

# PORTAL INFORMACJI TECHNICZNEJ

WWW.SIGMA-NOT.PL



ponad

90 000 e-publicacji

ponad

30 tytułów w jednym miejscu

PRASA FACHOWA

**SIGMA-NOT**

www.sigma-not.pl



więcej informacji: 22 827 43 65, reklama@sigma-not.pl  
22 840 30 86, prenumerata@sigma-not.pl

TO CO NAS WYRÓŻNIA



**ZESPÓŁ REDAKCYJNY:**

**Redaktor Naczelny** – prof. dr hab. inż. Jerzy Łunarski  
**Z-ca Redaktora Naczelnego** – dr inż. Martyna Jachimowicz  
 tel. 663 311 966  
**Sekretarz Redakcji** – mgr Izabella Gosiewska  
 tel. 663 311 933  
**Redaktorzy tematyczni:**  
 Dr inż. Rafał Kluz (technologia, automatyzacja)  
 Dr inż. Katarzyna Antosz (niezawodność, eksploatacja)  
 Dr inż. Mirosław Chłosta (inżynieria, produkcja)

**RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA:**

Prof. Dario Antonelli (Politecnico di Torino, Włochy), prof. Bronius Baksys (Kaunas University of Technology, Litwa), prof. Marek Balaziński (Ecole Polytechnique Montreal, Kanada), prof. Adam BARYLSKI (Politechnika Gdańska), mgr inż. Magdalena Borek-Daruk (SIGMA-NOT), prof. Józef Gawlik (Politechnika Krakowska) – z-ca przewodniczącego, prof. Jan Godzimirski (WAT), prof. Stefan Góralczyk (IMBiGS), prof. Mikulas Hajduk (Technická Univerzita v Kosciach, Słowacja), prof. Michael Kheifetz (Polski Gosudarstwiennyj Uniwersytet, Białoruś), doc. dr inż. Radek Knoflicek (FME Brno, Czechy), prof. Mark Kristal (Volgograd State Technical University, Rosja), prof. Józef Kuczmaszewski (Politechnika Lubelska), prof. Piotr Łebkowski (AGH), prof. Antonio Maffei (KTH Royal Institute of Technology, Szwecja), prof. Ignace Martens (Katholieke Universiteit Leuven, Belgia), prof. Jacek Mucha (Politechnika Rzeszowska), prof. Vitaliy Pasichnyk (Nacjonalnyj Technicznyj Uniwersitet Ukrainy „Kijewskij Politechnicznyj Instytut”, Ukraina), prof. R. M. Chandima Ratnayake (University of Stavanger, Norwegia), prof. Emil Spisak (Technika Univerzita v Kosciach, Słowacja), dr inż. Dorota Stadnicka (Politechnika Rzeszowska), prof. Jerzy Stamirowski (Politechnika Świętokrzyska), prof. Michail W. Wartanow (Moskowskij Gosudarstwiennyj Maszynostroitelnyj Uniwersytet, Rosja), prof. Władimir P. Woronienko (Moskowskij Gosudarstwiennyj Technologicznyj Uniwersytet, Rosja), prof. Jan Żurek (Politechnika Poznańska) – przewodniczący

**ADRES REDAKCJI:**

Kwartalnik „Technologia i Automatykacja Montaży”  
 ul. Ratuszowa 11, pok. 740  
 00-950 Warszawa, skr. poczt. 1004  
 Tel. 22 853 81 13  
 e-mail: tiam@sigma-not.pl  
 www.tiam.pl

**PRENUMERATA:**

Zakład Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o.  
 ul. Ku Wiśle 7  
 tel. 22 840 30 86  
 tel./fax: 22 827 43 65, 619 22 41 w. 215  
 e-mail: prenumerata@sigma-not.pl  
 portal: www.sigma-not.pl

**REKLAMA:**

Redakcja: tel. 22 853 81 13  
 e-mail: tiam@sigma-not.pl  
 Dział Reklamy i Marketingu  
 tel./fax: 22 827 43 65  
 e-mail: reklama@sigma-not.pl

**SKŁAD I ŁAMANIE:**

Drukarnia Wydawnictwa SIGMA-NOT  
 ul. Ks. Jerzego Popiełuszki 19/21, 01-590 Warszawa  
 e-mail: drukarnia@drukarnia.sigma-not.pl

**WYDAWCZA:**



Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego  
 ul. Racjonalizacji 6/8, 02-673 Warszawa



Wydawnictwo SIGMA-NOT  
 ul. Ratuszowa 11 skr. poczt. 1004, 00-950 Warszawa

**PATRONAT:**

Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników i Techników Polskich

Za treść ogłoszeń i artykułów promocyjnych redakcja nie odpowiada

Cena prenumeraty rocznej 60 zł  
 Wersja pierwotna: elektroniczna

## W numerze

Od Redakcji	
Łunarski J.: Wybrane zagadnienia konstrukcyjno-technologiczne połączeń montażowych . . . . .	3
Magiera M.: Dwukryterialna metoda planowania taktycznego, dotyczącego montażu w hybrydowych systemach przepływowych . . . . .	5
Bławucki S., Zaleski K.: Analiza porównawcza wytrzymałości wybranych połączeń przewodniczących, stosowanych w budowie maszyn . . . . .	11
Dzhuguryan T., Józwiak Z.: Improving the logistics of the multi-floor assembly manufacturing . . . . .	16
Nieoczym A.: Stanowisko do zrobotyzowanego procesu spawania zawiasów . . . . .	21
Czajka P., Garbacz P.: Metoda inspekcji uszczelniaaczy wału z zastosowaniem triangulacji laserowej 2D . . . . .	25
Kluz R., Kubit A.: Wpływ parametrów zgrzewania tarciowego z przemieszaniem na nośność połączenia . . . . .	31
Wiśniewski M., Pietrowiak A., Ciszak O., Peta K., Żurek J.: Badania parametrów robotów przemysłowych, istotnych w procesach technologicznych montażu . . . . .	35
Godzimirski J., Tkaczuk S.: Problemy klejenia komponentów z lekkich kompozytów odpornych na przebicia . . . . .	40
Domińczuk J., Krawczuk A., Kuczmaszewski J.: Energia powierzchniowa wybranych klejów epoksydowych . . . . .	47
Rudawska A., Ściuba N., Stančeková D.: Wpływ obróbki mechanicznej powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję . . . . .	53

Магера М.: Двукритериальный метод тактического планирования касающегося сборки в гибридных поточных системах . . . . .	5
Блавуцки С., Залески К.: Сравнительный анализ прочности избранных направляющих соединений применяемых в машиностроении . . . . .	11
Джугурян Т., Юзьвяк З.: Совершенствование логистики в многоярусных сборочных системах . . . . .	16
Неочим А.: Сварочный стенд для роботизированного изготовления петлей . . . . .	21
Чайка П., Гарбач П.: Метод контроля герметиков вала с применением лазерной триангуляции 2D . . . . .	25
Клюз Р., Кубит А.: Влияние параметров сварки трением с перемешиванием на работоспособность соединения . . . . .	31
Висьневски М., Петровяк А., Цишак О., Пета К., Журек Я.: Исследование параметров промышленных роботов существенных в технологических процессах сборки . . . . .	35
Годзими́рски Я., Ткачук С.: Вопросы склеивания компонентов легких композитов стойких против пробоя . . . . .	40
Доминьчук Е., Кравчук А., Кучмашевски Ю.: Поверхностная энергия избранных эпоксидных клеев . . . . .	47
Рудавска А., Сьцюба Н., Станцекова Д.: Влияние механической обработки на прочность клеевых соединений жести из коррозионностойкой стали . . . . .	53

## Wskazówki dotyczące przygotowania artykułów

- Artykuły przeznaczone do opublikowania w kwartalniku „Technologia i Automatykacja Montażu” powinny mieć oryginalny i naukowo-techniczny charakter i być zgodne z problematyką czasopisma. Redakcja przyjmuje artykuły w jęz. polskim, jęz. angielskim i jęz. rosyjskim.
- Artykuł o maksymalnej objętości 5 stron A4 wraz z ilustracjami powinien być napisany czcionką Times Roman lub Arial 12 pkt, z interlinią 12 pkt. Formatowany tekst nie powinien mieć podziału na kolumny.
- Tytuł artykułu należy podać w jęz. polskim i jęz. angielskim. Tytuł nieprzekraczający 10 słów powinien odzwierciedlać istotne elementy treści artykułu.
- Struktura artykułów naukowo-technicznych prezentujących prace autora(ów) powinna być następująca: wstęp (wprowadzenie); metodyka (badań, analiz, pracy z podaniem ewentualnie materiałów, założeń itp.); wyniki (badań, analiz); omówienie wyników; wnioski; spis literatury.
- Podpisy pod ilustracjami oraz tytuły tablic należy podać w jęz. artykułu i jęz. angielskim.
- Ilustracje należy dołączyć również jako osobne pliki w formacie: .jpg, .tiff, z rozdzielczością co najmniej 300 dpi. Wszystkie zamieszczane ilustracje powinny być własnością autora(ów) lub należy podać źródło pochodzenia rysunków.
- Wzory matematyczne pisane w edytorze równań Microsoft Equation i powinny być oznaczane kolejnym numerem w nawiasie okrągłym. Wszystkie symbole powinny być objaśnione. Należy stosować jednostki układu SI.
- Spis literatury należy podać w kolejności cytowania w tekście, a odnośniki w tekście powinny być ponumerowane cyframi arabskimi i umieszczone w nawiasach kwadratowych. W przypadku korzystania z Internetu należy podać adres strony i datę odczytu. Liczbę autocytowań należy ograniczyć do niezbędnych.
- Do artykułu należy dołączyć streszczenie w jęz. artykułu i jęz. angielskim, zawierające minimum 200–250 słów.
- Pod streszczeniem należy podać 3–6 słów kluczowych w jęz. artykułu i jęz. angielskim, zwracając uwagę, by nie były one powtórzeniem tytułu pracy.
- Po spisie literatury zaleca się podanie źródła finansowania pracy.
- Na końcu artykułu należy podać: imiona i nazwiska autorów, tytuły naukowe lub zawodowe, telefon, faks, e-mail, miejsce zatrudnienia wraz z adresem do korespondencji.

## Procedura recenzowania

Procedura recenzowania artykułów w czasopiśmie jest zgodna z zaleceniami Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego zawartymi w opracowaniu „Dobre praktyki w procedurach recenzyjnych w nauce”, Warszawa 2011.

Wszystkie artykuły naukowo-techniczne publikowane w kwartalniku „Technologia i Automatykacja Montażu” są recenzowane.

Nadesłane artykuły są poddawane redakcyjnej ocenie formalnej i otrzymują numer redakcyjny, identyfikujący je na dalszych etapach procesu wydawniczego, a redakcja wysyła do autorów informację o przyjęciu artykułu i wysłaniu go do recenzentów. Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch niezależnych recenzentów. Redakcja dobiera recenzentów rzetelnych i kompetentnych w danej dziedzinie. Nadesłane artykuły nie są nigdy wysyłane do recenzentów z tej samej placówki, z której pochodzi autor. Prace recenzentów są poufne i anonimowe. Recenzja musi mieć formę pisemną i kończyć się jednoznacznym wnioskiem o dopuszczeniu artykułu do publikacji w czasopiśmie lub jego odrzuceniu. W przypadku pracy w języku obcym, co najmniej jeden z recenzentów jest afiliowany w instytucji zagranicznej innej niż narodowość autora pracy. Autorzy są informowani o wynikach recenzji oraz otrzymują je do wglądu. W sytuacjach spornych redakcja powołuje dodatkowych recenzentów.

Lista recenzentów publikowana jest w ostatnim zeszycie każdego rocznika.

## Warunki prenumeraty kwartalnika „Technologia i Automatykacja Montażu” w 2016 r.

Kwartalnik „Technologia i Automatykacja Montażu” ukazuje się formie elektronicznej i jest dostępny on-line na Portalu Informacji Technicznej Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o. ([www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl)).

**Cena prenumeraty rocznej wynosi:** 60 zł (w tym 5% VAT).

### Rabaty:

50% – dla członków stowarzyszeń naukowo-technicznych NOT, nauczycieli, studentów i uczniów,

10% – dla prenumeratorów podpisujących z Wydawnictwem umowę prenumeraty ciągłej (odnawialnej automatycznie).

### Prenumeratę można zamówić:

- **telefonicznie:** 22 840 30 86, 22 840 35 89
- **faksem:** 22 891 13 74
- **e-mailem:** [prenumerata@sigma-not.pl](mailto:prenumerata@sigma-not.pl)
- **on-line:** [www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl)
- **listownie:**  
Zakład Kolportażu Wydawnictwa SIGMA-NOT ul. Ku Wiśle 7, 00-707 Warszawa
- **dokonując wpłaty na konto:**  
Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o., ul. Ratuszowa 11, 00-950 Warszawa PKO BP 24 1020 1026 0000 1002 0250 0577 (w tytule przelewu należy podać nazwę czasopisma, liczbę zamawianych egzemplarzy i okres prenumeraty).

## WYBRANE ZAGADNIENIA KONSTRUKCYJNO-TECHNOLOGICZNE POŁĄCZEŃ MONTAŻOWYCH

Jerzy ŁUNARSKI

Zasadniczym celem montażu jest uzyskanie gotowego wyrobu o wymaganych właściwościach przez łączenie poszczególnych elementów składowych, wykonywanych ręcznie, w sposób zmechanizowany lub zautomatyzowany. Wymóg zapewnienia funkcjonalności wiąże się z jednoczesnym zapewnieniem zadowalającej ekonomiczności i bezpieczeństwa tego procesu. Z tych względów opracowano wiele rozwiązań konstrukcyjnych połączeń oraz metod ich wykonywania, umożliwiających wybór optymalnych rozwiązań w różnych sytuacjach (skala produkcji, cechy i gabaryty wyrobu, warunki użytkowania i utylizacji itp.). W zależności od tych sytuacji dobierane są cechy połączeń montażowych, technologie ich realizacji i kontroli oraz sposoby eksploatacyjnego podtrzymywania ich funkcjonalności i niezawodności.

