

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

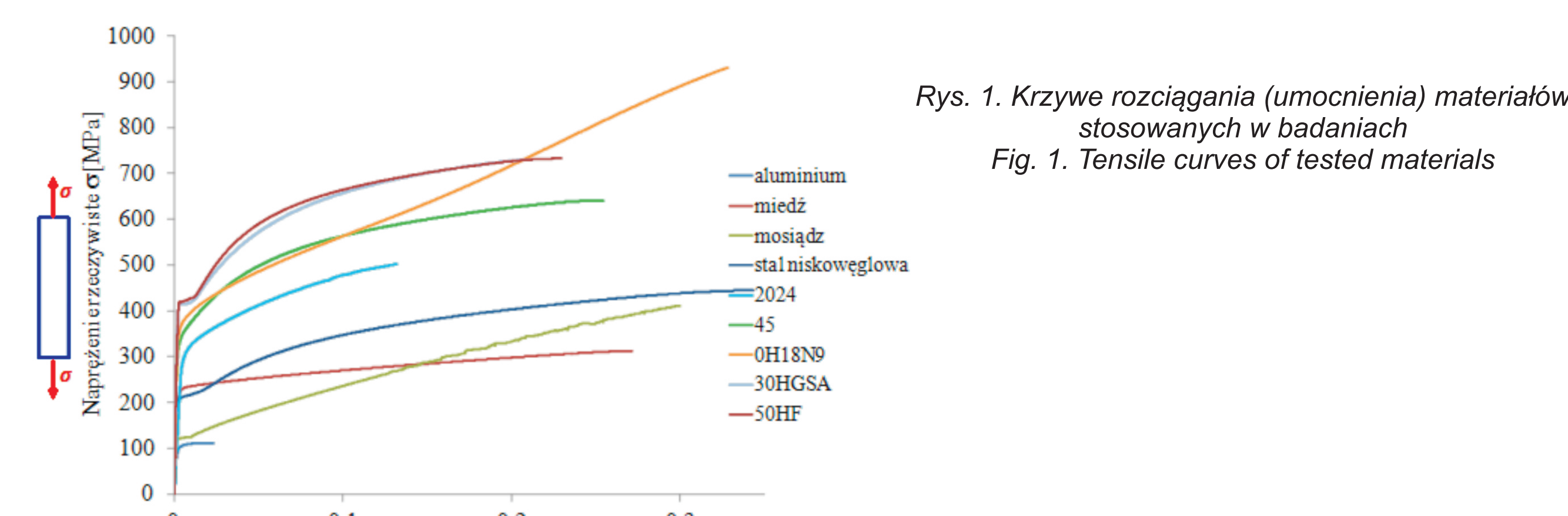
Unconventional technologies of joining elements of aeronautical constructions

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

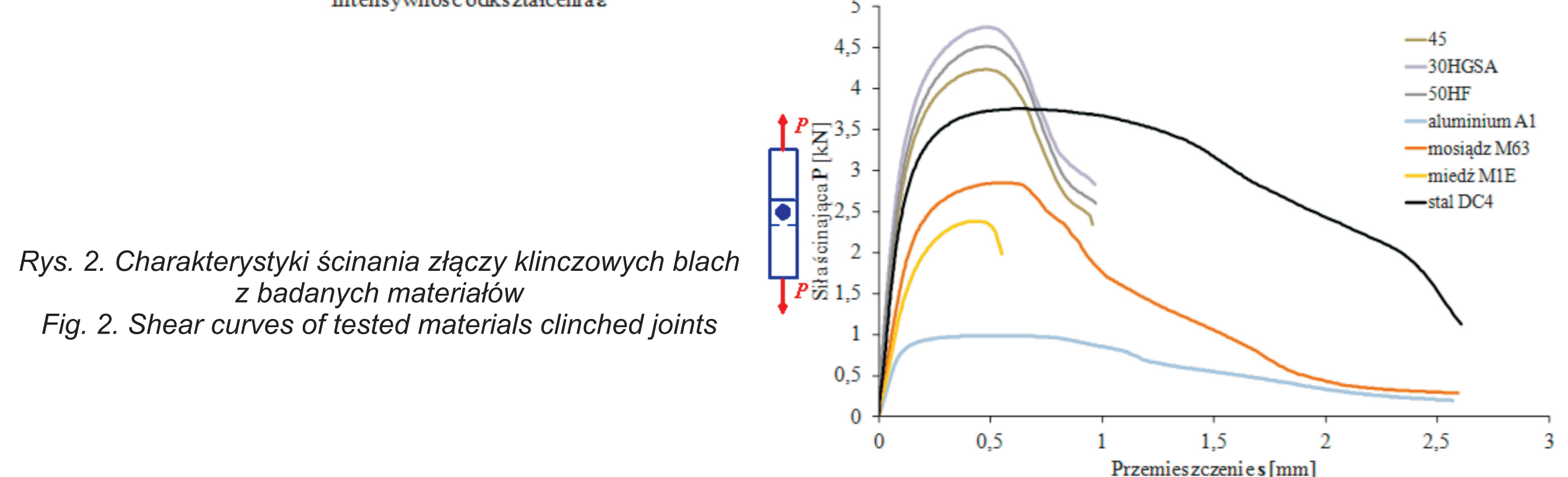
Wyniki badań Results

Badania połączeń klinczowych materiałów o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych
Research of clinched joints of different mechanical properties materials

