

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji

Załącznik nr 3

do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia
doktora habilitowanego

Autoreferat

dr inż. Andrzej Kubit

Rzeszów, dn. 17.03.2020 r.

Spis treści

1. Dane osobowe	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych oraz w przemyśle	4
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy	4
5. Aktywność naukowa realizowana w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej	40
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę	46
7. Sumaryczne zestawienie dorobku naukowo–badawczego, popularyzatorskiego, dydaktycznego i organizacyjnego (Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych)	47

1. DANE OSOBOWE

Imię i nazwisko: Andrzej Kubit

Stopień naukowy: doktor nauk technicznych

Miejsce i adres zatrudnienia:

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów

tel. +48 17 865 2019, *fax.* +48 17 865 11 84

adres e-mail: akubit@prz.edu.pl

2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

2009 r. - Tytuł zawodowy – magister inżynier

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn

Specjalność: Inżynieria Systemów Wytwarzania

Temat pracy magisterskiej: „Analiza szczyptych procesów wytwarzania”,

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Świętoniowski (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie).

2010 r. – Studia podyplomowe

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

Wydział Ekonomii i Stosunków Międzynarodowych

Katedra Zarządzania Międzynarodowego

Specjalność: Systemy Logistyczne Przedsiębiorstw

2015 r. – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn

Doktor nauk technicznych,

Politechnika Rzeszowska,

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,

Specjalność: Budowa i eksploatacja maszyn,

Temat rozprawy doktorskiej: „*Determinanty wytrzymałości połączeń klejowych na oddzieranie*”

Promotor: dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRz (Politechnika Rzeszowska),

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski (Politechnika Lubelska), dr hab. inż. Marek Rośkiewicz, prof. WAT (Wojskowa Akademia Techniczna).

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH ORAZ W PRZEMYSŁE

Od 1 września 2009 r. do 31 sierpnia 2010 r.

Technolog wdrożeniowy,
Nowy Styl Sp. z o.o.,
Zakład Produkcji Metalowej.

Od 1 października 2010 r. do 30 września 2015 r.

Asystent naukowo-dydaktyczny,
Politechnika Rzeszowska,
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji.

Od 1 października 2015 r. do dzisiaj

Adiunkt naukowo-dydaktyczny,
Politechnika Rzeszowska,
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji.

4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY

Jako osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, wynikające z art. 219 ust. 1 pkt.2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, przedstawiam cykl 12 publikacji powiązanych tematycznie, na który składa się monografia oraz dziesięć artykułów z czego dziewięć znajduje się w bazie JCR, a także jedno zgłoszenie patentowe, które uzyskało pozytywną opinię Rzecznika Patentowego.

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Analiza właściwości połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad zgrzewanych metodą tarciovą z przemieszaniem w zastosowaniu do wytwarzania struktur cienkościennych

4.2. Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcia naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

Monografia:

H1 Kubit A.: *„Właściwości punktowych połączeń zgrzewanych metodą tarciovą z przemieszaniem, z wypełnieniem krateru, w zastosowaniu do wytwarzania cienkościennych struktur nośnych”*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019, ISBN 978-83-7934-350-8.

MNiSW: 80 pkt.

Publikacje:

- H2** Kubit A., Trzepiecinski T., Faes K., Drabczyk M., Bochnowski W., Korzeniowski M.: „*Analysis of the effect of structural defects on the fatigue strength of RFSSW joints using C-scan scanning acoustic microscopy and SEM*”. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Volume 42, Issue 6, June 2019, pp. 1308-132.
IF: 2.389, MNiSW: 100 pkt.
- H3** Kluz R., Kubit A., Trzepiecinski T., Faes K.: „*Polyoptimisation of the refill friction stir spot welding parameters applied in joining 7075-T6 Alclad aluminium alloy sheets used in aircraft components*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, August 2019, Volume 103, Issue 9–12, pp. 3443–3457.
IF: 2.75, MNiSW: 100 pkt.
- H4** Kubit A., Trzepiecinski T., Świąch Ł., Faes K., Słota J.: „*Experimental and Numerical Investigations of Thin-Walled Stringer-Stiffened Panels Welded with RFSSW Technology under Uniaxial Compression*”. Materials. 2019 Jun; 12(11): 1785.
IF: 3.532, MNiSW: 140 pkt.
- H5** Kubit A., Trzepiecinski T., Bochnowski W., Drabczyk M., Faes K.: „*Analysis of the mechanism of fatigue failure of the Refill Friction Stir Spot Welded overlap joints*”. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 19, Issue 4, August 2019, Pages 1419-1430.
IF: 2.805, MNiSW: 140 pkt.
- H6** Kluz R., Kubit A., Trzepiecinski T., Faes K., Bochnowski W.: „*A Weighting Grade-Based Optimization Method for Determining Refill Friction Stir Spot Welding Process Parameters*”. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019 28:, pp. 6471–6482.
IF: 1.67, MNiSW: 70 pkt.
- H7** Kubit A., Kluz R., Trzepiecinski T., Wydrzyński D., Bochnowski W.: „*Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets*”. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 18 2018, pp. 235–244.
IF: 2.846, MNiSW (lista A czasopism, 2018): 30pkt.
- H8** Kubit A., Wydrzyński D., Trzepieciński T.: „*Refill friction stir spot welding of 7075-T6 aluminium alloy single-lap joints with polymer sealant interlayer*”. Composite Structures, 201 (2018), pp. 389-397.
IF: 4.829, MNiSW: 140pkt.
- H9** Kubit A., Bucior M., Wydrzyński D., Trzepieciński T., Pytel M.: „*Failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy single-lap joints*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February 2018, Volume 94, Issue 9–12, pp. 4479-4491.
IF: 2.496, MNiSW (lista A czasopism, 2018): 30pkt.
- H10** Kubit A., Jurczak W., Trzepiecinski T., Faes K.: „*Experimental and numerical investigation of impact resistance of riveted and RFSSW stringer-stiffened panels in blunt impact test*”.

Transactions of FAMENA (ISSN:1333-1124, eISSN: 1849-1391). Artykuł zaakceptowany, załączam „Letter of acceptance”.

IF: 0.637, MNiSW: 70pkt.

H11 Wydrzyński D., Bucior M., **Kubit A.** „*The effects of welding parameters on the tensile shear strength of refill friction stir spot welding of 7075-T6 aluminium alloy joints*”. ITM Web of Conferences 15, 04012 (2017).

MNiSW: 15pkt. (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)

H12 **Kubit A.**, Trzepieciński T.: „*Głowica dociskowa*” (do zgrzewania blach metodą RFSSW). Pozytywnie ocenione przez Urząd Patentowy RP zgłoszenie patentowe nr P.427565 z dnia 30.10.2018r.

Wymienione wyżej prace załączono do wniosku w pełnej ich wersji w formie załącznika nr 5 – Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy.

4.3. Omówienie celu i osiągniętych wyników prac naukowych oraz sposobu ich wykorzystania

Przedstawiony do oceny cykl publikacji stanowiący podstawę do wszczęcia przewodu habilitacyjnego jest wynikiem prac badawczych mających na celu analizę właściwości połączeń zgrzewanych metodą RFSSW pod kątem zastosowania tej technologii łączenia w budowie cienkościennych struktur nośnych. Celem badań było określenie optymalnych parametrów zgrzewania zapewniających wysokiej jakości połączenie blach ze stopu EN AW-7075-T6, określenie możliwości zgrzewania blach pokrytych tworzywem uszczelniającym, zdefiniowanie mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego, a także porównanie właściwości fragmentów cienkościennych struktur zgrzewanych omawianą metodą ze strukturami nitowanymi. Z założenia badania prowadziłem pod kątem wykazania możliwości zastosowania omawianej technologii jako alternatywnej metody łączenia wobec nitowania. Badania oparte były na przykładzie konstrukcji występujących w budowie statków powietrznych, jednak ich rezultaty mogą mieć bardziej uniwersalny wymiar w odniesieniu do technologii łączenia elementów cienkościennych ustrojów mających szerokie zastosowanie w budowie środków transportu. Mowa tu o konstrukcjach występujących m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, a także wszędzie tam, gdzie wzrasta zastosowanie nieżelaznych stopów metali trudno spawalnych, przede wszystkim stopów aluminium.

Zakres tematyczny zawarty w przedstawionym do oceny cyklu publikacji obejmuje następujące zagadnienia:

- analiza wpływu parametrów zgrzewania na nośność oraz właściwości struktury połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad zgrzewanych metodą RFSSW,
- dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania metodą RFSSW przy użyciu analitycznych modeli optymalizacyjnych,
- badania możliwości zgrzewania blach pokrytych polimerowym uszczelniaczem stanowiącym zabezpieczenie antykorozyjne,
- analiza mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego dla różnych poziomów obciążenia zmiennego w badaniach wysoko-cyklowej wytrzymałości zmęczeniowej przy granicznej liczbie cykli równej 2×10^6 ,
- określenie wpływu wad struktury zgrzeiny na mechanizm zniszczenia zmęczeniowego połączenia,

- badania porównawcze jednorzędowego połączenia zgrzewanego z połączeniem nitowym,
- analiza porównawcza stanów powyboczeniowych płyt usztywnionych wykonanych technologią zgrzewania RFSSW oraz nitowania,
- zgłoszenie patentowe głowicy dociskowej dedykowanej dla procesu zgrzewania metodą RFSSW,
- modelowanie numeryczne MES procesu zgrzewania metodą RFSSW.

Według Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) transport generuje 26% emisji gazów cieplarnianych w Wielkiej Brytanii. Podobna tendencja występuje w większości krajów rozwiniętych. Głównym źródłem tych zanieczyszczeń są silniki spalinowe zarówno benzynowe jak i diesel-a [11].

The International Council on Clean Transportation wykazała, że ograniczenie emisji CO₂ generowanego przez środki transportu do poziomu 95g/km, można osiągnąć poprzez obniżenie ich masy [8, 12].

Stopy aluminium są najczęściej stosowanymi w technice stopami metali nieżelaznych. Przede wszystkim zastosowanie mają stopy wieloskładnikowe Al-Cu-Mg ze względu na dobre właściwości wytrzymałościowe przy jednoczesnym zachowaniu niskiej masy. Stopy z tej grupy mają powszechne zastosowanie przede wszystkim w tych dziedzinach przemysłu, gdzie wymagana jest niska masa wyrobów, tj. w lotnictwie, transporcie lądowym, a także budownictwie [10]. Stopy Al-Cu-Mg są trudno spawalne, dlatego w metodach tarciovych upatruje się możliwości ich łączenia [2]. Wykonawcy projektu LightBlank [13] ukierunkowanego na technologie wytwarzania lekkich konstrukcji dla transportu (samochodowego, lotniczego i kolejowego) celem ograniczenia emisji CO₂ również wskazują tarciove technologie łączenia jako kluczowe metody wytwarzania lekkich struktur bazujących na stopach aluminium.

Technologia punktowego zgrzewania tarciovego z przemieszaniem, z wypełnieniem krateru – RFSSW została opracowana przez GKSS-GmbH w 2002 roku w Niemczech [3]. Technologia ta z zastosowaniem trój-elementowego narzędzia rozwijana początkowo była Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) [6].

W procesie zgrzewania metodą RFSSW wyróżnia się trzy podstawowe parametry, którymi można sterować w trakcie procesu. Parametrami tymi są: prędkość obrotowa narzędzia, jego maksymalne zagłębienie, a także czas trwania poszczególnych etapów zgrzewania. Od ich wartości zależą późniejsze właściwości samej zgrzeiny, ale także lokalnie łączonych blach m.in. ze względu na generowaną strefę wpływu ciepła.

Analiza wpływu parametrów zgrzewania na nośność oraz właściwości struktury połączeń blach ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad zgrzewanych metodą RFSSW

Celem zapewnienia prawidłowych warunków termo-mechanicznych podczas procesu zgrzewania niezbędny jest właściwy dobór parametrów. Parametry te należy indywidualnie dobrać do materiału o danych właściwościach, a także do geometrii łączonych elementów, w tym przede wszystkim grubości. Stąd w pierwszej kolejności przeprowadziłem cykl badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie parametrów procesu zgrzewania zapewniających pożądaną jakość połączenia blach ze stopu aluminium EN AW-7075-T6 Alclad o grubościach 1,6 mm oraz 0,8 mm. Rezultaty tych badań opisałem w pracach [H1-H4]. Wykonałem próbki zakładkowe jednopunktowych połączeń zgrzewanych dla 27 wariantów o różnych wartościach parametrów zgrzewania. Parametry procesu rozpatrywano na trzech różnych poziomach, tj.:

- prędkość obrotową narzędzia: 2000; 2400; 2800 obr./min,
- maksymalne zagłębienie narzędzia: 1,5; 1,7; 1,9 mm,
- czas zgrzewania: 1,5; 2,5, 3,5 s.

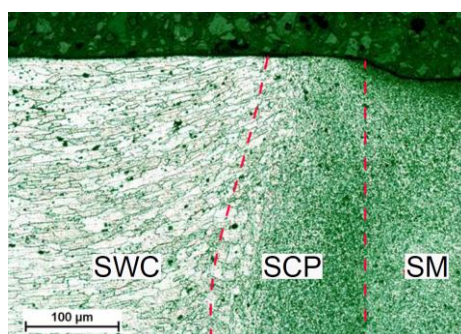
Na podstawie badań nośności w próbie statycznego ścinania przy zastosowaniu przyrządu wymuszającym czysty stan ścinania, wykazałem, że największą nośność połączenia uzyskać można dla maksymalnego zagłębienia narzędzia o wartości 1,5 mm. Wartość ta zwraca uwagę, ponieważ w rozważanym pakiecie łączonych blach, górna z nich ma grubość 1,6 mm, a zatem najkorzystniejsze właściwości wytrzymałościowe wykazałem dla wariantu, w którym nie dochodzi do mechanicznej penetracji narzędzia w strukturze obydwu blach, a połączenie wytworzone zostało poprzez przemiany termomechaniczne. Pozostałe parametry, tj. prędkość obrotowa oraz czas zgrzewania determinują wytworzenie odpowiedniej ilości ciepła na skutek tarcia. Wykazałem, że dla łączonego pakietu blach optymalną ilość ciepła zapewniającą odpowiednie uplastycznienie materiału można uzyskać przy zastosowaniu następujących wartości prędkości obrotowej oraz czasu zgrzewania:

- prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min oraz czas zgrzewania $t = 3,5$ s,
- prędkość obrotowa $n = 2400$ obr/min oraz czas zgrzewania $t = 2,5$ s,
- prędkość obrotowa $n = 2800$ obr/min oraz czas zgrzewania $t = 1,5$ s.

Wykazałem, że przekroczenie właściwej ilości ciepła determinowanej przez czas zgrzewania i prędkość obrotową narzędzia prowadzi do nadmiernego rozszerzenia strefy wpływu ciepła, co z kolei prowadzi do osłabienia materiału występującego pierwotnie w stanie T6. Objawia się to w próbach statycznych poprzez zniszczenie blachy na skutek rozciągania przy znacząco mniejszym obciążeniu niż wynika to z nominalnej wytrzymałości.

Badania nośności w próbach statycznego ścinania oraz oddzierania przeprowadziłem z zastosowaniem przyrządów wymuszających odpowiednio czysty stan ścinania oraz stan oddzierania. Przyrządy zostały opracowane i skonstruowane przeze mnie.

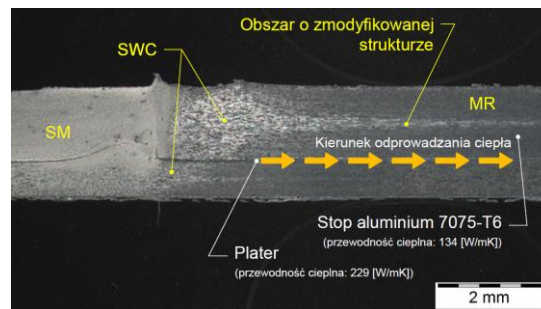
W ramach analiz metalograficznych przedstawionych w pracach H1, H4 wykazałem, że poprawnie ukształtowane połączenie złożone jest z trzech podstawowych stref, tj. strefy mieszania (SM), strefy ciepłno-plastycznej (SCP) oraz strefy wpływu ciepła (SWC) [5, 6]. Każda z wymienionych stref cechuje się określoną wielkością oraz układem ziaren (rysunek 1).



Rys. 1. Widok mikrostruktury poprawnego połączenia ukazujący poszczególne strefy charakteryzujące się różną wielkością i układem ziaren [H1]

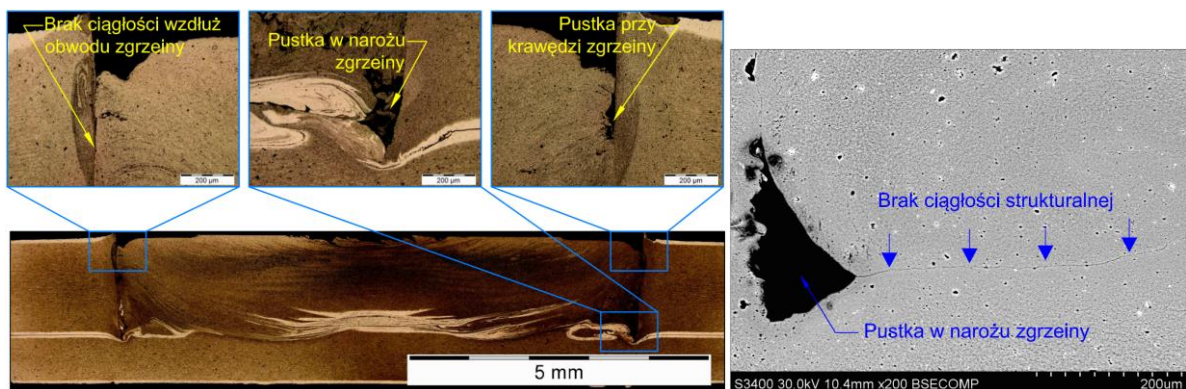
Wykazałem również, że zależnie od parametrów zgrzewania, dochodzi do różnej formy ukształtowania materiału plateru w zgrzeinie, co z kolei może mieć wpływ na właściwości eksploatacyjne połączenia. Dodatkowo wykazałem, że plater ze względu na znacząco wyższą wartość współczynnika przewodności cieplnej tj. 229 W/mK od stopu 7075 tj. 134 W/mK ma istotny wpływ na rozkład ciepła podczas zgrzewania, gdyż odprowadza ciepło. Zjawisko to prowadzi do powstania

charakterystycznego obszaru w środku grubości blachy o zmodyfikowanej poprzez ciepło strukturze (rysunek 2). Spostrzeżenia te opisałem szerzej w pracy H1.



Rys. 2 Makrostruktura zgrzeiny wykonanej przy zastosowaniu parametrów: $n = 2800$ obr./min; $g = 1,55$ mm; $t = 3,5$ s ukazująca rozkład ciepła podczas zgrzewania [H1]

Na podstawie badań metalograficznych opisanych w pracy H1, wykazałem, że niepoprawnie dobrane parametry zgrzewania prowadzą do powstania szeregu wad strukturalnych złącza. Można tu wyróżnić takie wady jak pustki, brak wypełnienia, brak ciągłości w wybranych obszarach zgrzeiny (rysunek 3). Wady te wynikają przede wszystkim z niedostatecznego uplastycznienia materiału zgrzewanego.



Rys. 3. Typowe wady strukturalne zgrzeiny powstałe na skutek niedostatecznego uplastycznienia materiału [H1]

Zagadnienia dotyczące badań eksperymentalnych w zakresie doboru parametrów, nośności, badań metalograficznych przedstawiłem kompleksowo w pracy H1, ale również m.in. w publikacjach H7, H9, H11.

Dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania metodą RFSSW przy użyciu analitycznych modeli optymalizacyjnych

Dysponując rezultatami badań statycznych dla połączeń wykonanych przy zastosowaniu różnych parametrów, dokonałem optymalizacji wielokryterialnej.

Dobór optymalnych parametrów procesu zgrzewania wymaga określenia adekwatnego modelu matematycznego w postaci funkcji regresji $W(x)$. Analizę regresji przeprowadziłem z wykorzystaniem zasady najmniejszej sumy kwadratów o następującej postaci kryterium oceniającego jakość aproksymacji:

$$\min R = \min \sum_{i=0}^N [f(x_i) - W(x_i)]^2 \quad (1)$$

gdzie wartość funkcji R jest pewną miarą odchylenia funkcji aproksymującej $W(x)$ od aproksymowanej $f(x)$, $i = 1, \dots, N$ – liczba doświadczeń.

