

# Wysoce wydajny proces FAST tłoczenia na gorąco paneli tytanowych

Mateusz Kopec<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

<sup>2</sup> Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, 02-106 Warsaw, Pawinskiego 5B, Poland

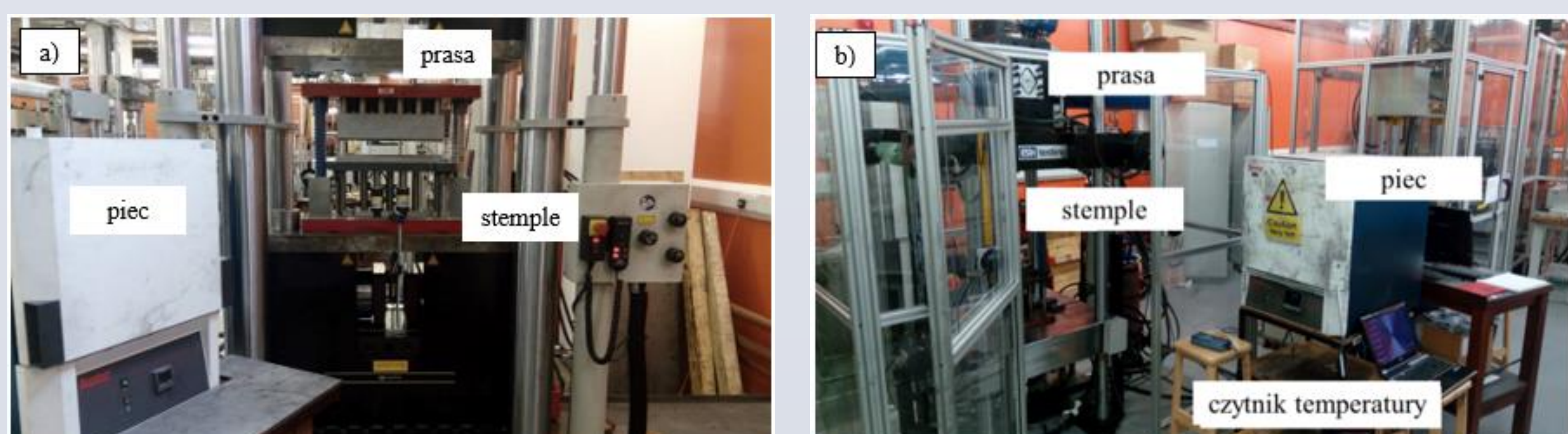
## Abstrakt

Zapotrzebowanie na materiały o niskiej gęstości i masie oraz wysokiej wytrzymałości w sektorze lotnictwa zwiększyło się dzięki ambitnym celom zredukowania konsumpcji paliwa pojazdów lotniczych oraz obniżenia produkcji CO<sub>2</sub>. Konwencjonalne technologie formowania blach tytanowych wymagają bardzo niskich prędkości formowania, temperatury powyżej 950°C oraz jednoczesnego wygrzewania matryc oraz materiału wsadowego w trakcie procesu, co przekłada się na czasochłonność oraz wysoki wydatek energetyczny tych metod. Alternatywną metodą formowania stopów tytanu staje się technologia Fast Light Alloys Stamping Technology (FAST) wykorzystująca szybki proces nagrzewania oraz formowanie przeprowadzane za pomocą matryc w temperaturze otoczenia. Wpływ parametrów nagrzewania na właściwości mechaniczne po formowaniu zbadano za pomocą wysokotemperaturowej próby rozciągania. Zaobserwowano, że stop Ti6Al4V wygrzany do 950°C z szybkością nagrzewania 100°C/s, a następnie schłodzony do 700°C i poddany rozciąganiu charakteryzował się wydłużeniem ponad 3 razy wyższym niż przy konwencjonalnej próbie rozciągania w 700°C z wygrzewaniem w tej temperaturze. Technologia FAST pozwoliła z powodzeniem uformować tytanowy usztywniacz skrzydeł w czasie krótszym niż 70 sekund, łącznie z nagrzewaniem, przenoszeniem materiału wsadowego i formowaniem zachowując 90% właściwości mechanicznych materiału wyjściowego. Element ten jest pierwszym na świecie pełnowymiarowym, uformowanym usztywniaczem skrzydła, którego wykonanie nie było możliwe z wykorzystaniem komercyjnie dostępnych technik. Implementacja technologii FAST pozwala zwiększyć efektywność procesu formowania o ponad 80%, redukując czas formowania z ~6 min do ~1 min.