Przyjęto podział połączeń montażowych na cztery zasadnicze klasy: ruchome rozłączne i nierozłączne oraz nieruchome rozłączne i nierozłączne. Klasyfikacja poszczególnych metod jest przeważnie dokonywana wg kryterium konstrukcyjnego, materiałowego lub uzyskiwanego stanu naprężeń w strefie łączenia, tzn.:

1. Pod względem cech konstrukcyjnych rodzaje połączeń montażowych mogą być następujące:
  - a) Połączenia gwintowe, wykonywane za pomocą śrub, wkrętów i śrub dwustronnych.
  - b) Połączenia wpustowe, wykonywane za pomocą wpustów prostokątnych, półokrągłych i klinowych.
  - c) Połączenia kołkowe, wykonywane za pomocą walcowych lub stożkowych kołków.
  - d) Połączenia wielowypustowe, wykonywane za pomocą wielowypustów o profilu prostokątnym, ewolwentowym lub trójkątnym kształtowanych na osiowo łączonych częściach.
  - e) Połączenia nitowe, wykonywane za pomocą nitów o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, deformowanych statycznie lub dynamicznie.
  - f) Połączenia zawleczkowe, wykonywane za pomocą zawleczek o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych.
2. W zależności od stosowanych materiałów metody wykonywanych połączeń montażowych mogą być następujące:
  - a) Połączenia spawane, polegające na roztopieniu strefy łączenia i ewentualnie dodatkowego materiału oraz chłodzenia strefy powodującej złączenie.

- b) Połączenia lutowane, polegające na wprowadzeniu lutu między łączone elementy i w odpowiedniej temperaturze jego topienie i zwilżanie powierzchni łączonych oraz chłodzenie, a do tego adhezyjne i kohezyjne wiązanie elementów.
  - c) Połączenia klejowe, polegające na zastosowaniu różnych substancji klejących oraz warunków ich utwardzania z adhezyjnym łączeniem elementów.
3. W zależności od stanu naprężeń w strefie łączenia połączenia montażowe mogą być z: luzem, wciskiem, zaginaniem kołnierzy, rozwałcowywaniem, ogrzewaniem części obejmującej lub chłodzeniem części obejmowanej, sprężyste lub z zatraskami.

Poszczególne odmiany połączeń powiązane są z konkretnymi technologiami ich wykonywania, przy czym można wskazać sześć typowych procesów technologicznych ich wykonywania, z których każdy ma jeszcze szereg odmian i rozwiązań szczegółowych. Są to następujące technologie:

    1. Technologia mechanicznego składania elementów z gwarantowanym luzem wykonywana ręcznie lub automatycznie bez przykładania sił łączenia. Połączenie odbywa się wg powierzchni obejmującej lub wg baz ustalających.
    2. Technologia plastycznego deformowania elementów złącznych (nitów) lub innych elementów wchodzących w połączenie. Plastyczne deformowanie odbywa się za pomocą rozklepywania, rozwałcowywania, zaginania kołnierzy, obciskania, miejscowego zagniatania i inne.
    3. Technologia sprężystego deformowania łączonych elementów za pomocą wciskania lub wtlaczania (siłą osiową), nagrzewania i chłodzenia elementów obejmujących lub schładzania elementów obejmowanych, dodawanie elementów sprężystych (podkładki, pierścienie) lub z pomocą sprężystych zatrasków.
    4. Technologia łączenia za pomocą części złącznych gwintowanych takich jak: śruby, wkręty, walcowe i stożkowe kołki oraz elementów unieruchamiających. W trakcie łączenia następuje ściskanie elementów łączonych i stosowane są elementy przeciwdziałające rozhermetyzowaniu.
    5. Technologie łączenia, polegające na wprowadzeniu do strefy kontaktu łączonych elementów dodatkowego materiału (roztopianego przy spawaniu, lutowia, klejów, tworzyw sztucznych, hermetyków).

6. Specjalne technologie łączenia polegające na zalewaniu złącza roztopionym metalem, wiązaniu drutem, łączeniu pakietów płaskich (metalowych lub z tworzyw sztucznych) spinaczami, nawijaniu drutem lub taśmą itp.

Udziały poszczególnych rodzajów połączeń w całości procesów montażowych są różne w różnych dziedzinach wytwarzania i rodzajach wyrobów. W przybliżeniu można przyjąć, że połączeń walcowych jest ok. 35–40%, składanych z powierzchniami płaskimi 12–20%, śrubowych 15–25% i innych 6–8%. Ze względu na wzrost udziału zautomatyzowanych technik montażu oraz postępujące procesy optymalizacyjne obserwuje się pewne tendencje zmian poszczególnych udziałów połączeń w ich ogólnej liczbie. Poniżej podano przybliżone dane (przemysł maszynowy), gdzie pierwsze cyfry wskazują na stan aktualny a drugie stany prognozowane.

- a) Połączenia składane 26%, 22–23%
- b) Połączenia skręcane (śrubowe) 25%, 20–22%
- c) Połączenia plastycznie deformowane 8%, 11–13%
- d) Połączenia nitowe 9%, 12–14%
- e) Połączenia spawane i zgrzewane 10%, 15–18%
- f) Połączenia lutowane 14%, 8–10%
- g) Połączenia klejowe 5%, 10–13%
- h) Inne połączenia 8%, 8%

W przypadku projektowania połączeń, których realizacja powinna przebiegać w cyklu automatycznym, projektant powinien uwzględnić następujące zagadnienia:

- kierunek i złożoność ruchów koniecznych do wykonania połączenia,
- rodzaj kontaktu w strefie połączenia (punktowy, liniowy, powierzchniowy),
- kształty łączonych powierzchni (walcowe, płaskie, kształtowe),
- dokładność wykonania poszczególnych łączonych powierzchni,
- liczbę, kształty i cechy elementów tworzących połączenie,
- liczbę jednakowych połączeń w wyrobie i ich wzajemne usytuowanie,
- dostęp narzędzia do strefy połączenia i jego cechy wytrzymałościowe,
- czas konieczny i dysponowany na wykonanie połączenia,

- możliwości kontrolowania przebiegu procesu i uzyskiwanej jakości połączenia.

Mając na względzie automatyzację montażu połączeń względem łączonych elementów stawiane są następujące wymagania:

1. Możliwie maksymalny stopień znormalizowania wymiarów, kształtów i wzajemnego usytuowania poszczególnych powierzchni.
2. Wyeliminowanie możliwości wzajemnego szepiania się łączonych elementów w procesach podawania i transportu (usuwanie zadziorów, faski, rozmagnesowywanie, obróbka antystatyczna, mycie in.).
3. Dla ułatwienia orientowania części w procesie łączenia wskazane jest zapewnienie ich symetryczności lub wyraźnej asymetryczności z wyraźnym wyodrębnieniem powierzchni bazowych.
4. Wykonywanie wyraźnie zaznaczonych powierzchni fazowych na krawędziach podlegających łączeniu.
5. W częściach powinny być powierzchnie wygodne dla uchwycenia przez chwytaki manipulatorów, robotów lub organów wykonawczych automatu montażowego.

We wszystkich procesach montażowych występują określone problemy z montażem połączeń. Często są one specyficzne (warunki korozyjne, wysokie temperatury, dynamiczna zmienność obciążeń itp.) i ich rozwiązanie może być trudne w oparciu o znane dane teoretyczne. W takich sytuacjach konieczne jest przeprowadzenie określonych badań eksperymentalnych w celu optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych.

Organizatorzy IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej „Połączenia montażowe – konstrukcja i technologia PM-2016” mają nadzieję, że specyficzne problemy wytwarzania specjalnych połączeń w procesach montażowych zostaną wyczerpująco omówione w oparciu o doświadczenia i wiedzę uczestników oraz z pożytkiem wykorzystane w przyszłych pracach o charakterze innowacyjnym i wdrożeniowym. Uczestnikom konferencji życzymy twórczych dyskusji, nawiązania inspirującej współpracy oraz dalszych osiągnięć w rozwoju osobistym i działaniach na rzecz rozwoju technik montażu w kraju i za granicą.



# DWUKRYTERIALNA METODA PLANOWANIA TAKTYCZNEGO, DOTYCZĄCEGO MONTAŻU W HYBRYDOWYCH SYSTEMACH PRZEPLYWOWYCH

## *A bi-criteria method of tactical planning for assembly in hybrid flow shop systems*

Marek MAGIERA

**S t r e s z c z e n i e:** We wprowadzeniu opisano wykorzystywane w montażu systemy przepływowe. Następnie przedstawiono metodę przeznaczoną do rozwiązywania zadań dotyczących planowania taktycznego (średnio- i krótkookresowego) dla elastycznych systemów montażowych. Do zadań tych należy planowanie zapotrzebowania na zasoby oraz optymalizacja obciążeń maszyn w celu wykonania zleceń produkcyjnych. Pierwsze z wymienionych zadań dotyczy rozdziału podajników części pomiędzy stadią jednokierunkowej linii montażowej z maszynami równoległymi, czyli hybrydowego systemu przepływowego. Drugie zadanie związane jest z równoważeniem obciążeń stadiów.

Opisano parametry i zdefiniowano zmienne, służące rozwiązywaniu zadań planowania taktycznego. Opracowano procedurę przeznaczoną do oszacowania obciążenia stadium, stanowiącego wąskie gardło w systemie. W procedurze tej wzięto pod uwagę planowane przestoje maszyn montażowych, przeznaczone m.in. na remonty i konserwacje. Metoda charakteryzuje się również uwzględnieniem losowych przestojów maszyn montażowych, np. awarii. W celu rozwiązywania problemów dotyczących planowania taktycznego, zbudowane zostały liniowe modele zadań programowania całkowitoliczbowego. Jeden z modeli matematycznych dotyczy sztywnych marszrut montażu, a drugi model zbudowano do wykorzystania w przypadku alternatywnych marszrut montażu. W funkcji celu, której wartość jest minimalizowana, uwzględniono dwa kryteria. Pierwsze z nich dotyczy równoważenia obciążeń stadiów. Drugie kryterium służy minimalizacji przepływów międzystadialnych. Rozwiązaniem opisanych w artykule zadań są przydziały operacji do stadiów. Wyznaczane jest również rozmieszczenie podajników części składowych montowanych produktów, wykorzystywanych do wykonywania tych operacji, w przypadku których części pobierane są z podajników.

Zaprezentowano wyniki eksperymentów obliczeniowych, służących do weryfikacji metody i porównania rozwiązań, dotyczących różnych wag przy uwzględnieniu sztywnych lub alternatywnych marszrut montażu.

**S ł o w a   k l u c z o w e:** systemy montażowe, harmonogramowanie montażu, planowanie taktyczne, programowanie całkowitoliczbowe, optymalizacja wielokryterialna

**A b s t r a c t:** A flow shop systems connected with assembly are described in the introduction. The method of tactical planning (medium-term and short-term) for a flexible assembly systems is presented in the next chapters. Demand for planning resources and optimization of stage workloads are regarded tasks of tactical planning. The first of tasks is connected with allocation of part feeders among the stages (the stage is set of parallel machines) – for an unidirectional assembly line with parallel machines (a hybrid flow shop). The second of tasks is related to balancing stage workloads.

A parameters and variables are defined for solving of tactical planning problems. A procedure was constructed to estimate the workload of stadium which is a bottleneck in the system. This procedure was taken into consideration planned downtime of assembly machines, among others for repairs and maintenance of the machines. The method is also characterized by taking into account the random downtime of machines, for example connected with failures.

The mathematical models of integer programming are constructed for the solving of described tasks of tactical planning. The first model is formulated for a fixed assembly routes and the second model is used for an alternative assembly routes. Two criteria are regarded in an objective function. The first of these concerns the balancing stages workloads. The second criterion is the minimization of flows between stages. The solution of tasks described in article are assignments of assembly operations to stages. The part feeders are also assigned to the stages.

The results of computational experiments with the proposed method are presented. The results obtained for the different criterion weights and for a fixed and for an alternative assembly routes are compared.

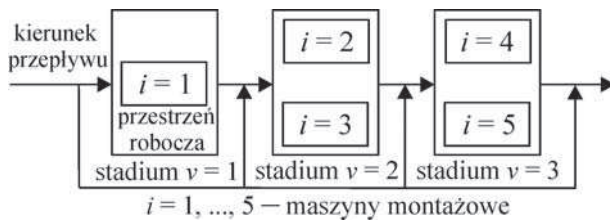
**K e y w o r d s:** assembly systems, assembly scheduling, tactical planning, integer programming, multi-criteria optimization

### **Wprowadzenie – systemy przepływowe dotyczące montażu**

Na początku zostaną wyjaśnione terminy użyte w tytule artykułu. Zaprezentowana w pracy metoda dotyczy zastosowania jednego z rodzajów systemów przepływowych do równoczesnego montażu różnych typów produktów. Do montażu w systemach przepływowych wykorzystywane są linie montażowe. Przepływ jest tu rozumiany jako przemieszczanie się produktów, których dotyczą operacje wykonywane na poszczególnych maszynach.