Podczas aproksymacji w charakterze funkcji bazowych wybiera się najczęściej jednomiany $1, x, x^2, \dots, x^m$, gdyż zgodnie z twierdzeniem Weierstrassa, dla każdej funkcji $f(x)$ określonej i ciągłej na domkniętym i ograniczonym przedziale $[a, b]$ istnieje wielomian $W = b_0 + b_1x_1 + b_mx^m$, który przybliży jednostajnie funkcję $f(x)$ w przedziale $[a, b]$. W trakcie analizy nie udało się jednak uzyskać takiego wielomianu o racjonalnym stopniu m , który można było uznać za adekwatny. Dlatego do opisu procesu przyjąłem postać wielomianu algebraicznego stopnia m , zawierającego interakcje pomiędzy parametrami procesu:

$$W(x) = b_0 + \sum_{i=1}^S b_i^{(1)} x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^S b_{ij}^{(1)} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,\dots,l,n=1 \\ i < j, \dots, l < n}}^S b_{ij\dots ln}^{(1)} x_i x_j \dots x_l x_n + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^S b_{ij}^{(2)} x_i^2 x_j + \sum_{i=1}^S b_{ii\dots m}^{(m)} x_i^m \quad (2)$$

w którym występuje L nieznanymi współczynników $b_0, b_i^{(1)}, b_{ij}^{(1)}, b_{ij\dots ln}^{(1)}, b_{ij}^{(2)}, b_{ii\dots m}^{(m)}$

Ocenę istotności współczynników równania regresji przeprowadziłem poprzez porównanie ich wartości z wartością krytyczną wyznaczoną ze wzoru:

$$b_{kr} = t_{(a,f)} \sqrt{\frac{S^2(y)}{Nr}} \quad (3)$$

gdzie: $t_{(a,f)} = t_{kr}$ jest testową wartością współczynnika t określaną z tablic rozkładu t -Studenta, r jest liczbą powtórzeń.

Do oceny adekwatności równania regresji z wynikami badań wykorzystałem test Fishera-Senecora.

Na pierwszym etapie analizy wyznaczyłem wariancję adekwatności:

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - k - 1} \quad (4)$$

gdzie: \bar{y}_i – wartość średnia wyników pomiarów w i -tym doświadczeniu, \bar{y}_i – wartość obliczona z równania regresji dla poziomów czynników wejściowych i wyjściowych i -tego doświadczenia, k – liczba wyrazów równania regresji (bez wyrazu wolnego) po odrzuceniu wyrazów nieistotnych, r – liczba powtórzeń, N – całkowita liczba doświadczeń.

Następnie wyznaczoną wartość współczynnika testowego F :

$$F = \frac{S_{ad}^2(y)}{S^2(y)} \quad (5)$$

porównano z wartością krytyczną określoną z tablic rozkładu Fishera-Snedecora uzyskując adekwatne równanie regresji opisujące wpływ parametrów punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszaniem na nośność połączenia, o następującej postaci:

$$W_F(x) = b_0 + b_1^{(1)} x_1 + b_2^{(1)} x_2 + b_3^{(1)} x_3 + b_{12}^{(1)} x_1 x_2 + b_{13}^{(1)} x_1 x_3 + b_{23}^{(1)} x_2 x_3 + b_{12}^{(2)} x_1^2 x_2 + b_{21}^{(2)} x_2^2 x_1 + b_{13}^{(2)} x_1^2 x_3 + b_{23}^{(2)} x_2^2 x_3 + b_{11}^{(2)} x_1^2 + b_{22}^{(2)} x_2^2 + b_{33}^{(2)} x_3^2 + b_{111}^{(3)} x_1^3 + b_{222}^{(3)} x_2^3 + b_{333}^{(3)} x_3^3 \quad (6)$$

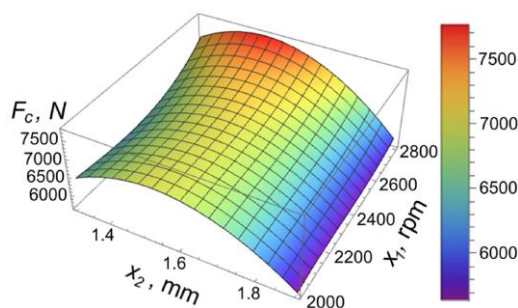
Wartości współczynników dla funkcji regresji opisujących nośność połączenia $W_F(x)$ i odchylenie standardowe procesu $W_\sigma(x)$ podano w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości współczynników równań regresji $W_F(x)$ i $W_\sigma(x)$

Współczynnik	$W_F(x)$	$W_\sigma(x)$
b_0	10878,1	-8585,36
$b_1^{(1)}$	-18,751	-1,0813
$b_2^{(1)}$	9753,29	18367,7
$b_3^{(1)}$	-4329,75	-63,958
$b_{12}^{(1)}$	28,626	0,1364
$b_{13}^{(1)}$	8,878	0,0164
$b_{23}^{(1)}$	-3808,33	-
$b_{12}^{(2)}$	-0,00426	-
$b_{21}^{(2)}$	-2,877	-
$b_{13}^{(2)}$	-0,000194	-
$b_{23}^{(2)}$	1187,5	-
$b_{11}^{(2)}$	-0,0054	0,0000838
$b_{22}^{(2)}$	-14944,4	-10739,6
$b_{33}^{(2)}$	-1153,15	9,791
$b_{111}^{(3)}$	$2,3485 \cdot 10^{-6}$	$6,304 \cdot 10^{-8}$
$b_{222}^{(3)}$	1921,3	2094,91
$b_{333}^{(3)}$	164,087	-

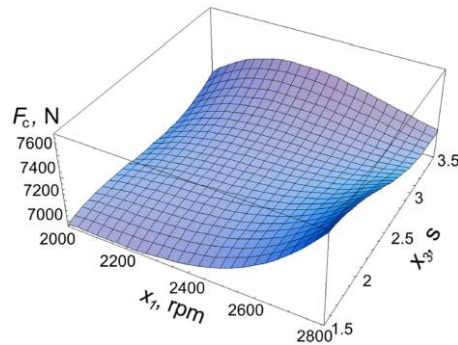
Maksymalna wartość błędu funkcji regresji nie przekroczyła 6,11%, natomiast błąd średniokwadratowy między wynikami uzyskanymi w wyniku badań i modelowania matematycznego wyniósł 2,55%

Na rysunku 4 przedstawiono wykres funkcji regresji dla stałej wartości czasu zgrzewania równy $x_3 = 1,5s$ oraz wyniki badań w postaci wykresu słupkowego z wynikami pomiarów oraz błędami aproksymacji funkcji. Z przedstawionych wykresów widać wyraźny wzrost nośności połączenia wraz ze wzrostem prędkości obrotowej oraz lokalne maksimum funkcji przy zagłębieniu narzędzia wynoszącym 1,5 mm. Kształt uzyskanej funkcji może wyjaśnić duże wartości odchylenia standardowego nośności złączy uzyskiwanych dla zagłębienia $x_2 = 1,5$ mm i prędkości obrotowej $x_1 = 2800$ obr./min, która po osiągnięciu maksimum gwałtownie opada zarówno w kierunku większych jak i mniejszych wartości zagłębienia narzędzia.



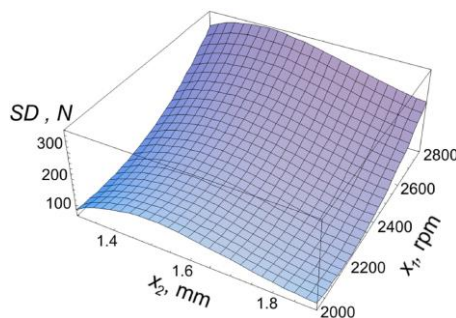
Rys. 4. Wpływ prędkości obrotowej i głębokości narzędzia na nośność połączenia [H3]

Przy zagłębieniu narzędzia wynoszącym $x_2 = 1,5$ mm (rysunek 5) wzrost prędkości obrotowej powoduje wzrost nośności połączenia. Sytuacja taka ma miejsce dla czasu zgrzewania zawierającego się w przedziale od 1,5 do 2,5 s. Dalsze zwiększenie czasu skutkuje gwałtownym spadkiem nośności połączenia. Analiza wykresu wykazuje również, że przy tym zagłębieniu narzędzia występuje jeszcze jedno lokalne maksimum funkcji dla czasu 3,5 s.



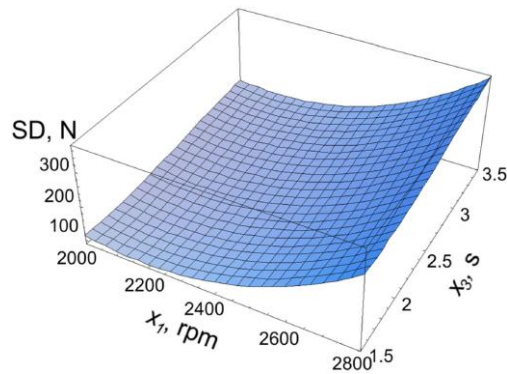
Rys. 5. Wpływ prędkości obrotowej i czasu zgrzewania na nośność połączenia [H3]

Funkcja regresji opisująca zmienność procesu $W_\sigma(x)$ spełniająca kryterium adekwatności Fishera-Senecora ma znacznie prostszą postać (tabela 1). Maksymalny błąd funkcji regresji w rozpatrywanym przypadku nie przekraczał 14,51%, natomiast błąd średniokwadratowy wyniósł 14,59%. Na rysunku 6 przedstawiono wpływ prędkości obrotowej i zagłębienia narzędzia na stabilność procesu (odchylenie standardowe). Analiza rysunku wskazuje, że wzrost prędkości obrotowej powoduje zwiększenie wartości odchylenia standardowego. W związku z tym stosowanie prędkości obrotowej wynoszącej 2800 obr./min, zapewniającej maksymalną nośność połączenia może być nieuzasadnione. W rzeczywistej konstrukcji składającej się z dużej liczby złączy, tylko niektóre będą w stanie przenieść maksymalne obciążenie, co może przyczynić się zmniejszenia jej niezawodności.



Rys. 6. Wpływ prędkości obrotowej i zagłębienia narzędzia na odchylenie standardowe nośności połączeń [H3]

Podobną tendencję zmniejszenia stabilności procesu można zaobserwować analizując wykres wpływu prędkości obrotowej narzędzia i czasu zgrzewania na odchylenie standardowe nośności złączy (rysunek 7). Wzrost czasu zgrzewania prowadzi w tym przypadku również do zmniejszenia stabilności procesu.



Rys. 7. Wpływ prędkości obrotowej i czasu zgrzewania na odchylenie standardowe nośności połączeń [H3]

Optymalizacja parametrów procesu zgrzewania musi gwarantować nie tylko dużą nośność połączeń, lecz również wysoką stabilność procesu, charakteryzującego się możliwie najniższą wartością wariancji uzyskiwanych wyników. Wymaga to przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej procesu i znalezienia rozwiązania kompromisowego spełniającego przedstawione warunki.

Dla zapisania problemu wielokryterialnego przyjąłem oznaczenia:

$D \subset R^m$ – zbiór rozwiązań dopuszczalnych – zakres parametrów ustawczych procesu,

$z = (z_1, z_2, \dots, z_m) \in D$ – rozwiązanie dopuszczalne,

$f_i : D \rightarrow R$ – i -ta funkcja celu ($i = 1, 2, \dots, k$),

$(z) = (f_1(z), f_2(z))$ – funkcja celu zagadnienia wielokryterialnego.

Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej doboru parametrów procesu można zapisać w postaci:

$$\begin{cases} f_1(z) = W_F(x) \rightarrow \max, \\ f_2(z) = W_\sigma(x) \rightarrow \min, \\ z \in D \end{cases} \quad (7)$$

Zagadnienie jednokryterialne

$$f_i(z) \rightarrow \text{ekstremum}, \quad z \in D \quad (8)$$

jest i -tym zagadnieniem cząstkowym, natomiast wektor $z^{io} \in D$, w którym i -ta funkcja celu osiąga poszukiwane ekstremum – i -tym rozwiązaniem cząstkowym. Wektor:

$$\varphi^o = (f_1(z^{1o}), f_2(z^{2o})) \quad (9)$$

to wektor zwany rozwiązaniem idealnym (utopijnym) w przestrzeni ocen, natomiast:

$$z^o = (z^{1o}, z^{2o}) \quad (10)$$

rozwiązaniem idealnym. Najczęściej rozwiązanie idealne zagadnienia (7) nie jest osiągalne, co oznacza, że w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych D nie istnieje wektor z^o , dla którego wszystkie funkcje celu osiągają poszukiwane ekstremum. Dlatego przy rozwiązaniu przedstawionego zagadnienia poszukiwano rozwiązań efektywnych.

Zbiór rozwiązań efektywnych najczęściej zawiera wiele rozwiązań. Dlatego celem przedstawionego zagadnienia było wybranie ze zbioru rozwiązań efektywnych jednego rozwiązania, zwanego rozwiązaniem kompromisowym (kompromisowo-optymalnym). W tym celu sprowadzono zagadnienie (7) do postaci jednokryterialnej, z funkcją skalaryzującą $s : R^k \rightarrow R$ w postaci:

$$\max(s(f_1(z), f_2(z)) : z \in D) \quad (11)$$

Skalaryzację zagadnienia przeprowadzono z wykorzystaniem metody ważenia ocen. Przyjęto wartości wag $u_i > 0$ poszczególnych kryteriów f_i (spełniające warunek $u_1 + u_2 = 1$), a następnie wyznaczano rozwiązanie optymalne zagadnienia (12)

$$\max \left(\sum_{i=1}^k u_i f_i(z) : z \in D \right) \quad (12)$$

Utworzenie funkcji $\varphi(z) = \sum_{i=1}^k u_i f_i(z)$ jest możliwe tylko wtedy, gdy wszystkie funkcje celu wyrażone są w takich samych jednostkach i skalach wartości. Ponieważ w rozpatrywanym przypadku funkcje celu wyrażone były w różnych skalach wartości, przeprowadzono ich transformację do postaci bezwymiarowej w postaci:

$$f_i^u(z) = \frac{f_k(z) - \min(f_k(x) : x \in D)}{\max(f_k(x) : x \in D) - \min(f_k(x) : x \in D)} \quad (13)$$

Tak zdefiniowane funkcje celu f_i^u przyjmują dla $z \in D$ wartości z przedziału $[0, 1]$ i są bezwymiarowe.

Funkcja opisująca nośność połączenia $W_F(x)$ osiąga wartość maksymalną wynoszącą 7801,3 N przy prędkości obrotowej $x_1=2800$ obr./min., zagłębieniu narzędzia $x_2=1,55$ mm oraz czasie zgrzewania $x_3=1,5$ s, oraz minimalną (5613,56 N) przy $x_1=2000$ obr./min, $x_2=1,9$ mm i $x_3=1,5$ s. Uzyskane wartości maksymalne i minimalne odpowiadają skrajnym parametrom ustawczym procesu zgrzewania, przy których prowadzane były badania.

Po transformacji funkcja opisująca nośność połączenia, będąca zagadnieniem cząstkowym zagadnienia (7) przyjmuje następującą postać:

$$f_1^u(z) = \frac{W_F(x) - 7801.3N}{7801.3N - 5613.6N} \quad (14)$$

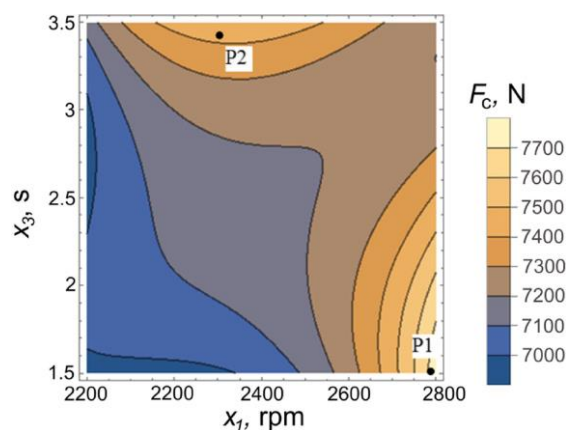
Druga funkcja opisująca odchylenie standardowe rozrzutu wyników przyjmuje największą wartość (380,87 N) przy prędkości obrotowej $x_1=2800$ obr./min., zagłębieniu narzędzia $x_2=1,46$ mm oraz czasie zgrzewania $x_3=3,5$ s, natomiast wartość minimalną (16,85 N) przy $x_1=2226,55$ obr./min, $x_2=1,9$ mm i $x_3=1,81$ s. Ponieważ w metodzie ważenia ocen obie funkcje mają być maksymalizowane, druga funkcja przyjmie postać:

$$f_2^u(z) = -\frac{W_\sigma(x) - 380,87N}{380,87N - 16,85N} \quad (15)$$

Po przeprowadzeniu unitaryzacji poszukiwano o optymalnego rozwiązania zagadnienia:

$$\max \left(\sum_{i=1}^k u_i f_i^u(z) : z \in D \right) \quad (16)$$

Rozwiązanie optymalne zagadnienia (16) jest rozwiązaniem efektywnym zagadnienia wielokryterialnego. Postać rozwiązania zależy od przyjętej wartości wag u_i . Jeżeli podczas obliczeń przyjmie się, że siła nośna połączenia jest najważniejszym parametrem decydującym o jakości połączeń ($u_1=1, u_2=0$) wówczas uzyskane rozwiązanie pokrywa się z rozwiązaniem optymalnym zadania cząstkowego (14) (rysunek 8, pkt. 1).



Rys. 8. Wyniki rozwiązania zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej [H3]

W przypadku przyjęcia jednakowych wartości wag ($u_i = 0,5$) funkcja (16) osiąga maksimum dla prędkości obrotowej $x_1 = 2229$ obr./min., zagłębienia narzędzia $x_2 = 1,60$ mm oraz czasu zgrzewania $x_3 = 2,02$ s. Odpowiada to nośności połączenia $7071,5$ N i odchyleniu standardowemu rozrzutu wyników wynoszącemu $86,22$ N. Jeżeli natomiast podczas procesu optymalizacji zostaną przyjęte różne wartości wag wówczas można uzyskać jeszcze inne rozwiązanie kompromisowe. Założenie, że nośność polaczenia jest ważniejsza od wariacji procesu ($u_1 = 0,6$, $u_2 = 0,4$) przemieszcza rozwiązanie optymalne do punktu odpowiadającego prędkości obrotowej $x_1 = 2256,05$ obr./min, zagłębienia narzędzia $x_2 = 1,55$ mm i czasu $x_3 = 3,4$ s (rysunek 8, pkt. 2). Zastosowanie podanych parametrów ustawczych procesu daje możliwość uzyskania nośności połączenia wynoszącego $7462,37$ N przy odchyleniu standardowym rozrzutu wyników na poziomie $142,09$ N. W celu weryfikacji uzyskanych wyników wykonano z 6 zgrzein z parametrami odpowiadającymi punktowi 2 na wykresie (rysunek 8), a następnie przeprowadzono statyczną próbę ścinania, na podstawie której wyznaczono średnią nośność spoin i odchylenie standardowe rozrzutu wyników. Średnia wartość nośności połączenia wyniosła 7115 N a więc o $0,6\%$ więcej od wartości uzyskanej w wyniku optymalizacji przy odchyleniu standardowym wynoszącym $102,3$ N.

Zagadnienie optymalizacji parametrów procesu zgrzewania przedstawiłem w publikacjach **H3** i **H6**.

Badania możliwości zgrzewania blach pokrytych polimerowym uszczelniaczem stanowiącym zabezpieczenie antykorozyjne

Bardzo istotnym zagadnieniem w budowie cienkościennych struktur jest kwestia uszczelnienia połączenia zakładkowego oraz ochrona antykorozyjna [7]. W przypadku struktur nitowanych uszczelniacz można wygodnie aplikować na powierzchnie łączonych elementów przed ich połączeniem. Z kolei w przypadku konstrukcji łączonych poprzez zgrzewanie rezystancyjne uszczelniacz jest aplikowany po procesie zgrzewania. Łączy się to z trudnościami technologicznymi, gdyż należy szczelnie wypełnić tworzywem uszczelniającym szczelinę o wymiarze nie przekraczającym $0,05$ mm.

Stąd zaproponowałem, aby zweryfikować możliwość powlekania blach uszczelniaczem przed procesem zgrzewania metodą RFSSW i poddać analizie właściwości tak powstałego złącza.

