

Maciej KOTYK<sup>1</sup>, Krzysztof KOWALICKI<sup>2</sup>, Andrzej SKIBICKI<sup>3</sup>

## ANALIZA TWARDOŚCI ZGRZEWANEGO WYBUCHOWO MATERIAŁU WARSTWOWEGO Al – Ti ORAZ JEGO MATERIAŁÓW BAZOWYCH

**Streszczenie:** Szeroko rozpowszechniony trend polegający na zmniejszeniu ciężaru obiektów technicznych poprzez zastosowanie do ich budowy materiałów lekkich wciąż nie traci na aktualności. W konsekwencji powoduje on powstawanie coraz to nowych, lżejszych materiałów, których charakterystyki mechaniczne wymagają weryfikacji eksperymentalnej. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów twardości jednego z opisywanych materiałów, tj. AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V dwiema metodami. Dodatkowo wyniki badań odniesiono również do twardości materiałów bazowych. Stwierdzono, że twardość materiału bazowego różni się od warstwy w materiale warstwowym wykonanej z tego samego materiału.

**Słowa kluczowe:** twardość, materiał warstwowy, stop Ti6Al4V, stop AA2519, materiały lekkie, materiał warstwowy Al – Ti

### 1. WPROWADZENIE

Twardość jest jedną z mechanicznych własności metali. W ogólności twardość można określić jako opór materiału przy wciskaniu w niego wgłębnika lub miarę oporu metalu na odkształcenia trwale wywołane wciskaniem wgłębnika [4]. Ma ona wpływ na decyzję o wykorzystaniu danego materiału do budowy maszyny. Dodatkowo pomiar twardości jest metodą sprawdzenia powtarzalności wyrobów przy wytwarzaniu materiałów konstrukcyjnych [12].

Określenie twardości metali odbywa się poprzez badania eksperymentalne wykonywane z zastosowaniem twardościomierzy. Wspomnianą aparaturę podzielić można na urządzenia dynamiczne i statyczne. Ze względu na większą dokładność częściej stosowane są twardościomierze statyczne. Dzieli się je na te, w których twardość mierzy się za pomocą analizy geometrii odcisku pozostawionego przez wgłębnik na powierzchni badanego materiału oraz na takie, w których opisywaną charakterystykę mechaniczną określa się poprzez pomiar kąta wychylenia młota [7].

#### 1.1. Badanie twardości stopów aluminium i tytanu

Badania twardości i mikrotwardości są wykonywane powszechnie. W literaturze można odnaleźć wiele publikacji, w których opisywane są tego typu eksperymenty. Zdecydowanie powszechniejsze oraz mniej wymagające z uwagi na wykorzystywaną aparaturę są badania twardości w skali „makro”.

---

<sup>1</sup> dr inż. Maciej KOTYK, UTP Bydgoszcz, e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

<sup>2</sup> inż. Krzysztof KOWALICKI, e-mail: kkowalicki37@gmail.com

<sup>3</sup> dr inż. Andrzej SKIBICKI, UTP Bydgoszcz, e-mail: andrzej.skibicki@utp.edu.pl

Pomiary twardości w skali makro przedstawiono w pracy [9]. Przeprowadzono je na poprzecznych przekrojach spoin wykonanych na falowodzie w kształcie walca ze stopu aluminium 2017A, które nałożono metodą MIG. Pomiary wykonano metodą Vickersa pod obciążeniem 100 gramów.

Podobne badania, ale na innym stopie aluminium zaprezentowano w pracy [14]; zmierzono w nich opisywaną charakterystykę materiałową na warstwie wierzchniej kutego matrycowo tłoka silnika samochodowego. Pomiar mikrotwardości wykonano również metodą Vickersa na wybranych wycinkach powierzchni elementu. Wycinki poddano obciążeniu, a następnie z wyników badania opracowano krzywą wgłębnikową potrzebną do wyznaczenia wartości parametrów niezbędnych do obliczenia mikrotwardości.

W kolejnym artykule [15] opisano wpływ efektu retrogresji na twardość stopu aluminium 7085. Do badania zastosowano blachę o wymiarach  $25 \times 20$  mm, którą wycięto z dużej płyty wzdłuż kierunku jej walcowania. Po zastosowaniu retrogresji wypolerowano powierzchnię próbek w celu otrzymania optymalnej dokładności pomiaru twardości. Do badania zastosowano metodę Vickersa zgodnie z procedurą opisaną w ASTM E92-17, a urządzeniem pomiarowym był tester twardości MH-5L. W temperaturze otoczenia (pokojowej) na każdej z próbek zrobiono 10 odcisków przy obciążeniu 1000 g i z uzyskanych wyników obliczono średnią wartość twardości HV. Wyniki badania pokazują, że retrogresja w temperaturze  $180^{\circ}\text{C}$  daje znaczny wzrost twardości, natomiast po obróbce w temperaturze  $200^{\circ}\text{C}$  stop aluminium wykazuje dużą utratę twardości.