W przypadku montażu wykorzystuje się następujące systemy przepływowe (zgodnie z ich nazewnictwem i opisem zamieszczonym w pracy [1]):

- system przepływowy (flow shop). Dotyczy on linii montażowych bez równoległych maszyn. W przypadku każdego produktu wykonywane są operacje na specjalistycznych maszynach. Kolejność wykonywania operacji dotyczących produktów jest zgodna z rozmieszczeniem maszyn w linii. Dzięki temu możliwy jest jednokierunkowy przepływ,
- permutacyjny system przepływowy (permutation flow shop). Jest to szczególny przypadek powyższej



Rys. 1. Przykład struktury hybrydowego systemu przepływowego  
Fig. 1. Example of structure of hybrid flow shop

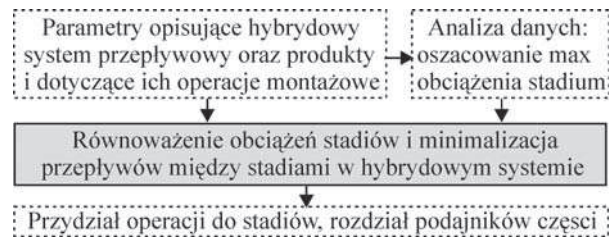
ogólnie scharakteryzowanego systemu przepływowego. System ten wyróżnia jednakowa kolejność wykonywania operacji przypisanych poszczególnym produktom. Produkty przepływają więc zgodnie z kolejnością wprowadzenia produktów do systemu montażowego. W przypadku  $n$  produktów istnieje  $n!$  możliwości wprowadzenia produktów do systemu – tyle jest permutacji dotyczących kolejności przepływów produktów,

- hybrydowy system przepływowo (hybrid flow shop) nazywany jest także systemem przepływowym z maszynami równoległymi lub elastycznym systemem przepływowym (flexible flow shop). Jest to połączenie systemu przepływowego (flow shop) i maszyn równoległych. Kolejność przepływu produktów przez poszczególne stadia systemu (zbiory maszyn pracujących równolegle) nie musi być zgodna z kolejnością wprowadzania produktów do systemu montażowego. Przykładowa struktura tego najbardziej złożonego systemu przepływowego przedstawiono na rys. 1.

Planowanie produkcji w opisanych systemach odbywa się na następujących poziomach: strategicznym (długookresowym), taktycznym (średnio- i krótkookresowym), a także operacyjnym (związanym z bieżącym funkcjonowaniem systemu montażowego) [2]. Do zadań planowania strategicznego zalicza się m.in. projektowanie systemu montażowego oraz produktów, które będą montowane w tym systemie. Zaprezentowana w kolejnych rozdziałach metoda służy jednak do rozwiązywania zadań planowania taktycznego – w zakresie optymalizacji obciążeń maszyn, planowania zapotrzebowania na podajniki części montowanych produktów. Opis zadań rozwiązywanych za pomocą opracowanej metody zawarto w rozdz. 2, zaś rozdz. 3 poświęcony jest matematycznemu opisowi metody. Rozwiązania zadań planowania taktycznego wykorzystywane są na poziomie operacyjnym – w szeregowaniu operacji montażowych.

### Ogólny opis metody

Zgodnie ze schematem blokowym metody, przedstawionym na rys. 2, w metodzie należy uwzględnić wiele parametrów, dotyczących montowanych produktów, maszyn montażowych. Szczegółowy wykaz parametrów zamieszczono w rozdz. 3, gdzie przedstawiono również relacje



Rys. 2. Schemat blokowy metody  
Fig. 2. Block diagram of the method

matematyczne pomiędzy tymi parametrami i zmiennymi, sformułowanymi w celu rozwiązania problemu. Dane, określające planowane okresy niedostępności maszyn, uwzględnione zostały w procedurze oszacowania średniego obciążenia stadium. W metodzie wzięto pod uwagę także losowe przestoje maszyn.

Metoda służy do równoczesnej minimalizacji obciążeń stadiów i minimalizacji liczby przemieszczeń produktów pomiędzy poszczególnymi stadiami. Obciążenie stadium to czas, w którym operacje wykonywane są na maszynach umieszczonych w tym stadium. Uwzględniono więc dwa kryteria, które są przeważnie w konflikcie. Zmniejszenie liczby przemieszczeń produktów pomiędzy stadiami skutkuje często zwiększeniem obciążeń stadiów.

W celu wyznaczenia rozwiązania opisanego problemu zbudowane zostały liniowe modele zadań programowania całkowitoliczbowego (PC). Modele te zaprezentowano w następnym rozdziale. W modelach tych uwzględniono dwa rodzaje marszrut montażu:

- w modelu M1: sztywne marszrut montażu – marszrut, w przypadku których każdy typ operacji przydzielany jest tylko do jednego stadium,
- w modelu M2: alternatywne marszrut montażu – marszrut, w przypadku których każdy typ operacji przydzielony jest co najmniej do jednego stadium.

Zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 2, rozwiązaniem zadania są przydziały operacji do poszczególnych stadiów. W przypadku, gdy wykonanie operacji polega na domontowaniu części składowej do uprzednio zmontowanych części, a część ta pobierana jest z podajnika części, to do rozwiązania zadania należy również rozdział podajników części.

Należy podkreślić, że metoda służy równoważeniu obciążeń stadiów, a nie obciążeń maszyn. Operacje przydzielane są do stadiów, a nie maszyn. W związku z tym przydział operacji do maszyn dokonywany jest na poziomie planowania operacyjnego, w przypadku którego szereguje się operacje. Rezultatem uszeregowania operacji jest harmonogram wykonywania operacji, w którym uwzględnione są przydziały operacji do maszyn wyznaczone za pomocą opracowanej metody. Rozwiązanie opisanego zadania optymalizacji obciążeń stadiów i minimalizacji przepływów międzystadialnych należy więc do danych uwzględnianych w harmonogramowaniu montażu – np. za pomocą metod zaprezentowanych w [3] i [4].



## Matematyczny opis metody

W celu sformułowania liniowych modeli matematycznych zadań równoczesnego równoważenia obciążeń stadiów i minimalizacji przepływów międzystadialnych przyjęto oznaczenia parametrów i zmiennych, które zestawiono w tab. 1.

Planowane przestoje maszyn (np. konserwacje, przeglądy) uwzględniono w opracowanej metodzie i dotychczas czasu, który nie przekracza minimalnego obciążenia stadium w systemie montażowym oznaczonego  $LBP_{\max}$ , a wyznaczanego zgodnie z następującą procedurą:

- 1) Na podstawie równania (1) oblicz  $c_k$  – całkowity czas wykonywania operacji dotyczących wszystkich sztuk

produktu  $k \in K$ , na które jest zapotrzebowanie wynoszące  $d_k$ .

$$c_k = \sum_{j \in J_k} d_k p_{jk}; \quad k \in K \quad (1)$$

- 2) Zgodnie z równaniem (2) oblicz  $e$  – średni czas obciążenia stadium. Zastosowano funkcję round służącą zaokrągleniu do liczby całkowitej ( $M$  – liczba maszyn, zgodnie z tab. 1).

$$e = \text{round} \left( \frac{1}{M} \sum_{k \in K} c_k \right) \quad (2)$$

- 3) W przypadku każdej maszyny  $i \in I$  oszacuj jej minimalne obciążenie  $\omega_i$ , uwzględniające ograniczoną

Tabela 1. Zestawienie parametrów i zmiennych  
Table 1. Summary of parameters and variables

Podstawowe zbiory:	
$I$	– zbiór maszyn: $I = \{1, \dots, M\}$ ,
$J$	– zbiór typów operacji: $J = \{1, \dots, N\}$ ,
$K$	– zbiór typów produktów: $K = \{1, \dots, T\}$ ,
$L$	– zbiór przedziałów czasowych: $L = \{1, \dots, H\}$ ,
$S$	– zbiór indeksów produktów (dotyczy modelu M2, każda sztuka ma inny indeks); $S = \{1, \dots, \max_{k \in K} d_k\}$ ,
$V$	– zbiór stadiów: $V = \{1, \dots, \vartheta\}$ ,
Pozostałe zbiory:	
$I_j$	– zbiór maszyn zdalnych do wykonania operacji typu $j \in J$ , $I_j \subset I$ ,
$V_j$	– zbiór stadiów, w których maszyny są zdalne do wykonania operacji typu $j \in J$ , $V_j \subset V$ ,
$J^c$	– zbiór operacji wymagających wykorzystania podajnika części, $J^c \subset J$ ,
$J_k$	– zbiór operacji wykonywanych dla produktu $k \in K$ , $J_k \subset J$ ,
$R_k$	– zbiór uporządkowanych par operacji $(r, j)$ kolejno wykonywanych dla produktu $k$ , gdzie $r, j \in J_k$ ,
$Z$	– zbiór uporządkowanych par $(i, v)$ , takich, że maszyna $i$ należy do stadium $v$ ,
Parametry:	
$a_{vj}$	– przestrzeń robocza maszyny umieszczonej w stadium $v$ wymagana dla wykonania operacji $j$ ,
$b_v$	– przestrzeń robocza maszyny umieszczonej w stadium $v$ , w której mogą być umieszczone podajniki,
$d_k$	– zapotrzebowanie (popyt) na produkt $k$ ; inaczej: liczba sztuk produktu $k$ , która ma być zmontowana,
$m_v$	– liczba maszyn umieszczonych w stadium $v$ ,
$p_{jk}$	– czas wykonywania operacji typu $j$ dotyczącej produktu $k$ ,
$\mu_{il}$	= 1, jeżeli maszyna $i$ jest dostępna w przedziale czasowym $l$ , inaczej $\mu_{il} = 0$ ,
$\lambda$	– waga kryterium dotyczącego obciążenia stadium, gdzie $\lambda \in [0, 1]$ ,
Zmienne:	
$P_{\max}$	– obciążenie stadium stanowiącego wąskie gardło w linii montażowej,
$x_{vj}$	= 1, jeżeli operację $j$ przydzielono do stadium $v$ , inaczej $x_{vj} = 0$ ,
▪ dotyczące tylko modelu M1 (sztywne marszruty montażu):	
$y_{vk}$	= 1, jeżeli produkt typu $k$ przepływa przez stadium $v$ , inaczej $y_{vk} = 0$ ,
$z_{vjk}$	= 1, jeżeli do stadium $v$ przydzielono operację $j$ wykonywaną dla produktu typu $k$ , inaczej $z_{vjk} = 0$ ,
▪ dotyczące tylko modelu M2 (alternatywne marszruty montażu):	
$w_{vks}$	= 1, jeżeli produkt $s$ (sztuka nr $s$ ) typu $k$ przepływa przez stadium $v$ , inaczej $w_{vks} = 0$ ,
$q_{vjks}$	= 1, jeżeli do stadium $v$ przydzielono operację $j$ wykonywaną dla produktu $s$ typu $k$ , inaczej $q_{vjks} = 0$ .

dostępność maszyny. W tym celu przyjmij  $i := 1$  i kolejno wykonaj:

- przyjmij  $\omega_i := 1$  i idź do kroku 3b.
- jeżeli warunek (3) jest spełniony w przypadku maszyny  $i$ , to idź do kroku 3d, w przeciwnym razie idź do kroku 3c.

$$\sum_{\tau=1}^{\omega_i} \mu_{i\tau} = e \quad (3)$$

- jeżeli  $\omega_i < H$  ( $H$  – liczba przedziałów czasowych) to przyjmij  $\omega_i := \omega_i + 1$  i wróć do kroku 3b. W przypadku, gdy  $\omega_i = H$  i nie został spełniony warunek (3) należy zmodyfikować parametry: zwiększyć wartość  $H$  w celu umożliwienia wykonania wszystkich operacji lub zwiększyć dostępność maszyny w kolejnych okresach  $l$ .
- jeżeli  $i < M$  to wróć do kroku 3a, w przeciwnym razie idź do kroku 4, w którym uwzględnione zostaną wyznaczone wartości  $\omega_i$  dla  $i = 1, \dots, M$  stanowią oszacowanie minimalnych obciążeń poszczególnych maszyn.
- oszacuj wg (4) minimalną wartość obciążenia stadium najbardziej obciążonego.

$$LBP_{\max} = \max_{i \in I} \omega_i \quad (4)$$

W celu uwzględnienia losowych przestoju maszyn wykorzystano znajomość funkcji niezawodności każdej maszyny w stadium  $v$  oznaczonej  $F_v(t)$  [5]. Funkcja ta (5) dla każdego czasu ustalonego  $t \geq 0$  ma wartość równą prawdopodobieństwu znajdowania się maszyny umieszczonej w stadium  $v$  do chwili  $t = LBP_{\max}$  w stanie zdatności.

$$F_v(t) = P(E_v \geq t); \quad t = LBP_{\max} \quad (5)$$

gdzie:

$E_v$  – zmienna losowa oznaczająca czas zdatności dla maszyny w stadium  $v$ .

Zestawione w tab.1 parametry i zmienne, jak i również zdefiniowane w zależnościach (4) i (5) dodatkowe dane, uwzględniono w zaprezentowanych poniżej modelach zadań PC.

Model matematyczny M1 przeznaczony do równoczesnego równoważenia obciążeń stadiów i minimalizacji przepływów międzystadialnych – w przypadku sztywnych marszrut:

$$\text{Zminimalizować: } \lambda P_{\max} + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} d_k y_{vk} \quad (6)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{k \in K} \frac{d_k P_{jk} z_{vj k}}{m_v F_v(LBP_{\max})} + \sum_{l \in I: l \leq LBP_{\max}} \sum_{i \in I: (i,v) \in Z} \frac{1 - \mu_{il}}{m_v} \leq P_{\max}; \quad v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{v \in V_j} x_{vj} = 1; \quad j \in J \quad (8)$$

$$x_{vj} = 0; \quad j \in J; \quad v \notin V_j \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J^c} a_{vj} x_{vj} \leq b_v m_v; \quad v \in V \quad (10)$$

$$z_{vj k} \leq x_{vj}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad v \in V \quad (11)$$

$$\sum_{v \in V_j} z_{vj k} = 1; \quad j \in J_k; \quad k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{v \in V} v z_{vj k} \leq \sum_{v \in V} v z_{vr k}; \quad k \in K; \quad (j, r) \in R_k \quad (13)$$

$$y_{vk} \geq z_{vj k}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad v \in V \quad (14)$$

$$x_{vj}, y_{vk}, z_{vj k} \in \{0, 1\}; \quad j \in J; \quad k \in K; \quad v \in V \quad (15)$$

Funkcja celu (6) służy do zrównoważenia obciążeń stadiów oraz do minimalizacji liczby produktów przepływających przez poszczególne stadia, co skutkuje poszukiwaniem takich rozwiązań, w których każdy produkt przepływa przez jak najmniejszą liczbę stadiów [4]. W funkcji (6)  $\lambda \in [0, 1]$  jest współczynnikiem wagi, dotyczącej wyznaczenia dzięki ograniczeniu (7) średniego obciążenia maszyny umieszczonej w najbardziej obciążonym stadium. Wzięto pod uwagę ograniczoną dostępność maszyn: planowane przestoje (znane dzięki wartościom parametrów  $\mu_{il}$ ) oraz losowe przestoje maszyn (wykorzystano znajomość funkcji (5)). Drugim kryterium, dotyczącemu liczby przepływów produktów przez stadia, przyporządkowano wagę  $1 - \lambda$ . Wartość parametru  $\lambda$  ma istotne znaczenie dla rozwiązywanego zadania. Oba uwzględnione kryteria nie dotyczą jednakowych jednostek (czas obciążenia maszyny mierzy się w sekundach, a liczbie przepływów produktów nie przypisuje się jednostek. Ponadto mogą być różne rzędy wielkości składników funkcji celu w przypadku obu kryteriów. Dlatego w celu doboru wag wskazane jest zastosowanie dialogowej procedury optymalizacji dwukryterialnej [4]. Jest to interaktywna procedura przeznaczona do wyznaczania rozwiązań dla 3 wag testowych w każdej iteracji. W przypadku, gdy żadne z rozwiązań nie satysfakcjonuje decydenta, następuje zmiana obszaru poszukiwań. Nowy obszar poszukiwań uzależniony jest od wartości funkcji celu i wag testowych, uwzględnianych w poprzedniej iteracji.

