

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

#### Unconventional technologies of joining elements of aeronautical constructions

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

#### Wyniki badań Results

##### Badania wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych narażonych na zmienną temperaturę i ciśnienie

Klejenie zajmuje ważną pozycję wśród technik łączenia elementów konstrukcyjnych wykonanych z szeregu różnych materiałów. Bez większych ograniczeń za pomocą klejów łączy się elementy metalowe (stałe, stopy aluminium, stopy tytanu i inne) lub z tworzyw sztucznych w wielu gałęziach przemysłu. W przemyśle lotniczym klejenie odgrywa istotną rolę z uwagi na korzystną relację wytrzymałości do wagi konstrukcji (możliwość tworzenia lżejszych konstrukcji), przy czym ich wytrzymałość porównywalna jest do wytrzymałości połączeń nitowanych, lutowanych, spawanych i zgrzewanych. Dodatkowo w konstrukcjach lotniczych istotne jest, że połączenia klejone tłumią wibracje oraz to, że możliwe jest łączenie różnych pod względem właściwości materiałów (stał konstrukcyjnych ze stopami aluminium, tytanu, kompozytami) o zróżnicowanej grubości lub strukturze (np. cienkich z grubszymi, powierzchni gładkich ze strukturami typu „plaster miodu”). Ponadto można zachować optywne kształty konstrukcji, a połączenia są uszczelnione warstwą kleju. Klejenie jest także operacją tańszą i często szybszą niż inne operacje montażowe.

Wytrzymałość spoiny klejowej jest uzależniona od kilku czynników:

- rodzaju kleju
- warunków utwardzania
- rodzaju klejonego materiału i sposobu jego przygotowania przed klejeniem
- i innych.

Kleje mają oprócz zalet również wady. Są wrażliwe na działanie czynników otoczenia jak: wysoka temperatura, agresywne chemiczne cieczki, itp. Mogą one powodować częściowe uszkodzenie klejonych materiałów, np. wskutek korozji, zmian twardości. Również same kleje narażone są na rozkład w czasie długiego sezonowania.

Do przeprowadzenia eksperymentu wstępnie dokonano selekcji klejów.

Do klejenia przygotowano z blach o grubości 1 mm próbki o wymiarach 25x100 [mm] według normy PN-EN 2243-1:2006.

Do klejenia użyto klejów o zróżnicowanym składzie chemicznym, sposobie przygotowania, czasie nakładania po wymieszaniu oraz czasie wiązania:

- 1) Araldit 2021 – klej metakrylowy, dwuskładnikowy (1:1), o czasie nakładania do 3 min. i czasie wiązania – 8 min., pełne utwardzenie po 24 godz.;
  - 2) PascoFix – klej cyjanoakrylowy o czasie wiązania 2-3 min.;
  - 3) Permapond ET515 – klej epoksydowy, dwuskładnikowy (1:1), o czasie nakładania do 1525 min. i czasie wiązania – 4060 min., pełne utwardzenie po 24 godz.;
  - 4) Araldit 2011 – klej epoksydowy, dwuskładnikowy (1:1), o czasie nakładania do 100 min. i czasie wiązania – 7 godz., pełne utwardzenie po 36 godz.;
  - 5) Araldit 2014-1 – klej epoksydowy, dwuskładnikowy (2:1), o czasie nakładania do 60 min. i czasie wiązania – 3 godz., pełne utwardzenie po 36 godz.;
  - 6) Epidian 6 z utwardzaczem Z1 – żywica epoksydowa z trójetylenoceteroaminą; mieszanka o czasie nakładania do 90 min., czasie wiązania 0,51,5 godz.; pełne utwardzenie po 1014 godz.;
  - 7) Epidian 6 z utwardzaczem PAC – żywica epoksydowa z poliaminamidem C, mieszanka o czasie nakładania do kilku godz., pełne utwardzenie po 47 dniach.
- Wszystkie wykorzystane kleje przeznaczone są do klejenia metali, a czasy utwardzania podane zostały dla temp. 20C.