W pracy Bai [1] omówiono wzrost twardości stopu tytanu przygotowanego w drodze transformacji fazy martenzytycznej. Próbkę stopu TC21 została wycięta z pręta kutego, a następnie poddana wygrzewaniu do  $1050^{\circ}\text{C}$  i chłodzeniu w wodzie, mającym na celu wytworzenie martenzytu. Kolejnym etapem przygotowania materiału było odpuszczanie w zakresie temperatur od  $300$  do  $700^{\circ}\text{C}$  przez dwie godziny. W trakcie odpuszczania mierzono twardość Vickersa. Stwierdzono, że twardość stopu TC21 wzrasta wraz ze wzrostem temperatury odpuszczania, osiągając swoje maksymalne wartości przy  $500^{\circ}\text{C}$ , a po jej przekroczeniu stopniowo maleje.

Kolejny przykład pomiaru twardości dla stopu tytanu przedstawiono w pracy [10]. Analizie poddano twardość połączenia spawanego laserem czystego tytanu w trakcie rekrytalizacji. Obiektami badania były arkusze czystego tytanu o grubości 2,5 mm. Łączenie płyt odbyło się za pomocą lasera o mocy 4 kW z zastosowaniem systemu spawania laserowego IPG YLR-4000. Takie połączenie zostało pocięte na mniejsze próbki, a następnie poddane odpuszczaniu w temperaturze od  $625$  do  $700^{\circ}\text{C}$ . Twardość była mierzona przed obróbką cieplną i po jej przeprowadzeniu urządzeniem HXD-1000TMC/LCD pod obciążeniem 0,98 N w odstępach co 0,1 mm. Wyniki wskazują, że twardość jest wyższa w strefie spoiny przed obróbką cieplną, jednak po procesie odpuszczania i wraz z rozwojem rekrytalizacji średnie wartości twardości wykazują spadek.

## 1.2. Badanie mikrotwardości stopów aluminium i tytanu

Pomiary mikrotwardości wykonuje się często na małych elementach, takich jak cienkie druty, taśmy o grubości poniżej jednego milimetra i powłoki metalowe. Polegają one na statycznym wciskaniu wgłębnika twardościomierza w powierzchnię elementu prostopadłą do jego osi [4].

Przykładem badań mikrotwardości metodą Vickersa jest pomiar przeprowadzony na złączu lutowanym wykonanym pomiędzy stopem aluminium AW 5754 oraz tytanem Grade 2. Do połączenia wykorzystano spoiwo AlSi5. W badaniach wykorzystano twardościomierz HVS-1000 firmy Sinowon. Pomiar przeprowadzono w dwóch liniach, które zawierały strefę między lutospoiną a tytanem Grade 2 oraz strefę pomiędzy lutospoiną i stopem aluminium AW 5754 [16].

Mikrotwardość zbadano także na połączeniu lutowanym między stopem aluminium EN AW-1050A wg PN-EN 573-3 oraz miedzią Ecu58-CuETP (99,9% Cu). Podobnie jak w poprzednich badaniach w opisywanym przypadku zastosowano metodę Vickersa za pomocą twardościomierza PMT3, przy obciążeniu ostrosłupa diamentowego równym 25 G, zgodnie z zaleceniami normy PN EN ISO 6507-1. Z badania wynika, że na granicy połączenia lutowiny z miedzią powstaje strefa reakcyjna, w której występuje duży gradient twardości. Skutkuje tendencją do powstawania pęknięć cieplnych [13].

Na uwagę zasługuje również artykuł [11], w którym zaprezentowano wyniki badań wpływu frezowania na mikrotwardość warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali nierdzewnej 15-5PH. Próbkę została zeszlifowana pod kątem 3 stopni i następnie wypolerowana. Na każdej z badanych próbek wykonano po dziesięć pomiarów metodą Vickersa. Rozkład mikrotwardości dla wszystkich badanych przypadków miał podobny charakter. Różnice w wartościach wystąpiły natomiast pomiędzy poszczególnymi badanymi materiałami. Przy powierzchni odnotowane były największe wartości, które malały w głębszych warstwach. Wyniki pokazały, że warstwa wierzchnia stopu tytanu (przy posuwie wynoszącym 0,233 mm na obrót) została umocniona o 18,3%.

W artykule Liu [8] przedstawiono wyniki badań wpływu mikroelastycznego walcowania i wyżarzania na mikrostrukturę oraz mikrotwardość stopu aluminium. Do badania zastosowano stop aluminium 1060 o grubości 460  $\mu\text{m}$ . Wyniki pokazują, że cieńsze strefy ze zredukowanym walcowaniem wykazują wyższą mikrotwardość. Wspomniana twardość spada natomiast w głębszych warstwach materiału, gdzie wpływ zredukowanego walcowania był mniejszy. Natomiast podczas wyżarzania mikrotwardość stopniowo maleje wraz ze zmianą temperatury z 200 do 400°C.