Ze względu na oddziaływanie podwyższonej temperatury podczas zgrzewania, należało starannie dobrać tworzywo uszczelniające, aby było ono odporne na krótkotrwałe oddziaływanie tej temperatury. W tym celu w metodyce badawczej zaproponowałem dokonanie pomiaru temperatury,

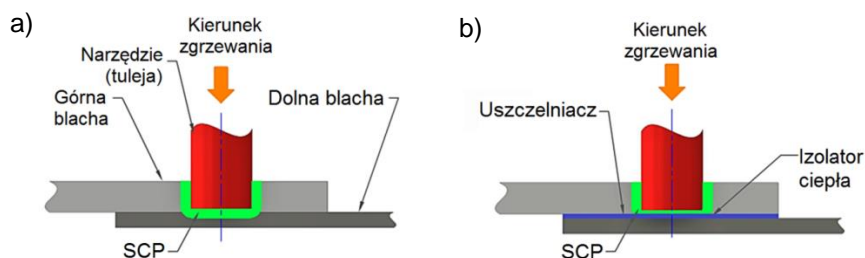
na którą narażone będzie tworzywo pokrywające blachy w obrębie zakładki. W tym celu dokonano pomiaru temperatury podczas zgrzewania przez zastosowanie termopary umieszczonej w otworze wykonanym w blasze zgrzewanej.

Znając temperaturę, działającą na tworzywo uszczelniające w procesie zgrzewania (która wynosi ok. 405 °C), do badań dobrano dwa różne typy uszczelniaczy, które w założeniu są odporne co najmniej na krótkotrwałe działanie wskazanej temperatury.

Pierwszym z wybranych uszczelniaczy jest klej na bazie żywicy fenolowo-formaldehydowej Aqualock AL 6002 firmy Henkel Niemcy. Klej ten cechuje się tym, iż jest wodno-rozpuszczalny, dzięki czemu po nałożeniu cienkiej warstwy na zgrzewaną blachę ulega wstępnemu utwardzeniu poprzez samoczynne odparowanie wody, co jest wygodne ze względu na procesy manipulacyjne przed zgrzewaniem. Natomiast właściwe utwardzenie kleju następuje pod wpływem podwyższonej temperatury oraz nacisku, co następuje w procesie zgrzewania.

Drugi ze stosowanych materiałów uszczelniających, to uszczelniaacz w postaci dwustronnej taśmy klejącej Trosifol 100 firmy Kuraray GmbH, Niemcy.

W ramach badań wstępnych wykazałem, że pakiet zgrzewanych blach z warstwą uszczelniającą wymaga odmiennych parametrów niż w przypadku tych samych blach bez dodatkowej warstwy. Dla połączenia bez warstwy uszczelniającej najwyższą nośność złącza uzyskano dla zagłębienia narzędzia $g = 1,5$ mm. Jest to wartość zagłębienia, przy której nie dochodzi do przejścia narzędzia przez wspólną płaszczyznę na granicy blach, a efektywne połączenie wytwarzane jest dzięki oddziaływaniu strefy cieplno-plastycznej. Próba zgrzewania blach z rozdzielającą warstwą uszczelniacza przy wskazanej wartości zagłębienia nie powiodła się, ponieważ przy stosowanych parametrach procesu klej uszczelniający stanowił izolację termiczną w procesie, co schematycznie przedstawiono na rysunku 9. Zatem wykazałem, że uszczelniaacz ma wpływ na rozkład ciepła podczas zgrzewania.



Rys. 9. Poglądowy rozkład strefy cieplno-plastycznej podczas zgrzewania dla pakietu blach bez uszczelniacza (a) oraz z uszczelniaczem tworzącym izolator ciepła (b) [H1]

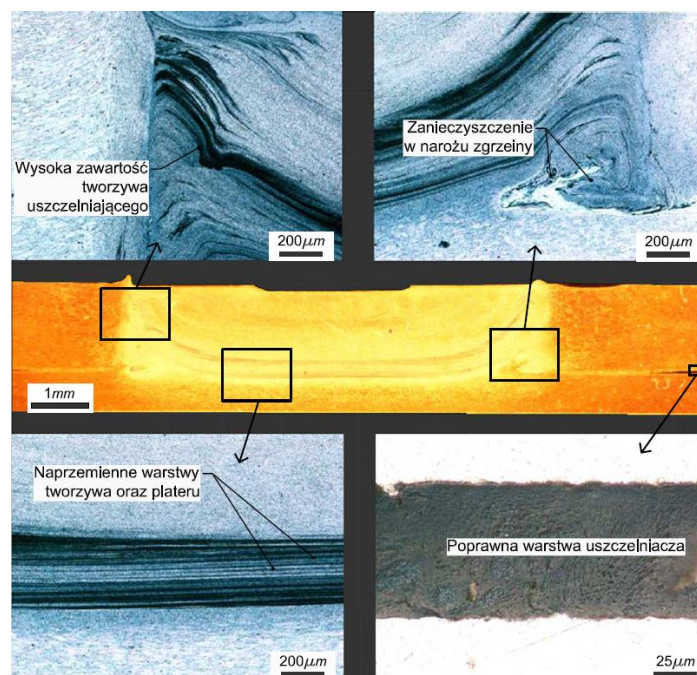
Udało się potwierdzić drogą eksperymentalną możliwość uszczelnienia połączenia zakładkowego poprzez aplikację warstwy uszczelniacza na powierzchni zgrzewanych blach przed procesem ich łączenia. Z technologicznego punktu widzenia, jest to najkorzystniejsza metoda uszczelniania. Jednak wyniki badań wykazały, że w każdym z rozpatrywanych wariantów w mniejszym lub większym stopniu doszło do zanieczyszczenia struktury zgrzeiny tworzywem uszczelniającym. Także w każdym z wariantów doszło do obniżenia nośności połączenia. Generalnie należy stwierdzić, że w odniesieniu do odpowiedzialnych konstrukcji nośnych, przedstawione rozwiązanie nakładania tworzywa uszczelniającego nie jest właściwe. Aczkolwiek taka forma uszczelniania hipotetycznie może być użyta w mniej odpowiedzialnych fragmentach konstrukcji. Dla odpowiedzialnych struktur najbardziej korzystną formą zabezpieczenia antykorozyjnego, które w żaden sposób nie wpłynie na jakość zgrzeiny, pozostaje uszczelnianie typowe dla złączy wytwarzanych metodą zgrzewania

rezystancyjnego, czyli aplikowanie kleju o niskiej lepkości do szczeliny zakładki po procesie zgrzewania.

Wykazałem, że w przypadku wszystkich prezentowanych wariantów polimerowe tworzywo uszczelniające ulega zmieszaniu z materiałem zgrzewanym, tj. ze stopem aluminium 7075 (rysunek 10). Stopień wymieszania materiału uszczelniającego w spoinie zależy od rodzaju tworzywa oraz grubości warstwy.

Badania mikroskopowe wykazały, że w przypadku obydwu zastosowanych typów uszczelniaczy nie doszło do ich degradacji na skutek wysokiej temperatury, czyli karbonizacji lub spalania.

Siła nacisku stempla spowodowała w pewnym stopniu wyciśnięcie uszczelniacza z obszaru wokół zgrzeiny. Maksymalna wartość tej siły nie była wystarczająca do całkowitego wyciśnięcia polimeru z obszaru zgrzeiny. Pozostały materiał polimerowy uległ zmieszaniu z metalem i gromadzi się zwłaszcza w dolnej części strefy mieszania.



Rys. 10. Makro- oraz mikrostruktury zgrzeiny z uszczelniaczem polimerowym [H1]

Złącze RFSSW z pojedynczą warstwą pośrednią w formie taśmy epoksydowej zapewnia szczelne połączenie o wysokiej wytrzymałości na ścinanie, która jest tylko o 9% niższa w porównaniu do połączenia bez uszczelniacza.

Zagadnienie zgrzewania blach pokrytych tworzywem uszczelniającym przedstawiłem w pracy **H1** oraz w publikacji z bazy JCR **H8**.

Analiza mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego dla różnych poziomów obciążenia zmiennego w badaniach wysoko-cyklowej wytrzymałości zmęczeniowej przy granicznej liczbie cykli równej 2×10^6

Technologia zgrzewania tarcowego z przemieszaniem jako relatywnie nowa, wciąż wymaga szeregu badań eksperymentalnych wzbogacających powszechną wiedzę na jej temat. Ponieważ w technologii tej upatruje się atrakcyjną technikę łączenia struktur lotniczych z trudno spawalnych stopów duraluminiowych [4], wymaga ona wyjątkowo dobrego poznania szczególnie pod kątem

długotrwałej eksploatacji, a to z kolei przekłada się na konieczność poznania zachowania się połączeń pod wpływem obciążeń zmęczeniowych.

Zrealizowałem wysokocyklowe badania wytrzymałości zmęczeniowej połączeń zakładkowych obciążonych na ścinanie. W ramach tych badań poddałem analizie mechanizm zniszczenia przy poszczególnych poziomach obciążenia zmiennego. Mechanizm ten określiłem przede wszystkim na podstawie obrazów SEM przełomów zmęczeniowych.

Poddałem również analizie wpływ wad strukturalnych zgrzeiny na mechanizm zniszczenia zmęczeniowego.

Badania wytrzymałości zmęczeniowej przeprowadziłem na maszynie wytrzymałościowej Instron E10000 w temperaturze pokojowej. Zrealizowałem wysokocyklowe badania zmęczeniowe o granicznej liczbie cykli równej 2×10^6 , zastosowano częstotliwość równą 50 Hz, natomiast współczynnik obciążenia zmiennego $R = 0,1$.

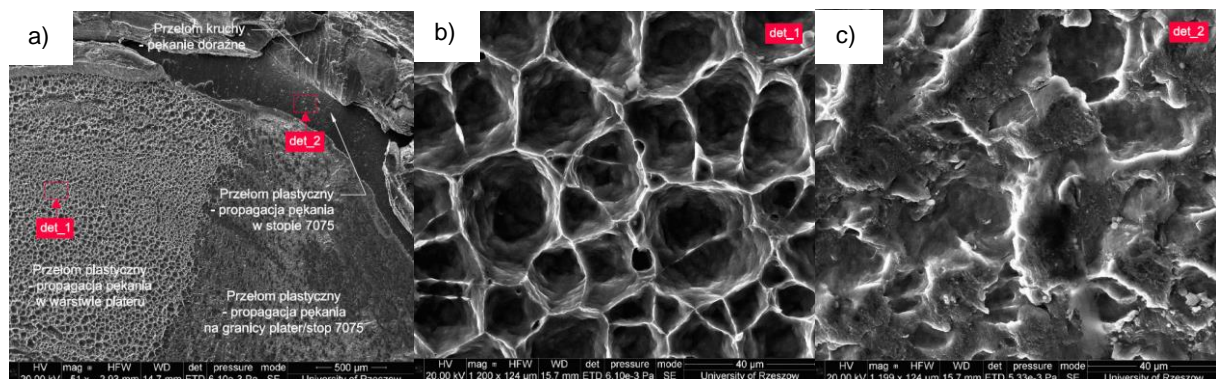
Dla wybranych próbek dokonałem analizy składu chemicznego prowadzono na zasadzie rentgenowskiej spektroskopii energodispersyjnej (EDS).

W obszarze niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej próbki uległy zniszczeniu w płaszczyźnie połączenia na skutek obciążeń ścinających. Na podstawie analizy EDS powierzchni przełomu wykazałem, że złącze uległo zniszczeniu w płaszczyźnie nawarstwienia plateru w strukturze zgrzeiny. Świadczy o tym skład chemiczny wykazujący niemal czyste aluminium na przełomie, co pokrywa się ze składem chemicznym plateru. Na podstawie analizy przełomów zmęczeniowych wykazałem liczne pęknięcia w warstwie plateru. Potwierdziłem tym samym hipotezę, że nawarstwiony plater na dnie zgrzeiny stanowi swego rodzaju karb strukturalny i w tym przypadku warstwa plateru przy dnie zgrzeiny jest hipotetycznie miejscem inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Dodatkowo poprzez analizę EDS wykazałem obecność tlenków na powierzchni przełomu stanowiących zanieczyszczenie zgrzein. Technologia RFSSW nie wymaga dokładnego oczyszczania powierzchni łączonych blach do czystej warstwy metalicznej, blachy przed zgrzewaniem były jedynie czyszczone acetonem, więc oczywistym jest, iż powierzchnie zgrzewane ze stopu aluminium pokryte były warstwą tlenków. Częściowo tlenki mogły ulec rozbiciu i wydaleniu spoza obszaru zgrzeiny podczas procesu, ale jak widać pojawiają się one w strukturze złącza, co także może być czynnikiem osłabiającym połączenie i może prowadzić do inicjacji pęknięć zmęczeniowych.

Wykazałem także, że propagacja pęknięcia zmęczeniowego w strukturze zgrzeiny postępowała w warstwie plateru, ale także na granicy plateru oraz właściwego stopu aluminium EN AW-7075, co potwierdziłem dzięki analiza składu chemicznego EDS wykazując we wskazanym obszarze obecność pierwiastków stopowych tego stopu. Zasadniczo wykazałem, że inicjowanie pęknięcia zmęczeniowego w połączeniu zakładkowym zgrzewanym metodą RFSSW następuje na granicy warstwy plateru oraz stopu aluminium EN AW-7075.

Wykazałem, że charakter pęknięcia zmęczeniowego w strefie przełomu plastycznego jest odmienny w obszarze plateru oraz właściwego stopu 7075. Na rysunku 11 przedstawiłem przełom zmęczeniowy zgrzeiny obciążonej siłą zmienną o maksymalnej wartości równej 2 kN, która uległa zniszczeniu po $26,913 \times 10^3$ cyklach obciążenia. Podobnie jak w przypadku poprzednio opisanej próbki, można tu dostrzec obszary pęknięcia w warstwie plateru oraz we właściwym stopie 7075. Dodatkowo można tu wyróżnić obszar propagacji pęknięcia zmęczeniowego na granicy pomiędzy platerem, a stopem 7075. Duże powiększenie przełomu zmęczeniowego w obszarze plateru umożliwia identyfikację charakterystycznego pęknięcia ciągłego cechującego się powstaniem wgłębień (tzw. dołków, kraterów), co zobrazowano na rysunku 11b. Zupełnie odmienna jest topografia powierzchni przełomu zmęczeniowego stopu aluminium. Ze względu na odmienne właściwości mechaniczne tego

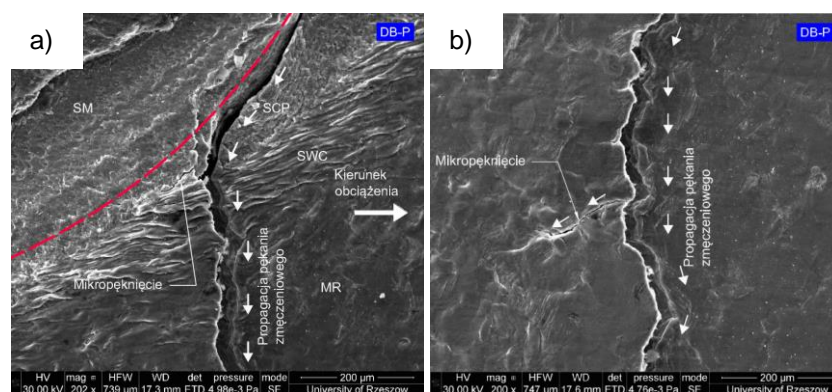
stopu, pomimo, że ciągle można tu zidentyfikować propagację pęknięcia zmęczeniowego, a zatem występuje tu przełom plastyczny, to jednak nie doszło tu do powstania charakterystycznych kraterów (rysunek 11c).



Rys. 11. Obrazy SEM powierzchni przełomu zmęczeniowego zgrzeiny, która uległa zniszczeniu zmęczeniowemu $26,913 \times 10^3$ cyklach obciążenia siłą zmienną o wartości maksymalnej równej 2 kN, widok o małym powiększeniu obrazujący charakterystyczne strefy pęknięcia (a), duże powiększenie przełomu zmęczeniowego w warstwie plateru (b) oraz w stopie aluminium 7075 (c) [H1, H5]

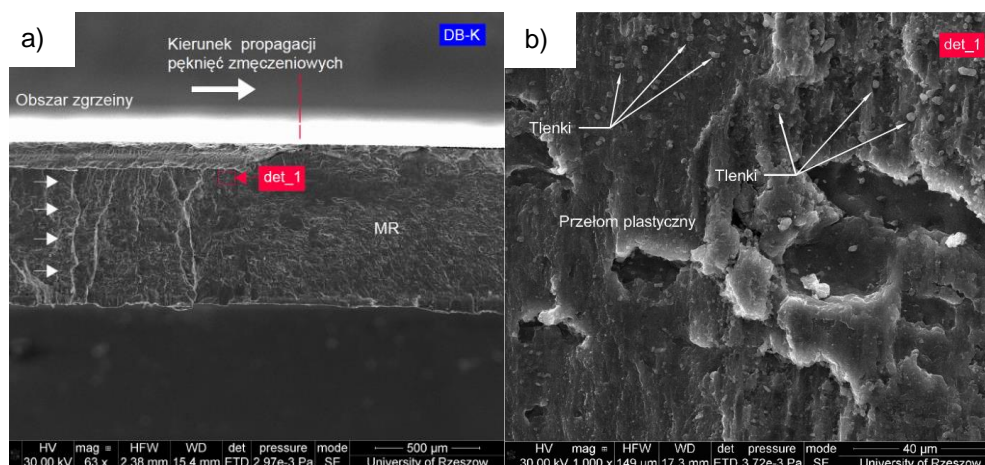
Poddając analizie przełomy zmęczeniowe próbek obciążonych niższym poziomem siły zmiennej, tj. 1,5 kN, wykazałem, że w skali makro jego charakter jest podobny jak dla poprzedniego opisanego przypadku, tj. złącze uległo zniszczeniu na skutek jego ścinania. Jednak w skali mikroskopowej, na płaszczyźnie blachy obecne jest pęknięcie, które zainicjowane było przy obwodzie zgrzeiny pomiędzy strefą zgrzeiny, a strefą cieplno-plastyczną. Wykazałem także, że obwodowe początkowo pęknięcie miało tendencję do propagacji w różnych kierunkach ze względu na postępowanie pęknięcia wzdłuż granicy ziaren. Propagacja pęknięcia w pewnym punkcie zmienia swój kierunek z obwodowego, na poprzeczny, prostopadły do kierunku obciążenia blachy (rysunek 12a). Wyraźnie widać tu pęknięcie zmęczeniowe na skutek rozciągania dolnej blachy, pomimo tego, ostatecznie próbek uległa zniszczeniu w płaszczyźnie połączenia wskutek ścinania. Świadczy to, że równoległe zachodziły dwa mechanizmy pęknięcia zmęczeniowego, przy czym ten na skutek ścinania w płaszczyźnie połączenia doprowadził do wcześniejszego obniżenia nośności połączenia, niż pęknięcie rozciąganej dolnej blachy. W rezultacie szybciej postępujący mechanizm zniszczenia w płaszczyźnie złącza doprowadził do ostatecznego przełomu połączenia.

Obserwując postępujące pęknięcie w poprzek blachy (rysunek 12b) dostrzegalne są boczne odnogi pęknięcia od głównego frontu propagacji w formie mikropęknięć zjawisko to może świadczyć o propagacji pęknięcia wzdłuż granicy ziaren.