Kolejne ograniczenia zapewniają: (8) – przydział każdego typu operacji dokładnie do jednego stadium, (9) – eliminację przydziału operacji do niewłaściwych stadiów, (10) – uwzględnienie ograniczonej przestrzeni roboczej maszyn, (11) – wykonywanie operacji przypisanych produktom w tych stadiach, którym przydzielono operacje dotyczące tych produktów, (12) – rozdział wszystkich operacji pomiędzy stadia, (13) – jednokierunkowość przepływu produktów i zachowanie kolejności wykonywania operacji, (14) – wyznaczenie stadiów, przez które przepływają poszczególne produkty, (15) – binarność zmiennych decyzyjnych.

W przypadku alternatywnych marszrut montażu należy zastosować model M2:

$$\text{Zminimalizować: } \lambda P_{\max} + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{s \in S} w_{vks} \quad (16)$$

przy ograniczeniach (9) i (10), a także:

$$\sum_{j \in J_k} \sum_{k \in K} \frac{p_{jk} q_{vjks}}{m_v F_v(LBP_{\max})} + \sum_{l \in L: l \leq LBP_{\max}} \sum_{i \in I: (i,v) \in Z} \frac{1 - \mu_{il}}{m_v} \leq P_{\max}; \quad v \in V \quad (17)$$

$$\sum_{v \in V_j} x_{vj} \geq 1; \quad j \in J \quad (18)$$

$$q_{vjks} \leq x_{vj}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad v \in V \quad (19)$$

$$\sum_{v \in V_j} q_{vjks} = 1; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad s \leq d_k \quad (20)$$

$$\sum_{v \in V} v q_{vjks} \leq \sum_{v \in V} v q_{vrks}; \quad k \in K; \quad (j,r) \in R_k; \quad s \in S_k; \quad s \leq d_k \quad (21)$$

$$w_{vks} \geq q_{vjks}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad v \in V; \quad s \leq d_k \quad (22)$$

$$x_{vj}, q_{vjks}, w_{vks} \in \{0,1\}; \quad j \in J; \quad k \in K; \quad s \in S; \quad v \in V \quad (23)$$

W modelu M2 zastosowano m.in. zmienne  $w_{vks}$  służące opisowi przepływów poszczególnych sztuk  $s$  produktów typu  $k$  przez stadia  $v$ . Suma wartości tych zmiennych jest uwzględniona w funkcji (16) w celu wyznaczenia liczby przepływów produktów przez poszczególne stadia (łącznej liczby „odwiedzin” stadiów przez produkty). Interpretacja funkcji celu (16) oraz ograniczenia (17) jest taka sama, jak w przypadku funkcji (6) oraz relacji (7). Alternatywność marszrut montażu zapewnia ograniczenie (18). Ograniczenia (19)–(23) pełnią podobną rolę jak zinterpretowane relacje (11)–(15), dotyczące modelu M1.

## Weryfikacja metody

W celu weryfikacji metody rozwiązano przykłady testowe dotyczące 4 grup zadań. Parametry tych grup zadań oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych zestawiono w tab. 2. W przypadku każdej

z grup zadań rozwiązano 30 przykładów. Modele matematyczne zostały zakodowane w języku AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) [6]. Do obliczeń wykorzystano pakiet optymalizacji dyskretnej GNU *Linear Programming Kit* (GLPK). W celu porównania obciążenia najbardziej obciążonego stadium  $P_{\max}$  z oszacowanym największym obciążeniem stadium  $LBP_{\max}$  w (24) zdefiniowano wskaźniki dotyczące różnych wag  $\lambda$ . Eksperymenty obliczeniowe dotyczyły również drugiego kryterium. W celu porównania liczby przemieszczeń zdefiniowano w (25) wskaźniki  $\beta_i$  (dotyczące sztywnych marszrut) oraz  $\gamma_i$  (dotyczące alternatywnych marszrut), gdzie indeks  $i$  oznacza wartość parametru  $\lambda$  (waga, która została uwzględniona w rozwiązaniu zadania). Wartości średnie wszystkich wskaźników porównań zestawiono w tab. 2.

$$\alpha_1 = \frac{P_{\max} - LBP_{\max}}{LBP_{\max}} \cdot 100\% \quad (\text{dla } \lambda = 1); \quad (24)$$

$$\alpha_{0,5} = \frac{P_{\max} - LBP_{\max}}{LBP_{\max}} \cdot 100\% \quad (\text{dla } \lambda = 0,5)$$

$$\beta_i = \frac{Y_i - Y_0}{Y_0} \cdot 100\%, \quad \text{gdzie } Y_i = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} d_k y_{vk}; \quad (25)$$

$$\gamma_i = \frac{W_i - W_0}{W_0} \cdot 100\%, \quad \text{gdzie } W_i = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{s \in S} w_{vks}$$

Porównanie średnich wartości wskaźnika  $\alpha$  wykazuje, że łatwiej jest zrównoważyć obciążenia stadiów w przypadku marszrut alternatywnych ( $\alpha_1$  nie przekroczył 5,6%) niż w przypadku sztywnych marszrut ( $\alpha_1$  wynosił nawet prawie 10%) – tutaj istotny jest nie tylko przydział każdego typu operacji do tylko jednego stadium, ale również niepodzielność wykonywanych operacji (zarówno pomiędzy maszyny, jak i również niepodzielność w czasie). Dokonane symulacje obciążeń maszyn pokazały wpływ zmniejszenia wagi  $\lambda$  ( $\lambda = 0,5$ ) na wzrost obciążenia wąskiego gardła systemu (na podstawie wartości  $\alpha_{0,5}$ ) i zmniejszenie liczby produktów przepływających przez stadia. W tab. 2 wykazano za pomocą wskaźników  $\beta$  i  $\gamma$ ,

Tabela 2. Parametry grup zadań i wyniki eksperymentów obliczeniowych [%]

Table 2. Parameters of groups of tasks and results of computational experiments [%]

Grupa zadań	Parametry grupy zadań					Sztywne marszrut				Alternatywne marszrut			
	$\vartheta$	$M$	$N$	$T$	$B$	$\alpha_1$	$\alpha_1$	$\beta_{0,7}$	$\beta_{0,5}$	$\alpha_1$	$\alpha_1$	$\gamma_{0,7}$	$\gamma_{0,5}$
1	2	4	10	4	100	9,8	14,9	3,2	1,4	5,6	10,1	8,7	4,5
2	2	6	12	5	200	8,3	12,4	3,3	1,6	5,4	8,8	9,2	4,8
3	3	6	14	5	400	7,5	11,1	4,1	1,9	2,9	7,7	10,0	6,4
4	3	8	16	6	500	7,2	10,2	4,8	2,6	2,4	4,5	12,1	8,8

Liczby:  $\vartheta$  – stadiów,  $M$  – maszyn,  $N$  – typów operacji montażowych,  $T$  – typów produktów,  $B$  – łączna liczba produktów przepływających przez linię montażową



że znacznie łatwiej sterować liczbą produktów w przypadku marszrut alternatywnych niż w przypadku sztywnych marszrut, których uwzględnienie skutkuje brakiem elastyczności marszrut przepływów produktów, co wykazały niewielkie wartości wskaźników  $\beta_{0,5}$ .

### Uwagi końcowe

Przedstawiona metoda planowania taktycznego służy przede wszystkim do przeprowadzania symulacji: badania wpływu uwzględnianych wag i rodzaju marszrut montażu na obciążenia stadiów i liczbę przemieszczeń produktów, a zalety przeprowadzania symulacji procesów produkcyjnych wykazano w pracy [7]. Uzyskiwane rozwiązania stanowią punkt wyjścia do szeregowania operacji montażowych – budowy harmonogramów montażu.

Metodę opracowano do wykorzystania w przypadku hybrydowych systemów przepływowych. Jednakże przy zapisie danych, w którym każde stadium zawiera jedną maszynę, metoda dotyczy również systemów przepływowych bez maszyn równoległych (flow shop).

Do zalet metody zalicza się wzięcie pod uwagę planowanych oraz losowych przestojów maszyn. Dzięki temu opracowane modele w lepszym stopniu odzwierciedlają rzeczywistość. Temu samemu celowi służy również wyodrębnienie zbioru operacji wymagających wykorzystania podajników części i uwzględnienie ograniczonej przestrzeni roboczej.

W przypadku wagi  $\lambda = 1$  lub  $\lambda = 0$ , czyli uwzględnienia tylko jednego kryterium, za pomocą

opracowanych modeli wyznaczone są rozwiązania optymalne. Jest to kolejna zaleta opracowanych modeli, osiągnięta dzięki zastosowaniu programowania całkowitoliczbowego.

### LITERATURA

- [1] Fourer R., D. Gay, B. Kernighan. 2003. "AMPL, A Modelling Language for Mathematical Programming". Duxbury Press, Pacific Grove, CA.
- [2] Kobiałka J., P. Łukasik. 2015. „Symulacja procesów produkcyjnych – modułowe stanowiska dydaktyczne”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (2): 28–32.
- [3] Macha E. 2001. „Niezawodność maszyn”. Opole: Wydawnictwo Politechniki Opolskiej.
- [4] Magiera M. 2016. „Wybrane metody planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne i łańcuchy dostaw”. Kraków: Wydawnictwo AGH (w druku).
- [5] Pinedo M.L. 2008. "Scheduling. Theory, Algorithms and Systems". New York: *Springer*.
- [6] Sawik T. 1999. "Production Planning and Scheduling in Flexible Assembly Systems". Berlin: *Springer-Verlag*.
- [7] Skołod B. 2006. „Zarządzanie operacyjne. Produkcja w małych i średnich przedsiębiorstwach”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.

---

Dr inż. Marek Magiera – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Badań Operacyjnych i Technologii Informatycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mmagiera@zarz.agh.edu.pl.

# ANALIZA PORÓWNAWCZA WYTRZYMAŁOŚCI WYBRANYCH POŁĄCZEŃ PROWADNICOWYCH, STOSOWANYCH W BUDOWIE MASZYN

## *The comparative analysis of the strength on selected guide joints used in a construction of machinery*

Stanisław BŁAWUCKI, Kazimierz ZALESKI

---

**Streszczenie:** Wykonywanie połączeń kształtowych wiąże się z trudnościami technologicznymi, stąd potrzeba poszukiwania nowych, prostszych do wykonania konturów. W pracy dokonano oceny porównawczej trudności wykonania i montażu połączeń kształtowych o zarysie trapezowym i teowym oraz zaproponowano nowe kształty połączeń konstrukcyjnych. Przeprowadzono obliczenia numeryczne wytrzymałości statycznej połączeń w stanie zmontowanym, z wykorzystaniem metody elementów skończonych w programie ABAQUS.

**Słowa kluczowe:** połączenia kształtowe, połączenia prowadnicowe, połączenia trapezowe, połączenia teowe, ABAQUS

**Abstract:** The performance of shaped joints is associated with many technological problems, hence the need to seek out new, simpler to perform, contours. This paper contains a comparative assessment of difficulties of performance and mounting of trapezoidal and T-slot shaped joints and new outlines of joints were proposed. There were also done the numerical computations of the static strength in ready-assembled joints with the use of finite element method in ABAQUS program.

**Keywords:** shaped joints, guided joints, trapezoidal joints, T-slot joints, ABAQUS

---

Połączenia kształtowe odgrywają ważną rolę w budowie maszyn, przenosząc siłę lub moment obrotowy w mechanizmach i zespołach. W zależności od kształtu i przeznaczenia wyróżnia się połączenia wżębnne, wtyczkowe oraz prowadnicowe. Istnieje wiele pozycji literatury naukowej, w których przedstawiono wyniki badań wytrzymałości połączeń wpustowych i wielowypustowych [1, 2]. Nadal jednak brakuje aktualnego piśmiennictwa na temat połączeń prowadnicowych, mających częste zastosowanie w budowie statków powietrznych, obrabiarek oraz narzędzi skrawających. Dobrym przykładem zastosowania mogą być połączenia prowadnic łoża tokarki z konikiem i prowadnice w nożach tokarskich słupkowych z uchwytem narzędziowym. Opisywane połączenia mają także częste zastosowanie w przemyśle lotniczym, szczególnie w powietrznych statkach transportowych do zabezpieczenia ładunku przed przemieszczeniem [3, 4].