Podczas przeglądu literatury zwrócono również uwagę na artykuł [5], pokazujący wpływ jonów miedzi na mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów tytanu VT1-0. Do badania zastosowano metodę Vickersa, a urządzenie, którym wykonano pomiar, to Nano Hardness Tester. Dla uzyskania wiarygodnych wyników dla każdej próbki wykonano nie mniej niż 10 odcisków wgłębnika pod obciążeniem 50 mN. Mikrotwardość została obliczona na podstawie analizy gałęzi odciążającej zgodnie z metodą Olivera-Pharra.

## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania eksperymentalne polegały na pomiarze twardości oraz mikrotwardości poszczególnych warstw (stron) bimetalu AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V

oraz jego materiałów bazowych. Ze względu na niewielką grubość warstwy przedkładkowej wykonanej z AA1050 pomiary twardości tego materiału pominięto. Zasadniczym celem badań było dokonanie analizy porównawczej wyników uzyskanych na podstawie pomiarów twardości dokonanych różnymi metodami.

W oparciu o analizę literatury z zakresu tematu ustalono, że najodpowiedniejszą metodą pomiaru twardości dla tak szerokiej grupy będzie pomiar metodą Vickersa. Ze względu na to za wielkość wyjściową, tj. taką, do której odniesiono pozostałe wyniki badań, przyjęto wyniki uzyskane za pomocą standardowego twardościomierza mierzącego twardość we wcześniej wspomnianej skali. Dodatkowo postanowiono wykonywać pomiary z naciskiem 100 N.

## 2.1. Obiekt badań

Pomiar twardości odbywał się na trzech obiektach, tj. materiale warstwowym AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V oraz jego materiałach bazowych.

Badany materiał warstwowy nie jest obecnie wykorzystywany. Jest całkowicie nowy, wytworzony przez opolską firmę Explomet. Został opracowany, aby wyjść naprzeciw oczekiwaniom konstruktorów, którzy poszukują do projektowanych przez siebie urządzeń coraz to lżejszych materiałów, nie zmniejszając przy tym własności mechanicznych. Dodatkowo ze względu na połączenie materiału o wysokiej wytrzymałości mechanicznej ( $R_m$  o wartości blisko 1000 MPa), jakim jest stop tytanu, oraz plastycznego aluminium sprawia, że powstały w wyniku zgrzewania wybuchowego kompozyt wykazuje odporność balistyczną. Jest to cecha, która sprawia, że materiał jest dedykowany do zastosowań militarnych.

Ze względu na innowacyjny charakter badanego materiału warstwowego oraz materiałów bazowych znajdujących się w zupełnie różnym obszarze zastosowań trudno jednoznacznie opisać własności badanego kompozytu, opierając się na powszechnie stosowanych metodach. Z tego powodu analizę twardości kompozytu Al – Ti postanowiono rozpocząć od pomiarów twardości materiałów bazowych.

Należy zaznaczyć, że wybrane własności mechaniczne badanych materiałów zostały już wcześniej wyznaczone. Szczegółowe wyniki tych badań można odnaleźć w autorskich artykułach [2, 3, 8].

Skład chemiczny stopu aluminium AA 2519 przedstawiono w tabeli 1, natomiast skład chemiczny tytanu Ti6Al4V – w tabeli 2.

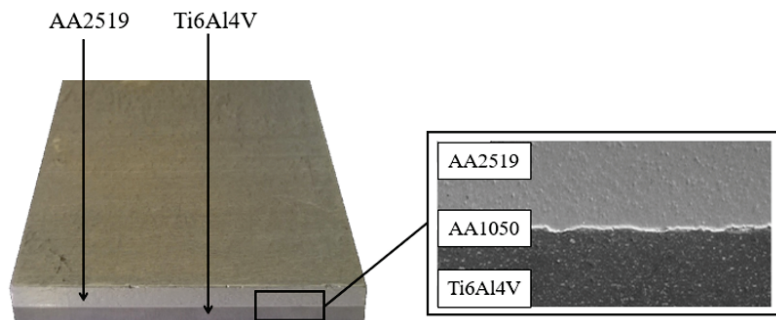
Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium AA2519 [6]  
Table 1. Chemical composition of aluminum alloy AA2519 [6]

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	V	Zr
0,06	0,08	5,77	0,18	0,01	0,04	0,12	0,2

Tabela 2. Skład chemiczny stopu tytanu Ti6Al4V [17]  
Table 2. Chemical composition of titanium alloy Ti6Al4V [17]

Al	V	Fe	Si	O	C	N	H
6,42	4,12	0,18	0,024	0,12	0,013	0,011	0,004

Materiały bazowe, których skład chemiczny przedstawiono w tabelach 1 i 2, zostały połączone ze sobą metodą wysokoenergetyczną, tj. za pomocą zgrzewania wybuchowego z wykorzystaniem saletrolu. Arkusz blachy uzyskany właśnie podczas tego procesu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Arkusz blachy powstały w wyniku zgrzewania wybuchowego stopów AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V

Fig. 1. The sheet was formed as a result of explosive welding of AA2519 – AA1050 – Ti6Al4V alloys

Ze względu na znaczne oddziaływanie ciepła podczas procesu łączenia blach po procesie zgrzewania konieczna jest obróbka termiczna powstałego kompozytu. Polega ona na wygrzewaniu blachy w temperaturze (530–550)°C przez dwie godziny oraz przyspieszonym starzeniu w temperaturze 165°C przez 10 godzin. Naturalnie taka temperatura nie jest w stanie wpłynąć na własności stopu tytanu, jednak w przypadku stopu aluminium AA2519 wspomniana obróbka wpływa pozytywnie na własności wytrzymałościowe tego stopu poprzez wytwarzanie się cząstek fazy  $\theta$ .