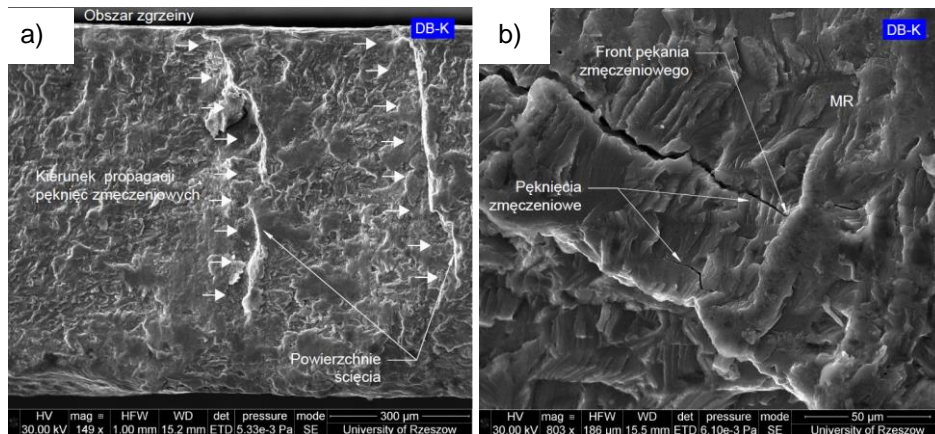
Rys. 12. Obrazy SEM przełomu zmęczeniowego dla połączenia, które uległo zniszczeniu po $42,639 \times 10^3$ cyklach obciążenia siłą zmienną o maksymalnej wartości równej 1,5 kN; zmiana kierunku propagacji pęknięcia z obwodowego na prostopadły do kierunku obciążenia (a); propagacja pęknięcia w materiale rodzimym z widoczną odnogą w formie mikropęknięcia (b) (oznaczenia: „DB-P” oznacza Dolna Blacha-Płaszczyzna) [H1, H5]

Odmienne charakterystyki zniszczenia zmęczeniowego wykazałem dla próbek obciążonych siłą zmienną o maksymalnej wartości równej 1 kN. W tym przypadku doszło do zniszczenia dolnej blachy przez pęknięcie zmęczeniowe wywołane jej rozciąganiem. Na rysunku 13a widoczny jest widok struktury czoła przełomu obejmujący zewnętrzną krawędź zniszczonej zgrzeiny, dostrzegalne są tu linie obrazujące przemieszczanie się pęknięcia zmęczeniowego. Przechodząc do analizy mikrostruktury przełomu, rysunek 13b przedstawia widok strefy cieplno-plastycznej zgrzeiny, widać tutaj typowy dla zniszczenia zmęczeniowego przełom ciągliwy. W tym fragmencie mikrostrukturalnym dostrzec także można intensywną obecność tlenków, co potwierdza wcześniej opisaną zjawisko zanieczyszczania tlenkami występującymi na powierzchni plateru przed zgrzewaniem struktury zgrzeiny, które to tlenki podczas zgrzewania zostały rozbite i częściowo zmieszane ze stopem metali łączonych (rysunek 13b). Tlenki te zostały zidentyfikowane na podstawie analizy składu chemicznego metodą EDS.



Rys. 13. Obrazy SEM przełomu zmęczeniowego dla połączenia, które uległo zniszczeniu po $231,794 \times 10^3$ cyklach obciążenia siłą zmienną o maksymalnej wartości równej 1 kN; przełom zmęczeniowy obejmujący obszar zgrzeiny oraz materiał rodzimy (a); przełom zmęczeniowy w strefie cieplno-plastycznej (b); (oznaczenia: „DB-K” oznacza Dolna Blacha-Krawędź; „det_” oznacza detal powiększony) [H1, H5]

W przypadku najniższego poziomu obciążenia zmiennego przy którym doszło do zniszczenia zmęczeniowego połączenia, tj. dla maksymalnej wartości siły zmiennej równej 900 N, poddałem szczegółowej analizie przełom zmęczeniowy próbki, która uległa zniszczeniu po $1363,043 \times 10^3$ cyklach obciążenia. Mamy tu do czynienia właściwie z tym samym charakterem zniszczenia, do jakiego doszło w przypadku próbki obciążonej siłą zmienną równą 1 kN. Zatem doszło tu do zniszczenia dolnej blachy na skutek jej rozciągania. Na czole przełomu blachy, w obszarze zgrzeiny można wyróżnić charakterystyczne progi pęknięcia określane jako powierzchnie ścięcia, które zaznaczono na rysunku 14a. To samo zjawisko występowało w przypadku bezpośrednio wcześniej opisanym. Podobnie jak dla poprzedniego przypadku poniżej obszaru zgrzeiny można tu dostrzec potwierdzenie propagacji pęknięcia zmęczeniowego o czym świadczą fragmenty przełomu plastycznego, występują tu także fragmenty pęknięcia kruchej (rysunku 14b).



Rys. 14. Obrazy SEM przełomu zmęczeniowego dla połączenia, które uległo zniszczeniu po $1363,043 \times 10^3$ cyklach obciążenia siłą zmienną o maksymalnej wartości równej 0,9 kN; przełom zmęczeniowy w obszarze zgrzeiny (a); przełom zmęczeniowy w obszarze materiału rodzimego (b); (oznaczenia: „DB-K” oznacza Dolna Blacha-Krawędź) [H1, H5]

Określenie wpływu wad struktury zgrzeiny na mechanizm zniszczenia zmęczeniowego połączenia

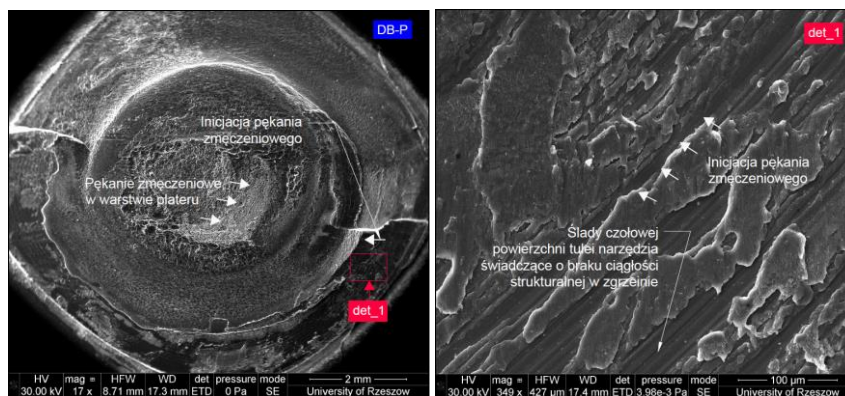
Ponieważ uprzednio wykazałem w ramach badań metalograficznych pewne charakterystyczne wady zgrzeiny będące efektem niepoprawnie dobranych parametrów, postanowiłem dokonać analizy wpływu tych wad na mechanizm zmęczenia. Zagadnienie do szczegółowo opisałem w pracach H1, H6.

Badaniom zmęczeniowym poddałem próbki z wadami typowymi dla zgrzewania przy parametrach niezapewniających dostatecznego uplastycznienia metalu na skutek zbyt małej ilości ciepła wygenerowanego podczas zgrzewania. Badano tu zgrzeiny wykonane przy zastosowaniu następujących parametrów: prędkość obrotowa narzędzia $n = 2000$ obr./min; maksymalne zagłębienie narzędzia $g = 1,5$ mm; czas zgrzewania $t = 1,5$ s.

Wady wynikające z niedostatecznego uplastycznienia materiału, to przede wszystkim brak ciągłości strukturalnej wzdłuż obwodu zgrzeiny będąca skutkiem braku trwałego połączenia – spojenia metalicznego materiału wciskanego podczas procesu zgrzewania z materiałem rodzimym. Podobnie powstałą wadą struktury jest częściowy brak połączenia na dnie zgrzeiny w płaszczyźnie maksymalnego zagłębienia tulei podczas zgrzewania. Ostatnią z opisywanych wad są pustki w narożu zgrzeiny także będące wynikiem niedostatecznego uplastycznienia materiału zgrzewanego. Dla zgrzein zawierających wszystkie z wymienionych wad struktury powtórzyłem wysokocyklowe badania zmęczeniowe.

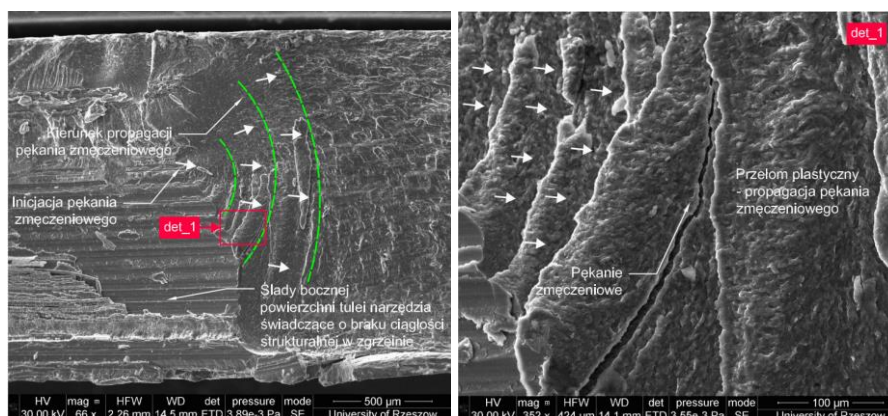
Poniżej przytaczam analizę przełomów zmęczeniowych dla dwóch charakterystycznych poziomów obciążenia zmiennego.

Na rysunku 15 przedstawiono przełom zmęczeniowy połączenia obciążonego siłą zmienną o maksymalnej wartości równej 1,5 kN. Widać tu istotny wpływ wady w postaci braku ciągłości w dolnej części zgrzeiny na inicjację i kierunek propagacji pęknięcia zmęczeniowego. Zakres występowania tej nieciągłości wykazałem poprzez badania nieniszczące metodą skaningowej mikroskopii akustycznej. Wykazałem, że rozpatrywana wada zgrzeiny doprowadziła do zniszczenia połączenia przy znacznie niższej liczbie cykli zmęczeniowych, bo średnio $69,9 \times 10^3$, podczas gdy prawidłowo uformowane połączenie przy takim poziomie obciążenia zmiennego ulegało zniszczeniu przy średnio $148,3 \times 10^3$ cyklach, co ma przełożenie na spadek trwałości zmęczeniowej o 53%.



Rys. 15. Obrazy SEM przełomu zmęczeniowego przedstawiające mechanizm zniszczenia zmęczeniowego dla zgrzeiny, która uległa zniszczeniu przy poziomie obciążeń zmiennych równym 1,5 kN; (oznaczenia: „DB-P” oznacza Dolna Blacha-Powierzchnia; „det_” oznacza detal powiększony) [H1, H2]

Przy niższej wartości obciążenia zmiennego, tj. przy maksymalnej wartości siły zmiennej równej 900 N, wykazałem z kolei, że wada w postaci nieciągłości obwodowej ma wpływ na znaczący spadek trwałości zmęczeniowej połączenia. Na rysunku 16 przedstawiono widoki przełomu zmęczeniowego połączenia z widocznymi śladami bocznej powierzchni narzędzia (tulei) co potwierdza nieciągłość strukturalną. Widoki przełomu zmęczeniowego wskazują również, że propagacja pęknięcia zmęczeniowego inicjowana były przy wskazanej nieciągłości, co wiąże się ze spiętrzeniem naprężeń w tym obszarze. Wykazałem, że rozpatrywana wada zgrzeiny przy wskazanym poziomie obciążenia zmiennego prowadzi do znaczącej redukcji trwałości zmęczeniowej. Dla połączenia z wadą średnia wartość trwałości zmęczeniowej wyniosła $609,3 \times 10^3$ cykli, natomiast dla poprawnie ukształtowanego złącza wykazano trwałość równą 1296×10^3 cykli. Przekłada się to na spadek trwałości zmęczeniowej o 53% na poziomie obciążenia zmiennego 900 N.



Rys. 16. Obrazy SEM przełomu zmęczeniowego obciążonego zmienną siłą o maksymalnej wartości równej 900 N; (oznaczenia: „det_” oznacza detal powiększony) [H1, H2]

Na podstawie badań zmęczeniowych dla połączeń z rozpatrywanymi wadami strukturalnymi określiłem wpływ poszczególnych wad zgrzeiny na mechanizm zniszczenia dla różnych poziomów obciążenia zmiennego co przedstawiono w pracach H1, H6.

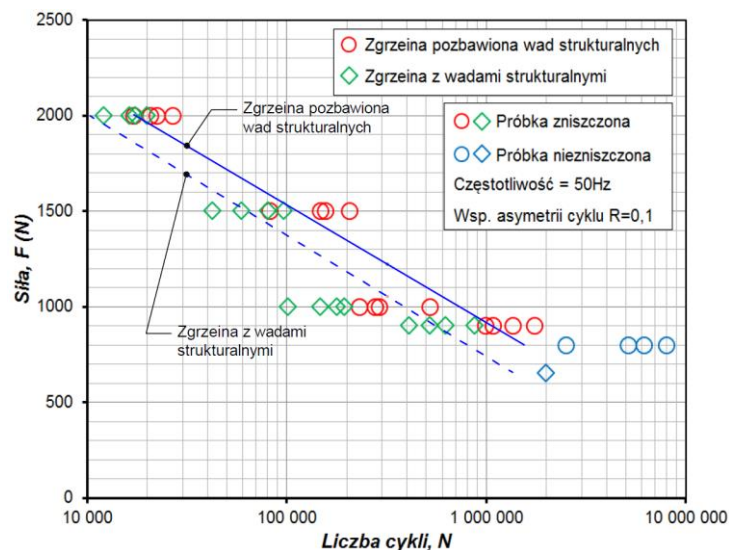
Potwierdziłem zatem jak istotne z punktu widzenia długotrwałej eksploatacji przy zmiennym obciążeniu jest zapewnienie, aby zgrzeiny pozbawione były jakichkolwiek wad strukturalnych. Przedstawione nieciągłości struktury złącza prowadzą do znaczącego obniżenia trwałości zmęczeniowej. Zależy jest to od poziomu obciążenia, ale wady mogą prowadzić do obniżenia

trwałości zmęczeniowej o ponad 50%, co jest niedopuszczalne w odpowiedzialnych konstrukcjach, stąd też istotne jest prowadzenie efektywnej kontroli jakości połączeń stosowanych w konstrukcjach metodami nieniszczącymi.

Należy przy tym podkreślić, że omawiane wady zgrzeiny w odniesieniu do badań wytrzymałości przy próbach statycznych, nie wykazują istotnego wpływu na nośność doraźną.

Potwierdzono także, że defekty złącza efektywnie można wykryć przedstawioną nieniszczącą metodą skaningowej mikroskopii akustycznej.

Rezultaty badań wytrzymałości zmęczeniowej zarówno dla prawidłowo ukształtowanych połączeń, jak również dla zgrzeiny z wadami strukturalnymi posłużyły do wykreślenia krzywych zmęczeniowych (rysunek 17). Porównując przebiegi tych krzywych można zaobserwować, że w rozpatrywanym zakresie liczby cykli zmęczeniowych niezależnie od poziomu obciążenia zmiennego wady struktury złącza znacząco obniżają jego trwałość zmęczeniową. Z kolei poziom siły maksymalnej odpowiadającej wytrzymałości zmęczeniowej przy granicznej liczbie cykli równej 2×10^6 dla połączenia z wadami wyniósł 650 N, podczas gdy dla prawidłowego złącza wartość tej siły wyniosła 800 N, co przekłada się na spadek wytrzymałości zmęczeniowej o ok. 19%.



Rys. 17. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla zgrzeiny z wadami strukturalnymi oraz bez wad [H1, H2]

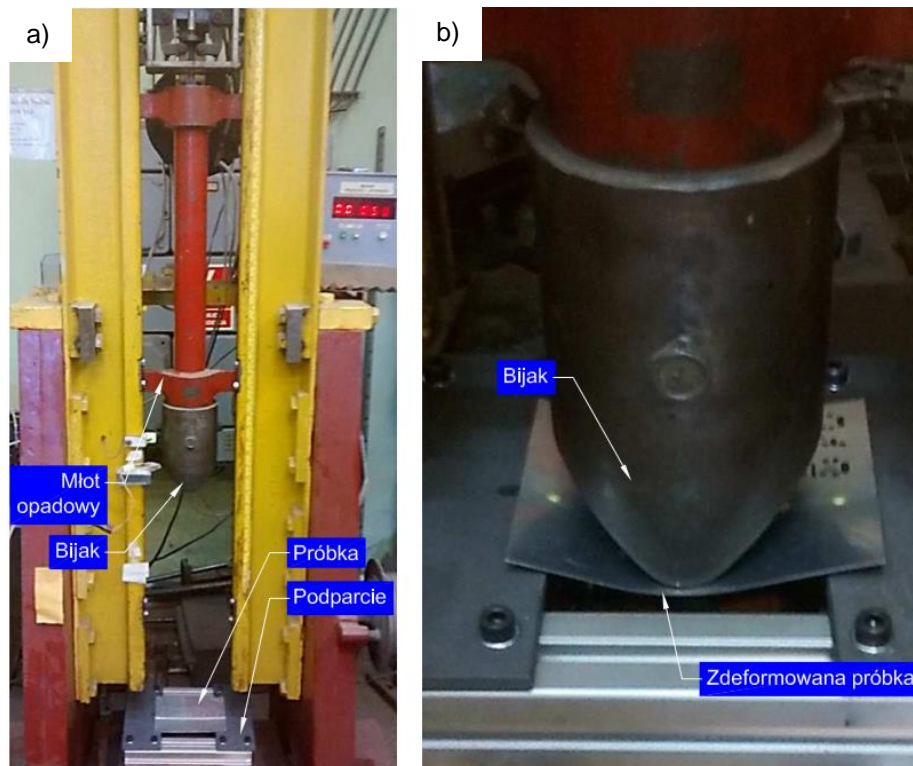
Wyniki zrealizowanych przeze mnie badań zmęczeniowych wraz z analizą mechanizmu zniszczenia oraz wpływu wad zgrzeiny na efekt zniszczenia zmęczeniowego opisałem w pracy **H1**, a także poddałem szerszej dyskusji w pracach **H2** i **H5**.

Badania porównawcze jednorzędowego połączenia zgrzewanego metodą RFSSW z połączeniem nitowym

Zrealizowałem badania porównawcze jednorzędowych połączeń nitowych oraz zgrzewanych metodą RFSSW poddanych obciążeniom w formie uderzenia dynamicznego tępym obiektem poruszającym się z niską prędkością. Celem badań było określenie zachowania się struktury zgrzewanej w odniesieniu do nitowanej pod wpływem rozważanych obciążeń, w tym przede wszystkim odporności zgrzeiny na obciążenia dynamiczne. Zagadnienie to jest bardzo istotne w

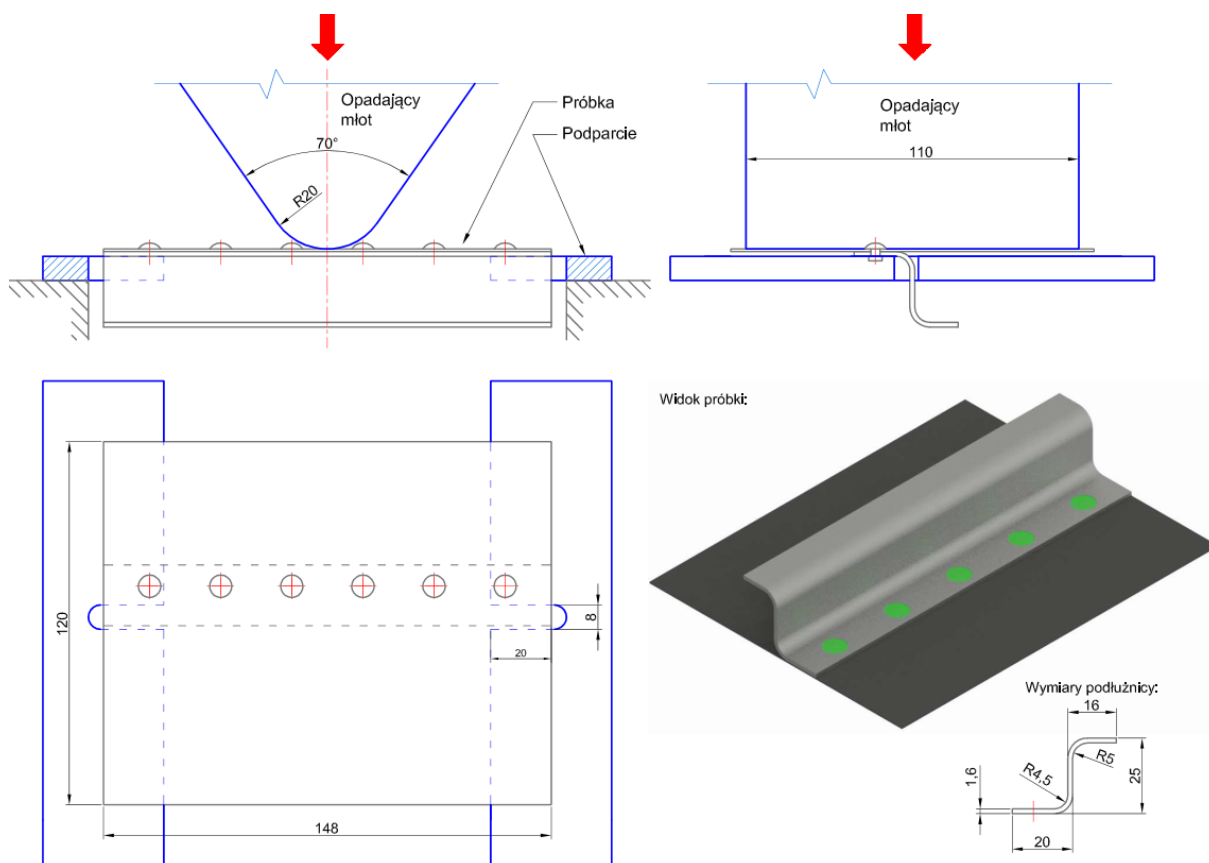
kontekście badań nowej technologii wytwarzania ustrojów cienkościennych, ze względu na prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń losowych polegających na uderzeniach w rzeczywistą konstrukcję różnego typu obiektów.