Rozwijający się przemysł maszynowy i lotniczy wymaga od konstruktorów poszukiwania optymalnych zarysów połączeń kształtowych, co pozwoli na minimalizację kosztów produkcji oraz redukcję masy części przy możliwie najwyższej dokładności wykonania i wytrzymałości doraźnej połączenia. Dobrym kierunkiem wydaje się być rozwijanie znanych dotychczas połączeń kształtowych na drodze ich modyfikacji wymiarowo-kształtowej. Prowadzenie prób wytrzymałościowych na rzeczywistych połączeniach pociąga za sobą koszt wykonania łączonych elementów i badań laboratoryjnych. Dlatego też wstępny etap projektowania i optymalizacji można wykonać relatywnie niedrogą metodą badań wytrzymałościowych na modelach wirtualnych, przy użyciu programu służącego do obliczeń numerycznych [5, 6].

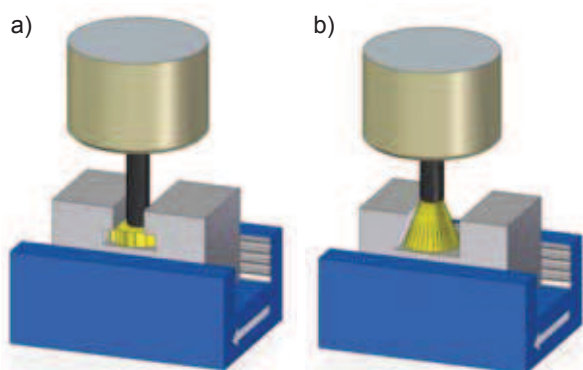
Podstawowym zadaniem połączenia prowadnicowego spoczynkowego jest narzucenie odpowiednich więzów pomiędzy przesuwanym się prowadnikiem a prowadnicą, co pozwala uzyskać ściśle określone ich wzajemne położenie [3].

### Technologia wykonania

Połączenia prowadnicowe teowe wykonuje się metodą frezowania walcowo-czołowego przy użyciu frezów kształtowych trzpieniowych jednolitych bądź składanych. Narzędzie ustawia się przed obrabianym przedmiotem i wprowadza się do wstępnie wykonanego rowka o przekroju prostokątnym (rys. 1a). Uzyskanie wysokiej powtarzalności kształtu jest utrudnione ze względu na ciągłe zużycie narzędzia, znajdującego się wewnątrz obrabianego profilu. Nie ma możliwości dokonania korekty zużycia narzędzia ze względu na symetryczny charakter pracy jego ostrzy oraz skrawanie rowka w jednym przejściu. Obróbka frezowaniem rowka teowego może być stosowana zarówno na obrabiarce konwencjonalnej jak i sterowanej numerycznie.

Połączenia prowadnicowe trapezowe (rys. 1b) wykonuje się podobnie jak teowe. Różnica polega na tym, że pochylone ścianki wykonywane są w osobnych przejściach. Próba odwzorowania kształtu narzędzia w jednym przejściu spowodowałaby przyspieszone zużycie narzędzia w miejscu naroża, a następnie jego katastroficzne uszkodzenie.

Wykonywanie znormalizowanych rowków w połączeniach kształtowych wymaga ciągłej kontroli zużycia frezu, w celu zapewnienia dokładności wymiarowo-kształtowej oraz wymaganej jakości obrabianych powierzchni.



Rys. 1. Frezowanie połączeń kształtowych przewodniczych: a) połączenie teowe, b) połączenie trapezowe  
Fig. 1. Milling of shape guided joints: a) T-slot joint, b) trapezoidal joint

### Technologia montażu

Powierzchnie frezowane niejednokrotnie potrzebują dodatkowej obróbki wykończeniowej w postaci ręcznego skrobania, docierania, szlifowania lub szczotkowania ostrych krawędzi. Odgrywa to ważną rolę w procesie montażu i na etapie późniejszej eksploatacji połączenia, zapewniając mu odpowiednią nośność [3, 4].

Przed złączeniem przewodnika i przewodnicy przeprowadza się kontrolę wymiarową. W tym celu stosuje się najczęściej pośrednie metody pomiaru z użyciem kulek i wałeczków pomiarowych. Kontrolę przyłączy wykonuje się z wykorzystaniem mikrometrycznego głębokościomierza i średnicówki. Po złączeniu przewodnika z przewodnicą dokonuje się kontroli współbieżności i prostoliniowości przewodnicy przy użyciu czujnika zegarowego,

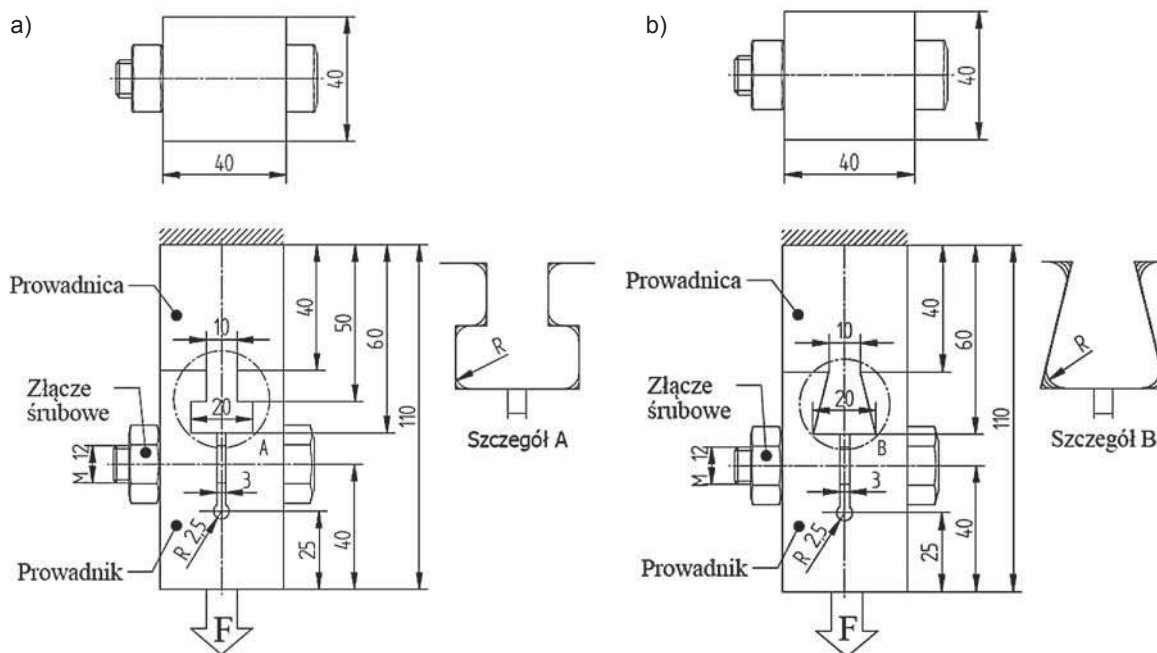
zamocowanego w uchwycie magnetycznym. Ostatnim etapem montażu jest utrwalenie wzajemnego położenia przewodnika i przewodnicy. Sposób utrwalenia jest przede wszystkim zależny od rodzaju konstrukcji połączenia. Najczęściej stosuje się śruby dociskowe i kliny [3, 5, 7].

### Metodyka badań

Pierwszym celem pracy było porównanie wytrzymałości doraźnej na rozciąganie połączeń przewodniczych spoczynkowych – teowego i trapezowego (rys. 2). Drugim celem było sprawdzenie czy modyfikacja kształtu zarysu połączenia przewodniczego, przez wprowadzenie promienia zaokrąglenia  $R$  ostrych krawędzi, nie spowoduje znaczącego spadku wytrzymałości na rozciąganie przy poprawie technologii wykonania przyłączy.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla połączeń o założonych wymiarach (rys. 2). Stworzone modele stanowiły jednocześnie punkt wyjścia do modyfikacji kształtu zarysu, prowadzonych na elementach wirtualnych w programie ABAQUS. Wymiary próbek dobrano na podstawie znormalizowanego szeregu wymiarów wyrobów hutniczych, popularnych w budowie maszyn. Symulacje wytrzymałościowe przeprowadzono dla stopu aluminium EN AW-6061 T4 ze względu na częste stosowanie tego materiału w przemyśle lotniczym oraz możliwości aplikacyjne w budowie maszyn. Zastosowanie popularnego stopu EN AW-6061 T4 daje możliwość weryfikacji otrzymanych obliczeń na drodze eksperymentu doświadczalnego na modelach rzeczywistych. Granica plastyczności  $R_e$  dla tego stopu wynosi 250 MPa, a wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  ok. 300 MPa [8, 9].

Obliczenia numeryczne wytrzymałości badanych połączeń przewodniczych na rozciąganie można podzielić



Rys. 2. Wymiary zmontowanych połączeń, użytych do wytrzymałościowych analiz numerycznych: a) teowe, b) trapezowe  
Fig. 2. Dimensions of assembled joints, used for numerical analysis of endurance: a) T-slot joint, b) trapezoidal joint



na dwa etapy, co pokazano na rys. 3. W pierwszym etapie (rys. 3b) wprowadzono napięcie wstępne o wartości 25 kN w złączu śrubowym M12 przewodnika, co odpowiada 60 Nm momentu dokręcenia śruby. Wprowadzenie zacisku miało na celu ograniczenie ruchu przewodnika i doprowadzenie do wzrostu tarcia w obszarze styku przyłączy. Tarcie odgrywa szczególnie ważną rolę w połączeniach trapezowych, przeciwdziałając ruchowi przewodnika względem przewodnicy w kierunku działania siły.

W drugim etapie obliczeń (rys. 3c) połączenie obciążono równomierną siłą rozciągającą o wartościach 5 kN, 10 kN i 20 kN. Dobrano kilka wartości siły w celu oszacowania granicznej wytrzymałości połączeń na jednoosiowe rozciąganie o charakterze statycznym.

Modyfikacja kształtu badanych połączeń polegała na wprowadzeniu promienia  $R$  zaokrąglenia krawędzi, o wartościach 1, 2 i 3 mm dla analizowanych połączeń – trapezowego i teowego (rys. 2 i 5).

### Analiza wyników badań

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły na oszacowanie różnic wytrzymałości na rozciąganie w połączeniu teowym oraz trapezowym o założonych wymiarach konstrukcyjnych (rys. 2). Badane modele odkształciły się w sposób symetryczny i zgodny z oczekiwaniami. Pola odkształceń oraz naprężeń rozkładają się wg założeń eksperymentu.

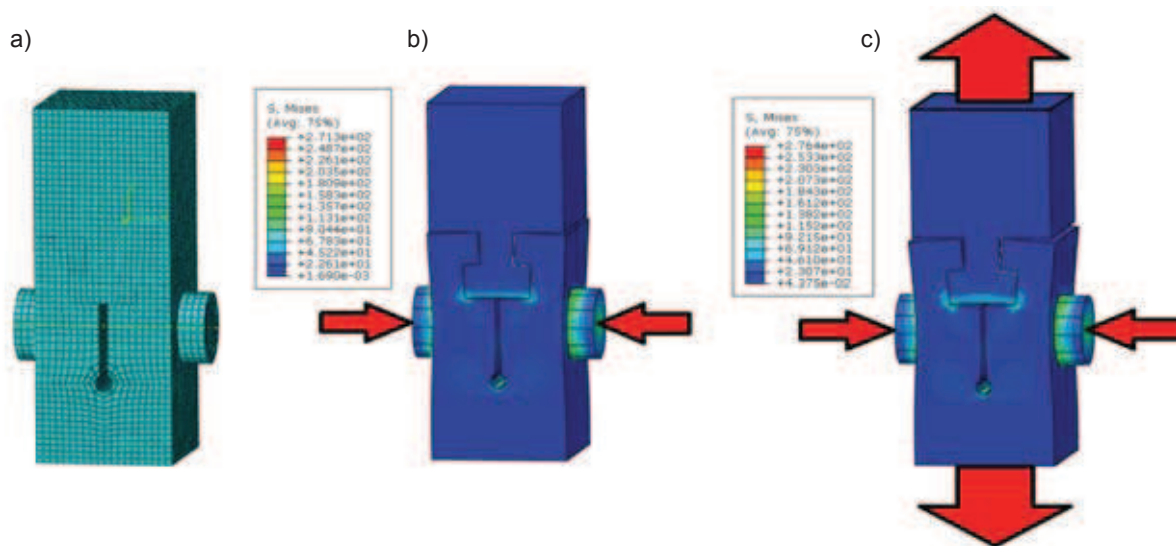
Dla obciążenia siłą rozciągającą  $F$  o wartościach 5 kN i 10 kN otrzymano zbliżone stany odkształcenia w analizowanych przyłączach rzędu 0,03–0,05 mm. Są to nieduże odkształcenia, biorąc pod uwagę sumaryczny wymiar przyłączy wynoszący 110 mm (rys. 4). Przy dalszym zwiększaniu obciążenia do 20 kN odnotowuje się wyraźny, nawet pięciokrotny przyrost odkształcenia w złączach trapezowych i ok. dwukrotny w połączeniach

teowych, bez względu na promień zaokrąglenia krawędzi. Nie odnotowano znaczącego wpływu wzrostu promienia zaokrąglenia na zmianę wartości odkształceń badanych połączeń pod obciążeniem. Zauważono pozytywny wpływ promienia  $R$  jedynie w przypadku połączenia trapezowego, obciążonego największą wartością siły  $F$  (rys. 4a). Można to interpretować jako skutek rozwinięcia powierzchni styku przewodnika z przewodnicą, gdzie wzrostowi powierzchni kontaktu towarzyszy rozproszony rozkład nacisków kontaktowych.