## 2.2. Opis badań

Badania składały się z pomiarów twardości z wykorzystaniem dwóch twardościomierzy. Zmierzono twardość każdego z materiałów bazowych oraz poszczególnych warstw. Wszystkie próbki przed rozpoczęciem badań zostały zeszlifowane w taki sposób, aby chropowatość powierzchni nie zakłóciła pomiarów. Należy zaznaczyć, że wszystkie próbki do badań stanowiły wycinki z arkusza poszczególnych blach o grubości 10 mm i pozostałych wymiarach dostosowanych do zakresu aparatury badawczej. Każdorazowo dopilnowano, aby kolejne pomiary twardości odbywały się w odpowiednim odstępnie od pomiaru poprzedzającego. Zgodnie z procedurami opisanymi w stosownych instrukcjach, za minimalny odstęp przyjęto dwukrotność wielkości odcisku pozostawionego po wykonaniu pomiaru poprzedzającego.

Wspomniane pomiary twardości wykonano za pomocą standardowego twardościomierza Vickersa firmy Huatec z obciążeniem 100 N. Zmierzono twardość zarówno materiału warstwowego, jak i materiałów bazowych. Twardościomierz, przy wykorzystaniu którego wykonano pomiary, zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Twardościomierz HV 10 wykorzystany podczas badań  
Fig. 2. HV 10 hardness tester used during tests

Następnie przystąpiono do pomiarów tej samej charakterystyki mechanicznej za pomocą uniwersalnego twardościomierza TH – 110, dokonując pomiaru metodą Leeba z głowicą typu D. W przypadku gdy było to możliwe, zmierzona wartość była przeliczana na twardość Vickersa. Należy zaznaczyć, że zgodnie z metodyką pomiaru próbki w sposób trwały zamocowano w uchwycie, którego masa wraz z próbką przekraczała 5 kg. Twardościomierz wykorzystany podczas badań zaprezentowano na rysunku 3. Należy zaznaczyć, że wyniki twardości mierzone za pomocą twardościomierza Leeba – przeliczone do twardości wyrażonej na skali Vickersa – oznaczone zostały za pomocą symbolu  $HV_L$ .



Rys. 3. Twardościomierz TH – 110 (Leeba) wykorzystany podczas badań twardości  
Fig. 3. TH –110 hardness tester (Leeba) used during hardness tests

### 2.3. Wyniki badań

Wyniki badań uzyskane zgodnie z przedstawioną w poprzednich rozdziałach procedurą zebrano i opracowano w postaci tabelarycznej. Wyniki badań twardości stopu aluminium AA2519 jako materiału samodzielnego (bazowego) zaprezentowano w tabeli 3, natomiast graficzną formę wyników – na rysunku 4a.

Podobnie jak w przypadku stopu aluminium, tak w przypadku Ti6Al4V otrzymane wyniki zestawiono w postaci tabelarycznej (tabela 4), a ich graficzne przedstawienie – na rysunku 4b.

Tabela 3. Wyniki pomiarów twardości stopu aluminium AA2519

Table 3. The results of measuring the hardness of the AA2519 aluminum alloy

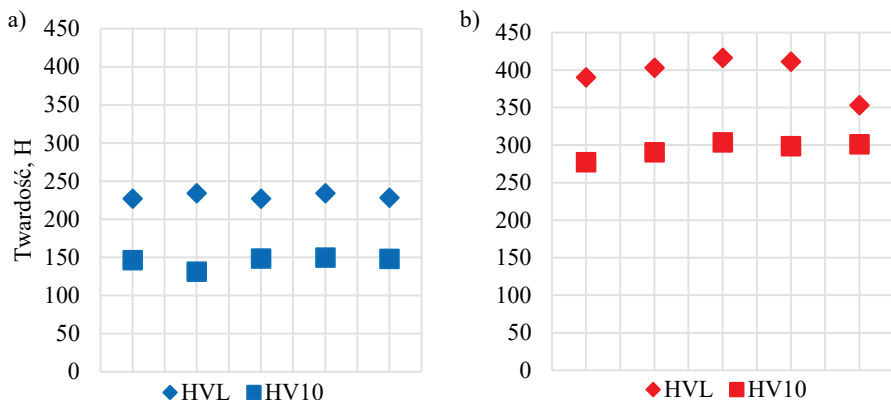
Materiał	Twardość		
	HL	HV <sub>10</sub>	HV <sub>L</sub>
AA2519	504	146	227
	511	131	234
	504	148	227
	511	150	234
	505	148	228
<b>Wartość średnia <math>\overline{H}_t</math></b>	<b>507,0</b>	<b>144,7</b>	<b>230,0</b>
Odchylenie standardowe	3,7	7,7	3,7