Klinczowanie pozwala na łączenie różnorodnych metali ze sobą. Jedynym ograniczeniem łączenia tą technologią są właściwości plastyczne materiałów. Jednakże nie dla wszystkich plastycznych materiałów można otrzymać silne złącza klinczowe. Wytrzymałość złącza klinczowego zależy od zdolności przetoczenia blach do umocnienia odkształceniowego. W przeprowadzonych badaniach testowano możliwości wykonywania połączeń klinczowych następujących materiałów: stop aluminium 2024, czyste aluminium 1070 (A1), miedź M1E, mosiądz M63, stal niskowęglowa DC4, stal w gat. 45, stале konstrukcyjne stopowe: 30 HGSA (do ulepszenia ciepłego), stal chromowo-manganowo-krzemowa), 50 HF (stal sprężynowa, chromowo-wanadowa) i stal wysokostopową chromowo-niklową 0H18N9. Blachy łączone na pojedynczą zakładkę wykonując przetoczenia klinczujące o średnicy wykłoseści 78 mm i średnicy wypukłości 70 mm. Wykonanie złącza poprzedzono próbami jednoosiowego rozciągania tych materiałów oraz określeniem ich właściwości plastycznych, tj. wyznaczeniem krzywych umocnienia tych materiałów. W tym celu rozciągano paski blachy o wymiarach: szerokość 35 mm, długość 165 mm i grubości 1 mm, tj. o szerokości i grubości odpowiadających blachom łączonym klinczowaniem. Do pomiaru przemieszczenia stosowano ekstensometr o długości bazowej $L_0 = 50$ mm (podobnie mierzono przemieszczenie w próbach ścinania zakładkowych złączy klinczowych). Przykładowe zarejestrowane wyniki prób rozciągania materiałów stosowanych w badaniach przedstawiono na rysunku 1 w postaci zależności naprężenia uplastyczniającego od intensywności rzeczywistych odkształceń logarytmicznych. Przykładowe charakterystyki ścinania złączy klinczowych testowanych materiałów przedstawiono na rysunku 2.



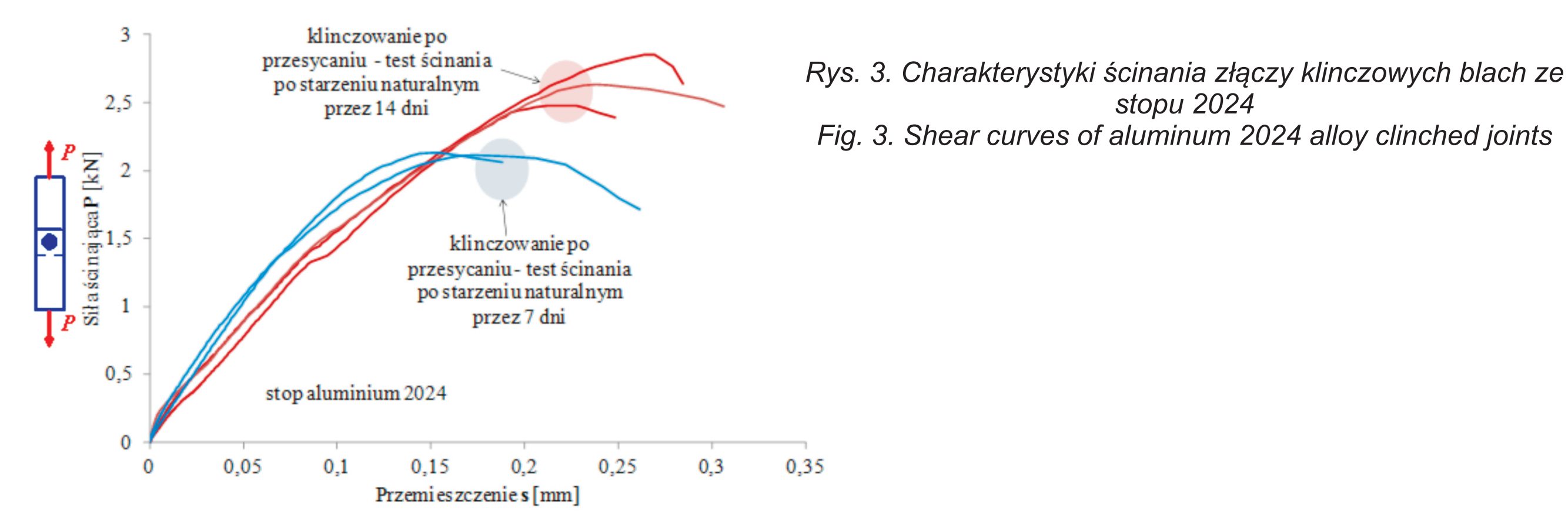
Rys. 1. Krzywe rozciągania (umocnienia) materiałów stosowanych w badaniach
Fig. 1. Tensile curves of tested materials