Badania udarności przeprowadziłem z użyciem młota opadowego MDO. Kompletne stanowisko badawcze wraz z próbką badaną przedstawiono na rysunku 18a. Z kolei rysunek 18b zaprezentowano próbkę jednorzędowego połączenia zakładkowego płaskich blach bezpośrednio po uderzeniu bijaka. Element wywołujący w sposób grawitacyjny obciążenie dynamiczne złożony jest z młota opadowego o masie 27 kg oraz bijaka o masie 8,81 kg, co łącznie daje masę 35,81 kg.



Rys. 18. Stanowisko – młot opadowy do badań na udarność jednorzędowych połączeń zakładkowych podłużnica-pokrycie (a) oraz widok próbki bezpośrednio po uderzeniu bijaka (b)

Na rysunku 19 widoczna jest konfiguracja obciążenia próbek jednorzędowych. Badaniom poddałem trzy warianty, w tym dwa zgrzewane o rozstawach 29,5 mm oraz 44,25 mm, a także jeden wariant nitowany o rozstawie nitów 23,5 mm. Do wykonania próbek nitowanych zastosowałem anodowane nity lotnicze do rozwalcowania z łbem grzybkowym o średnicy 3 mm ze stopu aluminium PA24.

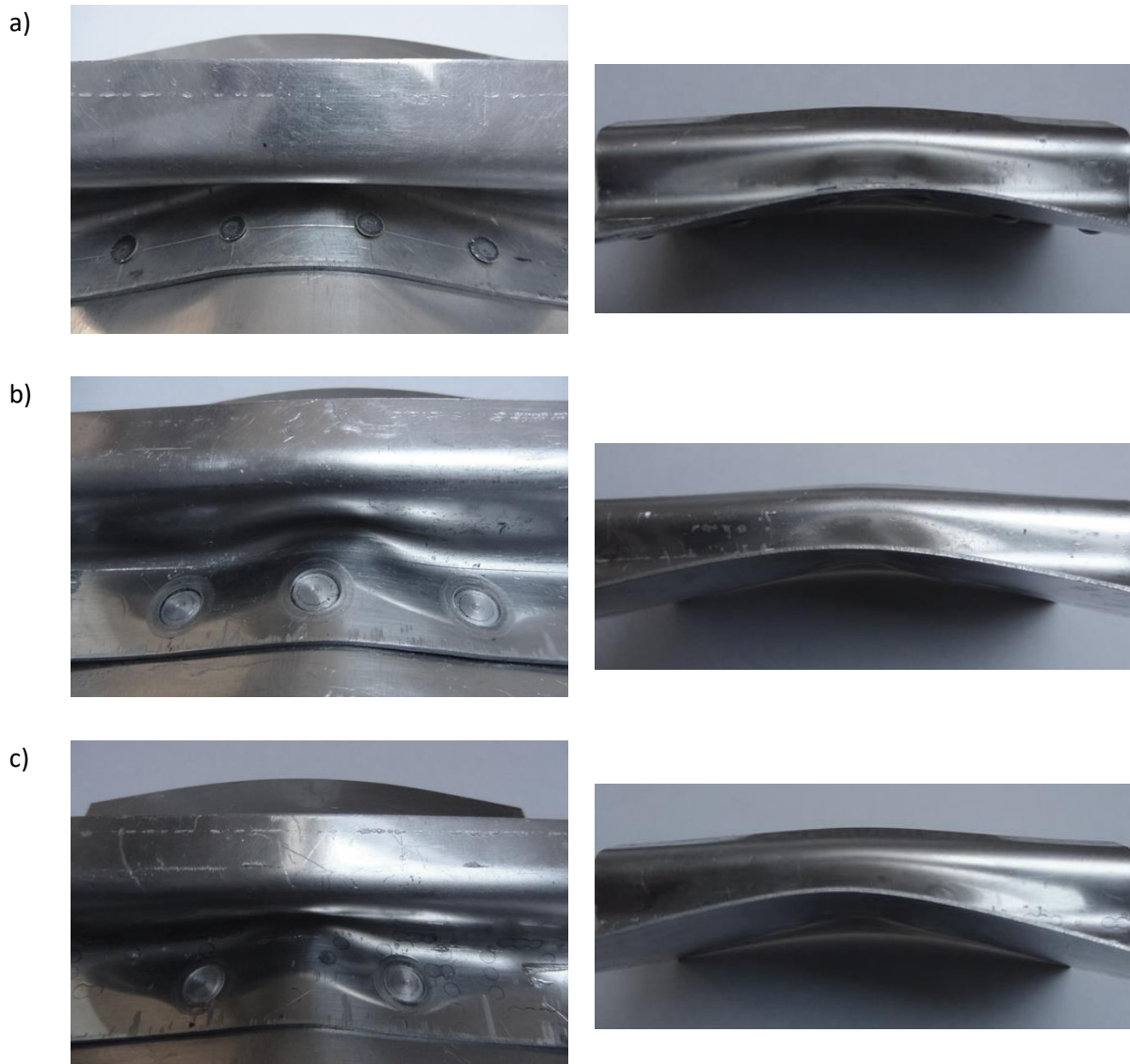


Rys. 19. Wymiary geometryczne oraz konfiguracja podparcia i obciążenia próbek, dla próbek jednorzędowego połączenia zakładkowego podłużnica-pokrycie

Po przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych dokonałem także modelowania MES zagadnienia dynamicznego obciążenia struktur.

Zasadniczym założeniem opracowania jest określenie drogą eksperymentalną, czy zgrzeiny wykonane metodą RFSSW stanowiące połączenie pomiędzy podłużnicą, a pokryciem fragmentu struktury cienkościennej wykażą się odpornością i nie ulegną całkowitej destrukcji w postaci utraty spójności połączenia na skutek znaczącej deformacji tej struktury poprzez obciążenie dynamiczne. Drugą kwestią poruszoną w badaniach jest porównanie stopnia deformacji plastycznej, a także sztywności połączeń nitowych oraz zgrzewanych.

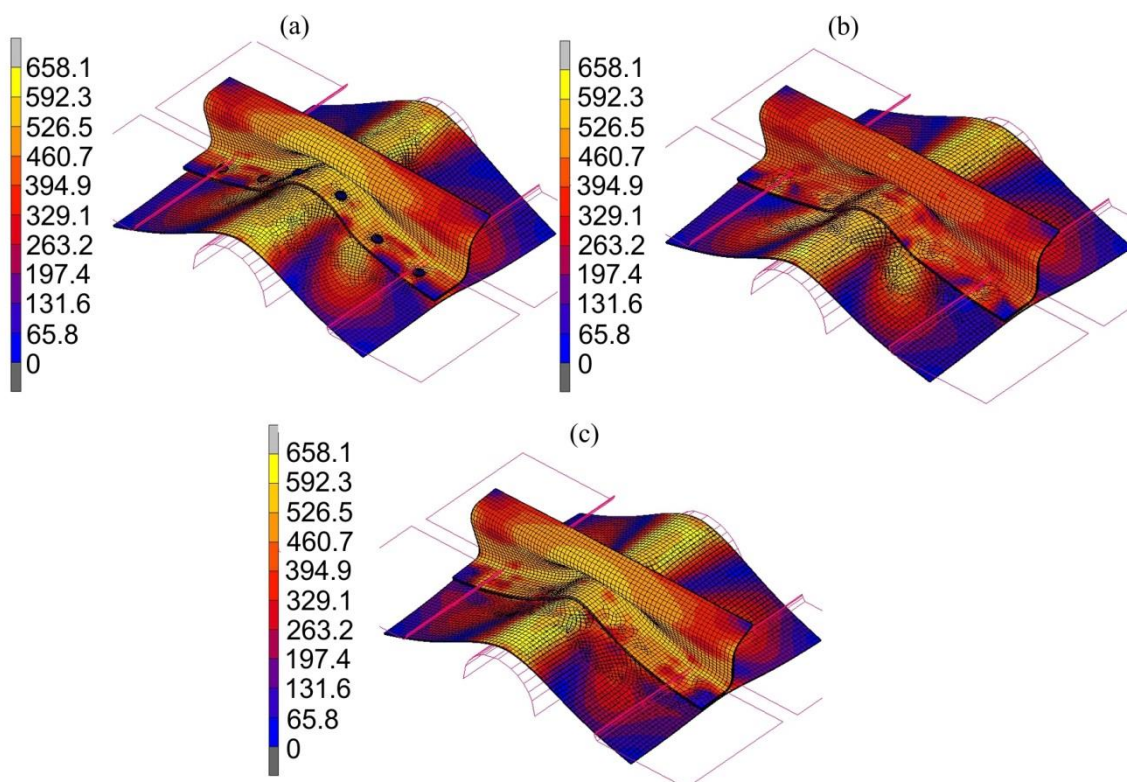
Na rysunku 20 przedstawiłem widoki próbek po poddaniu ich obciążeniom dynamicznym. Wykazałem, że połączenia RFSSW mają wyższą odporność przy dynamicznych obciążeniach, gdyż w żadnym z przedstawionych przypadków złącze zgrzewane nie uległo zniszczeniu poprzez ścinanie, natomiast w przypadku połączeń nitowych zakładkowych płaskich blach, skrajne nity ulegały ścinaniu. Inną istotną cechą, którą wykazałem jest ta, że połączenia zgrzewane z przedstawionej konfiguracji zakładkowej mają wyższą sztywność od połączeń nitowych. Przy czym sztywność ta wzrasta wraz ze zmniejszeniem rozstawu zgrzein.



Rys. 20. Połączenia zakładkowe podłużnica-pokrycie po próbach udarności; połączenie nitowe o rozstawie równym 23,5 mm (a); połączenie wykonane technologią RFSSW o rozstawie zgrzein równym 29,5 mm (b); połączenie wykonane technologią RFSSW o rozstawie równym 44,25 mm (c);

W oparciu o wyniki badań eksperymentalnych zrealizowałem modele numeryczne poszczególnych próbek metodą MES. Przeprowadziłem symulacje dynamicznego uderzenia odpowiadające warunkom panującym podczas rzeczywistych prób.

Wykazałem, że modele numeryczne ulegają tej samej formie deformacji, co próbki rzeczywiste. Wartości ugięcia również przyjmują zbliżone wartości. Ponieważ stwierdziłem poprawną walidację modeli MES, wyznaczyłem na ich podstawie rozkłady naprężeń dla poszczególnych wariantów połączeń. Na rysunku 21 przedstawiłem rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises-a dla omawianych wariantów próbek.



Rys. 21. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises-a [MPa] podczas symulacji MES w momencie największego ugięcia próbek: (a) wariant nitowany (rozstaw nitów $p = 23.5$ mm), (b) wariant zgrzewany (rozstaw zgrzein $p = 29.5$ mm), (c) wariant zgrzewany (rozstaw zgrzein $p = 44.25$ mm)

Dzięki opracowanemu modelowi MES oraz pozytywnie zweryfikowanej symulacji obciążenia dynamicznego połączenia jednorzędowego podłużnicy z fragmentem blachy pokrycia, możliwe jest analizowanie modeli rzeczywistych struktur poddanych zderzeniom z obiektami zewnętrznymi.

Zagadnienie dotyczące badań eksperymentalnych odporności na dynamiczne uderzenia połączeń jednorzędowych opisałem szerzej w monografii tj. w pracy **H1**, natomiast modelowanie MES tego zjawiska wraz z symulacją przedstawiłem w publikacji z bazy JCR – **H10**.

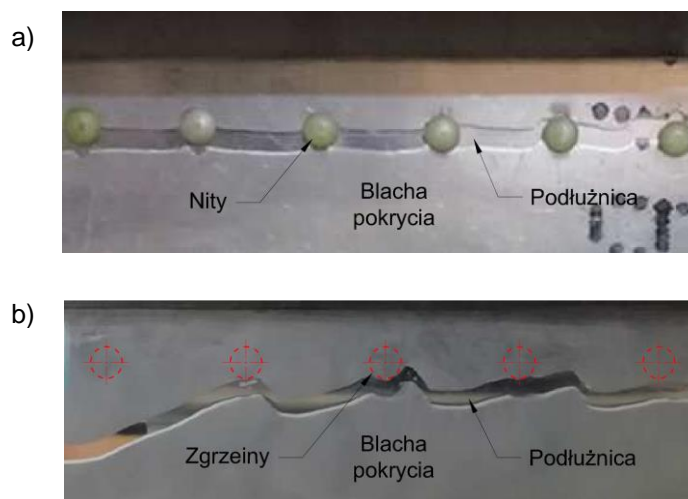
W ramach badań porównawczych połączeń RFSSW z połączeniami nitowymi, rozważaniem poddałem zjawisko presuryzacji występujące w konstrukcji kadłubów statków powietrznych. Presuryzacja kabiny samolotu prowadzi do znaczących obciążeń struktury pokrycia kadłuba, w pracy [9] opisano pomiary odkształcenia blachy pokrycia pomiędzy nitowanymi podłużnicami. Przy czym w przypadku struktur nitowanych wieloletnie doświadczenie konstruktorów lotniczych sprawia, iż zagadnienie to jest niemal w pełni poznane i samoloty są projektowane w ten sposób, aby cykliczne rozciąganie struktury kadłuba nie miało wpływu na bezpieczeństwo lotu.

W przypadku nitowego połączenia pokrycie-podłużnica dobrze poznane jest zjawisko spiętrzenia naprężeń w obszarze otworów nitowych. Natomiast w przypadku połączeń zgrzewanych pomimo, że wprawdzie nie wykonuje się tu otworów, to jednak dochodzi do znaczącej ingerencji w strukturę materiału m.in. poprzez działanie ciepła w procesie zgrzewania, a także przemian cieplno-plastycznych. Zatem opisane w poprzednich rozdziałach strefa wpływu ciepła, a także strefa cieplno-plastyczna osłabiają blachę pokrycia.

Przeprowadziłem badania eksperymentalne, w ramach których porównałem wytrzymałość na rozciąganie fragmentu pokrycia z nitowaną oraz zgrzewaną podłużnicą. Oba warianty porównałem z

wynikiem rozciągania dla jednolitej blachy ze stopu 7075-T6 uzyskując tym samym informację o stopniu osłabienia blachy pokrycia zarówno nitowanej, jak i zgrzewanej technologią RFSSW. Ale także, co istotne wykazałem kierunek propagacji pęknięcia.

W przypadku połączenia nitowego blacha osłabiona przez otwory nitowe ulega zniszczeniu w linii rzędu nitów (rysunek 22a). Przechodząc do wariantu połączenia zgrzewanego, szereg zgrzein nie wywołuje osłabienia geometrycznego, ale strukturalne. Doszło tu do wytworzenia strefy wpływu ciepła, strefy cieplno-plastycznej, a także strefy mieszania. Zarówno same wymienione strefy mogą cechować się osłabieniem, co wykazano w poprzednich rozdziałach, ale także osłabienie może zachodzić na granicy tych faz. Charakter zniszczenia wariantu zgrzewanego jest odmienny od nitowanego. Widoczna jest tu ścieżka pęknięcia, która propaguje od krawędzi zgrzeiny ukośnie w stosunku do rzędu zgrzein w stronę materiału rodzimego (rysunek 22b). Ten charakterystyczny sposób pęknięcia cechuje się tym, iż w procesie propagacji pęknięcia doszło do pominięcia obszaru skrajnej zgrzeiny (po lewej stronie na rysunek 22b).



Rys. 22. Widok zniszczonych próbek z widoczną ścieżką pęknięcia powiązaną z połączeniami, (a) dla próbki nitowanej, (b) dla próbki zgrzewanej [H1]

Różnica w przebiegu pęknięcia przedstawionych wariantów spowodowana jest spiętrzeniem naprężeń przy krawędziach otworów nitowych, co wymusza przebieg pęknięcia wzdłuż linii rzędu nitów.

Charakterystyczny kierunek pęknięcia wariantu zgrzewanego, pozbawionego otworów, jest typowy dla pęknięcia ciągłego poślizgowego. Poza brakiem otworów, innym zjawiskiem mającym wpływ na odmienny charakter pęknięcia, są zmienione właściwości strukturalne metalu poprzez strefę wpływu ciepła. Przez to lokalnie wokół zgrzein materiał cechuje się odmiennymi właściwościami, niż materiał rodzimy, stąd różne zachowanie w próbie statycznego rozciągania.

W przypadku połączenia nitowego ścieżka pęknięcia jest przewidywalna i zgodnie z oczekiwaniami blacha uległa rozerwaniu wzdłuż rzędu nitów. Natomiast blacha łączona poprzez zgrzewanie wykazała nieprzewidywalny sposób pęknięcia, gdyż doszło do pominięcia skrajnej zgrzeiny, a tym samym ścieżka pęknięcia została skierowana do materiału rodzimego. Jest to zjawisko niekorzystne, gdyż taki sposób pęknięcia uniemożliwia przewidywanie procesu propagacji pęknięć w konstrukcji.

Prowadząc analizy przełomów, na podstawie ich obrazów mikroskopowych (SEM), wykazałem różnice w mechanizmie zniszczenia obu wariantów. W przypadku połączenia nitowego pod wpływem koncentracji naprężeń przy krawędzi otworów dochodziło do inicjacji uplastycznienia materiału, a tym samym doszło do rozszerzającego się od osi otworu stanu plastycznego. Odształcenie

plastyczne postępujące od krawędzi otworu doprowadziło do umocnienia materiału, co spowodowało zwiększenie granicy plastyczności ograniczając jednocześnie zdolność do dalszych odkształceń plastycznych. W związku z tym w pewnej odległości od krawędzi otworu doszło do pęknięcia kruchej. W przypadku wariantu nitowanego opisany mechanizm pęknięcia przebiegał równomiernie w obszarze całej grubości blachy.

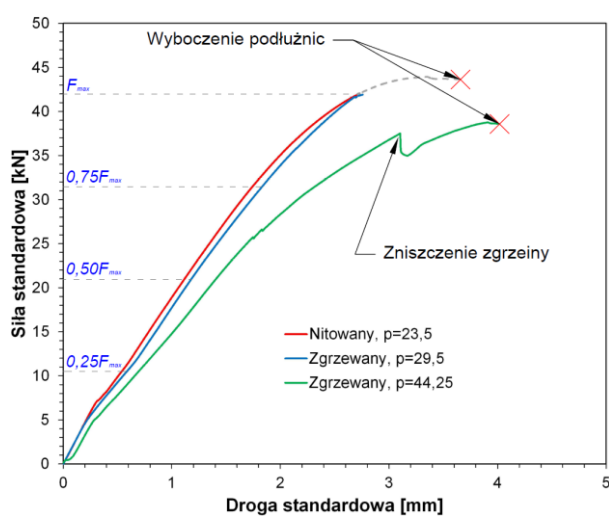
Przedstawione zagadnienie badań udarności połączeń jednorzędowych oraz osłabienia blachy poprzez jednorzędowe połączenie zgrzewane opisałem szerzej w pracy **H1**.

Analiza porównawcza stanów powyboczeniowych płyt usztywnionych wykonanych technologią zgrzewania RFSSW oraz nitowania

Zwieńczeniem udokumentowanych dotychczas w formie publikacji naukowych badań właściwości połączeń zgrzewanych jest badanie usztywnionej płyty w próbie statycznego ściskania. Zrealizowałem badania porównawcze płyty usztywnionej dwoma podłużnicami obciążając taką strukturę w warunkach jednoosiowego ściskania. Poddano porównaniu warianty z podłużnicami nitowanymi, a także zgrzewanymi analizując przy tym dwa różne rozstawy zgrzein. Przeprowadzono również analizę numeryczną tego zagadnienia modelując zjawisko ściskania pokrycia przy użyciu metody elementów skończonych.

Zasadniczym celem badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych była ocena zachowania się struktury zgrzewanej pod wpływem obciążenia wywołującego wyboczenie blachy pokrycia w zakresie sprężystej pracy podłużnic w odniesieniu do struktury nitowanej.