Rys. Wyniki selekcji klejów - najlepszy wariant - ok. 23 MPa dla ARALDIT 2011(nr 4)  
Fig. The results of glue selection - the best variant - app. 23 MPa for ARALDIT 2011 (No 4)

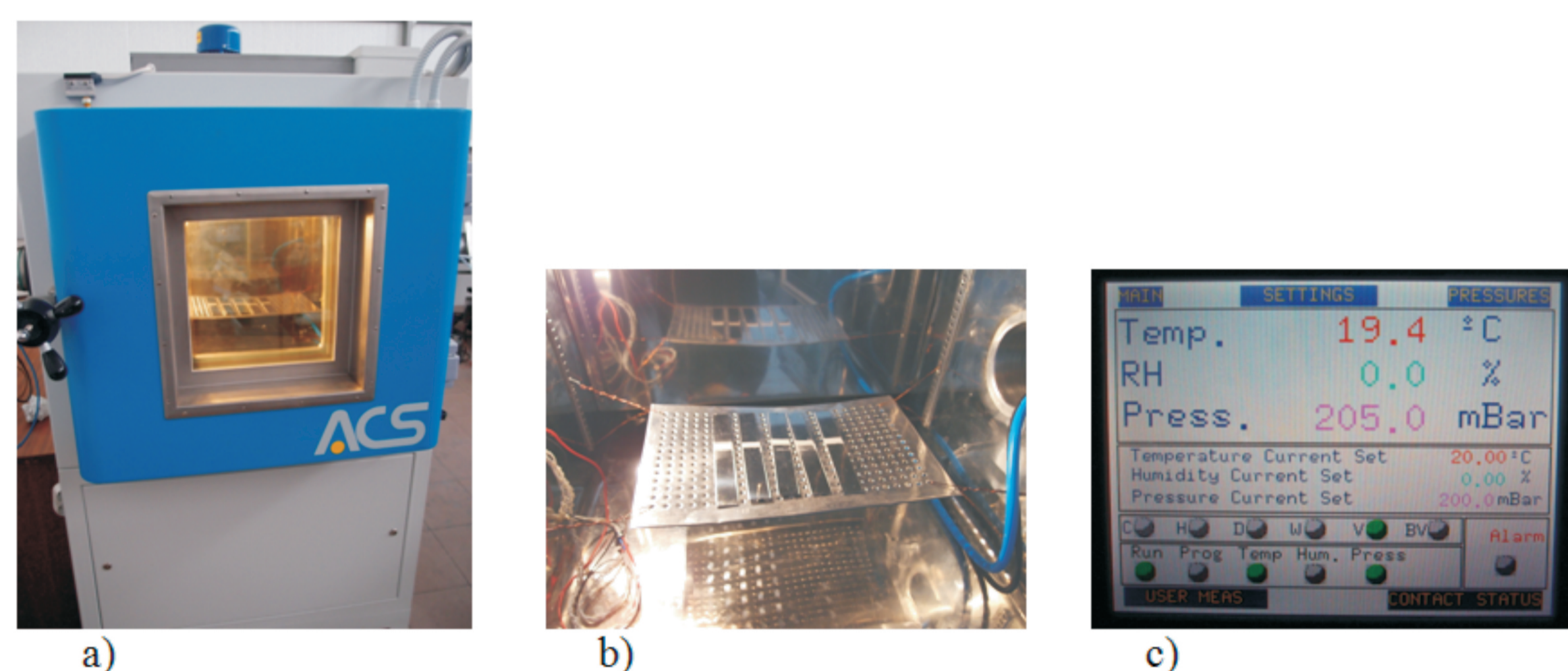
#### Badania w komorze klimatycznej

Badaniom poddano połączenia klejowe wykonane z blachy X6Cr17.

Tabela - Skład chemiczny stali X6Cr17 wg PN-EN 10088-1:1998  
Table - The chemical composition of X6Cr17 steel acc. to PN-EN 10088-1:1998

Pierwiastek	C	Mn	Si	P	S	Cr
Stężenie masowe, %	0,08	1,00	1,00	0,04	0,015	16,0-18,0

Powierzchnia próbek przed sklejaniem była piaskowana w czasie ok. 10 s. pod ciśnieniem 1,5 a. Tak dobrane parametry obróbki pozwalały zachować płaskość próbek, bez niekorzystnych naprężeń własnych. Klejenie odbywało się w uchwycie specjalnym pod obciążeniem ok. 1 kG, klejem Araldit 2011.