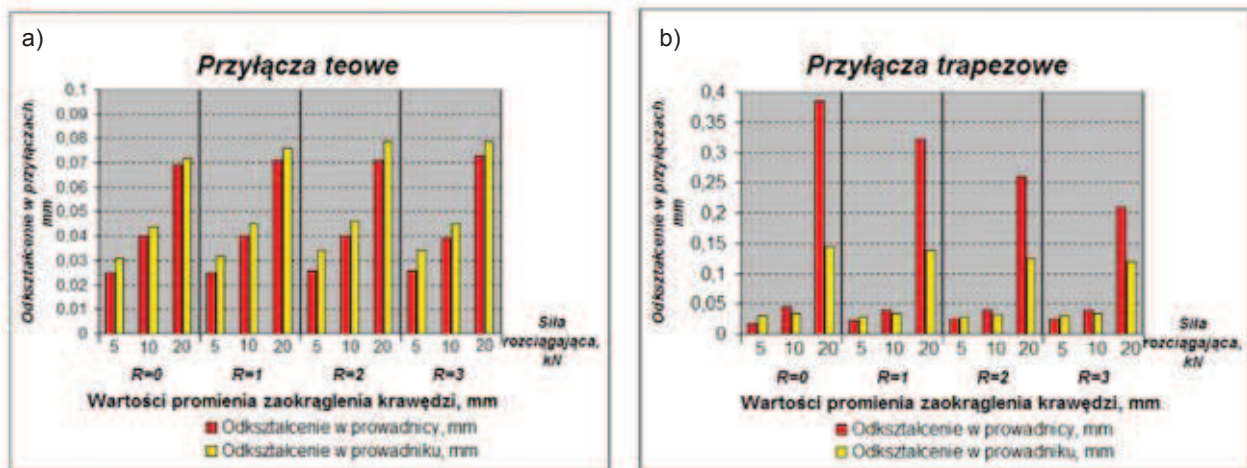
W połączeniach teowych odnotowano zbliżone wartości odkształcenia w przewodnicy – równoległe do kierunku działania obciążenia oraz przewodniku – prostopadłe do kierunku obciążenia. W połączeniach trapezowych różnice te są bardziej widoczne i silnie uzależnione od wartości przyłożonej siły.

Na rys. 5 (a-d) zestawiono graniczne przypadki geometryczne wybranych połączeń wraz z zaznaczonymi obszarami występowania naprężeń przy obciążeniu 10 kN. Można zauważyć, że zarówno dla kształtu trapezowego jak i teowego, maksymalne naprężenia występują w przewodniku. Wspomniane naprężenia przeważnie pochodzą od złącza śrubowego. Na podstawie prób rozpoznawczych zauważono, że stosowanie mniejszych zacisków wstępnych w śrubie prowadziłyby do większych odkształceń w kierunku zgodnym z kierunkiem działania siły. Stosowanie zaś większych wartości zacisków wstępnych prowadziłyby do przekroczenia granicy plastyczności już przy sile rozciągającej rzędu 10 kN.

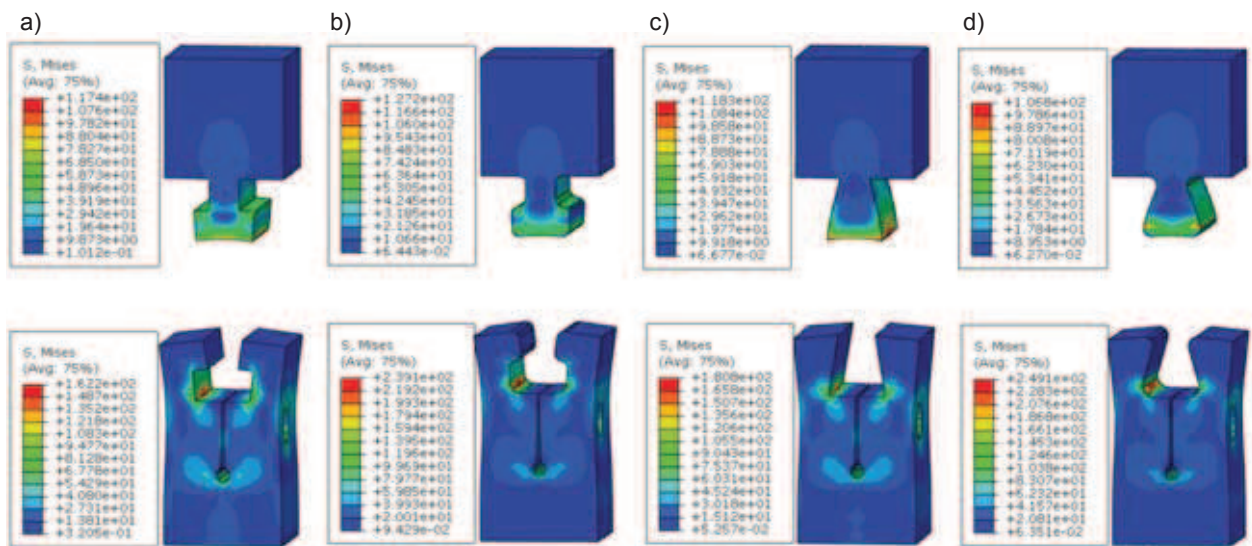
Na podstawie otrzymanych wyników stanu naprężeń (rys. 6) w rozważanych modelach wirtualnych można zauważyć, że w zakresie obciążeń do ok. 10 kN, złącza pracują w zakresie odkształceń sprężystych, zaś przy wyższych obciążeniach w obszarze sprężysto-plastycznym, przy czym z przewagą odkształceń sprężystych. Warto zwrócić uwagę na to, iż wprowadzenie promienia



Rys. 3. Etapy obliczeń numerycznych wytrzymałości na rozciąganie na przykładzie połączenia teowego ( $R = 0$ ) dla siły rozciągającej  $F = 5$  kN: a) dyskretyzacja modelu, b) wprowadzenie zacisku wstępnego w złączu śrubowym, c) przyłożenie siły rozciągającej  
 Fig. 3. Stages of numerical calculations of tensile strength on the example of T-slot joint ( $R = 0$ ) for the tensile force  $F = 5$  kN: a) discretization of the model, b) application of an initial load in the screw joint, c) putting the tensile force



Rys. 4. Zależność maksymalnych odształceń w zmodyfikowanych przyłączach teowych (a) oraz trapezowych (b) w funkcji wartości siły rozciągającej i promienia  $R$  zaokrąglenia krawędzi  
 Fig. 4. Relation of the maximum deformations in modified T-slot (a) and trapezoidal (b) in function of the tensile force and radius  $R$  of edges



Rys. 5. Rozkład naprężeń w wybranych badanych przyłączach przewodniczych: a) przyłącza teowe  $R = 0$ , b) przyłącza teowe  $R = 3$  mm, c) przyłącza trapezowe  $R = 0$ , d) przyłącza trapezowe  $R = 3$  mm  
 Fig. 5. Stress distribution in selected guiding joints: a) T-slot connector  $R = 0$ , b) T-slot connector  $R = 3$  mm, c) trapezoidal connector  $R = 0$ , d) trapezoidal connector  $R = 3$  mm

zaokrąglenia krawędzi przyczynia się do wzrostu dysproporcji w wartościach naprężeń powstałych w przewodnicy oraz w przewodniku. Jednak gdyby dokonać sumowania naprężeń w przypadku przyłączy o niezmodyfikowanej geometrii oraz takich, gdzie wprowadzono promień zaokrąglenia krawędzi, wówczas można zauważyć zależność, że sumy naprężeń są w przybliżeniu sobie równe, co można zapisać równaniem:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{przewodnik}(R=0)} + \sigma_{\text{przewodnica}(R=0)} &\approx \\ &\approx \sigma_{\text{przewodnik}(R_1>0)} + \sigma_{\text{przewodnica}(R_1>0)}, \end{aligned}$$

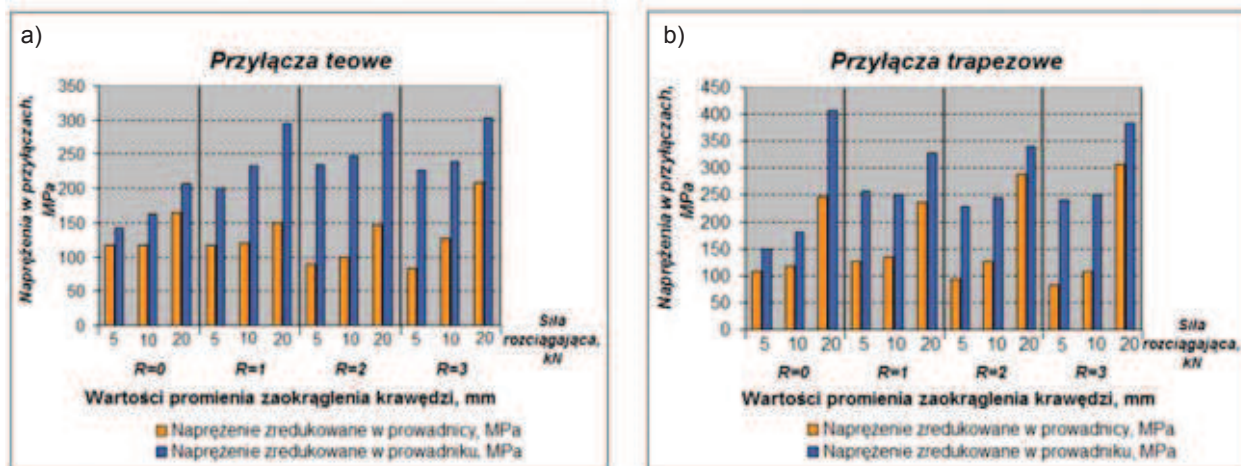
dla  $F = \text{const}$

Stąd wniosek, że przy zachowaniu ustalonego obciążenia i stałych wymiarów poprzecznych, a modyfikując

promień zaokrąglenia krawędzi, doprowadza się do obniżenia wytrzymałości doraźnej jednego z przyłączy przy poprawie warunków pracy drugiego.

Wraz z zastosowaniem promienia zaokrąglenia krawędzi eliminuje się konieczność usuwania zadziórów w zmodyfikowanych połączeniach. Wprowadzenie promienia zaokrąglenia poprawia także bezpieczeństwo pracy, dzięki wyeliminowaniu ryzyka skałeczenia.

Wzrostowi promienia zaokrąglenia krawędzi w obu analizowanych połączeniach towarzyszy wzrost technologiczności wykonania, co można rozważyć w dwóch aspektach. Przede wszystkim obniża się ryzyko katastroficznego i geometrycznego zużycia krawędzi skrawających frezu i zwiększa się jego trwałość ekonomiczna. Z drugiej strony, wprowadzając promień, można



Rys. 6. Zależność maksymalnych naprężeń w zmodyfikowanych przylącach trapezowych (a) oraz teowych (b) w funkcji wartości siły rozciągającej i promienia  $R$  zaokrąglenia krawędzi

Fig. 6. Relation of maximum stress in the modified trapezoidal connectors (a) and T-slot connectors (b) in function of tensile force and radius  $R$  of edges

zmodyfikować proces technologiczny wykonywania przyląc, uzyskując ich kształty przy użyciu frezów ogólnego przeznaczenia, co obniża koszty wytwarzania. Warunkiem koniecznym byłoby zastosowanie sterowanych komputerowo obrabiarek, co w obecnych czasach jest już standardem. Poważnym ograniczeniem wykonania nowych kształtów jest wartość wymiaru poprzecznego (głębokość) obrabianego przyląca, równa co najwyżej długości części roboczej frezu w jednym zamocowaniu.

#### Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia numeryczne pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Możliwe jest prowadzenie analiz numerycznych wytrzymałości doraźnej na rozciąganie dla kształtowych połączeń przewodnicowych, utrwalonych złączem śrubowym, napiętym siłą wstępną.
2. Nie odnotowano znaczącego wpływu wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi na zmianę wartości odkształceń badanych połączeń pod obciążeniem.
3. Wprowadzenie promienia zaokrąglenia krawędzi, przyczynia się do wzrostu dysproporcji w wartościach naprężeń, powstałych w przewodnicy oraz w przewodniku.
4. Suma naprężeń występujących w przewodniku i przewodnicy przed modyfikacją kształtu jest równa sumie naprężeń w przylącach po wprowadzeniu promienia zaokrąglenia krawędzi.
5. Wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia krawędzi zwiększa się całkowita powierzchnia styku przyląca, co pozwala uniknąć efektu powstawania karbów.
6. Możliwe jest dobranie takiego kształtu połączeń przewodnicowych, że nastąpi poprawa technologiczności ich wykonania i montażu przy niezmiennych wartościach odkształcenia oraz akceptowalnym wzroście naprężeń.

#### LITERATURA

- [1] Dębski H., G. Ponieważ, P. Różyło, A. Wójcik. 2015. „Podstawy metody elementów skończonych – przykłady obliczeń numerycznych w programie ABAQUS”. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [2] Kołodziej A. 2013. „Studium doboru parametrów geometrycznych do oceny skuteczności połączeń w budowie maszyn, rozprawy nr 494”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [3] Łunarski J., G. Banaś. 1988. „Technologia budowy maszyn. Cz. 1”. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej.
- [4] Maroszek J., J. Żółtowski. 1974. „Podstawy konstrukcji maszyn: połączenia”. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- [5] Matuszak J., M. Barszcz. 2015. “Computer aided design of cutting tools”. *Advances in Science and Technology Research Journal* (28): 107–111.
- [6] Pietrzyk W. 1978. „Połączenia w konstrukcji maszyn”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- [7] Puff T., W. Sołtys. 1980. „Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń”. Warszawa: WNT.
- [8] Różyło P., H. Dębski, P. Lonkwić. 2015. “Numerical and experimental analysis of the progressive gear body with the use of finite-element method”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* (4): 544–550.
- [9] Rudawska A., S. Cisz, T. Warda. 2014. “Selected methods for locking screw joints, including the use of adhesives, used in the helicopter construction”. *Technological Engineering* (2): 24–29.

