Blachy aluminiowe EN AW-6061 T651 (PA45)

Specyfikacja

Opis Produktu

Stop **EN AW-6061** w stanie T651 to jeden z najpopularniejszych stopów aluminium na świecie – szczególnie w Ameryce Północnej, gdzie jest synonimem aluminium przemysłowego. W Europie jego najbliższym odpowiednikiem jest EN AW-6082 T6/T651 , jednak 6061 zachowuje własną niszę dzięki wybitnym właściwościom anodowania twardego, dopuszczeniu do zastosowań lotniczych (AMS-QQ-A-250/11) i nieco wyższej granicy plastyczności niż 6082 przy zbliżonym Rm.

Stan T651 oznacza: przesycanie w roztworze stałym (Solution Heat Treatment) → szybkie chłodzenie (hartowanie) → kontrolowane rozciąganie na zimno o 1,5–3% (stress relief) → sztuczne starzenie. Kluczową różnicą między T651 a T6 jest właśnie etap rozciągania, który eliminuje naprężenia szczątkowe powstałe podczas hartowania. Przekłada się to bezpośrednio na stabilność wymiarową po frezowaniu – płyty T651 wykazują znacznie mniejsze odkształcenia po głębokiej obróbce CNC niż T6.

Stop spełnia wymagania dopuszczenia do kontaktu z żywnością . Spawalność TIG/MIG jest możliwa , ale spoiny tracą właściwości stanu T651 w strefie wpływu ciepła – wymagane ponowne hartowanie cieplne, jeśli parametry mechaniczne mają być zachowane.

KLUCZOWE PARAMETRY

R m [MPa]	R p0,2 [MPa]	Twardość HBW	Wydłużenie A50 [%]	Gęstość [g/cm³]
≥ 260–290 MPa	≥ 220-240 MPa	80-88	2–12 %	2,70

SKŁAD CHEMICZNY

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Inne (każdy)	Inne (suma)	Al
0,40–0,80	max 0,70	0,15–0,40	max 0,15	0,80–1,20	0,04–0,35	max 0,25	max 0,15	max 0,05	max 0,15	reszta
krzem	żelazo	miedź	mangan	magnez	chrom	cynk	tytan	inne (każdy)	inne (suma)	glin

Norma bazowa: EN 573-3. Głównymi pierwiastkami stopowymi są magnez (0,80–1,20%) i krzem (0,40–0,80%) tworzące fazę utwardzającą Mg_2Si, oraz miedź (0,15–0,40%) podnosząca wytrzymałość. Obecność Cu > 0,15% obniża spawalność w porównaniu do 6082.

SPECYFIKACJA TECHNICZNA

Parametr	Wartość (T651)
Wytrzymałość na rozciąganie Rm	260–290 MPa
Granica plastyczności Rp0,2	≥ 220 MPa
Twardość HBW	80-88
Wydłużenie przy zerwaniu A50	2–12 %

Wartości wg EN 485-2 i ASTM B209. Stan T651: przesycony, hartowany, odprężony przez rozciąganie (1,5–3%), sztucznie starzony.

Zalecane minimalne promienie gięcia (gięcie na zimno, stan T651)

Grubość	Warianty dostępne w sklepie [mm]	Min. promień 90° [×t]	Min. promień 180° [×t]	Uwagi
≥ 1,5-3,0 mm	brak	3,5×t	nie zalecane	Możliwe. Duże ryzyko sprężynowania. Wymagany naddatek kąta.
≥ 3,0-6,0 mm	brak	4×t	nie zalecane	Możliwe. Duże ryzyko sprężynowania. Wymagany naddatek kąta.
≥ 6,0-12,5 mm	8, 10, 12	5×t	nie zalecane	Gięcie możliwe z dużym promieniem. Zalecane wyżarzenie.
≥ 12,5-100,0 mm	15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100	nie zalecane	nie zalecane	Materiał przeznaczony do obróbki CNC. Gięcie wykluczone.

t = grubość materiału. Stan T651 charakteryzuje się niską podatnością na gięcie – materiał jest twardy i kruchy przy gięciu na zimno. Minimalne promienie są znacznie większe niż dla serii 5xxx. Gięcie grubości ≥ 30 mm na zimno jest wykluczone. Każde gięcie w stanie T651 wymaga uwzględnienia znacznego sprężynowania (springback ≈ 15–25°).