Badania eksperymentalne z użyciem systemu trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS wykazałem podobne zachowanie powyboczeniowe struktury zgrzewanej o podstawowym rozstawie zgrzein oraz płyty nitowanej. Udowodniłem natomiast, że zwiększenie rozstawu pomiędzy zgrzeinami ma negatywny wpływ na sztywność oraz nośność ściskanej płyty co z przebiegu krzywych ściskania przedstawionych na rysunku 23.



Rys. 23. Zależności siła-przemieszczenie zarejestrowane podczas ściskania płyt o różnym sposobie łączenia podłużnic [H1, H4]

Przeprowadziłem analizy numeryczne ściskania płyt. Modelowanie numeryczne procesu odkształcania panelu przeprowadziłem w programie ABAQUS/Standard, który umożliwia analizę modeli fizycznych uwzględniających nieliniowości geometryczne wywołane dużymi odkształceniami oraz nieliniową charakterystykę materiałową. Do dyskretyzacji modelu pokrycia i podłużnic użyto 4-węzłowych elementów S4R z pięcioma punktami całkowania na grubości. Model pokrycia składał się z 8646 elementów, a model podłużnic z 2 x 2358 elementów. Podczas generowania siatki należy stosować zasadę, aby elementy skończone miały jak najbardziej regularny kształt (stosunek długości boku najdłuższego do najkrótszego powinien być bliski jedności). Stosowanie elementów, których jeden z wymiarów jest znacznie większy od pozostałych powoduje generowanie podczas obliczeń błędów związanych z aproksymacją poszukiwanych wartości pomiędzy węzłami. Geometrię modelu zdyskretyzowano elementami o wymiarach 3 x 3 mm.

Model materiału przyjęto jako sprężysto-plastyczny z nieliniowym wzmocnieniem. Krzywą umocnienia odkształceniowego wprowadzono na podstawie wyników próby jednoosiowego rozciągania. Właściwości sprężyste określono przez wprowadzenie wartości modułu Younga $E = 73000$ MPa oraz współczynnika Poissona $\nu = 0,33$. Gęstość materiału wynosiła 2780 kg/m³. Materiał zdefiniowano jako izotropowy według kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego. Warunek plastyczności H-M-H we współrzędnych kartezjańskich przyjmuje postać:

$$2\sigma_p^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 - (\sigma_y - \sigma_z)^2 - (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{zx})$$

gdzie:

σ_p - naprężenie uplastyczniające,

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{yz}$ - składowe naprężenia wyznaczanymi w głównych osiach ortotropii: x – równoległej do kierunku walcowania, y - prostopadłej do kierunku walcowania oraz z – normalnej do płaszczyzny blachy.

Połączenia zgrzewane oraz nitowe zamodelowano za pomocą tak zwanych dyskretnych łączników punktowych między poszyciem a podłużnicami. Dyskretne łączniki WELD, dla połączenia zgrzewanego, oraz BEAM MPCs (Multi-point constraint) [1], dla połączenia nitowego, definiowane są przez określenie położenia linii łączących dwie lub więcej powierzchni. Miejsca dyskretnych łączników są niezależne od:

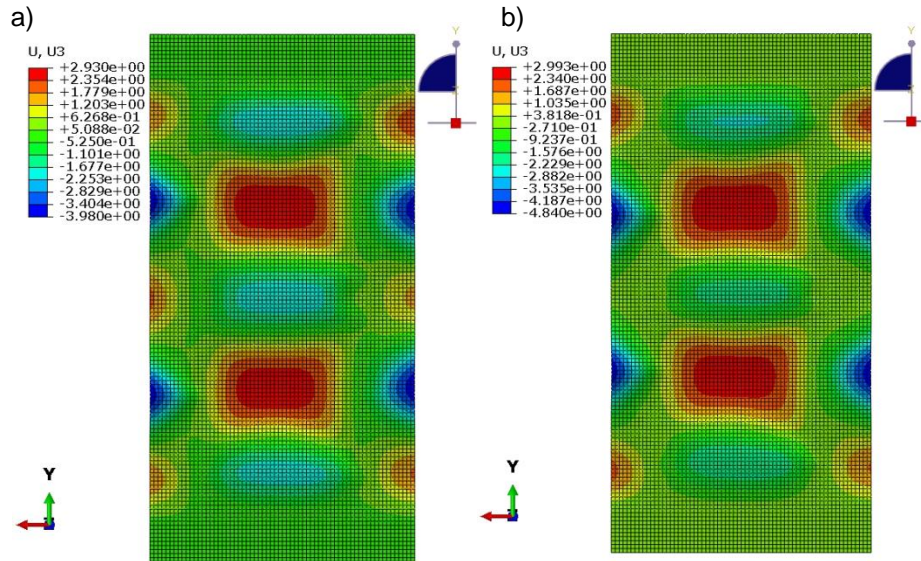
- położenia węzłów w siatce elementów,
- zagęszczenia siatki elementów skończonych.

Położenie zgrzein i nitów o zdefiniowanej średnicy 9 mm i nitów o średnicy 3 mm odpowiadały modelowi rzeczywistemu panelu.

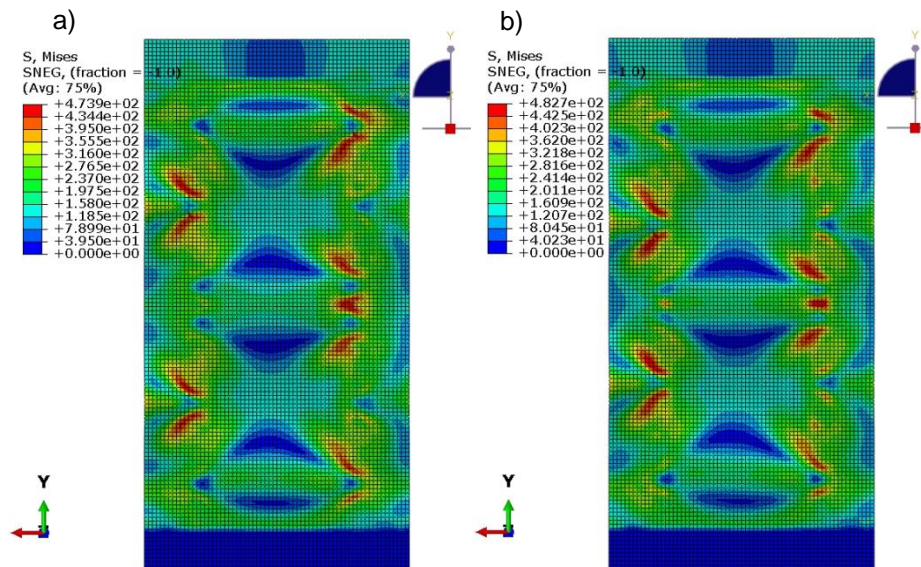
Ze względu na małe przemieszczenia względne między połączonymi elementami konstrukcji zastosowano kontakt beztarciowy.

Na podstawie modeli numerycznych wykazałem, że dla wartości 75% siły krytycznej dochodzi do pojawienia się dwóch dominujących półfal (rysunek 24) co jest zbliżone z badaniami eksperymentalnymi.

Te dwie półfale narastają do momentu zniszczenia-wybożenia podłużnic. Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych wg modelu zbliżone są już do naprężeń niszczących zastosowanego materiału i wynoszą odpowiednio 473 MPa dla przypadku zgrzewanego oraz 483 MPa dla wariantu nitowanego (rysunek 25).



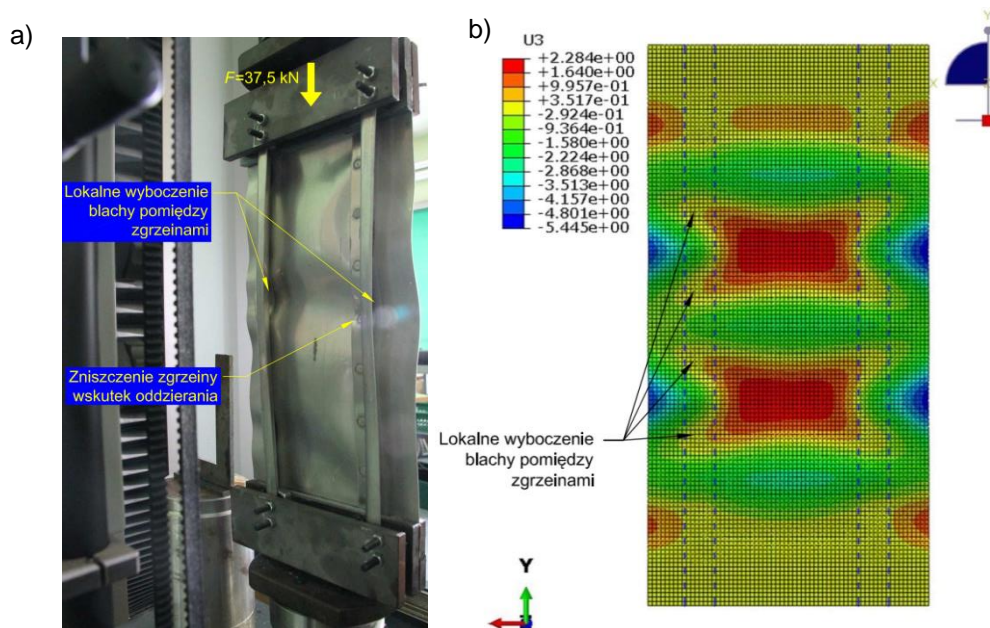
Rys. 24. Obraz deformacji płyty w stanie pokrytycznym przy obciążeniu siłą ściskającą równą $0,75F_{max}$: a) dla płyty z podłużnicami zgrzewanymi z podziałką $p = 29,5$ mm, b) dla płyty z podłużnicami nitowanymi [H1, H4]



Rys. 25. Porównanie rozkładów naprężeń zredukowanych wg hipotezy H-M-H na zewnętrznej stronie płyty przy obciążeniu siłą ściskającą równą $0,75F_{max}$: a) dla wariantu zgrzewanego z podziałką $p = 29,5$ mm, b) dla wariantu nitowanego [H1, H4]

Jak wykazałem na podstawie modeli numerycznych, przy sile ściskającej $0,75F_{max}$ dochodzi do lokalnych odkształceń plastycznych blachy pokrycia przy najbardziej obciążonych węzłach połączeń. Ze względu na większe pole powierzchni elementarnego połączenia, w przypadku wariantu zgrzewanego na podstawie modelu MES wykazano mniejsze wartości lokalnych odkształceń plastycznych.

Dla zwiększonego rozstawu zgrzein tj. 44,25 mm zarówno na podstawie badań eksperymentalnych jak i poprzez model MES wykazałem, że dochodzi w tym przypadku do lokalnych wyboczeń blachy pokrycia pomiędzy zgrzeinami (rysunek 26). Udowodniłem tym samym, że pomimo trzykrotnie większej średnicy zgrzein w stosunku do średnicy nitów, nie należy zwiększać odstępów pomiędzy elementarnymi połączeniami. Przekłada się to na spadek sztywności oraz nośności.



Rys. 26. Zjawisko lokalnego wyboczenia blachy pokrycia pomiędzy zgrzeinami dla płyty o podziałce zgrzein $p=44,25$ mm przy sile ściskającej równej 37,5 kN; badania eksperymentalne (a); model MES (b) [H1, H4]

Na podstawie zrealizowanych badań wykazałem, że w próbie ściskania płyta ze zgrzewanymi podłużnicami o podstawowej podziałce $p = 29,5$ mm zachowuje się porównywalnie jak płyta w wariancie nitowanym. Analiza numeryczna wykazała, że przez wzgląd na znacząco większe pole powierzchni zgrzein w odniesieniu do pola przekroju poprzecznego nitów, wariant zgrzewany cechuje się korzystniejszym rozkładem naprężeń, przez co nie dochodzi do ich znaczących spiętrzeń.

Podsumowując, wykazano, że zgrzewanie technologią RFSSW można z powodzeniem rozpatrywać jako alternatywę dla nitowania w wytwarzaniu cienkościennych struktur usztywnionych. Należy zaznaczyć, że zgrzewanie charakteryzuje się mniejszą pracochłonnością niż nitowanie, nie wymaga wykonywania otworów nitowych w strukturze, które stanowią jej karby. Co wyjątkowo istotne w odniesieniu to konstrukcji cienkościennych, przedstawiona płyta usztywniona dwoma podłużnicami w wariancie nitowanym cechuje się masą $m_N = 212,8$ g, natomiast masa płyty zgrzewanej to $m_Z = 207,3$ g.

Zagadnienie jednoosiowego statycznego ściskania usztywnionej płyty opisałem w pracy **H1**, a także poddałem szerszej analizie i dyskusji w publikacji **H4**.

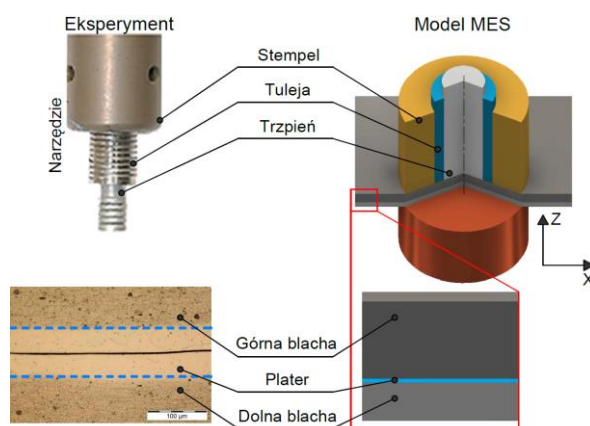
Zgłoszenie patentowe głowicy dociskowej dedykowanej dla procesu zgrzewania metodą RFSSW

Podczas realizacji prac badawczych związanych z wytwarzaniem próbek zgrzewanych metodą RFSSW zaobserwowałem pewne utrudnienia procesu związane z koniecznością realizacji czasochłonnego mocowania blach przed każdorazowym zgrzewaniem. Celem skrócenia czasu przygotowywania próbek zgrzewanych opracowałem oryginalną konstrukcję głowicy dociskowej, która poprzez odpowiednio zaprojektowany mechanizm samoczynnie generuje docisk poprzez ruch roboczy głowicy zgrzewającej maszyny RPS100 VA11 Harms & Wende. Na podstawie zaprojektowanego przyrządu dokonałem zgłoszenia patentowego w dniu 30.10.2018 o numerze nr P.427565: Kubit A., Trzepieciński T.: „Głowica dociskowa” (do zgrzewania blach metodą RFSSW). Na podstawie pisma przewodniego z dnia 12.02.2020 Urzędu Patentowego RP, uznano rozwiązanie za oryginalne i potwierdzono, iż uzyska ono patent.

Modelowanie numeryczne MES procesu zgrzewania metodą RFSSW

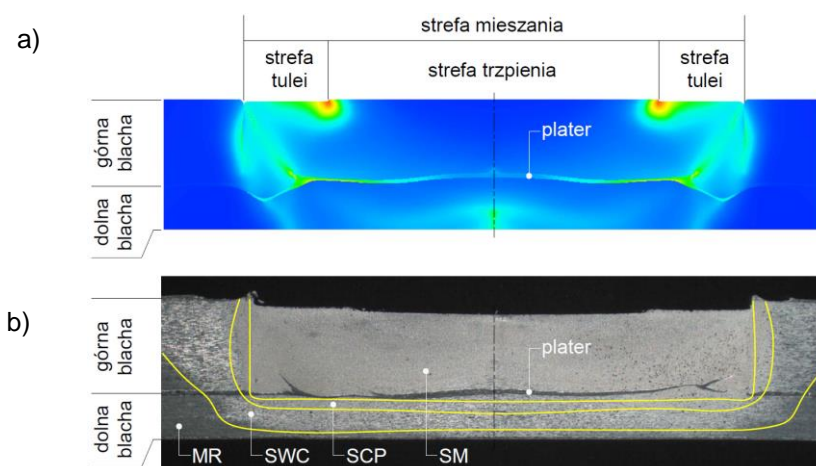
Dysponując doświadczeniem w zakresie wytwarzania i właściwości połączeń zgrzewanych metodą RFSSW na podstawie badań eksperymentalnych, dokonałem modelowania MES tego procesu. Modelowanie numeryczne z założenia ma służyć do jeszcze lepszego poznania zjawisk zachodzących podczas zgrzewania, w tym przepływu materiału, oraz określenia wielkości termomechanicznych niemożliwych do wyznaczenia w obiekcie rzeczywistym.

Podejmując się symulacji numerycznej procesu przyjąłem odpowiedni model przyjmując określone założenia i uproszczenia (rysunek 27). Modelowanie zrealizowałem w programie Simufact Forming.



Rys. 27. Model przyjęty do analizy FEM z zaznaczonymi uproszczeniami przyjętymi w stosunku do rzeczywistego układu [H10]

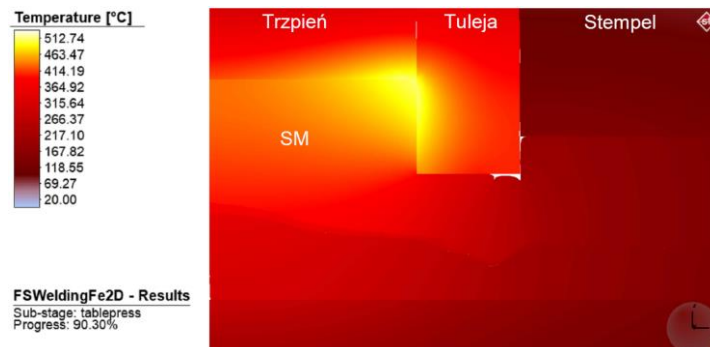
Celem oceny stopnia zgodności modelu numerycznego z rzeczywistym procesem zgrzewania w pierwszej kolejności poddano analizie przekrój struktury zgrzeiny porównując go ze strukturą rzeczywistego złącza. Widok struktury modelu zgrzeiny bezpośrednio po zakończeniu procesu przedstawiono na rysunku 5. Zwraca tu uwagę charakterystyczny rozkład warstwy plateru, który podobnie jak w strukturze rzeczywistego złącza (rysunek 28) w centralnej części ma zwiększoną grubość i jest nieco uniesiony w kierunku lica zgrzeiny. Przy narożu zgrzeiny warstwa plateru ulega rozdwojeniu i określa kierunek przepływu materiału w końcowej fazie zgrzewania. Charakter ukształtowania plateru w narożu modelu zgrzeiny jest zbieżny z rzeczywistym przypadkiem.



Rys. 28. Widok modelu numerycznego zgrzeiny (a) oraz makrostruktury rzeczywistej zgrzeiny (SM – Strefa Mieszania, SCP – Strefa Ciepłno-Plastyczna, SWC – Strefa Wpływu Ciepła, MR – Materiał Rodzimy) [H10]

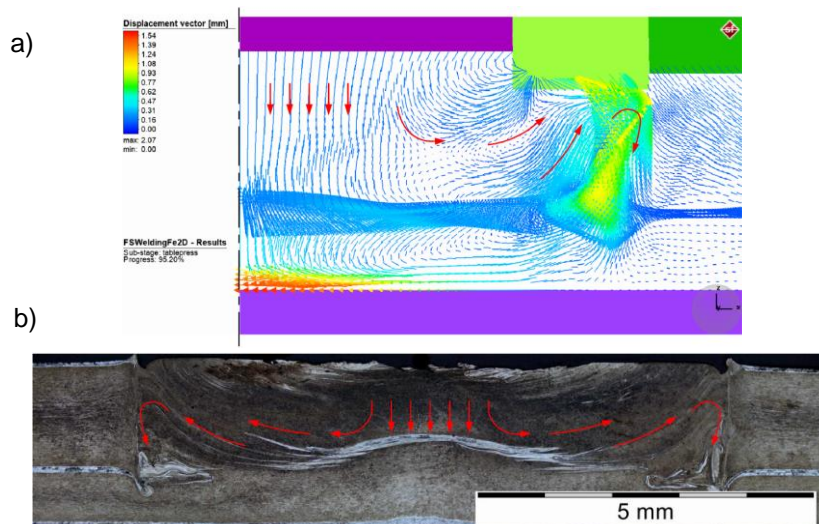
Dokonałem pomiaru temperatury w charakterystycznych punktach podczas procesu zgrzewania. Pomiary zrealizowano przy użyciu termopar. Zarejestrowane wartości porównano z modelem numerycznym i uzyskano zadowalającą zgodność. Po dokonaniu pozytywnej walidacji modelu MES przeprowadzono analizy wielkości termo-mechanicznych zachodzących w trakcie procesu, co jest niewykonalne drogą badań eksperymentalnych.

