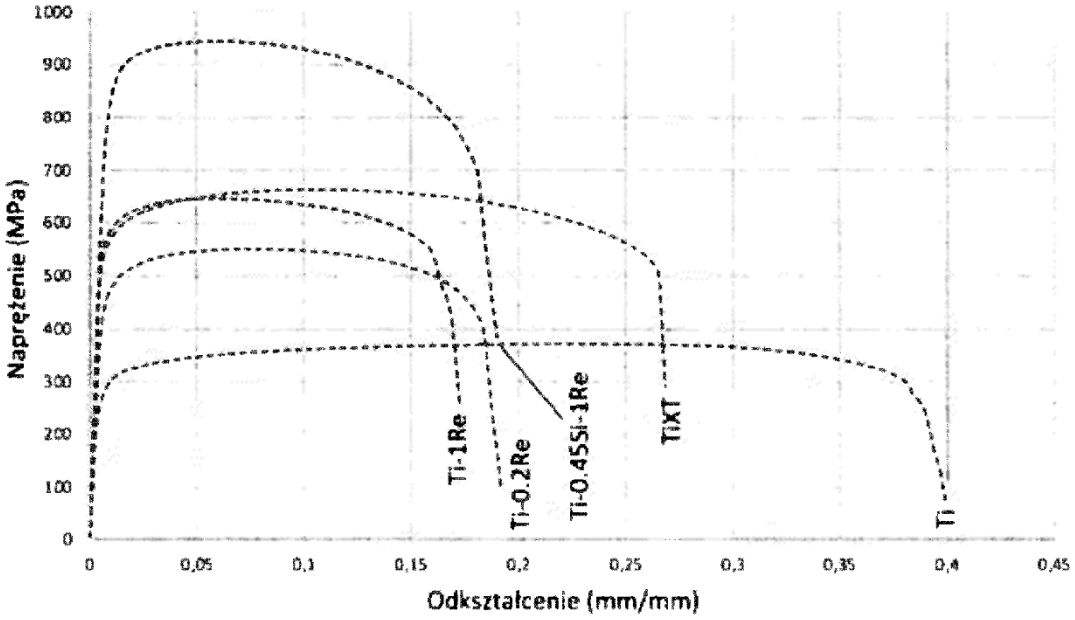

Naprężenie (MPa)
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
0,05
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,35
0,4
0,45
Odkształcenie (mm/mm)
Ti-1Re
Ti-0.2Re
Ti-0.45Si-1Re
TiXT
Ti

Fig. 4