Właściwości fizyczne

Parametr	Wartość

Gęstość	2,70 g/cm³
Moduł sprężystości E	69,5 GPa
Moduł sprężystości G	26 GPa
Przewodność cieplna	155-180 W/mK
Rozszerzalność cieplna	23,3 µm/mK
Ciepło właściwe	896 J/kgK
Temperatura pracy ciągła / chwilowa	150°C / 180°C
Przewodność elektryczna	40-46,5 % IACS

PARAMETRY TECHNOLOGICZNE (SKALA 1–5)

Parametr	Ocena
Skrawalność	4 / 5
Anodowanie twarde	5 / 5
Anodowanie ochronne	5 / 5
Anodowanie dekoracyjne	3 / 5
Polerowalność	4 / 5
Stabilność kształtu po obróbce CNC (T651)	4 / 5
Odporność na korozję (morska)	2 / 5
Odporność na korozję (atmosferyczna)	4 / 5
Odporność na korozję (naprężeniowa)	3 / 5
Kontakt z żywnością	TAK
Spawalność – WIG (TIG)	5 / 5
Spawalność – MIG	3 / 5
Spawalność – MIG	3 / 5
Spawalność – rezystancyjne	4 / 5
Spawalność – wiązką elektronów (EB)	4 / 5
Podatność na gięcie (T651)	2 / 5
Hartowność cieplna	5 / 5

Objaśnienie skali:

1 – brak możliwości / brak przydatności technologicznej

2 – ograniczone zastosowanie, wymaga ściśle kontrolowanych środków ostrożności

3 – średnia przydatność (standardowe trudności obróbcze)

4 – dobra charakterystyka (zalecane do większości zastosowań)

5 – charakterystyka wybitna (materiał optymalizowany pod dany proces)

OZNACZENIA I NORMY

Norma europejska – skład chemiczny	EN 573-3 (AlMg1SiCu)
Werkstoffnummer	3.3211
Oznaczenie stanu	T651 – przesycony, hartowany, odprężony przez rozciąganie (1,5–3%)
Norma mechaniczna – blachy	EN 485-2 (EU) / ASTM B209 (USA)
Norma ASTM (odpowiednik)	ASTM B209 / Alloy 6061-T651
Nazwa handlowa / skrót	PA45, Anticorodal 100
Tolerancja grubości	wg EN 485-3 (blachy grube i płyty)
Tolerancja płaskości	wg EN 485-3
Tolerancja cięcia formatu	-0 / +3 mm
Formaty fabryczne	1000×2000 mm, 1500×3000 mm
Uwaga dot. oznaczenia T651 vs T6	T651 = T6 + kontrolowane rozciąganie redukujące naprężenia szczątkowe. Stabilność wymiarowa po CNC lepsza niż T6. Bez różnicy w składzie chemicznym.

ZASTOSOWANIA

Obróbka CNC – maszyny i urządzenia	Korpusy maszyn, podpory, płyty bazowe, wały, tuleje, bloki hydrauliczne – skrawalność 4/5, stabilność T651.
Przemysł lotniczy i kosmiczny	Strukturalne elementy płatowców, żebra, wzmocnienia, wsporniki – standard lotniczy 6061-T651 wg AMS-QQ-A-250/11.
Budownictwo i architektura	Ramy okienne i drzwiowe, profile elewacyjne, elementy podkonstrukcji – anodowanie twarde 5/5.
Transport i pojazdy	Elementy podwozia, ramownice, stopnie, platformy załadunkowe, skrzynie biegów lekkich pojazdów.
Przemysł elektrotechniczny	Szyny zbiorcze, radiatory, obudowy elektroniki – przewodność elektryczna 40–47% IACS.