Rys. 2. Charakterystyki ścinania złączy klinczowych blach z badanych materiałów
Fig. 2. Shear curves of tested materials clinched joints

Klinczowanie blach ze stali w gatunkach 45, 30HGSA, 50HF dało dobre wyniki; materiały te okazały się bardzo dobrze odkształcalne w procesie klinczowania i uzyskano złącza dobre jakościowo, bez pęknięć na powierzchni wypukłości formowanej w matrycy. Potwierdzeniem tego są wyniki testów wytrzymałościowych (rys. 2); rozdzielenie blach w próbie ścinania złącza następowało w wyniku ich rozginania, a nie pęknięcia blachy górnej w szyjce przetoczenia. Wytrzymałość złączy klinczowych tych materiałów jest zadowalająca; we wszystkich przypadkach wynosi powyżej 4 kN. Niską wytrzymałość na ścinanie otrzymano dla złącza klinczowego blach z tak plastycznego materiału, o dużej podatności na odkształcenia, jak mosiądz w gatunku M63, a na blachach ze stali 0H18N9 wcale nie udało się utworzyć trwałego złącza klinczowego; przetoczenie było na tyle nietwałe, że podczas wyjmowania próbek z przestrzeni narzędziowej złącze ulegało rozłączeniu. Cechą charakterystyczną tych dwóch materiałów jest ich silne umacnianie się podczas plastycznego odkształcenia na zimno.

Wyniki prób klinczowania blach ze stopu 2024 w stanie dostawy (T351) nie dały zadowalających rezultatów. Podczas klinczowania następowało wykrawanie denka złącza od strony stępła, a w blasce od strony matrycy pojawiały się pęknięcia. W celu polepszenia właściwości plastycznych materiału zastosowano obróbkę cieplną polegającą na przesycaaniu materiału bezpośrednio przed klinczowaniem, a następnie starzenie naturalne po klinczowaniu w temperaturach otoczenia i dopiero wówczas przeprowadzano testy wytrzymałościowe złączy klinczowych (przesycanie => klinczowanie => starzenie => testy ścinania). Stosowano przesycaanie z temperatury ~500°C i starzenie naturalne w temperaturach otoczenia przez 7 i 14 dni. Właściwości mechaniczne po przesycaaniu były korzystne; następowało znaczne obniżenie naprężenia uplastyczniającego przy wysokiej odkształcalności ~20%. Pozwalało to na formowanie złączy klinczowych o zadowalającej jakości (wyeliminowano zjawisko wykrawania denka). Duży wpływ na wytrzymałość złącza miał czas starzenia; dłuższy czas (14 dni) powodował większą wytrzymałość złącza klinczowego (rys. 3). Jednakże porównując wytrzymałość blach ze stopu 2024 z wytrzymałością innych materiałów (rys. 1), oczekiwano większej wytrzymałości złączy klinczowych z tego materiału.