Tabela 4. Wyniki pomiarów twardości stopu tytanu Ti6Al4V

Table 4. Results of hardness measurements of titanium alloy Ti6Al4V

Materiał	Twardość		
	HL	HV <sub>10</sub>	HV <sub>L</sub>
Ti6Al4V	642	277	390
	651	290	403
	660	303	416
	656	299	411
	615	301	353
<b>Wartość średnia <math>\overline{H}_t</math></b>	<b>644,8</b>	<b>294,0</b>	<b>394,6</b>
Odchylenie standardowe	18,0	10,7	25,2

W kolejnej części badań przeprowadzono pomiary poszczególnych stron materiału warstwowego Al – Ti. Wyniki pomiarów dla strony aluminiowej materiału Al – Ti przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunku 5a, natomiast dla strony tytanowej – w tabeli 5, a w formie graficznej – na rysunku 5b.



Rys. 4. Wyniki pomiarów twardości materiałów bazowych: a) stopu aluminium AA2519, b) stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 4. Results of hardness measurements of base materials: a) AA2519 aluminum alloy, b) Ti6Al4V titanium alloy

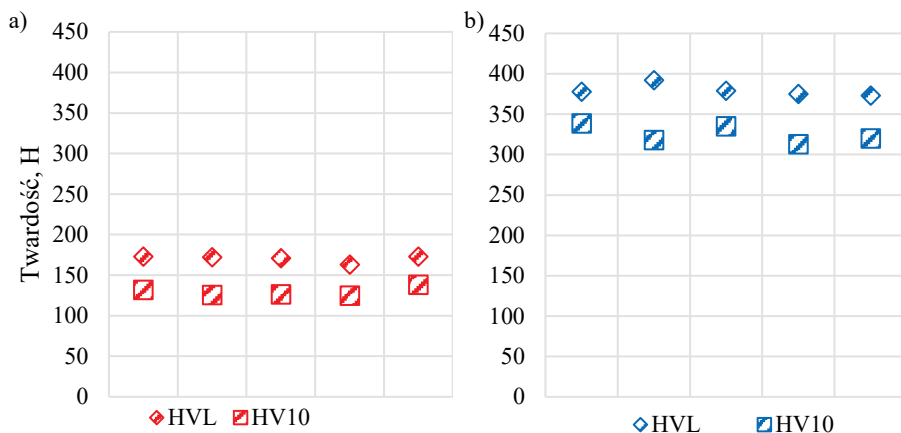
Tabela 5. Wyniki pomiarów twardości stopu aluminium AA2519 w materiale warstwowym Al – Ti  
Table 5. Results of hardness measurements of AA2519 aluminum alloy in Al – Ti material

Materiał	Twardość		
	HL	HV <sub>10</sub>	HV <sub>L</sub>
AA2519 w Al – Ti	446	132	173
	445	125	172
	443	126	171
	435	125	163
	446	138	173
<b>Wartość średnia <math>\bar{H}_t</math></b>	<b>443,0</b>	<b>129,4</b>	<b>170,4</b>
Odchylenie standardowe $\sigma$	4,6	5,8	4,2

Tabela 6. Wyniki pomiarów twardości stopu tytanu Ti6Al4V w materiale warstwowym Al – Ti  
Table 6. Results of hardness measurements of titanium alloy Ti6Al4V in the Al – Ti layer material

Materiał	Twardość		
	HL	HV <sub>10</sub>	HV <sub>L</sub>
Ti6Al4V w Al – Ti	633	339	378
	643	318	392
	634	335	379
	631	313	375
	630	320	373
<b>Wartość średnia</b>	<b>634,2</b>	<b>324,9</b>	<b>379,4</b>
Odchylenie standardowe	5,2	11,3	7,4





Rys. 5. Wyniki pomiarów twardości poszczególnych warstw w materiale warstwowym Al – Ti:  
a) strona stopu aluminium AA2519, b) strona stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 5. Results of hardness measurements of individual layers in the Al –Ti layered material:  
a) AA2519 aluminum alloy side, b) Ti6Al4V titanium alloy side

#### 2.4. Analiza wyników badań

Analizując otrzymane wyniki posługiwano się uśrednionymi wartościami z pomiarów. Ze względu na to, że pomiary twardości  $HV_L$  są wartością uzyskiwaną na podstawie twardości mierzonej na skali Leebea, nie poddano analizie wyników HL, ponieważ trudno je jednoznacznie odnieść do wyników wyrażonych na skali Vickersa.