Mgr inż. Stanisław Bławucki – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: s.blawucki@pollub.pl

Dr hab. inż. Kazimierz Zaleski – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: k.zaleski@pollub.pl



# IMPROVING THE LOGISTICS OF THE MULTI-FLOOR ASSEMBLY MANUFACTURING

## *Logistyka pionowego transportu wewnętrznego w montowni wielokondygnacyjnej*

Tygran DZHUGURYAN, Zofia JÓZWIAK

**Abstract:** The concordance of the vertical transport carrying capacity and of the performance of a multi-floor assembly manufacturing is one of tasks of production logistics. This paper defines the performance of multi-floor assembly manufacturing, depending on the number of parallel working flexible assembly cells, the weight or volume distribution of the finished product on the floors, the floor area occupied by the assembly production and vertical transport, the carrying capacity and number of freight elevators, time of their working cycle. The conditions to achieve the rational performance of multi-floor assembly manufacturing are revealed, allowing to determine the number of parallel working flexible assembly cells, the number of floors taking into account the height and the production of area floors, performance and footprint flexible assembly cells, the technical characteristics of the freight elevators and the area occupied by them. It provides the conditions for effective operations of the multi-floor assembly manufacturing and servicing, the vertical transport.

**Keywords:** flexible assembly cells, elevators, performance, time of cycle, number of floors

**Streszczenie:** Dopasowane pojemności i wydajności pionowego transportu w montowni, usytuowanej w obiekcie wielokondygnacyjnym, jest jednym z zadań logistyki produkcji. Wydajność montażu wyrobu określona jest w zależności od: liczby równoległych elastycznych komórek montażowych, masy i/lub objętości wyrobu końcowego, powierzchni podłogi zajmowanej podczas montażu oraz wydajności transportu pionowego, pojemności i liczby wind towarowych oraz od czasu cyklu produkcyjnego. Warunki do uzyskania skutecznego działania wielokondygnacyjnych montowni, wyznaczają: liczba równoległych elastycznych komórek montażowych, liczba pięter, wysokość i powierzchnia przestrzeni produkcyjnej, wydajności elastycznych komórek montażowych, właściwości techniczne wind towarowych wraz z zajmowanym przez nie obszarem. Uwzględnienie powyższych uwarunkowań i zaproponowanie logistycznych rozwiązań sprawia, że możliwe jest zapewnienie warunków dla skutecznego funkcjonowania produkcji montażowej wielopoziomowej i obsługi IT, transportu pionowego.

**Słowa kluczowe:** elastyczne komórki montażowe, windy, wydajność, czas cyklu, liczba kondygnacji

### Introduction

The multi-floor cellular assembly manufacturing is widely used in large cities and megacities with high-density populations due to limited areas for industrial development and also the necessity of unloading of transport streams. They are used for the manufacture of small-sized products based on modular technology [1, 2, and 3]. Assembly manufacturing is placed on each floor of the building in the form of autonomous flexible assembly cells (FACs), which are served by autonomous groups of assembly personnel. FACs contain the groups (two or more) flexible assembly lines (FALs), which are alternately readjusting as manufactured products are changed. FACs have high performance, the ability to quickly reprogramming to produce other products and are suitable for products with a variety of types and variants [1, 3]. The assembling products of the FACs are intended for sale to various customers of metropolitan agglomeration, including, as components of more large products assembled at other plants.

The FACs layout on the floors is carried out taking into account weight or volume of the finished product. The products of less weight or less volume are produced on the overhead floors of multi-floor manufacturing. For

instance, distribution of weight or volume of the assembling products on floors can be accepted as inversely proportional to the height of floor location [2]. This approach places heavy and bulky equipment at the lower floors and, thus, decrease the construction costs of multi-floor manufacturing by reducing the load on its bearing structure of the building, and also on setting of technological equipment [1, 2].

Presently planning of an assembly equipments layout from the point of view of the transport streams minimization into every floor and between floors successfully realized by the well known programs: CRAFT, SPACE-CRAFT, COFAD, ALDER, CORELAP, PLANET, PLANT-4D, etc. [1]. It should be noted that questions of multi-floor manufacturing layout (mainly in the chemical industry), vertical transporting of substances and materials, the choice of the number of building floors are considered in the large enough number of research studies [1, 4]. Nevertheless, the actual for researches are remained the questions, related to logistics of the vertical transport streams and their co-operating with horizontal transport streams taking into account the weight or volume distribution of the assembling product on the floors, the performance of the FACs and layout of storage facilities of the multi-floor manufacturing. It is important to mark that

limitation of the FACs performance is related not only to the limited production areas, the strength of the building structure, but also with the carrying capacity of the freight elevators of multi-floor manufacturing.

The aim of the paper is to improve the logistics of multi-floor assembly manufacturing taking into account the performance of the used FACs, weight or volume distribution on the floors of the assembling products and the carrying capacity of the freight elevators.

### The concordance of the manufacturing performance and transport capacity

The layout of the FACs in multi-floor manufacturing depends on many factors, among that basic are the type and weight of the assembling products, and also the applied technological process. One of the conditions of the FACs layout in multi-floor assembly manufacturing is to minimize the production of basic and auxiliary transport streams, defining movement the component, products, tools, consumables and waste [1, 3, and 6].

As an example on Fig. 1 the charts of the FACs layout are presented in multi-floor manufacturing. Multi-floor manufacturing includes the FACs 1 with the FALs 2 and 3 accordingly for the assembly of components and products; freight elevators 4, readjusted trolleys 5, 6, 7, 8, 9, accordingly with the components, finished products, defective components, and waste. FACs are equipped with areas for incoming inspection 10 and adjustment 11 of the component; auxiliary assembly features 12; output control 13, repair and adjustment 14, packing and loading 15 of finished products. Building for manufacturing contains: a main storage 16 and storages 17 for tools and supplies on each floor, administrative and sanitary facilities 18, stair grounds and passenger elevators 19 and sound-absorbing barrier 20.

Delivery of the components, tools and consumables in each FACs, shipping of products and wastes from it is carried out by freight elevators and readjusted trolleys. The supply of assembly manufacturing by readjusted trolleys is most effective on a method „Kanban Cards”. The trolleys after loading can be moved on the floor along the routes shown in Fig. 1. Filled trolleys with finished products or wastes are shipped on the main storage. The receiver control and the formation of components complete for assembly, including packaging, is carried out in main storage of the assembly manufacturing, which is located on the ground floor (floor number 0) of the building.

After completion of the preparatory work in the areas 10–12, the components arrive at the two in parallel working FALs 2, where the components are put together in assemblies that is, which are delivered to the two parallel working FALs 3 for the final assembling of the product. Four FALs 2 and 3 are realized the consistently-parallel works of the automated assembly equipments.

Time of cycle of the freight elevators work at consistently (shuttle) maintenance of the FACs on each floor of

the multi-floor manufacturing is determined with the following expression:

$$T_C = 2k_C h F^2 / 3600 v \varepsilon, \quad (1)$$

where:  $T_C$  – time of cycle of the freight elevators work, h;  $k_C$  – the coefficient of losses of time cycle of a work of the freight elevators, the values of that are in limits  $k_C = 1,05–1,6$  (with the increase of floors number of assembly manufacturing a value of the coefficient aspire to unit);  $F$  – the number of the building floors, since the first, on that FACs are layouted;  $h$  – the height of building floor, m;  $v$  – speed of uniform movement of the freight elevators, m/s;  $\varepsilon$  – the number of the freight elevators.

The values of the coefficient  $k_C$  depend also on the frequency of delivery tools and consumables, waste disposal, breakdowns of the freight elevators, availability of spare freight elevators in the building, etc.

The weight (gross) and volume distributions of the assembly products on the floors will be given in a kind:

$$W_n = \vartheta_W W_1 / n; \quad (2)$$

$$V_n = \vartheta_V V_1 / n, \quad (3)$$

where:  $W_n, W_1$  – the maximum weight (gross) of the assembling products accordingly on the n-th floor and on the ground floor of the multi-floor manufacturing, N;  $V_n, V_1$  – the maximum volume of the assembling products accordingly on the n-th floor and on the ground floor of the multi-floor manufacturing, m<sup>3</sup>;  $\vartheta_W, \vartheta_V$  – the coefficients of the distribution accordingly of the weight and volume of the finished products, the values of that depend on dynamic descriptions of the technological equipment and strength of the building structure;  $n$  – the number of floor since the second floor.

The weight and volume performance of the FACs during their consistently-parallel work on the n-th floor are defined [5]:

$$G_{W,n} = 3600 \cdot \vartheta_W W_1 q_n m_n p_n K_{0,n} / n \left( 1 + m_n p_n K_{0,n} t_{J,n} + m_n p_n^2 K_{0,n} t_{S,n} \right); \quad (4)$$

$$G_{V,n} = 3600 \cdot \vartheta_V V_1 q_n m_n p_n K_{0,n} / n \left( 1 + m_n p_n K_{0,n} t_{J,n} + m_n p_n^2 K_{0,n} t_{S,n} \right), \quad (5)$$

$$\text{where: } t_{S,n} = \sum C_{i,n} + t_{e,n}; \quad (6)$$

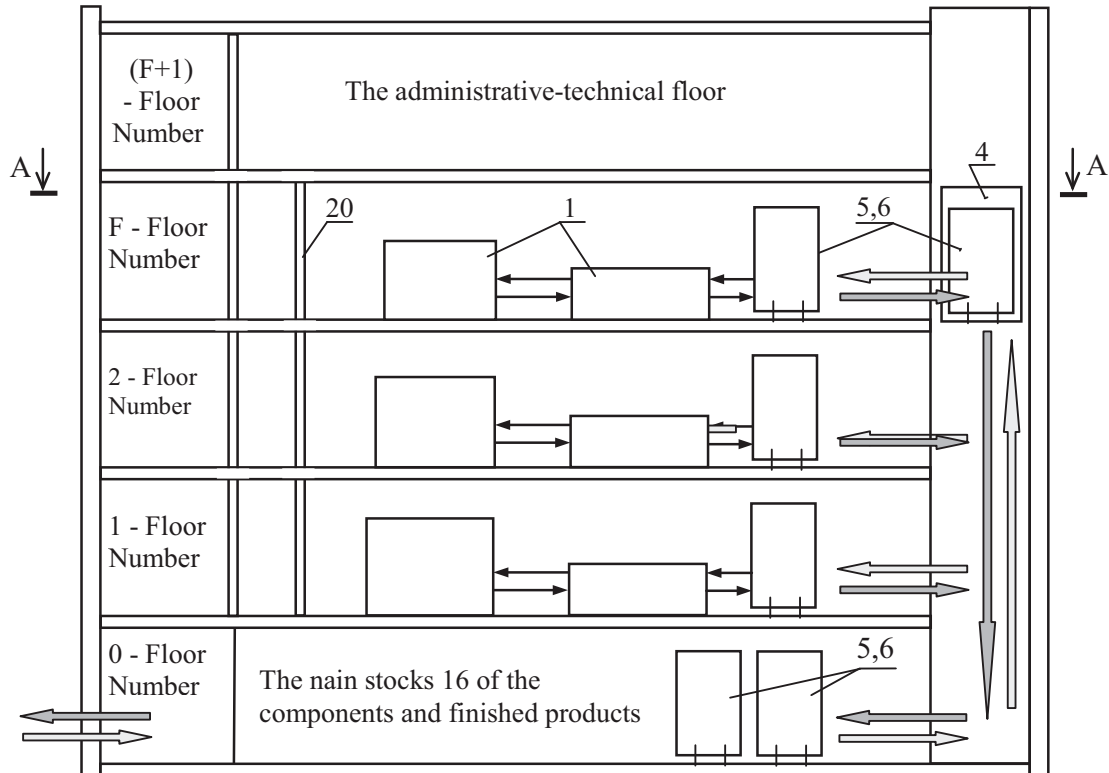
$G_{W,n}$  – the weight performance of the FACs on the n-th floor, N/h;  $G_{V,n}$  – the volume performance of the FACs on the n-th floor, m<sup>3</sup>/h;  $q_n$  – the number of the working FACs on the n-th floor, pcs;  $K_{0,n}$  – the technological performance of all assembling process before his crushing on the consistently working FALs on the n-th floor, pcs/s;

$p_n$  – the number of the consistently working FALs on the n-th floor;  $m_n$  – the number of the parallel working FALs on the n-th floor;  $t_{j,n}$  – time of idling of the group FALs on the n-th floor, s;  $t_{s,n}$  – losses of outside cycle time of a FAL on the n-th floor, s;  $t_{e,n}$  – losses of time for repairs

and readjusts of a FAL on the n-th floor, s;  $\Sigma C_{i,n}$  – losses of time for tools of a FAL on the n-th floor, s.