Rys. Fotografie: komory (a), widok próbek (b), panel sterowania (c)  
Fig. The photographs of: the chamber (a), the specimen view (b), control panel (c)

Część A. Badanie wpływu zmian ciśnienia na wytrzymałość statyczną na rozciąganie przy stałej temperaturze.

Tabela - Parametry przyjmowane podczas próby  
Table - The parameters performed during the test

Nr próby	1	2	3	4	5	6
Temperatura, °C	T = const. = +20					
Ciśnienie, mBa	1000	800	600	400	200	10

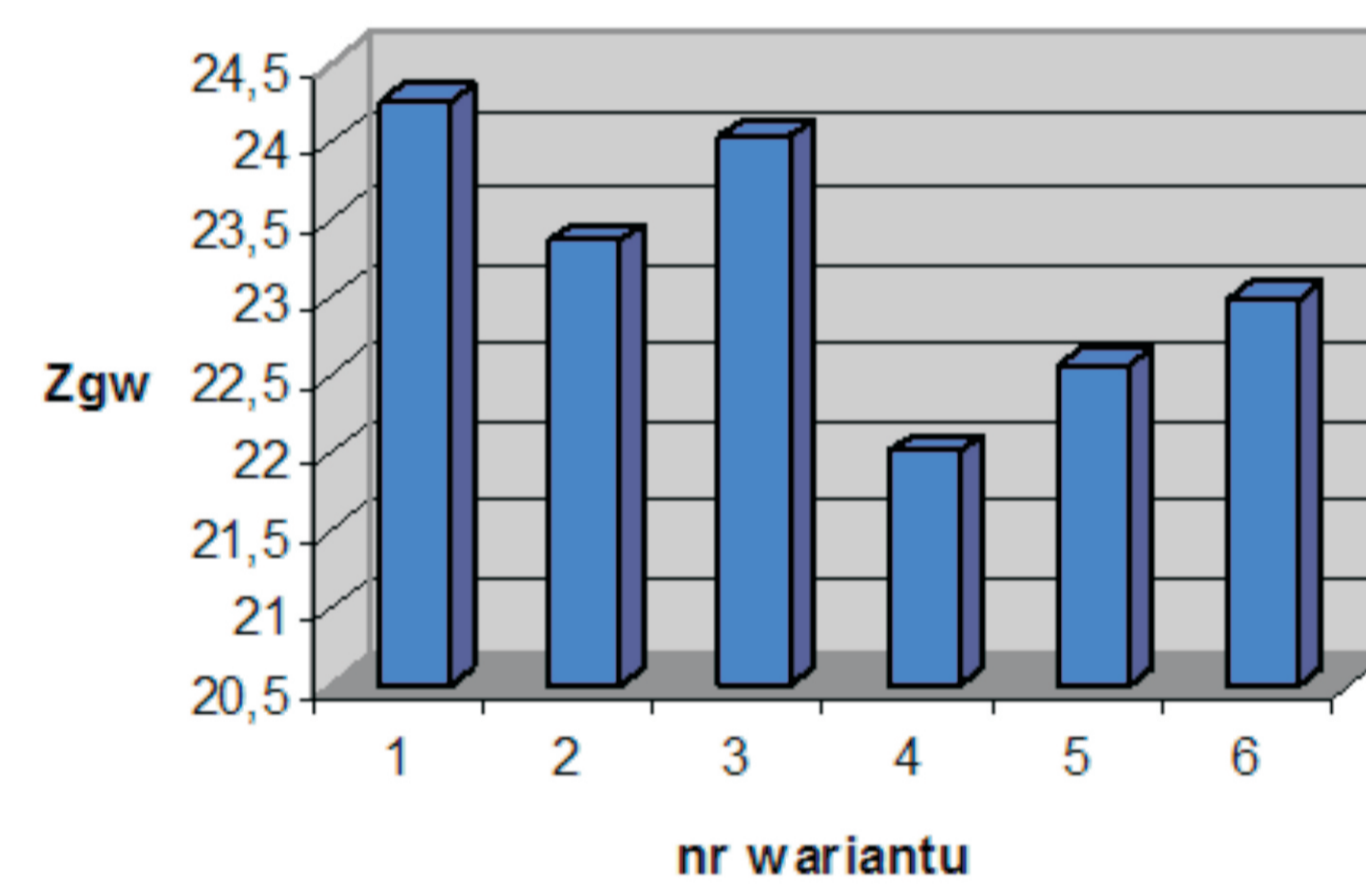
Tabela - Wyniki badań wytrzymałości połączeń w części A  
Table - The results of joints strength tests in part A