Jak wcześniej wspomniano, za wartość bazową uznano pomiar twardości metodą Vickersa z obciążeniem 100 N. Procentowe różnice pomiędzy poszczególnymi wynikami pomiarów, adekwatnie do rozpatrywanego przypadku, wyznaczano zgodnie z zależnością matematyczną (1):

$$\overline{\Delta H} = \frac{HV_{10} - HV_L}{HV_{10}} \cdot 100\% \quad (1)$$

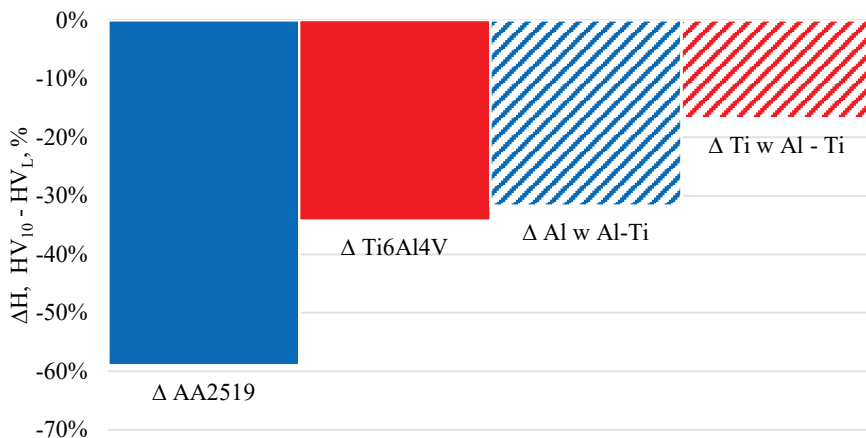
gdzie:

- $\Delta H$  – różnica w twardość mierzona przy wykorzystaniu różnych metod pomiarowych,
- $HV_{10}$  – twardość mierzona za pomocą twardościomierza Vickersa z obciążeniem 100 N,
- $HV_L$  – twardość mierzona za pomocą twardościomierza Leebea przeliczona na twardość w skali Vickersa.

Różnicę pomiędzy pomiarami twardości metodą Leebea przeliczoną do twardości wyrażonej w skali Vickersa dla obu materiałów bazowych przedstawiono na rysunku 6.

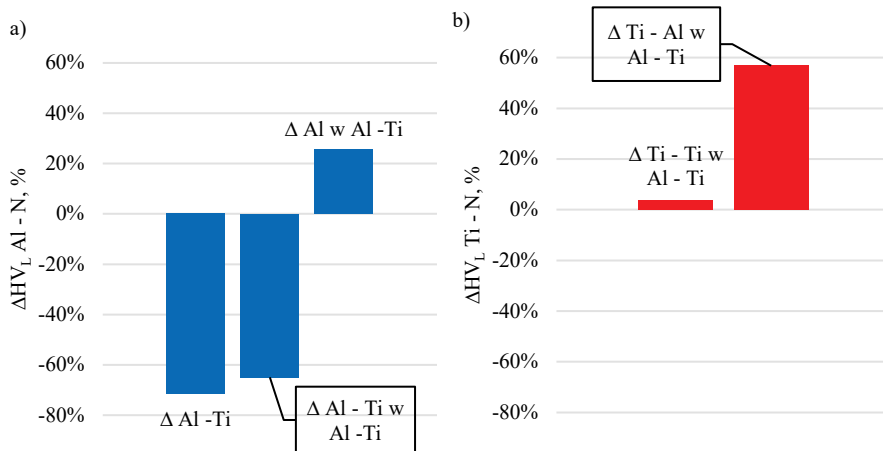
Pomiędzy materiałami bazowymi występują znaczne różnice własności mechanicznych, w tym także twardości (dla pomiarów  $HV_L$  – rys. 7, dla pomiarów  $HV_{10}$  – rys. 8). Można również zaobserwować, jak zmieniała się uśredniona wartość różnic twardości w skutek zastosowanej metody pomiaru.

Takie samo porównanie wykonano dla stopu Ti6Al4V, przy czym nie porównywano ze sobą ponownie stopów AA2519 oraz Ti6Al4V (rys. 7 i 8).



Rys. 6. Procentowe różnice pomiędzy pomiarami twardości wykonanymi za pomocą twardościomierzy Leeba oraz Vickersa dla materiałów bazowych oraz poszczególnych warstw w materiale warstwowym

Fig. 6. Percentage differences between hardness measurements made with Leeb and Vickers hardness testers for base materials and individual layers in the layered material