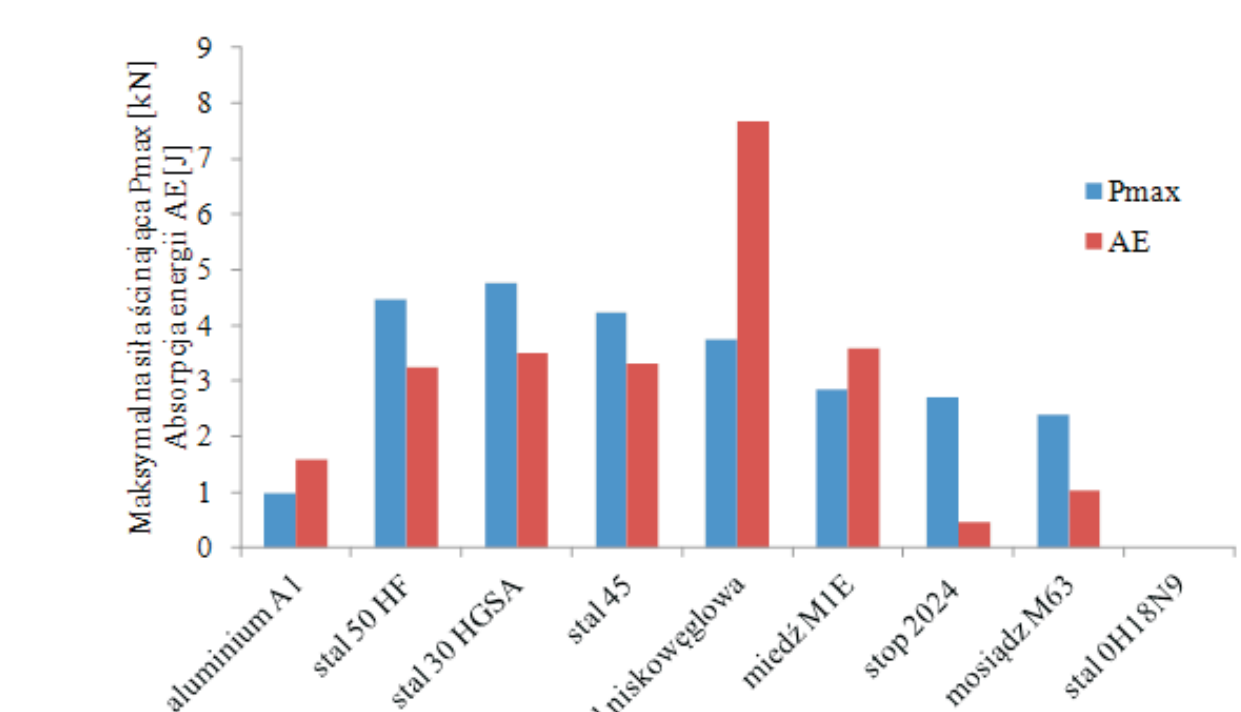


Rys. 3. Charakterystyki ścinania złączy klinczowych blach ze stopu 2024
Fig. 3. Shear curves of aluminium 2024 alloy clinched joints

Zestawienie wyników badań połączeń klinczowych materiałów o charakterystykach mechanicznych przedstawionych na rysunku 1 przedstawiono w tabeli 1; materiały uporządkowano wg rosnącej wartości wykładnika umocnienia. W oparciu o dane z tabeli 1 sporządzono wykresy przedstawione na rysunkach 4-7. Dla złączy klinczowych blach ze stopu aluminium 2024 stosowano dane tak jak zaznaczono w tabeli 1, tj. wykładnik umocnienia przyjmowano dla materiału po przesycaaniu, a właściwości wytrzymałościowe dla materiału po przesycaaniu i starzeniu. Charakterystyki krzywych umocnienia przedstawione na rysunku 1, opisywano trójparametrowymi równaniami Swifta w postaci:

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$$

gdzie:
K - współczynnik umocnienia,
n - wykładnik umocnienia,
 ϵ_0 - odkształcenie wstępne.



Rys. 4. Właściwości wytrzymałościowe złączy klinczowych w zależności od rodzaju materiału
Fig. 4. Strength properties of clinched joints for different kind of joined materials

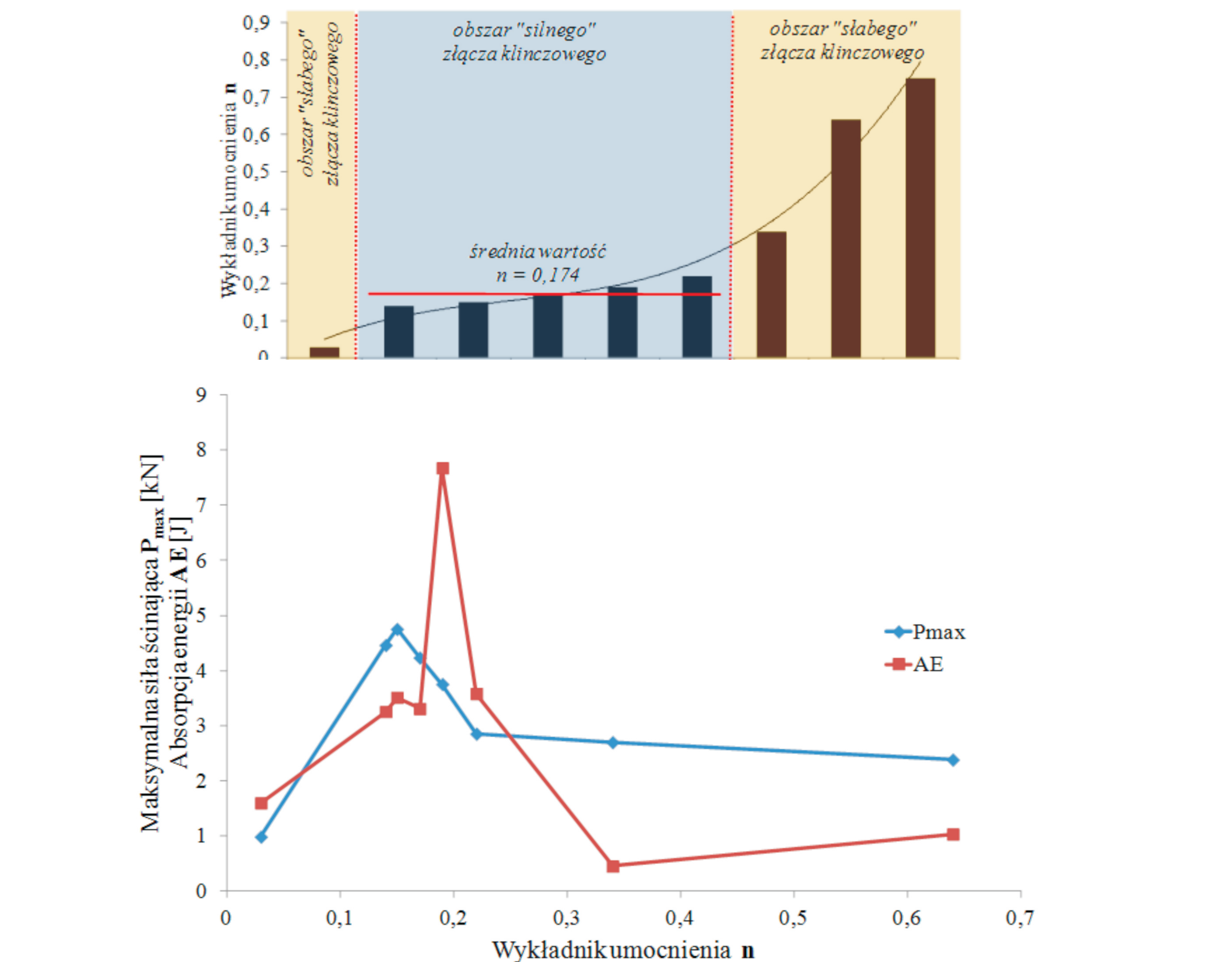
Tabela 1. Parametry krzywej umocnienia i właściwości wytrzymałościowe złączy klinczowych materiałów stosowanych w badaniach
Table 1. Flow curve parameters and strength properties of clinched joints obtained for tested materials