Określono etap procesu, w którym dochodzi do wygenerowania najwyższej temperatury, wskazano jej wartość oraz obszar występowania. Najwyższą temperaturę procesu odnotowano na etapie 90,3 %, jej wartość to 512,74 °C, występuje w narożu pomiędzy czołem trzpienia, a wewnętrzną krawędzią tulei (rysunek 29).



Rys. 29. Rozkład temperatury na styku narzędzia i formowanej zgrzeiny na etapie zgrzewania, w którym zarejestrowano maksymalną jej wartość [H10]

Dokonałem również analizy przepływu materiału podczas procesu zgrzewania na poszczególnych jego etapach. Na rysunku 30a przedstawiono przepływ materiału w końcowej fazie zgrzewania. Na podstawie zglądu metalograficznego dzięki układowi warstw plateru określono hipotetyczny kierunek przepływu materiału w końcowej fazie zgrzewania (rysunku 30b) co potwierdza słuszność analizy MES.



Rys. 30. Oznaczenie kierunku przepływu materiału w końcowej fazie zgrzewania na podstawie modelu numerycznego (a); na podstawie pasm materiału plateru w rzeczywistej próbce (b) [H10]

Na podstawie przedstawionego modelu numerycznego realizuję aktualnie dalsze analizy dotyczące zgrzewania blach pokrytych polimerowym tworzywem uszczelniającym. Pracuję także nad symulacją zgrzewania podłużnic do płyty w celu wyznaczenia deformacji cienkościennego obiektu zgrzewanego metodą RFSSW.

Zagadnienie modelowania MES procesu zgrzewania opisałem w obecnie recenzowanej publikacji w czasopiśmie „Materials”:

Manuscript ID: materials-733679

Type of manuscript: Article

Title: A Fully Coupled Thermo-Mechanical Numerical Modelling of the Refill Friction Stir Spot Welding Process in Alclad 7075-T6 Aluminium Alloy Sheets

Authors: Andrzej Kubit *, Tomasz Trzepieciński, Jan Słota

Pracę tą przedstawiłem w Załączniku nr 8, pkt. 4.

Literatura

- [1] Abaqus/Standard User's Manual version 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2005.
- [2] Haghshenas M., Gerlich A.P. „Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review”. Engineering Science and Technology, an International Journal, 21 (2018), pp. 130–148.
- [3] Iwashita T. „Method and apparatus for joining”. U.S. patent no. 6601751 B2, 2003.
- [4] Jata K.V., Sankaran K.K., Ruschau J.J. „Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451”. Metallurgical and Materials Transactions A. 31, (2000), pp. 2181-2192.
- [5] Kubit A., Bucior M., Wydrzyński D., Trzepieciński T., Pytel M.: „Failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy single-lap joints”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February 2018, Volume 94, Issue 9–12, pp. 4479-4491.
- [6] Kubit A., Kluz R., Trzepieciński T., Wydrzyński D., Bochnowski W.: „Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets”. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18 (2018), pp. 235–244
- [7] Kubit A., Wydrzyński D., Trzepieciński T.: „Refill friction stir spot welding of 7075-T6 aluminium alloy single-lap joints with polymer sealant interlayer”. Composite Structures, 201 (2018), pp. 389-397
- [8] Mishra R.S., Ma Z.Y. „Friction stir welding and processing”. Materials Science and Engineering: R: Reports, 50, (2005), pp. 1-78.
- [9] Phillips E.P., Britt V.O. „Measurements of fuselage skin strains and displacements near a longitudinal lap joint in a pressurized aircraft”. NASA Technical Memorandum 104163, October 1991.
- [10] Shen Z, Yang X, Zhang Z., Cui L., Li T. „Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints”. Materials and Design 44 (2013), pp. 476–486.
- [11] Statistical Release: National Statistics, 2018 UK Greenhouse Gas Emissions, Provisional Figures. Departament for Business, Energy & Industrial Strategy, 28 March 2019
- [12] www.europarl.europa.eu, Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emission in the automotive sector, Study by EMIS Committee.
- [13] <http://www.lightblank.com/>

Za moje najważniejsze osiągnięcia naukowe uważam:

- opracowanie metodyki badań umożliwiającej szczegółową analizę relatywnie nowego typu połączeń konstrukcyjnych w szeroko zakrojonym planie badawczym opartym o tzw. piramidę testów,
- opracowanie modelu numerycznego MES umożliwiającego wyznaczenie wielkości termomechanicznych podczas procesu niemożliwych do pomiaru drogą eksperymentalną,
- wyznaczenie optymalnych parametrów procesu zgrzewania dla rozpatrywanych blach drogą eksperymentalną oraz przy użyciu modeli matematycznych,
- opisanie mechanizmu zniszczenia zmęczeniowego połączeń zgrzewanych dla różnych poziomów obciążenia zmiennego
- opisanie wpływu wad strukturalnych zgrzeiny na mechanizm zniszczenia zmęczeniowego połączeń
- wykazanie możliwości zgrzewania blach pokrytych polimerowym tworzywem uszczelniającym dla mało odpowiedzialnych węzłów konstrukcji,
- **współautorstwo 21 artykułów naukowych o tematyce dotyczącej zgrzewania metodą RFSSW**, z czego **10 artykułów opublikowanych w czasopismach znajdujących się w bazie JCR** oraz 8 artykułów w czasopismach indeksowanych na *Web of Science*.

Realizacja wymienionych prac z pewnością pozwoli na uzupełnienie i poszerzenie wiedzy w zakresie właściwości połączeń zgrzewanych metodą RFSSW w odniesieniu do wytwarzania cienkościennych ustrojów nośnych. Dla mnie prace te stanowią cenne doświadczenie umożliwiające dalsze prowadzenie pracy naukowej w opisanym obszarze tematycznym.

4.4. Kierunki dalszych badań

Obecnie prowadzę badania płyt usztywnionych podłużnicami zgrzewanymi metodą RFSSW dotyczące analiz stanów powyboczeniowych w próbie statycznego ścinania. Na podstawie wyników tych badań zrealizuję modelowanie MES. Prowadzone będą również próby porównawcze ze strukturami nitowanymi.

Realizuję także pomiary deformacji zgrzewanych płyt metodami wizyjnymi. Modeluję również zgrzewanie podłużnic do płyt z użyciem programu MES Simufact Forming celem wyznaczenia deformacji zgrzewanej płyty drogą symulacji numerycznych.

Kolejnym krokiem planu badawczego jest przeprowadzenie niskocyklowych badań wytrzymałości zmęczeniowej płyt z podłużnicami zgrzewanymi oraz w celach porównawczych – nitowanymi.

Nowym kierunkiem badań, będącym naturalną kontynuacją wyżej opisanego cyklu badawczego, są badania struktur usztywnionych przetłoczeniami, które zamknięte są blachą zgrzewaną metodą RFSSW. Przetłoczenia usztywniające realizowane są przy zastosowaniu metody kształtowania przyrostowego (ang. Incremental sheet forming).

4.5. Pozostałe osiągnięcia naukowo – badawcze (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych)

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, nadanego uchwałą Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 10.06.2015r., obszar moich zainteresowań naukowych w początkowej fazie stanowiły zagadnienia związane z połączeniami adhezyjnymi

występującymi w cienkościennych ustrojach nośnych, w tym przede wszystkim w konstrukcjach lotniczych. W związku z tym podjąłem realizację prac badawczych związanych z badaniem kompozytów warstwowych typu GLARE, przy czym wg mojego pomysłu, w skrajnej warstwie metalowej takich kompozytów wykonane zostały przetłoczenia usztywniające. Prowadziłem badania sztywności takich struktur, a także i określałem właściwości adhezyjne pomiędzy blachą ze stopu aluminium 2024, a szklanym kompozytem polimerowo-włóknistym. Poddawałem takie układy warstwowe szokom termicznym badając wpływ obciążeń cieplnych na właściwości połączenia. Realizowałem badania wytrzymałości w podwyższonej i obniżonej temperaturze.

Prowadziłem także badania eksperymentalne dotyczące modyfikowania klejów epoksydowych dodatkiem nanonapełniaczy. Wykazałem wpływ wybranych nanonapełniaczy na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową połączeń klejowych. Jako nanonapełniacze stosowałem m.in. wielowarstwowe nanorurki węglowe (ang. Multi Walled Carbon Nanotubes).

Realizuję prace badawcze dotyczące kształtowania plastycznego przetłoczeń usztywniających metodą formowania przyrostowego (ang. incremental sheet forming). Polegają one na doborze parametrów i strategii kształtowania przetłoczeń.

Zajmuję się także badaniami nad poprawą właściwości zmęczeniowej połączeń zgrzewanych liniową metodą tarciovą z przemieszaniem. Podstawowe techniki stosowane do poprawy właściwości, to pneumokulowanie oraz nagniatanie hydrostatyczne.

Ze względu, iż właściwie od początku mojej pracy naukowej zajmowałem się właściwościami połączeń konstrukcyjnych, a także kształtowania usztywnień, stąd moje zainteresowania zawodowe zostały mocno skoncentrowane w obszarze technologii wytwarzania oraz badań cienkościennych ustrojów nośnych. Niemal cały mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora związany jest z tą właśnie tematyką.

Wyniki zrealizowanych dotychczas prac badawczych o przedstawionej wyżej tematyce zostały opublikowane w czasopismach w głównej mierze o zasięgu międzynarodowym jak również zostały zaprezentowane na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych – Załącznik nr 4, pkt. II G. Jestem autorem lub współautorem łącznie 54 artykułów naukowych (Załącznik nr 4, pkt. I B, II A, II D) opublikowanych **po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych**, z czego:

- 20 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach z bazy JCR,
- 14 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach indeksowanych na Web of Science i Scopus (bez IF),
- 15 artykułów naukowych opublikowano w czasopismach o zasięgu krajowym,
- 4 rozdziały w monografii,
- 1 pracę opublikowano jako monografię,
- 2 przyznane patenty, dodatkowo jedno zgłoszenie uzyskało pozytywną opinię Urzędu Patentowego RP,
- 18 zgłoszeń patentowych obecnie ocenianych przez Urząd Patentowy RP.

Załącznik nr 7 zawiera wydruk z baz Web of Science, Scopus i Google Scholar wykazu cytowań wraz z podaniem liczby cytowań i indeksu Hirscha będących wynikiem zrealizowanych przeze mnie prac naukowo – badawczych.

- **Sumaryczny Impact Factor (IF)** wszystkich publikacji wg listy JCR, zgodnie z rokiem opublikowania, wynosi **46.645**.

- **Liczba cytowań** (dane z dnia 14.03.2020) wg bazy Web of Science wynosi **92** (w tym bez autocytowań 70), wg bazy Google Scholar wynosi **151**.
- Indeks Hirscha (dane z dnia 14.03.2020) wg bazy Web of Science wynosi 5.

Regularnie recenzuję artykuły naukowe dla czasopism międzynarodowych oraz krajowych. Po uzyskaniu stopnia doktora zrecenzowałem 38 artykułów w tym 31 dla czasopism międzynarodowych – Załącznik nr 4, pkt. II P.

Za swą działalność naukową po uzyskaniu stopnia doktora byłem trzykrotnie nagradzany Nagrodą Rektora Politechniki Rzeszowskiej, dwukrotnie była to nagroda indywidualna, raz zespołowa (Zał. nr 4, pkt. II F).

4.6. Projekty badawcze oraz prace zlecone przez podmioty zewnętrzne:

W okresie od 01.12.2015r. do 30.11.2018r. byłem wykonawcą w projekcie badawczym U-16303/2016 pt. *„Innowacyjne zespoły okładzin hamulcowych pojazdów samochodowych o wysokiej trwałości i niezawodności z nowoczesnych kompozytów otrzymywanych za pomocą unikatowej, energooszczędnej i ekologicznej technologii kształtowania materiałów rozdrobnionych, podnoszące bezpieczeństwo ludzi i mienia dużej wartości”*. W ramach projektu dokonałem opracowania metod powlekania klejem blach klocków hamulcowych poprzez głowice dozujące mojego projektu, co opisano w sprawozdaniu pt. *„Badania optymalizacyjne procesu mieszania i klejenia oraz badania symulacyjne procesu prasowania nowej rodziny mieszanek”*. W efekcie uzyskałem dwa patenty na urządzenia powlekające blachy klocków hamulcowych klejem. Opracowałem również kompleksową linię technologiczną do powlekania blach klocków hamulcowych klejem oraz suszenia kleju fenolowo-formaldehydowego. Na podstawie tego opracowania przeprowadziłem szereg prób technologicznych celem doboru parametrów procesu. Sprawozdanie z tego zadania badawczego pt. *„Projekt zautomatyzowanej linii do nakładania powłoki klejowej na powierzchnie blach klocków hamulcowych oraz ich suszenia”* zawiera kompletny opis prac wykonanych przeze mnie.

Byłem także wykonawcą w projekcie kluczowym POIG.0101.02-00-015/08 pt. *„Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”*. Realizowałem prace w zadaniu badawczym ZB15. *„Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych zastosowania w lotnictwie.”* W ramach projektu wykonałem szereg badań eksperymentalnych dotyczących wpływu nanonapełniaczy klejów epoksydowych na wytrzymałość oraz trwałość zmęczeniową połączeń elementów ze stopu aluminium EN AW-2024. Zakończenie projektu: grudzień 2015.

W roku 2016 brałem udział w charakterze wykonawcy w trzech pracach zleconych przez Rejonowe Warsztaty Techniczne w Rzeszowie, w ramach umowy nr NT-651-34-U-16031/16 nt.: *„Optymalizacja potencjału obsługowo-remontowego Rejonowych Warsztatów Technicznych w Rzeszowie”*.

1. Optymalizacja potencjału obsługowo-remontowego Rejonowych Warsztatów technicznych w Rzeszowie
2. Wykonanie usługi opracowania dokumentacji technicznej, na wykonanie oprzyrządowania narzędziowego, doskonalącego czynności montażu i demontażu zespołów i podzespołów Bojowego Wozu Piechoty.

3. Wykonanie projektu modelowego stanowiska naprawczego BWP-1, biorąc pod uwagę istniejące ograniczenia infrastruktury; opracowanie wykazu niezbędnego wyposażenia stanowiska pracy; wykonanie wykazu specjalnego wyposażenia mechanika i elektryka.

W ramach prac samodzielnie wykonałem m.in. projekt pt. *"Regulowany manipulator będący uchwytem na półkę z narzędziami wykorzystywanymi głównie podczas demontażu silnika wozu bojowego BWP-1, a także stanowiący nośnik zasilania narzędzi pneumatycznych"* (Zał. nr 7).

Zrealizowałem także projekt organizacji stanowiska remontowego wozu bojowego BWP-1 (Zał. nr 7).

Na podstawie doświadczeń zdobytych podczas realizacji cyklu badań dotyczących zgrzewania tarcowego z przemieszaniem, opracowałem nową odmianę tej technologii, której celem jest wytwarzanie połączeń bimetalowych. Dokonałem wstępnych badań w tym zakresie, które potwierdziły efektywność takiej metody. Przygotowałem zgłoszenia patentowe opracowanej technologii łączenia o następujących tytułach:

1. „Technologia tarcowego zgrzewania z przemieszaniem z dodatkowym spoiwem nieobrotowych śrub montażowych do blach karoserii samochodowych wykonanych z lekkich stopów metali nieżelaznych.”
2. „Technologia tarcowego zgrzewania z przemieszaniem nieobrotowych śrub montażowych do blach karoserii samochodowych wykonanych z lekkich stopów metali nieżelaznych.”
3. „Technologia tarcowego zgrzewania z przemieszaniem trzpieni montażowych do blach karoserii samochodowych wykonanych z lekkich stopów metali nieżelaznych.”

Celem rozwoju tej technologii złożyłem wniosek o finansowanie projektu badawczego przez Narodowe Centrum Nauki, nr wniosku: ID: 460655, pt. *„Analiza struktury i właściwości mechanicznych połączeń stopu aluminium ze stalą konstrukcyjną wytworzonych nową odmianą punktowego zgrzewania tarcowego z przemieszaniem”* (Zał. nr 7). Wniosek obecnie jest na etapie oceny merytorycznej, w razie przyznania finansowania ja będę pełnił rolę kierownika projektu.

W roku 2018 byłem członkiem zespołu przystępującego do europejskiego konkursu projektowego nt: *„Optimization of hybrid joining (Refill Friction Stir Spot Welding with adhesive bond) for increasing mechanical properties and corrosion protection of the joints”* w ramach programu Clean Sky 2.

4.7. Patenty oraz zgłoszenia patentowe:

Uzyskałem dwa patenty krajowe, których przedmiotem ochrony są przyrządy do powlekania klejem blach klocków hamulcowych – Załącznik nr 4, pkt. III C.

Jestem autorem i współautorem 19 zgłoszeń patentowych, które obecnie podlegają ocenie przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej – Załącznik nr 4, pkt. II R.

5. AKTYWNOŚĆ NAUKOWA REALIZOWANA W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ:

Prowadzę stałą współpracę naukowo-badawczą z następującymi zagranicznymi uczelniami i instytucjami:

- Belgian Welding Institute – Belgia, Ghent,
- University of Stavanger, Faculty of Science and Technology – Norwegia, Stavanger,
- Technical University of Košice Department of Computer Aided Technology – Słowacja, Košice,
- University of Žilina, Department of Machining and Manufacturing Technology – Słowacja, Žilina,
- Institute of Aerospace Engineering Brno University of Technology – Czechy, Brno.

A także z uczelniami polskimi:

- Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki – Polska, Kraków,
- Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych – Polska, Kraków,
- Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny – Polska, Wrocław,
- Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej – Polska, Szczecin,
- Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Materiałowej – Polska, Kraków,
- Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny – Polska, Lublin,
- Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy – Polska, Rzeszów,
- Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny – Gdynia Polska,
- Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Krośnie – Polska, Krosno.

Niżej opisuję krótko charakter współpracy, a także wymieniam przykładowe publikacje potwierdzające taką współpracę.

Badania z zakresu technologii zgrzewania metodą RFSSW prowadzę w ścisłej współpracy z Belgian Welding Institute. Realizuję tam procesy zgrzewania, a także badania metalograficzne próbek. Osobą, z którą w głównej mierze współpracuję jest dr. ir. Koen Faes (European Welding Engineer), a potwierdzeniem naszej współpracy są wymienione niżej wspólne publikacje naukowe:

1. Kluz R., **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Faes K.: „*Polyoptimisation of the refill friction stir spot welding parameters applied in joining 7075-T6 Alclad aluminium alloy sheets used in aircraft components*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, August 2019, Vol. 103, Issue 9–12, pp. 3443–3457. **MNiSW: 100 pkt.; IF: 2.75**
2. Kluz R., **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Faes K., Bochnowski W.: „*A Weighting Grade-Based Optimization Method for Determining Refill Friction Stir Spot Welding Process Parameters*”. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 28(10) October 2019, pp. 6471–6482. **MNiSW: 70 pkt.; IF: 1.67**
3. **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Bochnowski W., Drabczyk M., Faes K.: „*Analysis of the mechanism of fatigue failure of the Refill Friction Stir Spot Welded overlap joints*”. Archives of Civil and

Mechanical Engineering, Vol. 19, Issue 4, August 2019, pp. 1419-1430. **MNiSW: 140 pkt.; IF: 2.805**

4. **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Faes K., Drabczyk M., Bochnowski W., Korzeniowski M.: „*Analysis of the effect of structural defects on the fatigue strength of RFSSW joints using C-scan scanning acoustic microscopy and SEM*”. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 42, Issue 6, June 2019, pp. 1308-1321. **MNiSW: 100 pkt.; IF: 2.389**
5. **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Święch Ł., Faes K., Slota J.: „*Experimental and numerical investigations of thin-walled stringer-stiffened panels welded with RFSSW technology under uniaxial compression*”. Materials, 2019 Jun; 12(11): 1785. **MNiSW: 140 pkt., IF: 3.532**
6. **Kubit A.**, Bucior M., Kluz R., Faes K., rok 2019: „*Analiza numeryczna procesu tarcowego punktowego zgrzewania z przemieszaniem z wypełnieniem krateru*”. 61. Naukowo – Techniczna Konferencja Spawalnicza nt. „Spawanie w XXI Wieku - Domena Ludzi czy Robotów?”. Gdańsk-Sobieszewo 14-16.10.2019.