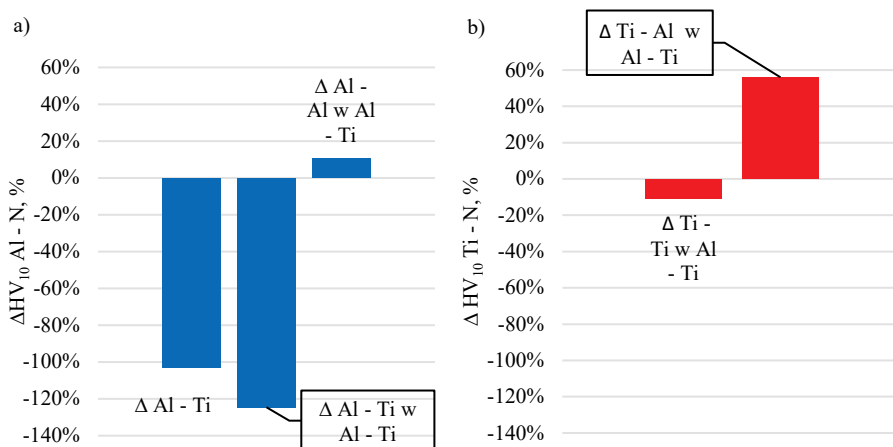


Rys. 7. Różnice w twardości materiałów bazowych oraz materiałów bazowych i poszczególnych warstw materiału warstwowego w skali Leeba przeliczone na wartość twardości w skali Vickersa: a) dla stopu aluminium AA2519, b) dla stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 7. Differences in the hardness of basic materials, as well as basic materials and individual layers of layered material on the Leeb scale converted to Vickers hardness value: a) for aluminum alloy AA2519, b) for titanium alloy Ti6Al4V

Pomiary twardości wykonane w skali Leeba przeliczone do skali Vickersa pokazują, że stop tytanu Ti6Al4V jako materiał samodzielny (bazowy) wykazuje największą twardość. W stosunku do bazowego stopu aluminium AA2519 różnica sięga 72%. W przypadku warstwy aluminium w materiale warstwowym bazowy Ti6Al4V jest twardszy o 65%. Zestawiając ze sobą twardość wspomnianego

wcześniej bazowego stopu tytanu oraz warstwy tytanowej, w materiale warstwowym zaobserwowano niewielką rozbieżność wynoszącą zaledwie 4%. W przypadku stopu aluminium po zgrzewaniu wybuchowym zwiększyła się jego twardość o 26% w odniesieniu do AA2519 jako materiału bazowego.



Rys. 8. Różnice w twardości materiałów bazowych oraz materiałów bazowych i poszczególnych warstw materiału warstwowego w skali Vickersa ( $HV_{10}$ ): a) dla stopu aluminium AA2519, b) dla stopu tytanu Ti6Al4V

Fig. 8. Differences in the hardness of base materials as well as base materials and individual layers of layered material on the Vickers scale ( $HV_{10}$ ): a) for aluminum alloy AA2519, b) for titanium alloy Ti6Al4V

Podobnie jak w poprzednim przypadku wyznaczono procentowe różnice pomiędzy twardościami materiałów bazowych oraz poszczególnymi warstwami w materiale warstwowym. Tym razem obliczenia wykonano wyłącznie w oparciu o pomiary wykonane twardościomierzem Vickersa z obciążeniem 100 N zgodnie z zależnością (2) i (3):

$$\overline{\Delta HV}_{Al} = \frac{\overline{HV_{10 Al}} - \overline{HV_{10 Al w Al - Ti}}}{\overline{HV_{10 Al}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

lub:

$$\overline{\Delta HV}_{Ti} = \frac{\overline{HV_{10 Ti}} - \overline{HV_{10 Ti w Al - Ti}}}{\overline{HV_{10 Ti}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta HV_{Al}$  – różnica w twardość wyrażonej w skali Vickersa pomiędzy bazowym stopem aluminium a warstwą aluminiową w kompozycie Al – Ti,
- $\Delta HV_{Ti}$  – różnica w twardość wyrażonej w skali Vickersa pomiędzy bazowym stopem tytanu a warstwą tytanową w kompozycie Al – Ti,
- $Al$  – indeks odnoszący się do stopu aluminium AA2519,
- $Ti$  – indeks odnoszący się do stopu tytanu Ti6Al4V,
- $Al - Ti$  – indeks odnoszący się do materiały warstwowego Al – Ti.

W przypadku zastosowania metody Vickersa z obciążeniem 100 N, materiałem o większej twardości jest stop tytanu Ti6Al4V, będący warstwą w materiale warstwowym. Jest to sprzeczne z wynikami uzyskanymi za pomocą metody Leeba. Różnica między bazowym stopem tytanu a jego warstwą w Al – Ti wynosi 11%. Sam stop tytanu jest ponad dwukrotnie twardszy od swobodnego bazowego aluminium AA2519, a różnica ta wynosi 103%. Różnica w twardości jest jeszcze większa w przypadku, gdy porówna się ze sobą twardość bazowego stopu Ti6Al4V oraz warstwę aluminiową w kompozycie Al – Ti. Tytan bowiem jest o 125% twardszy. Samodzielny stop aluminium w porównaniu z warstwą kompozytu będącą tym samym stopem – podobnie jak w metodzie Leeba – jest twardszy, a różnica w twardości wynosi 11%.