Materiał	Współczynnik umocnienia K [MPa]	Wykładnik umocnienia n	Maksymalna siła ścinająca P _{max} [kN]	Absorpcja energii AE [J]
aluminium A1	127	0,03	0,986268	1,60016
stal 50 HF	902	0,14	4,461681	3,255432
stal 30 HGSA	932	0,15	4,752165	3,512658
stal 45	804	0,17	4,23439	3,308878
stal niskowęglowa DC4	546	0,19	3,754075	2,675021
miedź M1E	395	0,22	2,854105	3,58214
stop 2024 - przesycający i starzony	716	0,21	2,7	0,453
stop 2024 - przesycający	801	0,24	-	-
stop 2024 - przesycający	648	0,34	-	-
mosiądz M63	816	0,64	2,383718	1,034449
stal 0H18N9	1671	0,75	-	-

Tabela 1. Parametry krzywej umocnienia i właściwości wytrzymałościowe złączy klinczowych materiałów stosowanych w badaniach
Table 1. Flow curve parameters and strength properties of clinched joints obtained for tested materials

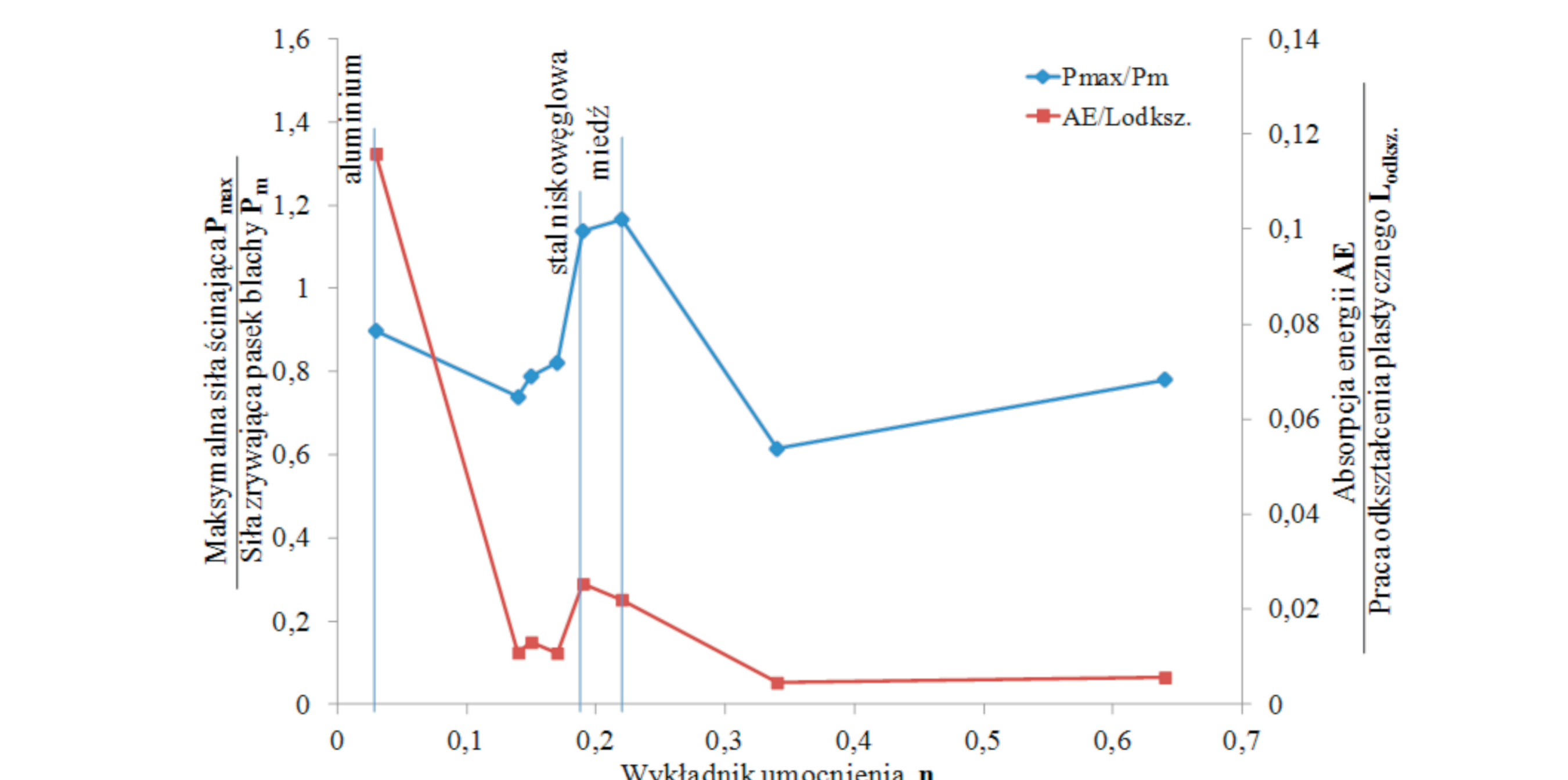
Materiał	Współczynnik umocnienia K [MPa]	Wykładnik umocnienia n	Maksymalna siła ścinająca P _{max} [kN]	Absorpcja energii AE [J]
aluminium A1	127	0,03	0,986268	1,60016
stal 50 HF	902	0,14	4,461681	3,255432
stal 30 HGSA	932	0,15	4,752165	3,512658
stal 45	804	0,17	4,23439	3,308878
stal niskowęglowa DC4	546	0,19	3,754075	2,675021
miedź M1E	395	0,22	2,854105	3,58214
stop 2024 - przesycający i starzony	716	0,21	2,7	0,453
stop 2024 - przesycający	801	0,24	-	-
stop 2024 - przesycający	648	0,34	-	-
mosiądz M63	816	0,64	2,383718	1,034449
stal 0H18N9	1671	0,75	-	-