Badania z zakresu analiz warunków tarcia w procesach formowania plastycznego blach realizuję we współpracy z University of Stavanger (Norwegia), Faculty of Science and Technology, Stavanger. Współpracuję z Hirpa Lemu, PhD Professor of Mechanical Design Engineering, czego potwierdzeniem jest publikacja:

1. Lemu H., Trzepieciński T., **Kubit A.**, Fejkiel R.: „*Friction Modeling of Al-Mg Alloy Sheets Based on Multiple Regression Analysis and Neural Networks*”. Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 11, Issue 1, 2017, pp. 48–57. **MNiSW (lista B czasopism, 2017): 10pkt.** (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)

Badania dotyczące technologii kształtowania przetłoczeń usztywniających w strukturach cienkościennych oraz badań struktur usztywnionych prowadzę we współpracy Technical University of Košice Department of Computer Aided Technology. Współpracuję z profesorem Janem Slotą, co potwierdzają wydane publikacje:

1. **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Święch Ł., Faes K., Slota J.: „*Experimental and numerical investigations of thin-walled stringer-stiffened panels welded with RFSSW technology under uniaxial compression*”. Materials, 2019 Jun; 12(11): 1785. **MNiSW: 140 pkt., IF: 3.532**
2. Trzepiecinski T., **Kubit A.**, Slota J., Fejkiel R.: „*An Experimental study of the frictional properties of steel sheets using the drawbead simulator test*”. Materials 2019, 12, 4037. **MNiSW: 140 pkt.; IF: 3.532**
3. Slota J., Krasowski B., **Kubit A.**, Trzepiecinski T., Bochnowski W., Dudek K., Neslušán M.: „*Residual stresses and surface roughness analysis of truncated cones of steel sheet made by single point incremental forming*”. Metals 2020, 10, 237. **MNiSW: 70 pkt.; IF: 2.371**

Prace badawcze w zakresie pomiaru naprężeń powierzchniowych cienkościennych struktur realizuję we współpracy z Department of Machining and Manufacturing Technology, University of

Žilina (Słowacja), osobą, z którą prowadzę kooperację jest profesor Miroslav Neslušan, dotychczas opublikowano następujący wspólny artykuł naukowy:

1. Slota J., Krasowski B., **Kubit A.**, Trzepieciniski T., Bochnowski W., Dudek K., Neslušan M.: „*Residual stresses and surface roughness analysis of truncated cones of steel sheet made by single point incremental forming*”. *Metals* 2020, 10, 237. **MNiSW: 70 pkt.; IF: 2.371**

Prowadzę badania w zakresie właściwości cienkościennych struktur kompozytowych, w tym metalowo-włóknistych, ich wytwarzanie i badania wytrzymałościowe realizuję we współpracy z Institute of Aerospace Engineering Brno University of Technology (Czechy). We wrześniu 2019 roku odbyłem w instytucie tym staż naukowo-badawczy. Osobą, z którą w głównej mierze współpracuję jest pan ing. Tomáš Katrňák.

Realizuję badania we współpracy z Akademią Górniczo-Hutniczą, przede wszystkim z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w zakresie obróbki i przygotowywania do badań wytrzymałościowych próbek z kompozytów warstwowych metalowo-włóknistych. W ramach współpracy z Panem dr inż. Rafałem Kudelskim wydano następujące publikacje:

1. Trzepieciński T., **Kubit A.**, Kudelski R., Kwolek P., Obłój A.: „*Strength properties of aluminium/glass-fiber-reinforced laminate with additional epoxy adhesive film interlayer*”. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85 (2018), pp. 29-36. **MNiSW (lista A czasopism, 2018): 35pkt.; IF: 2.501**
2. **Kubit A.**, Zielecki W., Kudelski R., Drabczyk M.: „*Investigations of the properties of fiber-metal laminates with stiffening rib embossed by the Incremental Sheet Forming technology*”. *AIP Conference Proceedings* 2113, 170020 (2019). **MNiSW: 15pkt.** (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)

Dodatkowo współpracuję z Wydziałem Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. We współpracy z Panem Profesorem Krzysztofem Żabą prowadzę badania dotyczące pomiaru deformacji zgrzewanych struktur cienkościennych, a także procesów kształtowania usztywnień metodą formowania przyrostowego.

Współpracuję z Politechniką Wrocławską gdzie na Wydziale Mechanicznym, w Katedrze Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii realizuję badania nieniszczące – NDT metodą skaningowej mikroskopii akustycznej. Badane są tą metodą połączenia RFSSW pod kątem wykrywania ich defektów, a także jakość wykonania kompozytów warstwowych FML. Współpracuję z Panem dr inż. Marcinem Korzeniowskim, z którym we współautorstwie opublikowałem pracę:

1. Kubit A., Trzepieciniski T., **Faes K.**, Drabczyk M., Bochnowski W., Korzeniowski M.: „*Analysis of the effect of structural defects on the fatigue strength of RFSSW joints using C-scan scanning acoustic microscopy and SEM*”. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Vol. 42, Issue 6, June 2019, pp. 1308-1321. **MNiSW: 100 pkt.; IF: 2.389**

Prowadzę także współpracę naukowo-badawczą z Instytutem Inżynierii Materiałowej Politechniki Krakowskiej, która polega na badaniu właściwości cieplnych kompozytów warstwowych polimerowo-włóknistych. Wraz z Panem dr inż. Markiem Hebdą opracowaliśmy artykuł naukowy:

1. **Kubit A.**, Trzepieciniski T., Kłonica M., Hebda M., Pytel M.: „*The influence of temperature gradient thermal shock cycles on the interlaminar shear strength of fibre metal laminate composite determined by the short beam test*”. Composites Part B, Vol. 176 (2019) 107217. **MNiSW: 200pkt.; IF: 6.313**

Wpływ nanorurek węglowych na właściwości zmęczeniowe konstrukcyjnych połączeń klejowych prowadzę we współpracy z Wydziałem Technologii i Inżynierii Chemicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Współpracuję z Panią profesor Urszulą Narkiewicz, a także z Panem Profesorem Zbigniewem Czechem, wspólnie opublikowaliśmy następującą publikację:

1. Zielecki W., **Kubit A.**, Trzepieciński T., Narkiewicz U., Czech Z.: „*Impact of multiwall carbon nanotubes on the fatigue strength of adhesive joint*”. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017, vol. 73, pp. 16-21. **MNiSW (lista A czasopism, 2017): 35pkt.; IF: 2.065**

Badania wytrzymałościowe oraz poddawanie szokom termicznym kompozytów warstwowych metalowo-włóknistych realizuję we współpracy z Wydziałem Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Na podstawie wspólnie zrealizowanych badań wraz z Panem dr inż. Mariuszem Kłonicą opracowaliśmy następującą publikację naukową:

1. **Kubit A.**, Trzepieciniski T., Kłonica M., Hebda M., Pytel M.: „*The influence of temperature gradient thermal shock cycles on the interlaminar shear strength of fibre metal laminate composite determined by the short beam test*”. Composites Part B, Vol. 176 (2019) 107217. **MNiSW: 200pkt.; IF: 6.313**

W zakresie badań materiałowych, a także wytrzymałości zmęczeniowej, prowadzę współpracę z Wydziałem Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego. Współpraca z panem dr Wojciechem Bochnowskim oraz Mateuszem Drabczykiem przyniosła efekt w postaci cyklu publikacji:

1. Słota J., Krasowski B., **Kubit A.**, Trzepieciniski T., Bochnowski W., Dudek K., Neslušán M.: „*Residual stresses and surface roughness analysis of truncated cones of steel sheet made by single point incremental forming*”. Metals 2020, 10, 237. **MNiSW: 70 pkt.; IF: 2.371**
2. **Kubit A.**, Bucior M. Kluz R., Bochnowski W., Perłowski R.: „*Experimental research of the weakening of the fuselage skin by RFSSW single row joints*”. Advances in Science and Technology-Research Journal, 3/ 2019 (13), pp. 90-97. **MNiSW: 70pkt.** (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)
3. Trzepieciński T., Fejkiel R., **Kubit A.**, Bochnowski W.: „*Evaluation of friction coefficient of an autobody steel sheet*”. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, 2016, Zeszyt 88, no. 3, s. 247-258. **MNiSW (lista B czasopism, 2016): 7pkt.**
4. Kluz R., **Kubit A.**, Trzepieciniski T., Faes K., Bochnowski W.: „*A Weighting Grade-Based Optimization Method for Determining Refill Friction Stir Spot Welding Process Parameters*”. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 28(10) October 2019, pp. 6471–6482. **MNiSW: 70 pkt.; IF: 1.67**

5. **Kubit A.**, Trzepieciński T., Bochnowski W., Drabczyk M., Faes K.: „*Analysis of the mechanism of fatigue failure of the Refill Friction Stir Spot Welded overlap joints*”. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 19, Issue 4, August 2019, pp. 1419-1430. **MNiSW: 140 pkt.; IF: 2.805**
6. **Kubit A.**, Trzepieciński T., Faes K., Drabczyk M., Bochnowski W., Korzeniowski M.: „*Analysis of the effect of structural defects on the fatigue strength of RFSSW joints using C-scan scanning acoustic microscopy and SEM*”. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. Vol. 42, Issue 6, June 2019, pp. 1308-1321. **MNiSW: 100 pkt.; IF: 2.389**
7. **Kubit A.**, Kluz R., Trzepieciński T., Wydrzyński D., Bochnowski W.: „*Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets*”. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18 (2018), pp. 235–244. **MNiSW: 140pkt.; IF: 2.846**
8. **Kubit A.**, Zielecki W., Drabczyk M.: „*Influence of nanoalumina particles on the static and high-cycle fatigue properties of peel-loaded adhesive-bonded joints*”. Strength of Materials, Vol. 48, No. 4, July, 2016, pp. 515-523. **MNiSW (lista A czasopism, 2016): 15pkt.; IF: 0.443**
9. **Kubit A.**, Zielecki W., Kudelski R., Drabczyk M.: „*Investigations of the properties of fiber-metal laminates with stiffening rib embossed by the Incremental Sheet Forming technology*”. AIP Conference Proceedings 2113, 170020 (2019). **MNiSW: 15pkt.** (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)

Badania z zakresu obciążeń dynamicznych cienkościennych struktur nośnych prowadzę na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Współpracuję z Panem dr hab. inż. Wojciechem Jurczakiem. Obecnie recenzowana jest nasza wspólna publikacja: Kubit A., Jurczak W., Trzepieciński T., Faes K.: „*Experimental and numerical investigation of impact resistance of riveted and RFSSW stringer-stiffened panels in blunt impact tests*”.

Badania naukowe prowadzę również w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Krośnie. Jest to współpraca w zakresie badań wytrzymałości oraz technologii kształtowania przetłoczeń usztywniających metodą przyrostową. Dodatkowo byłem promotorem pomocniczym Pana dr inż. Romualda Fejkiela. Z pracownikami PWSZ w Krośnie tj. dr inż. Romualdem Fejkiem oraz Bogdanem Krasowskim wydaliśmy szereg publikacji, z których przykładowe wymieniam:

1. Trzepieciński T., **Kubit A.**, Słota J., Fejkiel R.: „*An Experimental study of the frictional properties of steel sheets using the drawbead simulator test*”. Materials 2019, 12, 4037. **MNiSW: 140 pkt.; IF: 3.532**
2. Trzepieciński T., Fejkiel R., **Kubit A.**: „*Experimental evaluation of value of friction coefficient in the drawbead region*”. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika, t.XXXV, z.1, 2018, s.77-85. **MNiSW (lista B czasopism, 2018): 7pkt.**
3. Trzepieciński T., Fejkiel R., **Kubit A.**: „*Experimental evaluation of draw bead coefficient of friction*”. Acta Metallurgica Slovaca, 2017, pp. 337-344.

4. Fejkiel R., **Kubit A.**, Trzepieciński T.: „*Experimental evaluation of draw bead coefficient of friction*”. Proceedings of PRO-TECH-MA 2017 & SURFACE ENGINEERING 2017.
5. Trzepieciński T., **Kubit A.**, Fejkiel R.: „*Effect of sheet deformation on change of surface roughness and frictional properties of steel sheets*” [w:] Progressive Technologies and Materials 5, (pod red.) Jacek Mucha, 2016, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s.83-94. **MNiSW (lista B czasopism, 2016): 7pkt.**
6. Lemu H., Trzepieciński T., Kubit A., Fejkiel R.: „*Friction Modeling of Al-Mg Alloy Sheets Based on Multiple Regression Analysis and Neural Networks*”. Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 11, Issue 1, 2017, pp. 48–57. **MNiSW (lista B czasopism, 2017): 10pkt.** (czasopismo indeksowane w bazach Web of Science oraz Scopus)
7. **Kubit A.**, Wydrzyński D., Bucior M., Kluz R., Krasowski B.: „*Właściwości przetłoczeń usztywniających kształtowanych w cienkich blachach z lotniczego stopu aluminium 2024-T3 metodą formowania przyrostowego*”. Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 4/2018, s. 28-32. **MNiSW (lista B czasopism, 2018): 7pkt.**
8. Trzepieciński T., Krasowski B., **Kubit A.**, Wydrzyński D.: „*Possibilities of application of incremental sheet-forming technique in aircraft industry*”. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 298, z. 1/2018, styczeń-marzec, s. 87-100. **MNiSW (lista B czasopism, 2018): 7pkt.**
9. **Kubit A.**, Wydrzyński D., Bucior M., Krasowski B., rok 2018, referat: „*Testing of Stiffening Ribs Formed by Incremental Forming in Thin-Walled Aircraft Structures Made of 2024-T3 ALCLAD Aluminium Alloy*”. ESAFORM 2018 - Palermo (ITALY), 2018, April 23rd - 25th.

6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ

Za najważniejsze swoje osiągnięcie dydaktyczne uważam prowadzenie zajęć w ramach studiów podyplomowych zamawianych przez Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. nt. „*Kompozyty konstrukcyjne*”. Prowadziłem wykłady oraz ćwiczenia z następujących przedmiotów:

1. Kompozyty warstwowe
2. Nanokompozyty

Celem przygotowania się do realizacji powyższego cyklu zajęć dydaktycznych, z własnej inicjatywy odbyłem staże przemysłowe w firmach mających największe w Polsce doświadczenie w produkcji struktur kompozytowych, tj. WSK PZL Świdnik S. A. (2016r.) oraz ZPTSz PZL Mielec Sp. z o. o. Sp. K. (2016r.).

Prowadziłem również zajęcia na studiach podyplomowych zamawianych przez Wytwórnę Sprzętu Komunikacyjnego PZL - Świdnik SA nt. „*Lean Manufacturing – Doskonalenie Produkcji*”. Prowadziłem wykłady oraz ćwiczenia z przedmiotów:

1. Podstawy odchudzonej produkcji

2. Redukcja czasów przezbrajania SMED
3. Zapobieganie błędom Poka Yoke

Na otwartych studiach podyplomowych prowadzę wykłady oraz ćwiczenia z przedmiotu „*Redukcja czasów przezbrajania SMED*”.

Na co dzień prowadzę zajęcia dydaktyczne na studiach magisterskich oraz inżynierskich z takich przedmiotów jak:

1. Organizacja systemów produkcyjnych (wykład, projekt)
2. Inżynieria wytwarzania (wykład, laboratorium)
3. Narzędzia odchudzania produkcji (laboratorium)
4. Zarządzanie produkcją i usługami (projekt)

Prowadzę zajęcia dla studentów zagranicznych w ramach programu ERASMUS. Mowa o zajęciach laboratoryjnych dla studentów University of Minho, Portugal, prowadzony przedmiot:

1. Manufacturing Process Design

Poza macierzystą Uczelnią w roku akademickim 2015/2016 prowadziłem również niżej wymienione zajęcia dydaktyczne w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Krośnie:

1. Komputerowe wspomaganie projektowania (wykład, ćwiczenia)
2. Grafika inżynierska (wykład, projekt)
3. Projektowanie 2D (wykład, projekt)
4. Organizacja i procesy produkcji (wykład, ćwiczenia)
5. AutoCAD (wykład, projekt)
6. Planowanie obróbki na CNC (ćwiczenia)
7. Projektowanie i automatyzacja procesów obróbki (wykład, ćwiczenia)
8. Projektowanie 3D (wykład, projekt)

Sprawowałem opiekę naukową nad przeszło 60 studentami, pełniąc funkcję promotora ponad 25 prac inżynierskich oraz ponad 35 prac magisterskich – Załącznik nr 4, pkt. III J. Sprawowałem również opiekę naukową nad doktorantem w charakterze promotora pomocniczego. Przewód doktorski został pozytywnie sfinalizowany. Obecnie podjąłem się opieki nad kolejnym doktorantem, przy czym przewód doktorski nie został jeszcze otworzony.

W ramach działalności popularyzującej naukę w roku akademickim 2015/16 byłem współorganizatorem festiwalu nauki tzw. *Noc Nauki w PWSZ w Krośnie*, prowadziłem demonstracje dla zwiedzających z zakresu materiałoznawstwa i wytrzymałości materiałów.

W roku akademickim 2015/16 byłem współorganizatorem festiwalu nauki tzw. *Karpackie Klimaty z PWSZ w Krośnie*, prowadziłem demonstracje dla zwiedzających z zakresu obróbki skrawaniem.

Członkostwo w międzynarodowych oraz krajowych towarzystwach naukowych:

Jestem członkiem niżej wymienionych towarzystw naukowych:

1. European Structural Integrity Society (ESIS) – *towarzystwo międzynarodowe,*
2. European Scientific Association on Material Forming (ESAFORM) – *towarzystwo międzynarodowe,*
3. Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją – *towarzystwo krajowe,*

4. Polskie Towarzystwo Materiałów Kompozytowych – *towarzystwo krajowe*,
5. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich – *towarzystwo krajowe*.

Odbyte staże:

Ze względu na zainteresowania naukowe dotyczące technologii wytwarzania oraz badań cienkościennych ustrojów nośnych z własnej inicjatywy o uzyskaniu stopnia doktora odbyłem niżej wymienione staże:

1. Zagraniczny staż naukowo-badawczy: Institute of Aerospace Engineering Brno University of Technology (2019r.) – czas trwania: jeden miesiąc.
2. Staż przemysłowy: WSK PZL Świdnik S. A. (2016r.) – czas trwania: jeden tydzień.
3. ZPTSz PZL Mielec Sp. z o. o. Sp. K. (2016r.) – czas trwania: jeden tydzień.

Pozostała działalność organizacyjna:

Byłem członkiem Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej. Obecnie jestem pełnomocnikiem Dziekana ds. KRK.

Jestem członkiem zespołu redakcyjnego czasopisma „Technologia i Automatyzacja Montażu”, pełnię funkcję redaktora tematycznego w zakresie struktury i systemy montażu.

7. SUMARYCZNE ZESTAWIENIE DOROBKU NAUKOWO–BADAWCZEGO, POPULARYZATORSKIEGO, DYDAKTYCZNEGO I ORGANIZACYJNEGO (po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych)

Lp.	Kryterium	Liczba
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy <i>Journal Citation Reports (JCR)</i>	20
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	10
3.	Udzielone patenty	
	a) międzynarodowe	-
	b) krajowe	2
4.	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	-
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie <i>JCR</i>	33
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	5
7.	Sumaryczny <i>Impact Factor (IF)</i> według listy <i>JCR</i> , zgodnie z rokiem opublikowania prac	46.645
8.	Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Web of Science (WoS)</i> : z autocytowaniami / bez autocytowań	92/70
9.	Indeks Hirscha według bazy <i>Web of Science (WoS)</i>	5

	Kierowanie projektami badawczymi oraz udział w projektach badawczych:	
10.	a) międzynarodowe (wykonawca)	1
	b) krajowe (wykonawca)	2
11.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	3
13.	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach: międzynarodowych i krajowych	-
	Aktywny udział w konferencjach naukowych:	
14.	a) międzynarodowych	18
	b) krajowych	5
	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych:	
15.	a) międzynarodowych	-
	b) krajowych	3
16.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	1
17.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	-
18.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: przedsiębiorcami, innymi niż wymienione wyżej	-
19.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	1
20.	Członkostwo w międzynarodowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	2
	Członkostwo w krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	3
21.	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	6
22.	Opieka naukowa nad studentami	71
	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze:	
23.	a) opiekuna naukowego	1
	b) promotora pomocniczego	1
24.	Stáže w ośrodkach naukowych lub akademickich	1
25.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	-
26.	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	-
27.	Recenzowanie projektów	-
	Recenzowanie publikacji w czasopismach:	
28.	a) międzynarodowych	29
	b) krajowych	8
29.	Inne osiągnięcia	27


 (podpis wnioskodawcy)