### 3. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem obu metod wskazują, że stop tytanu jest twardszy niż stop aluminium w przypadku pomiarów metodą Vickersa o 150 HV<sub>10</sub>, natomiast w przypadku pomiarów wykonanych za pomocą twardościomierza Ti6Al4V był twardszy o 160 HV<sub>L</sub>.
2. Obie metody dają powtarzalne wyniki, jednak po przeliczeniu wartości ze skali Leeba na skalę Vickersa są między nimi różnice. Pomiar metodą Leeba w każdym badanym przypadku daje w odniesieniu do pomiarów metodą Vickersa większy wynik. Różnica (pomiędzy metodami) w badaniach bazowego stopu AA 2519 wynosiła niespełna 60%, w przypadku bazowego stopu tytanu ponad 40%. W badaniach warstwy aluminiowej w materiale Al – Ti różnica wynosiła ponad 30%, a w warstwie tytanowej w materiale warstwowym – oscylowała w granicach 15%.
3. W badaniach twardościomierzem Leeba stwierdzono, że samodzielny stop Ti6Al4V jest twardszy od tego samego stopu będącego warstwą w kompozycie Al – Ti, a w przypadku badań metodą Vickersa uzyskano odmienne wyniki.
4. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że pomiar twardości metodą Leeba może być wykorzystywany jedynie do celów porównawczych w obrębie jednego materiału.
5. W przypadku materiału warstwowego do pomiarów twardości sugeruje się stosować metody wgłębnikowe ze względu na to, że na przeciwległej stronie badanego arkusza znajduje się materiał o innej sztywności, powodujący zakłócenia w badaniach metodami dynamicznymi.

### LITERATURA

- [1] BAI F.M.: A significant increase in the hardness of nanotwinned titanium alloys prepared via the martensitic phase transformation. *Materials Letters*, 255, 2019, 126–507.
- [2] BOROŃSKI D.: Crack initiation and growth analysis in explosively welded AA2519–AA1050–Ti6Al4V layered material in ambient and cryogenic conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 232(8), 2018, 1470–1480.
- [3] BOROŃSKI D.: Fracture Toughness of Explosively Welded Al/Ti Layered Material in Cryogenic Conditions. *Procedia Structural Integrity*, 2, 2016, 3764–3771.

- [4] BUTNICKI S.: Metaloznawstwo. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.
- [5] FEDORISHEVA M.V.: The structure - phase state and microhardness of the surface layer of the VT1-0 titanium alloys treated by copper ions. *Vacuum*, 149, 2018, 150–155.
- [6] FISHER J.: Aluminum alloy 2519 in military vehicles. *Advanced Materials Process*, 160, 2002, 43–46.
- [7] KOLENDA J., KYZIOŁ L.: Porównawcza miara dynamicznej twardości metali. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 48 nr 3 (170), 2007, 39–45.
- [8] KOTYK M., BORONSKI D.: Influence of the theoretical load point on the value of the J – JQ integral during determination of fracture toughness of 2519 aluminium alloy. *MATEC Web Conf.*, 290, 2019, 08–011.
- [9] KRAJEWSKI A.: Wpływ fazy drgań ultradźwiękowych na strukturę i twardość napoin stopu aluminium 2017A. *Przegląd Spawalnictwa*, 85, nr 1, 2013, 45–50.
- [10] LIU H.: Microstructural evolution and hardness response in the laser beam welded joints of pure titanium during recrystallization and grain growth. *Materials Characterization*, 145, 2018, 87–95.
- [11] MATUSZAK J., ZALESKI K.: Badania porównawcze wpływu frezowania na chropowatość powierzchni i mikrotwierdność warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali nierdzewnej 15-5PH. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 31(2), 2011, 59–68.
- [12] PEŁCZYŃSKI T.A.: Twardość metali i ich stopów z uwzględnieniem fizyki odkształceń plastycznych: monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
- [13] PIWOWARCZYK T.: Możliwości łączenia aluminium z miedzią lutami miękkimi na osnowie Sn-Zn. *Welding Technology Review*, 85, 2013, 8.
- [14] TARNOWSKI J.: Badanie modułu sprężystości i mikrotwierdości warstw wierzchnich tła samochodowego w aspekcie jego zużycia. *Tribologia*, 5, 2013.
- [15] WANG Y., CAO L.: Effect of retrogression treatments on microstructure, hardness and corrosion behaviors of aluminum alloy 7085. *Journal of Alloys and Compounds*, 814, 2020, 152–264.
- [16] WOJDAT T.: Evaluation of the structure and selected properties of aluminum alloy and titanium joints welded with the CMT method. *Welding Technology Review*. 90, 2018, 8.
- [17] ZHANG W.: Preparation of TiBw/Ti–6Al–4V composite with an inhomogeneous reinforced structure by a canned hot extrusion process. *Journal of Alloys and Compounds*, 669, 79–90 (2016).

## **ANALYSIS OF HARDNESS OF EXPLOSIONALLY WELDED Al – Ti LAYER MATERIAL AND ITS BASE MATERIALS**

**Summary:** Widespread trend which is technical objects weight reduction through using very light materials to build is still very common. It leads us to create new and lighter materials which mechanical characteristics needs some experimental verification. In this article we present results of measurement one of described material which is AA2519-AA1050-Ti6Al4V in two different methods. Additionally all experiment results were referred to durability of basic materials. It shows that hardness of base material is different from layer in layer material made from same material.

**Key words:** hardness, layered material, alloy Ti6Al4V, alloy AA2519, light materials, Al – Ti layer material