Nr próby	P1	P2	P3	P4	P5	P6
P, mBa	1000	800	600	400	200	10
powtórzenie	Wartość siły zrywającej, N					
1	7917,2	7008,7	8241,3	6461,2	6526,7	7205,3
2	7331,7	7453,3	7327,4	6468,9	6916,7	7063,7
3	7491,1	7157,4	7330	7043,5	7409,5	7052,4
4	7716,1	7345,7	7493,7	7109,9	7713,1	7629,8
5	7469,3	7549	7155	7291,6	6696,7	6963,1
Srednia, N	7585,08	7302,82	7509,48	6875,02	7052,54	7182,86
odchylenie standardowe	206,8374	196,337	381,2694	344,4629	443,9239	236,5469
zakładka, mm <sup>2</sup>	A0 = 312,5					
Wytrzymałość na ścinanie	24,27226	23,36902	24,03034	22,00006	22,56813	22,98515



Rys. Zmiany siły zrywającej próbek części A  
Fig. The changes of break force in specimen, part A

#### Wytrzymałość statyczna na ścinanie



Rys. Zmiany wytrzymałości na ścinanie próbek części A  
Fig. The changes of joints strength of specimen in part A

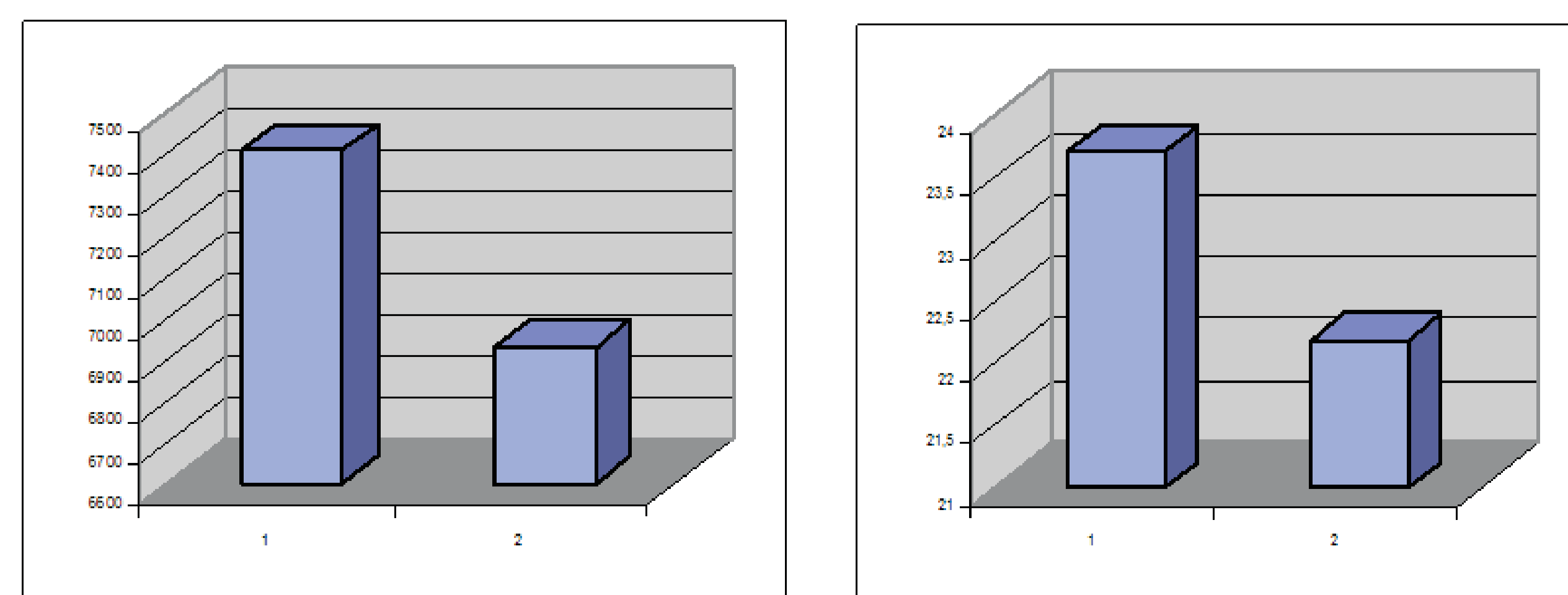
Część B. Badanie wpływu zmian ciśnienia i temperatury na wytrzymałość statyczną na rozciąganie