## Metodyka badań

Właściwości mechaniczne stopu tytanu Ti6Al4V w temperaturze pokojowej jak i podwyższonej zostały scharakteryzowane z użyciem termo-mechanicznego systemu pomiarowego Gleeble 3800. W badaniach wykorzystano próbki płaskie o długości bazy pomiarowej równej 46 mm, szerokości 12 mm oraz grubości 1,5 mm. W trakcie wysokotemperaturowej próby rozciągania, próbki były podgrzewane z szybkością 2°C/s do temperatury z zakresu od 600°C do 900°C tak, aby po osiągnięciu temperatury testu wykonać go natychmiastowo bez dodatkowego wygrzewania próbki w zadanej temperaturze. Po przeprowadzonej próbie rozciągania, próbki były chłodzone z użyciem sprężonego powietrza do temperatury pokojowej. Badania twardości zostały przeprowadzone z użyciem metody Vickersa stosując obciążenie 10 kgf indentujące próbkę w obszarze deformacji przez 10 sekund.

Formowanie tytanowych komponentów oraz panelu usztywniającego skrzydło samolotowe odbyło się odpowiednio z użyciem 250 tonowej prasy Instron oraz 25 tonowej prasy ESH o wysokiej prędkości ruchu siłownika (do 1000 mm/s) (Rys.1). Oba stanowiska składały się również z pieca zapewniającego wygrzanie elementu do ustalonej temperatury oraz zestawu termopar pozwalającego monitorować temperaturę w trakcie procesu. Formowanie tytanowych kształtek odbyło się w zakresie temperatury od 600 do 950°C w celu określenia najbardziej optymalnych warunków temperaturowych. Formowanie wstępne prostych kształtek (90x8x1,5mm) odbyło się z zadaniem prędkości przesuwu siłownika 10 mm/s na prasie Instron. Natomiast formowanie docelowe pełnowymiarowego komponentu tytanowego odbyło się z kontrolowaną prędkością 250 mm/s w temperaturze 850°C używając prasy ESH oraz dedykowanego zestawu matrycy i stempla zaprojektowanego w Imperial College London. Próbkę do formowania usztywniacza o wymiarze 200x65x1,6 mm były podgrzewane do określonej temperatury (850°C) a następnie wygrzewane przez 60 sekund w celu zapewnienia jej stabilności. Temperatura w trakcie procesu wygrzewania i formowania była monitorowana z użyciem zestawu termopar połączonego z czytnikiem temperatury. W m-kształtnych elementach użyto jednej termopary umiejscowionej na środku próbki zaś na panelach użyto dwóch termopar - jednej w połowie długości, drugiej w połowie szerokości komponentu. Wraz z osiągnięciem stabilnej, odpowiednio wysokiej temperatury próbka zostaje przeniesiona z pieca do strefy formowania i za pomocą prasy (stempla i matrycy) natychmiastowo ukształtowana z prędkością 250 mm/s. Czas od momentu przeniesienia próbki do chwili uformowania wynosi około 8 sekund. Testy formowania zostały wielokrotnie powtórzone w celu sprawdzenia powtarzalności procesu.



Rys.1 Stanowiska do formowania: (a) kształtek o prostej geometrii; (b) pełnowymiarowego komponentu.

Prostopadłościennym próbki do formowania usztywniacza zostały przedstawione na Rys. 2. Każda z nich została otrzymana przez gilotynowe cięcie blach tytanowych przeprowadzone w kierunku walcowania tej blachy. Powierzchnie próbki oraz stempla zostały zabezpieczone lubrykantem protekcyjno-poślizgowym (azotek boru) zapewniającym ochronę przed utlenieniem w trakcie wygrzewania jak i zmniejszającym tarcie między próbką a narzędziami do formowania. Na rysunku widoczne są również termopary zamocowane do krawędzi próbki.