Sprzęt sportowy i rekreacja	Ramy rowerowe, kije narciarskie, elementy sprzętu wspinaczkowego, wędki – dobry stosunek Rm do masy.
Formy i oprzyrządowanie	Formy wtryskowe i rozdmuchowe małej i średniej złożoności, przyrządy montażowe, matryce – alternatywa dla 7075 przy niższych kosztach.

WAŻNE OGRANICZENIA

⚠ **Spawanie – utrata właściwości w strefie HAZ**

Spawalność TIG/MIG oceniana na 3/5. Podczas spawania strefa wpływu ciepła (HAZ) powraca do stanu wyżarzonego (O) i traci właściwości T651 – Rm spada lokalnie do ok. 175 MPa, Rp0,2 do ok. 110 MPa. Spoiny są bezpieczne przy obciążeniach statycznych i mają pełną ciągłość materiału, ale konstrukcje spawane z 6061-T651 nie zachowują właściwości stanu T. Jedynym sposobem przywrócenia właściwości po spawaniu jest ponowne hartowanie całego elementu (przesycanie + starzenie), co jest praktyczne tylko dla małych detali.

⚠ **Gięcie na zimno – wysoki springback i ryzyko pęknięć**

Stan T651 jest kruchy przy gięciu. Promienie mniejsze niż 5×t dla grubości 6-12,5 mm prowadzą do pęknięć na zewnętrznej powierzchni gięcia. Sprężynowanie (springback) jest duże – kąt narzędziowy musi być przesadzony o 15–25° w zależności od grubości i promienia. Do gięcia grubości ≥ 30 mm wymagane wyżarzenie do stanu O (ok. 415°C przez ≥ 2 h), po czym ewentualne ponowne hartowanie.

⚠ **Korozja w środowisku morskim i chlorkowym**

Odporność na korozję morską 2/5 – stop jest podatny na korozję wżerową i szczelinową w obecności chlorków (woda morska, roztopy drogowe). Do zastosowań morskich lub w środowiskach z chlorkami wymagane anodowanie twarde (≥ 25 µm) lub lakierowanie. Nie stosować jako konstrukcja niezabezpieczona w strefie pływów lub bezpośredniego oddziaływania wody morskiej.

⚠ **Różnica T651 vs T6 – ważna przy zamówieniu**

Oznaczenie T651 (z rozciąganiem stress-relief) i T6 (bez rozciągania) ma identyczny skład chemiczny i zbliżone właściwości mechaniczne, ale różni się stabilnością wymiarową po obróbce CNC. Płyty T6 mogą wykazywać duże odkształcenia po głębokiej obróbce. Przy zamówieniu należy wyraźnie podać stan – T651 jest standardem dla płyt przeznaczonych do obróbki CNC.

PORÓWNAJ Z INNYMI STOPAMI

Właściwość	EN AW-6061 T651	EN AW-6082 T651	EN AW-7075 T651	EN AW-2024 T351
Rm [MPa]	260–290	260–310	460–570 ★	440–490 ★
Rp0,2 [MPa]	≥ 240 (EN)	240–260	320–470 ★	290–350 ★
Skrawalność	4/5	4/5	5/5 ★	4/5

Spawalność TIG/MIG	3/5	4/5 ★	1/5	1/5
Anodowanie twarde	5/5 ★	4/5	5/5 ★	2/5
Odporność atmosferyczna	4/5	4/5	2/5	2/5
Podatność na gięcie	2/5	3/5	1/5	1/5
Kontakt z żywnością	TAK ★	TAK ★	NIE	NIE
Dostępność	★ niska	★ wysoka	★ wysoka	★ niska
Typowe zastosowanie	CNC, lotnictwo, budownictwo	Konstr. ogólne	CNC, formy, obronny	Lotnictwo, konstr. wys.

★ = najlepsza ocena w danej kategorii. Dane wg EN 573-3, EN 485-2, ASTM B209. EN AW-2024 T351 dodany jako stop lotniczy wyższego segmentu. EN AW-6061 i 6082 mają porównywalny Rm, ale 6061 wyróżnia się anodowaniem i dostępnością w standardach ASTM/AMS.