Tabela - Parametry przyjmowane podczas próby  
Table - The parameters performed during the test

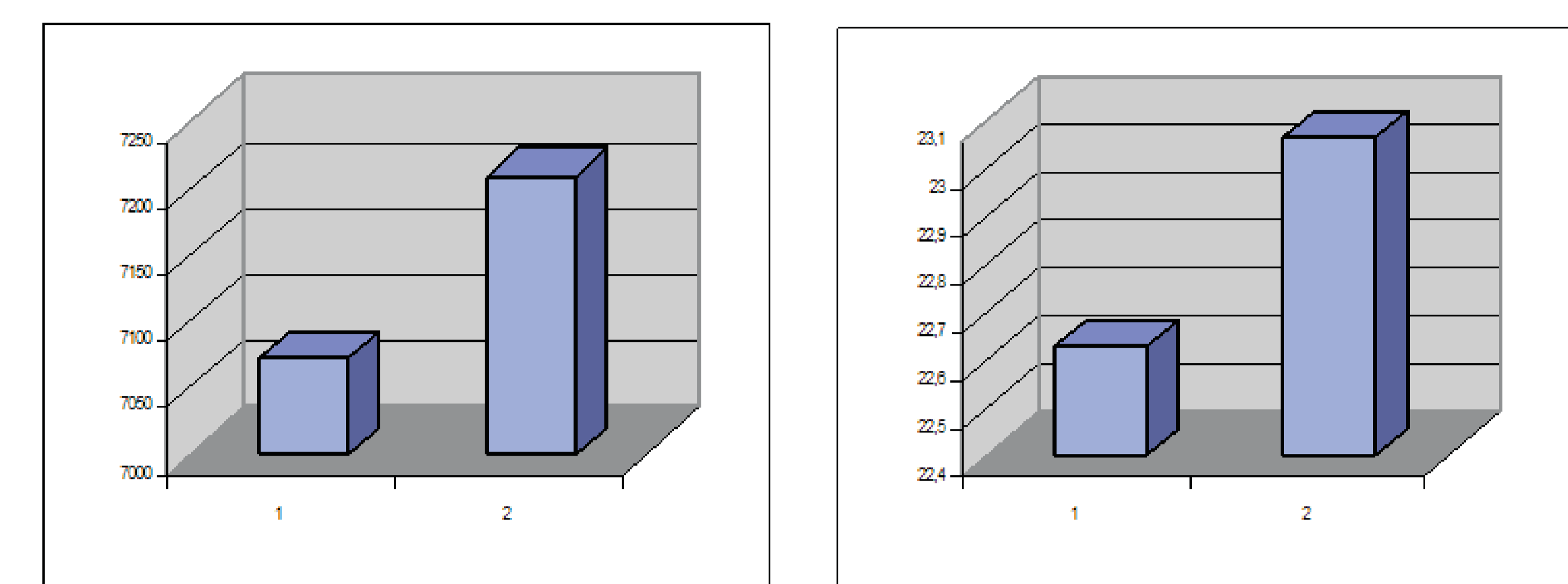
Nr próby	Temperatura, °C	Ciśnienie, mBa
A1	-20	1000
A2		200
A3	-40	1000
A4		200
T1	0	1000
T2	+20	1000
T3	+60	1000
T4		200

Tabela - Wyniki badań wytrzymałości połączeń w części B-I  
Table - The results of joints strength tests in part B-I