Rys.2 Próbkę do formowania pełnowymiarowych komponentów.

## Wyniki i dyskusja

### 4.1 Charakterystyka materiału w stanie surowym

W badaniach wykorzystano komercyjny stop tytanu Ti6Al4V o składzie chemicznym przedstawionym w Tabeli 1. Podstawowe właściwości mechaniczne zostały scharakteryzowane na podstawie jednoosiowej próby rozciągania w temperaturze pokojowej oraz pomiarów twardości metodą Vickersa. Wybrane właściwości zostały przedstawione w Tabeli 2. Badany w temperaturze pokojowej materiał cechuje się wysoką sztywnością i relatywnie wysoką twardością. Twardość materiału po przeprowadzonej próbie rozciągania wzrosła do 380 HV10 przez wystąpienie lokalnego umocnienia odkształceniowego materiału.

Tab. 1. Skład chemiczny stopu tytanu w stanie wyjściowym

Wt. %	C	N	O	H	Fe	Al	V	Ti
<b>Ti6Al4V</b>	0,08	0,05	0,2	0,15	0,4	6,8	4,5	Bal.

Tab. 2. Właściwości mechaniczne stopu tytanu w stanie wyjściowym

E [GPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A [%]	HV10
97 (±5)	1120 (±20)	850 (±20)	8 (±1)	360 (±10)

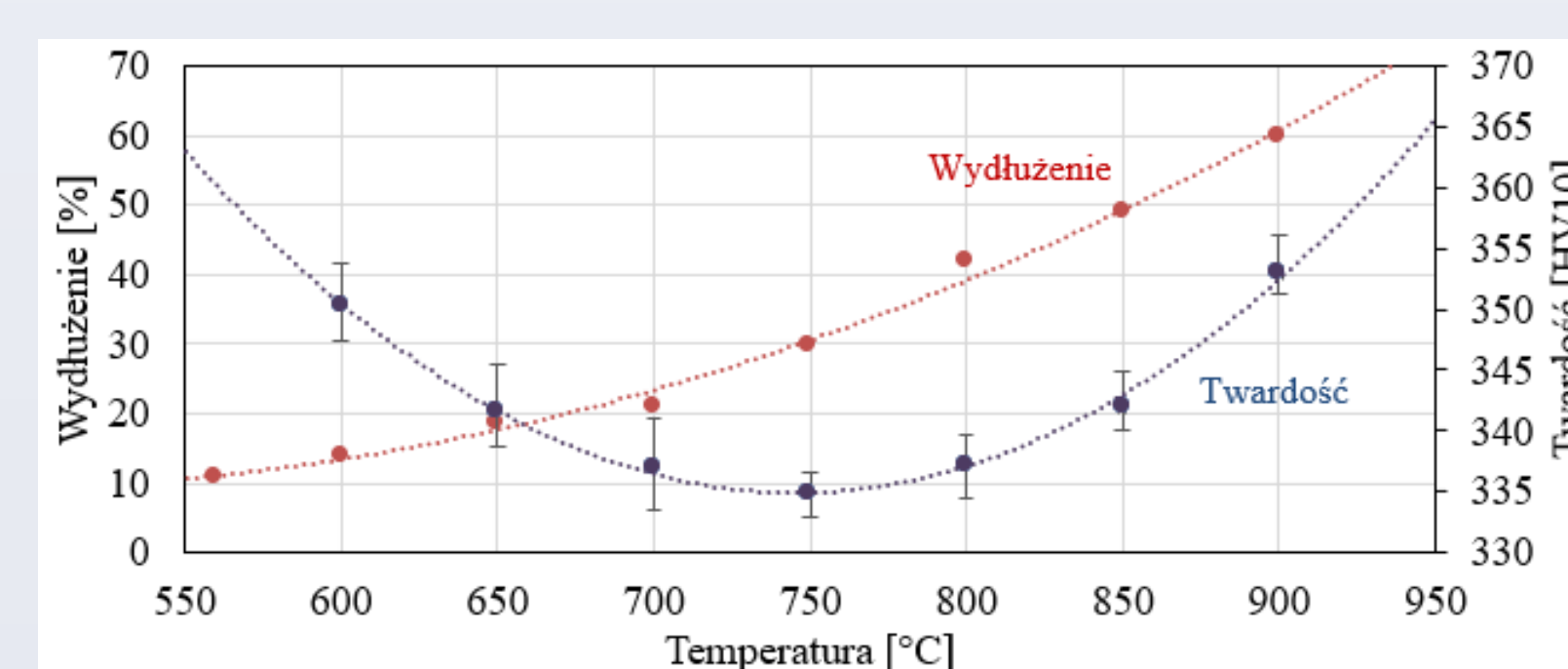
### 4.2 Wpływ temperatury oraz prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne stopu tytanu Ti6Al4V