Największą wytrzymałość otrzymano dla złączy klinczowych blach ze stali stopowej 30HGSA, natomiast największą absorpcją energii charakteryzowało się złącze blach ze stali niskowęglowej DC4 (rys. 2). Biorąc pod uwagę te dwa parametry złącza, stwierdzono, że dobre jakościowo złącza otrzymano dla materiałów: od stali 50HF począwszy, a na miedzi M1E skończywszy (wg rys. 4). Złącza charakteryzujące się zadowalającą wytrzymałością, a małą absorpcją energii uznano za niekorzystne. Na rysunku 5 pokazano obszary 'silnego' i 'słabego' złącza klinczowego, w zależności od wykładnika umocnienia n łączonych materiałów. Złącza o korzystnych cechach wytrzymałościowych otrzymano dla niskich wartości wykładnika umocnienia n; średnia wartość wykładnika umocnienia dla złączy 'silnych' wynosi $n = 0,174$. Zależności parametrów wytrzymałościowych złącza od wykładnika umocnienia posiadają ekstrema (rys. 6), gdy wykładnik umocnienia jest równy $n = 0,15$ (maksymalna wytrzymałość złącza klinczowego) i $n = 0,19$ (maksymalna absorpcja energii). Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 6 można stwierdzić, że efektywnie klinczowaniem można łączyć materiały o wykładniku umocnienia leżącym w przedziale $n = 0,14 \div 0,22$. Rezultat ten jest ściśle związany z geometrią narzędzi klin-czujących stosowanych w badaniach; złącza klinczowe wykonane narzędziami o innych wymiarach mogą 'przesuwać' obszar 'silnego' złącza w kierunku większych lub mniejszych wartości wykładnika umocnienia n. Jednakże otrzymane wartości wytrzymałości i absorpcji energii, są również zależne od właściwości mechanicznych łączonych materiałów. Dlatego też, poszukiwano takiego sposobu porównania wyników testów wytrzymałościowych, który oprócz warunków geometrycznych, uwzględniłby również właściwości łączonych materiałów. Spośród rozważanych wielkości mechanicznych opisujących właściwości materiałów wybrano wytrzymałość na rozciąganie R_m. W oparciu o ten parametr obliczono wytrzymałość paska blachy o szerokości odpowiadającej średnicy złącza klinczowego (średnicy zewnętrznej wypukłości przetoczenia). Założono, że dobre połączenie dwóch kawałków tego samego materiału jest prawidłowe, gdy wytrzymałość złącza jest porównywalna z wytrzymałością litego materiału łączonego. Wyniki przedstawiono na rysunku 7, jako zależność maksymalnej siły ścinającej złącze klinczowe P_{max} odniesionej do siły zrywającej P_m paska blachy o szerokości równej średnicy przetoczenia, od wykładnika umocnienia łączonych materiałów n. Podobnie, energię absorbowaną AE podczas testu ścinania złącza odniesiono do pracy odkształcenia plastycznego L_{odksz} podczas zrywania paska blachy o szerokości równej średnicy przetoczenia i wyrażono w formie zależności od wykładnika umocnienia n (rys. 7).