Oznaczenie próby	A1	A2	A3	A4
powtórzenie	Wartość siły zrywającej, N			
1	7267,2	7023,8	7330	7043,1
2	7597,1	7294,5	6657,7	6799,2
3	6643,4	6668	6760,4	7168,8
4	7942,2	6629	6683,4	7310,3
5	7614,3	7053,1	7924,4	7725,1
Srednia, N	7412,84	6933,68	7071,18	7209,3
odchylenie standardowe	440,002	251,392	492,5232	307,7971
zakładka, mm <sup>2</sup>	A0 = 312,5			
Wytrzymałość na ścinanie	23,72109	22,18778	22,62778	23,06976



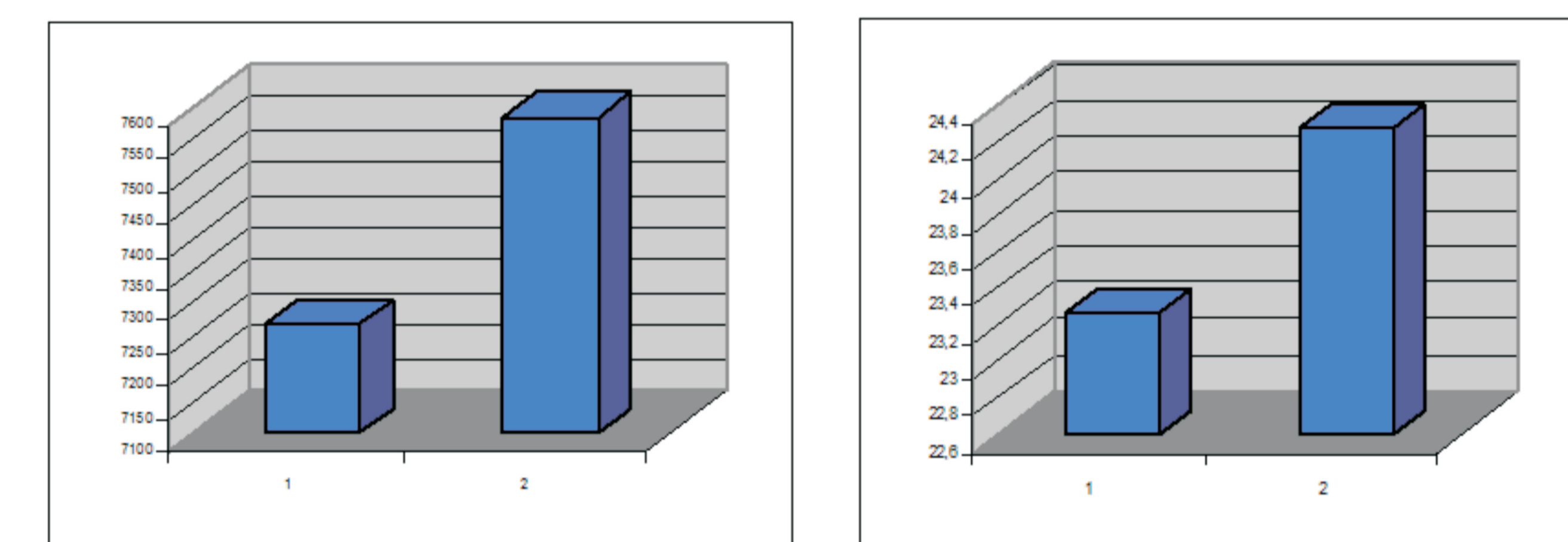
Rys. Porównanie siły zrywającej (a) i wytrzymałości połączeń (b) dla wariantów A1 i A2  
Fig. The comparison of break force (a) and joint strength (b) for A1 and A2 options