Wyznaczenie optymalnych warunków temperaturowych dla formowania stopu tytanu odbyło się poprzez przeprowadzenie wysokotemperaturowej, jednoosiowej próby rozciągania w temperaturze z zakresu 600°C - 900°C z zachowaniem stałej prędkości odkształcenia 1 s<sup>-1</sup>. Wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tab.3) oraz wykresu zbiorczego (Rys.3). Zaobserwowano jednoczesny wzrost wydłużenia wraz ze wzrostem temperatury. Zadawalające wydłużenie w zakresie od 30 do 60 % osiągnięto przy zastosowaniu temperatury odkształcenia z przedziału od 750 do 900°C.

Tab. 3. Właściwości mechaniczne stopu tytanu odkształconego w wysokiej temperaturze.

Temperatura [°C]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	HV10
600	600	12	350
650	533	18	341
700	470	20	337
750	401	29	334
800	337	41	337
850	263	49	341
900	200	60	352

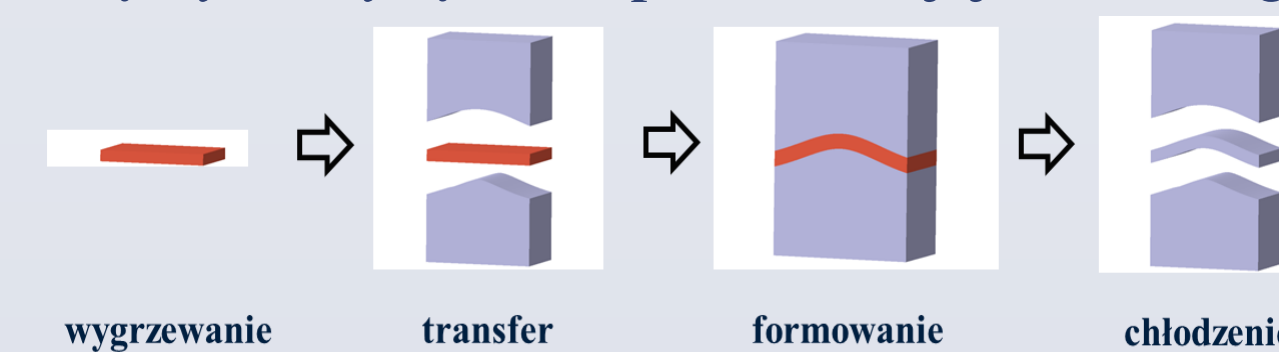
Próbki wytrzymałościowe po przeprowadzonych próbach wysokotemperaturowego rozciągania poddano badaniu twardości. Spadek twardości w przedziale temperatury 600 - 750°C spowodowany został zdrowieniem materiału poddanego odkształceniu w relatywnie wysokiej temperaturze. Dalszy wzrost twardości wraz ze zwiększeniem temperatury deformacji związany był z przemianami mikrostrukturalnymi charakterystycznymi dla stopów tytanu w danym reżimie temperaturowym. Wzrost temperatury spowodował zwiększenie zawartości fazy β w objętości materiału i jednocześnie umocnienie materiału.



Rys.3 Zależność wydłużenia i twardości w funkcji zmiany temperatury dla stopu Ti6Al4V.