Rys. 6. Zależność właściwości wytrzymałościowych od wykładnika umocnienia łączonych materiałów

Jak można zauważyć z rysunku 7, zastosowana metoda prezentacji wyników pozwoliła na wyodrębnienie dwóch materiałów tworzących optymalne ze względów wytrzymałościowych złącza klinczowe, tj. stal niskowęglowa i miedź. Korzystny rezultat otrzymano również dla złącza blach aluminiowych, które w porównaniu bezwzględnych wartości wytrzymałości i absorpcji energii zaliczają się do jakościowo słabych połączeń, a w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie aluminium, okazało się złączeniem bardzo efektywnym. Stale konstrukcyjne w tym układzie współrzędnych wypadają gorzej; złącza klinczowe z tych materiałów mają niższe parametry wytrzymałościowe w odniesieniu do ich wytrzymałości na rozciąganie. Dla materiałów (mosiądz, stop 2024), których złącza klinczowe były bardzo 'słabe', szczególnie niekorzystny rezultat (bardzo niskie wartości, bliskie 0) otrzymano w odniesieniu absorpcji energii do pracy odkształcenia plastycznego (stali w gatunku 0H18N9 w tym porównaniu w ogóle nie uwzględniano)



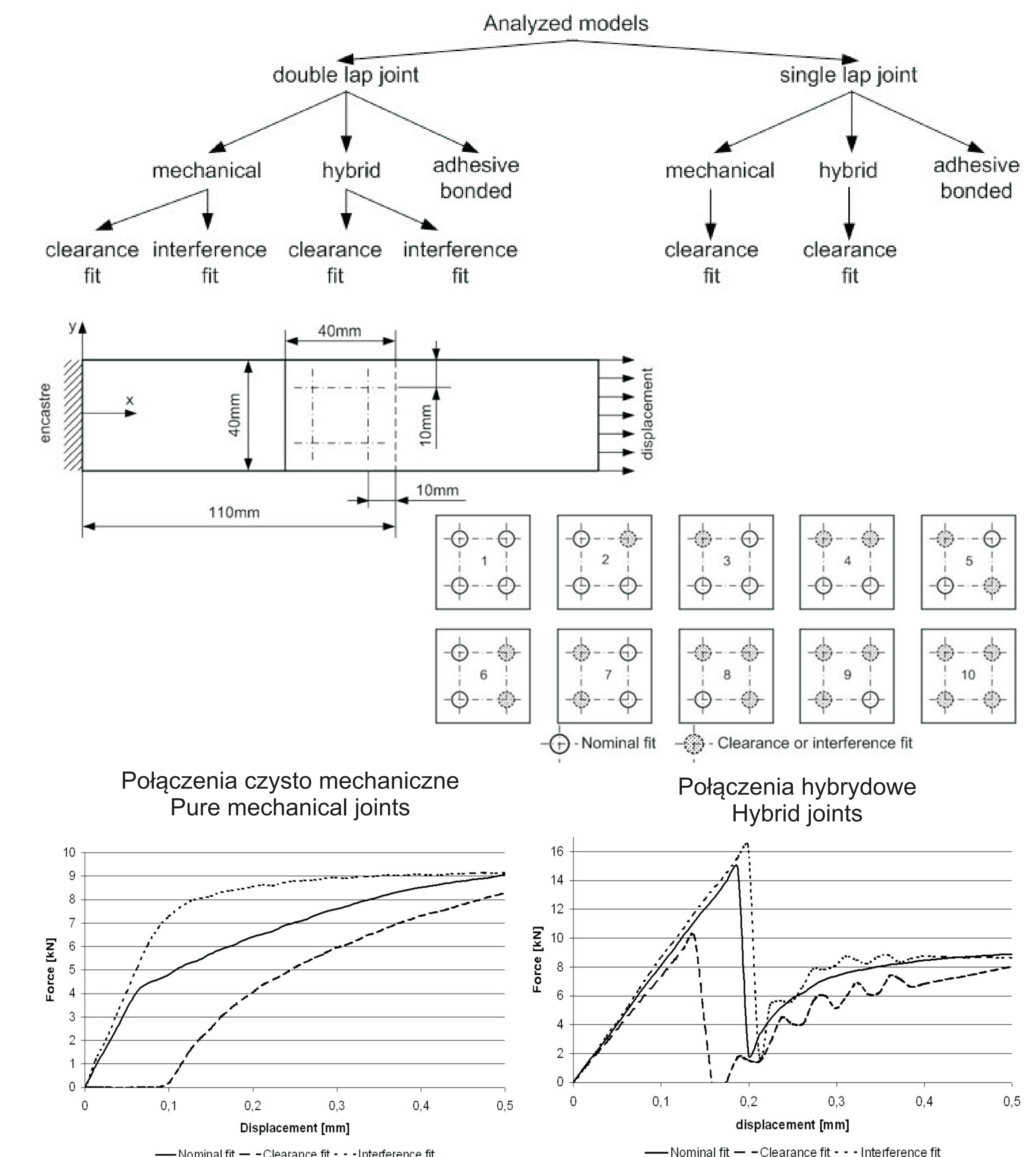
Rys. 7. Zależność właściwości wytrzymałościowych złącza klinczowego od właściwości materiałów w próbie rozciągania od wykładnika umocnienia