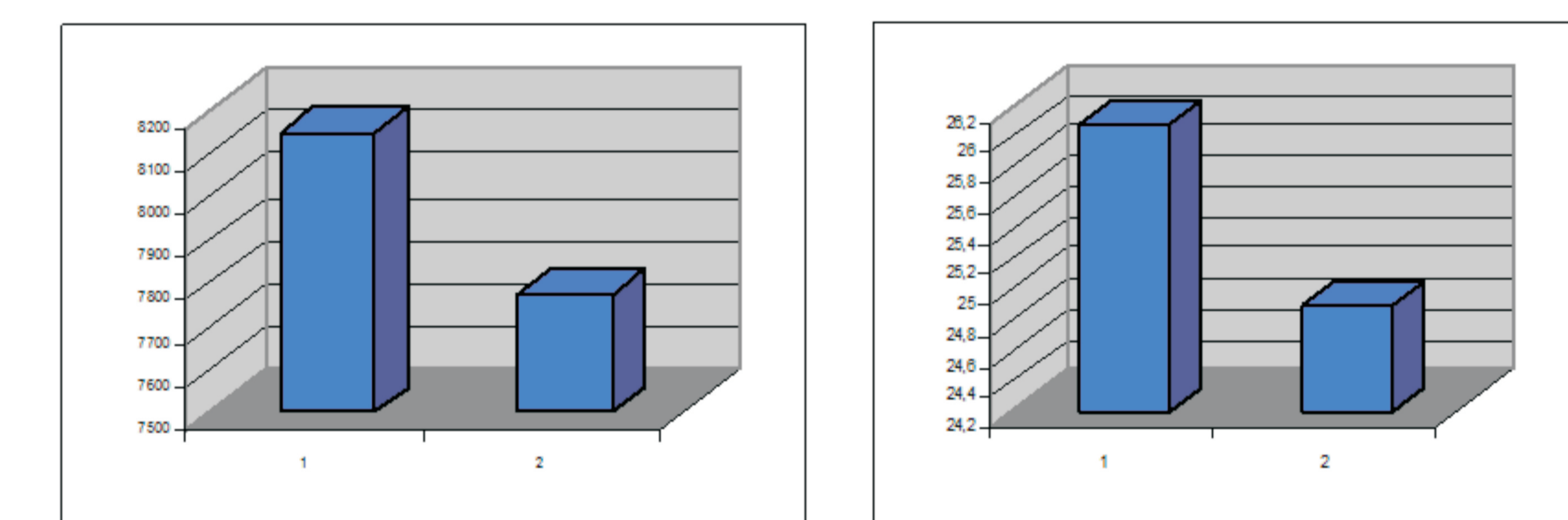
Rys. Porównanie siły zrywającej (a) i wytrzymałości połączeń (b) dla wariantów A3 i A4  
Fig. The comparison of break force (a) and joint strength (b) for A3 and A4 options

Tabela - Wyniki badań wytrzymałości połączeń w części B-II  
Table - The results of joints strength tests in part B-II

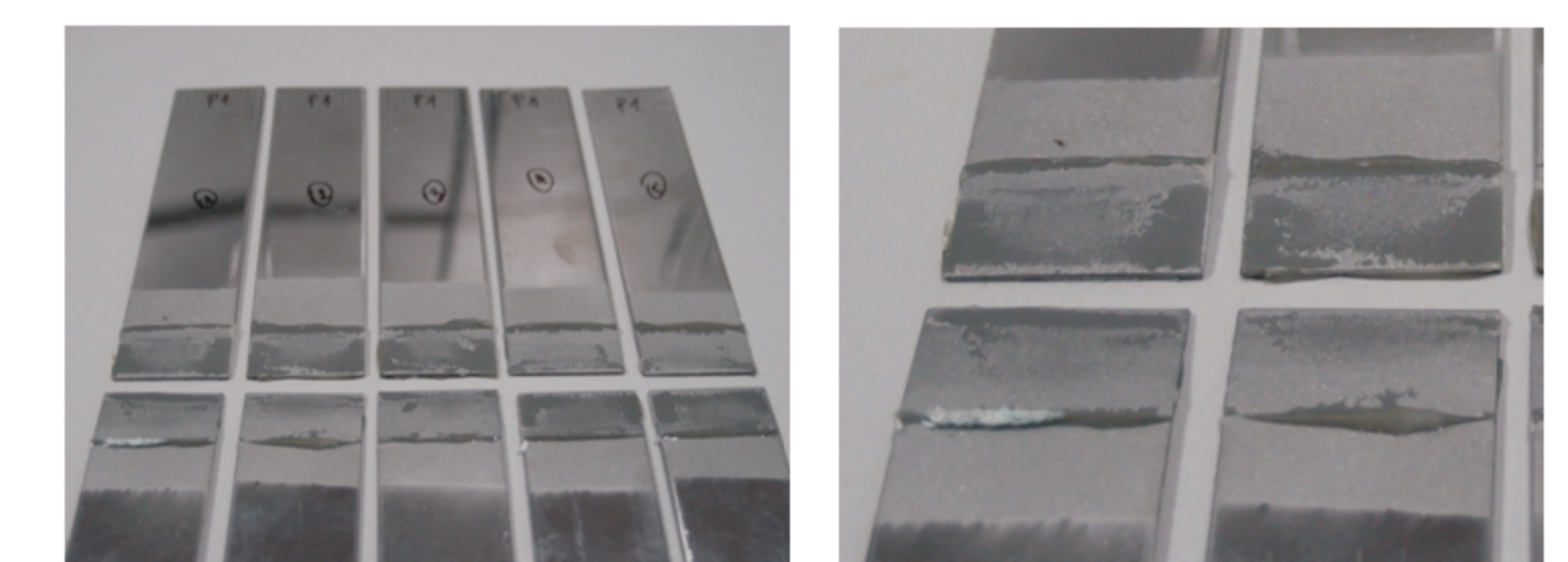
Oznaczenie próby	T1	T2	T3	T4
powtórzenie	Wartość siły zrywającej, N			
1	6626,8	7917,2	8678,2	8203,6
2	8116,2	7331,7	8487,3	7591,2
3	7226	7491,1	7972,9	7686,8
4	7568,1	7716,1	7618,3	7831,3
5	6800,5	7469,3	7987,4	7562,2
Srednia, N	7267,52	7585,08	8148,82	7775,02
odchylenie standardowe	536,8351	206,8374	382,9537	233,9714
zakładka, mm <sup>2</sup>	A0 = 312,5			
Wytrzymałość na ścinanie	23,25606	24,27226	26,07622	24,88006