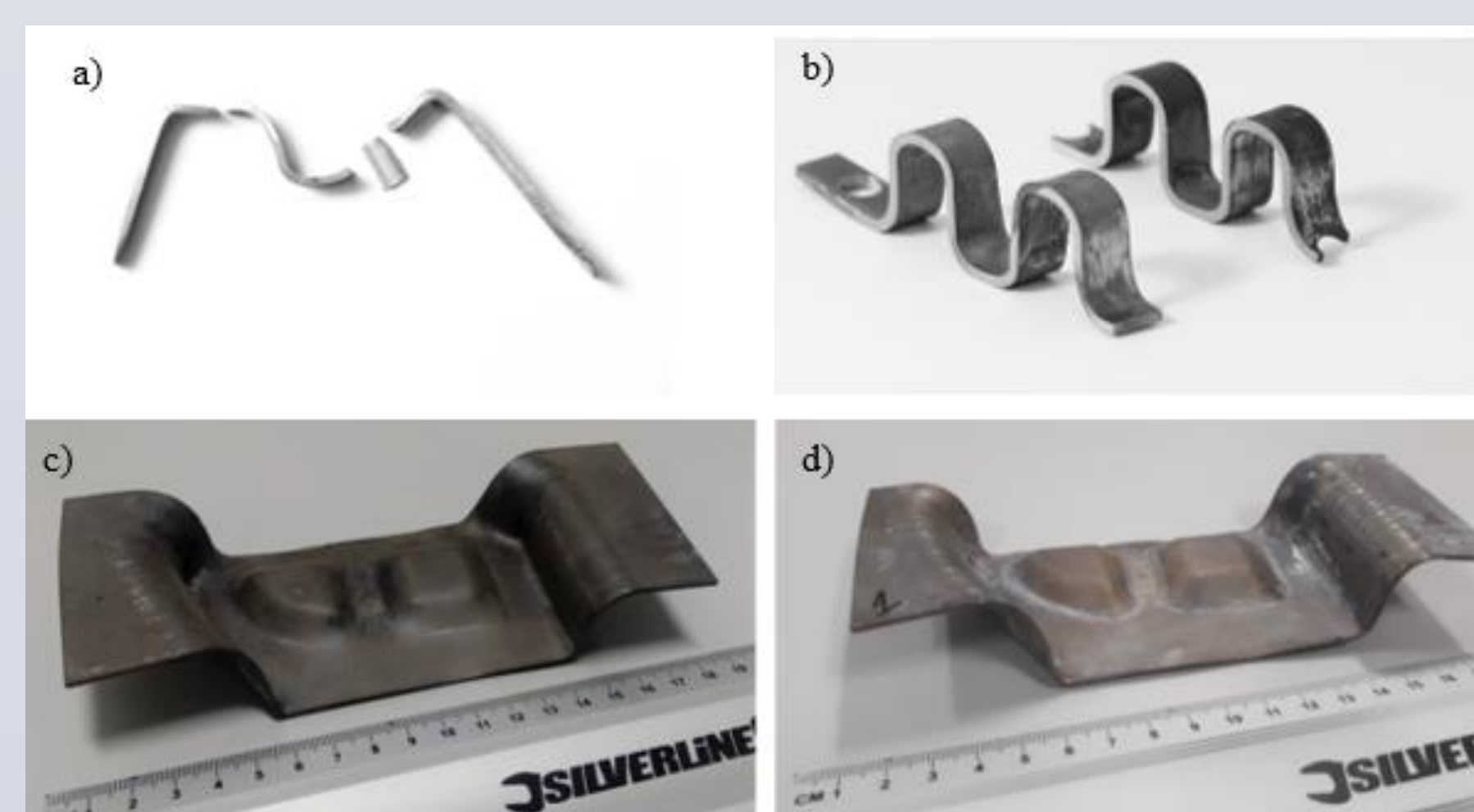
### 3.3 Formowanie na gorąco stopu Ti6Al4V

Proces formowania na gorąco stopów tytanu można podzielić na cztery etapy (Rys. 4): wygrzewanie próbki w piecu, transfer próbki w celu formowania, formowanie i chłodzenie próbki. Monitorowanie i kontrola temperatury próbki w trakcie procesu wpływa zarówno na formowalność materiału jak i na jego właściwości po formowaniu. W tym celu użyto termopar przymocowanych do powierzchni próbki. W pierwszym etapie próbka była podgrzewana do zadanej temperatury w konwencjonalnym piecu a następnie wygrzewana przez 180 sekund tak, aby zapewnić równomierny rozkład temperatury w jej objętości. Po tym czasie próbka została przeniesiona w obszar formowania i natychmiastowo ukształtowana za pomocą narzędzi będących w temperaturze pokojowej. Próbkę pozostaje w przestrzeni między matrycą a stemplem aż do jej całkowitego wystudzenia.