Wnioski Conclusions

- klinczowaniem można łączyć materiały metaliczne o dużym zróżnicowaniu właściwości mechanicznych, np. stале niskowęglowe, o niskich właściwościach wytrzymałościowych i stале konstrukcyjne stopowe o wysokich właściwościach wytrzymałościowych,
- jako kryterium oceny zdolności materiałów do formowania złącza klinczowego może służyć wykładnik krzywej umocnienia; wysoka wartość wykładnika krzywej umocnienia nie sprzyja formowaniu złącza klinczowych; silne złącza można otrzymać, gdy wykładniki krzywej umocnienia łączonych materiałów są małe.
Conclusions:
- clinching can be used for effective joining of wide range mechanical properties metallic materials, e.g. low carbon steel and constructional alloy steel, characterized by low and high mechanical properties,
- strain-hardening coefficient can be used as clinch joinability criterion; high value strain-hardening coefficient is not good for clinch joint creation; high strength clinch joint can be manufactured when low values strain-hardening coefficient materials are clinched.

Wyniki badań Results

Głównym celem przeprowadzonych badań numerycznych dla połączeń czysto mechanicznych i hybrydowych, było pokazanie jak wpływa pojawienie się luzu lub wcisku między otworem a nitem na parametry wytrzymałościowe. The main objective of the numerical study for pure mechanical and hybrid joints was to show how appearance of clearance or interference between the hole and the rivet affects on the strength parameters.



Wnioski Conclusions

Dla połączenia z luzem, jego praca zaczyna się dopiero od przemieszczenia 0,1mm czyli jego skasowania i wystąpieniu kontaktu między nitem a otworem. Takie połączenia nie posiada zatem sztywności. Odmianą sytuacją występuje dla połączenia z wciskiem. Możemy zaobserwować zwiększenie sztywności połączenia oraz wydłużenie zakresu liniowego. Połączenie jest zatem korzystniejsze pod względem wytrzymałościowym.
Odmienny charakter ma praca złącza hybrydowego. W tym przypadku sztywność dla połączeń z luzem czy wciskiem jest podobna. Przy zastosowaniu wcisku można uzyskać wzrost nośności połączenia o około 10%. Gdy pojawi się luz we wszystkich czterech otworach to spadek nośności wyniesie aż o około 32%.

For connection with clearance fit, its work starts until from the displacement 0,1mm which means occurrence of contact between the rivet and the hole. Therefore such connection does not have stiffness. A different situation occurs for interference fit connection. We can observe an increase of stiffness and extension of the linear range. The connection is therefore more advantageous in terms of strength.
Different character has hybrid joint work. In this case the stiffness for connections with clearance fit or interference fit is similar. By using interference fit we can increase capacity of the joint for about 10%. When will appear clearance in all four holes then decrease in capacity will be up to about 32%.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

- Referaty:**
1. Tomasz Sadowski, Marcin Kneć, Przemysław Golewski, *Fatigue response of the hybrid joints obtained by hot spot welding and bonding techniques*, ARTENS 2013, 23 – 25 maj, Timisoara
- Publikacje:**
1. T. Sadowski, T. Balawender R. Śliwa, P. Golewski, M. Kneć, *Modern hybrid joints in aerospace: modelling and testing*, Archives of Metallurgy and Materials, Volume 58, 163 – 169 (2013),
2. T. Sadowski, P. Golewski, *Numerical study of the prestressed connectors and their distribution on the strength of a single lap, a double lap and hybrid joints subjected to uniaxial tensile test*, Archives of Metallurgy
3. Monografia: T. Balawender: *Analiza wybranych sposobów zwiększenia nośności połączeń klinczowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013-06-19
- Prace mgr, dr, hab.:**
Praca doktorska:
Autor: Marcin Kneć
Tytuł: „Technika cyfrowej korelacji obrazów w analizie deformacji połączeń elementów konstrukcyjnych do zastosowań w lotnictwie”
Status: Otwarty przewód doktorski (8 maja 2013r)
Promotor: prof. dr hab. inż. T.Sadowski
- Patenty:**
1. Patent: 1. Balawender T.: Nit dwustronny, Udzielenie patentu na zgłoszenie patentowe: P.387468, (2009)