Rys. Porównanie siły zrywającej (a) i wytrzymałości połączeń (b) dla wariantów T1 i T2  
Fig. The comparison of break force (a) and joint strength (b) for T1 and T2 options



Rys. Porównanie siły zrywającej (a) i wytrzymałości połączeń (b) dla wariantów T3 i T4  
Fig. The comparison of break force (a) and joint strength (b) for T3 and T4 options



Rys. Fotografia wybranych próbek po badaniach wytrzymałości  
Fig. The photograph of selected specimen after strength tests

#### Wnioski Conclusions

1. Zmiana ciśnienia przy stałej temperaturze w badaniach próbek P1-P6 w zakresie od 1000 do ok. 10 mBa spowodowała początkowy spadek wytrzymałości połączeń na ścinanie (P2). Następnie jednak zauważono wzrost (P3), i ponowny - znacznie większy spadek w przypadku próbki P4. Począwszy od próbki P4 obserwowano stopniowy, nieznaczny wzrost wytrzymałości połączeń. Gwałtowny spadek i ponowny stopniowy wzrost wytrzymałości dla P4-P6 może świadczyć o tym, że połączenia przekroczyły pewną granicę utraty wytrzymałości.
2. Zmiany ciśnienia wpływają na utratę wytrzymałości statycznej na ścinanie połączeń klejowych.
3. Badanie próbek A1 i A2 w warunkach ujemnej temperatury (-20C) i zmiennego ciśnienia daje podstawę do stwierdzenia, iż spadek ciśnienia powoduje istotne zmniejszenie wytrzymałości. Jednak w podobnej próbie A3 i A4, przy temperaturze -40C sytuacja jest odwrotna. Zatem istnieje prawdopodobieństwo, że twierdzenie o pewnej granicy wytrzymałości (dla temperatury i ciśnienia właściwych tylko temu klejowi i materiałowi klejonemu) jest prawdziwe.
4. Wyniki prób T1 i T2 wskazują na wzrost wytrzymałości połączeń w przyjętym zakresie temperatur od 0 do +20C, przy ciśnieniu normalnym.
5. Z kolei wyniki prób T3 i T4 mówią o wpływie spadku ciśnienia na wytrzymałość, obniżenie z 1000 do 200 mBa dało spadek wytrzymałości.
6. Zniszczenie spoiny miało w każdym przypadku charakter adhezyjny, zatem istotne jest zbadanie przedziałów temperatur i ciśnień, w których następuje utrata własności spoiny.