Rys.4. Schemat procesu formowania na gorąco

Stopy tytanu charakteryzują się niską odkształcalnością w temperaturze pokojowej przez co nie jest możliwe formowanie nawet prostych kształtów w tych warunkach (Rys. 5a). Próby formowania tytanowych kształtek o relatywnie prostej geometrii przeprowadzone zostały z powodzeniem w przedziale temperatury 750 - 850°C (Rys. 5b). Formowanie poniżej i powyżej ustalonego zakresu skutkowało wystąpieniem licznych pęknięć powierzchniowych. Ostateczna weryfikacja poprawności założonej technologii została przeprowadzona w trakcie próby formowania usztywniacza skrzydła samolotu w jego faktycznych rozmiarach. Próbkę ze stopu tytanu o wymiarach 200x65x1,6 mm pokryta azotkiem boru była podgrzewana a następnie wygrzewana przez 60 sekund do temperatury 850°C w celu zapewnienia jej stabilności. Wraz z osiągnięciem zamierzonej temperatury próbka została przeniesiona z pieca do strefy formowania i natychmiastowo ukształtowana z prędkością 250 mm/s. Proces przeprowadzono wielokrotnie w celu potwierdzenia powtarzalności zaproponowanej technologii. Ukształtowane elementy bez widocznych pęknięć zostały przedstawione na Rys. 5 c, d.



Rys.5 Ukształtowane w trakcie formowania na gorąco usztywniacze skrzydeł.

## Wnioski

Jednym z głównych wyzwań we wszystkich technikach formowania na gorąco stopów tytanu jest zwiększenie wydajności produkcyjnej przez minimalizację czasu formowania z jednoczesnym zachowaniem wysokiej jakości formowanych komponentów. Konwencjonalnie stosowane techniki formowania na gorąco takie jak formowanie superplastyczne wymagają bardzo niskich prędkości odkształcenia (poniżej 0,1s<sup>-1</sup>), wysokiej temperatury (powyżej 900°C) oraz jednoczesnego podgrzewania narzędzi do formowania jak i samego półfabrykatu. Podczas formowania w takich warunkach, mikrostruktura wyjściowa znacząco się zmienia, co przekłada się na formowalność materiału jak i jego właściwości po formowaniu. Dzięki zastosowaniu zaproponowanej technologii możliwe staje się uformowanie tytanowych komponentów używając wysokiej prędkości odkształcenia oraz temperatury niższej niż 900°C. Elementy ukształtowane z pomocą tej technologii posiadają twardość jedynie 5% niższą w porównaniu do materiału w stanie wyjściowym. Kształtowanie tytanu z użyciem wysokich prędkości może znacząco zwiększyć wydajność technologii formowania na gorąco przez redukcję cyklu formowania oraz temperatury formowania. Szczegółowe informacje oraz naukowa analiza uzyskanych wyników dostępna jest w opublikowanych pracach:

- M. Kopec, Hot stamping of titanium alloys, Imperial College London, 2020 <https://doi.org/10.25560/86389>
- Kopec M., Wang K., Politis D.J., Wang Y., Wang L., Lin J., Formability and microstructure evolution mechanisms of Ti6Al4V alloy during a novel hot stamping process, Mater. Sci. Eng. A, 719, 72-81 (2018). doi:10.1016/j.msea.2018.02.0382.
- Wang K., Kopec M., Chang S., Qu B., Liu J., Politis D.J., Wang L., Liu G., Enhanced formability and forming efficiency for two-phase titanium alloys by Fast light Alloys Stamping Technology (FAST), Mater. Des.194,(2020). doi:10.1016/j.matdes.2020.108948