On the basis of dependences (1) – (6) we will find a rational number of the parallel working FALs in composition of the FACs on the n-th floor:

$$m_{n,w(v)} = \frac{n\varepsilon(Q_{w(v)} - \lambda L_{w(v)})}{3600 \cdot T_C \vartheta_W W_1 q_n p_n K_{0,n} - n\varepsilon(Q_{w(v)} - \lambda L_{w(v)}) (p_n K_{0,n} t_{j,n} + p_n^2 K_{0,n} t_{s,n})} \quad (7)$$



A-A

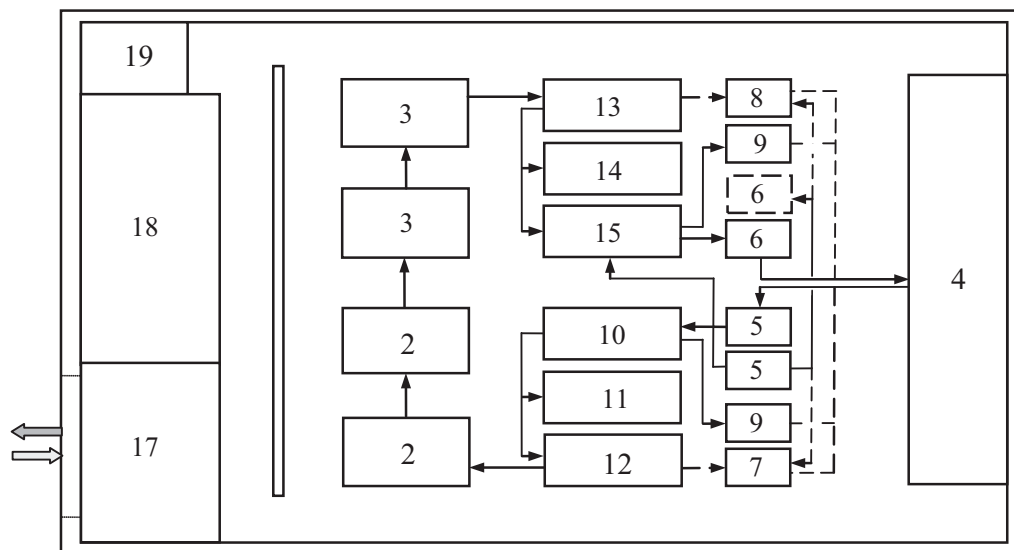


Fig. 1. Charts of the FACs layout on the floor of the multi-floor assembly manufacturing and technological streams: – basic technological streams, – auxiliary technological streams

Rys. 1. Schemat rozmieszczenia FACs dla wielokondygnacyjnej produkcji montażowej w technologii płynnej: podstawowe strumienie technologiczne i pomocnicze strumienie procesowe

where:  $m_{n,w}$ ,  $m_{n,v}$  – the calculation rational number of the parallel working FALs in composition of the FACs on the  $n$ -th floor accordingly on the weight and volume criteria;  $Q_w$  – the rated load of freight elevator, N;  $Q_v$  – the nominal volume capacity of the freight elevator,  $m^3$ ;  $L_w$  – the weight of the trolley, N;  $L_v$  – the volume, occupied the trolley,  $m^3$ ;  $\lambda$  – the number of the trolleys in the freight elevator, pcs;  $\varepsilon$  – the number of the freight elevators.

The resulting calculated values of the parameters  $m_{n,w}$  and  $m_{n,v}$  should be rounded to the largest integer value that provides some supply of the FACs production capacity. However, in practice the variant is possible in which due to the high concentration of operations on every FALs is difficult to pick up the rational number of the parallel working assembly equipment taking into account the carrying capacity of the freight elevators. In this case, it is expedient to use FALs with greater differentiation of technological process, which influences the performance of the consistently working assembly equipment.

### The condition for achieving the rational performance of the assembly manufacturing

The conditions for achieving the rational performance of multi-floor assembly manufacturing are defined under the following assumptions:

1. The weight (volume) performance of the FACs on each floor is identical and equal  $G_{w(v)}$ .
2. On each floor there are the same number of the FACs –  $q$  (the possibility of layout on the floor of the large number FACs associated with the tendency to reduce the area occupied by them due to the miniaturization of the finished products).
3. Each FAC takes the same manufacturing area of the building and work in parallel.
4. Each freight elevator has the same load  $W_E$  (volume capacity VE) and occupies the same manufacturing area of the building.
5. Manufacturing area  $S$  of each floor is constant and determined by the following equation:

$$S = q \cdot S_C + \varepsilon \cdot S_E, \quad (8)$$

where:  $q$ ,  $\varepsilon$  – accordingly the numbers of the FACs and the freight elevators on a floor,  $S_C$ ,  $S_E$  – according to the manufacturing areas, occupied a FAC and a freight elevator,  $m^2$ .

With the above conditions and equations (1) to (4), (5), (8) are defined the weight (volume) of output products and which are transported by the freight elevators for a cycle of its works on the each floor of the multi-floor assembly manufacturing:

$$\begin{aligned} \varepsilon Q_{w(v)} = q T_C G_{w(v)} &= \frac{2k_0 k_C h \cdot F^2 G_{w(v)} (S - \varepsilon S_E)}{3600 v \varepsilon S_C} = \\ &= \frac{H F^2 G_{w(v)} (S - \varepsilon S_E)}{\varepsilon S_C}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$H = 2k_0 k_C h / 3600 v. \quad (10)$$

From the equation (9) we will define a rational number of freight elevators of the multi-floor assembly manufacturing:

$$\varepsilon = F \left( \sqrt{b^2 F^2 + 4ac} - bF \right) / 2a, \quad (11)$$

where:

$$a = Q_{w(v)} S_C; \quad b = H G_{w(v)} S_E; \quad c = H G_{w(v)} S. \quad (12)$$

Taking into account equations (1) and (11), we will define the performance of the multi-floor assembly manufacturing:

$$\begin{aligned} G_{F,w(v)} &= \frac{F G_{w(v)} (S - \varepsilon S_E)}{S_C} = \\ &= \frac{F G_{w(v)} \left( 2a S + F^2 b S_E - F S_E \sqrt{b^2 F^2 + 4ac} \right)}{2a S_C} \end{aligned} \quad (13)$$

We will find the extrema of the function (13), deciding next equation:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dF} G_{F,w(v)} &= \\ &= \frac{d}{dF} \left[ \frac{F G_{w(v)} \left( 2a S + F^2 b S_E - F S_E \sqrt{b^2 F^2 + 4ac} \right)}{2a S_C} \right] = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

After conversion of the equation (14) we obtain the polynomial equation of the sixth degree:

$$A F^6 + B F^4 + C F^2 + D = 0, \quad (15)$$

where:

$$A = 7b^4 S_E^2; \quad B = 64ac b^2 S_E^2 - 36ab^2 c S_E^2 - 12ab^3 S S_E; \quad (16)$$

$$C = 64a^2 c^2 S_E^2 - 48a^2 bc S S_E - 4a^2 b^2 S^2; \quad D = -16a^3 c S^2; \quad (17)$$

The equation (15) can be decided in a general form or a numeral method in the chosen intervals of values. The real roots of the equation are determined the extrema values of parameter  $F$ , from that we choose the rational number of floors of the multi-floor manufacturing from of the conditions for its highest performance and the possibility of the building design realization.

### Conclusion

The proposed ways of improving logistics of multi-floor assembly manufacturing allow:

1. The efficiency of assembly manufacturing to be increased at the expense of the rational organization of technological streams, providing of rhythmic works of



- the FACs, the trolleys application for the transportation of components, finished products and wastes.
2. The rational performance of the FACs during their consistently-parallel work, number in parallel working FACs taking into account distribution of the weight or volume of the finished products on floors and carrying capacity of the freight elevators to be defined.
  3. The rational number of the freight elevators depending on their technical characteristics and operating conditions of the multi-floor assembly manufacturing to be determined.
  4. The conditions for achieving the rational performance of multi-floor assembly manufacturing to be found, that in turn allows to define the rational number of floors taking into account the height and floor area of the floor, the performance and footprint of the FACs, the technical characteristics of the freight elevators and the area occupied by them.

## REFERENCES

- [1] Dzhuguryan T. 2012. "Design Features of Flexible Manufacturing Modules in Frame Construction". *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej (1): 21–25.
- [2] Patsiatzis D. I., L.G. Papageorgiou. 2002. "Optimal multi-floor process plant layout". *Computers and Chemical Engineering* 26 (4–5): 575–583.
- [3] Westkämper Engelbert, Einführung in die Organisation der Produktion/Engelbert Westkämper. Unter Mitarb. Von Markus Decker und Lamine Jendoubi, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006, 258 s.
- [4] Wiendahl Hans-Peter, Reichardt, Jürgen, Nyhuis, Peter. Handbook Factory Planning and Design, Springer, Berlin, 2015, 501 p.
- [5] Шаумян А.Г., Комплексная автоматизация производственных процессов, Издательство Машиностроение, Москва, 1973, 640 p.

---

Prof. dr. hab. inż. Tygran Dzhuguryan – Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny Transportu Akademii Morskiej w Szczecinie, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, e-mail: dzhuguryan@gmail.com

Dr hab. inż. Zofia Józwiak – Wydział Inżynieryjno-Ekonomiczny Transportu Akademii Morskiej w Szczecinie, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, e-mail: z.jozwiak@am.szczecin.pl

**Źródło finansowania: Badania statutowe Wydziału Inżynieryjno-Ekonomicznego Transportu, Akademii Morskiej w Szczecinie**

# STANOWISKO DO ZROBOTYZOWANEGO PROCESU SPAWANIA ZAWIASÓW

## *Position for the robotic process of welding hinges*

Aleksander NIEOCZYM

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono konstrukcję stanowiska do spawania zawiasów, przeznaczonego do montowania na pozycjonerze współpracującym z robotem spawalniczym. Opisano jego budowę ze wskazaniem powierzchni oporowych i elementów blokujących.

**Słowa kluczowe:** stanowisko spawalnicze, pozycjoner, powierzchnia oporowa, element blokujący

**Abstract:** The article presents the structure for hinges welding stand. The stand is erected on the positioner cooperating with the welding robot. Described its construction with an indication of the bearing areas and locking elements.

**Keywords:** welding stand, positioner, bearing area, locking elements

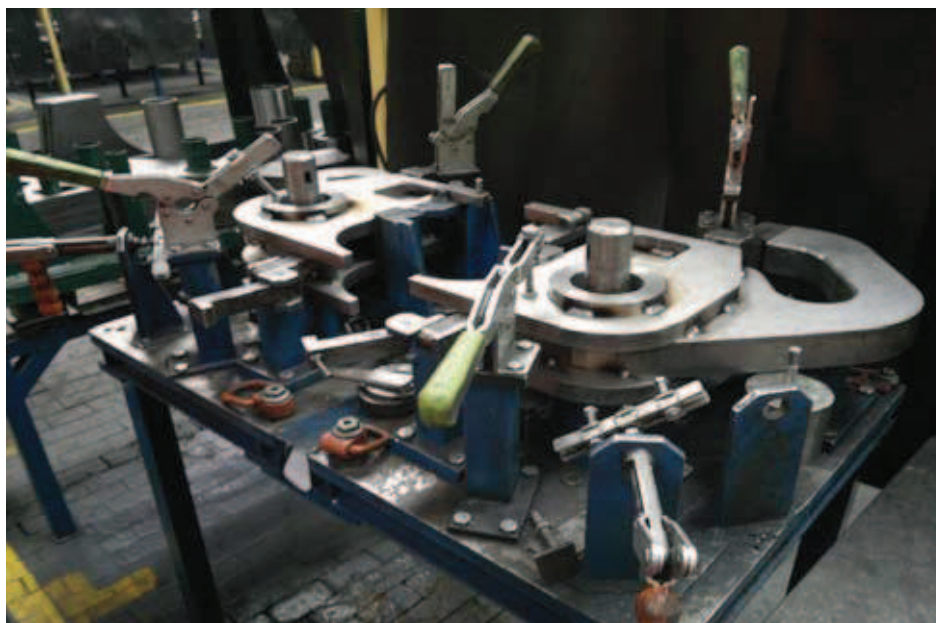
### Wprowadzenie

Dążenie do zwiększenia wydajności produkcji wymaga zmniejszenia cykli produkcyjnych. Można to osiągnąć dzięki modyfikacji systemu produkcyjnego, wymianie parku maszynowego i zmianie technologii wytwarzania. W tym przypadku zmiana ta obejmowała rezygnację ze spawania manualnego i zastąpienie go procesem zrobotyzowanym. Ręczne spawanie stanowiło duże ograniczenie w procesie produkcyjnym, ponieważ rzeczywisty czas spawania dwóch zawiasów wynosił 2,5 h. Spawanie odbywało się na stole spawalniczym (rys. 1) i wymagało ciągłej kontroli kąta ustawienia elektrody przez spawacza. Zainstalowanie robota spawalniczego wymagało

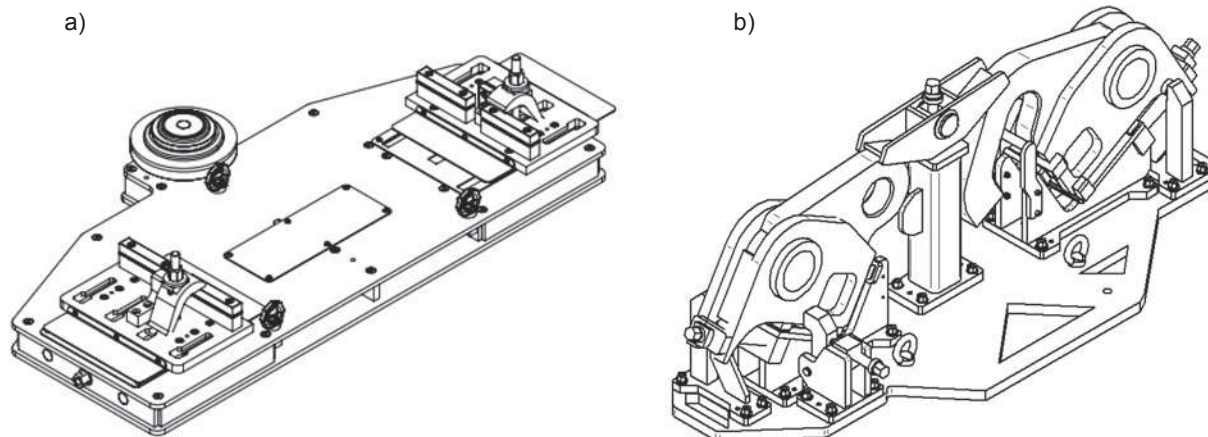
zaprojektowania przyrządu mocującego elementy spawane, kompatybilnego z pozycjonerem IRBP B-500 firmy ABB, współpracującego z robotem. Na przyrządzie tym wykonywane są dwa różne detale. Finalnie wchodzi one w skład zespołu wspornika zawiasu obrotowego w pojeździe przegubowym marki Caterpillar.

### Integracja projektowanego przyrządu z robotem spawalniczym

Zaprojektowane stanowisko spawalnicze mocowane jest na pozycjonerze IRBP B-500, który wyposażony jest w dwa ramiona na końcu, gdzie zainstalowane są stoły obrotowe. Stoły stanowią bazę



Rys. 1. Przyrząd do operacji unieruchamiania części składowych zawiasów podczas ręcznego spawania (zbiory własne autora)  
Fig. 1. Assembly jig for hinge components during manual welding

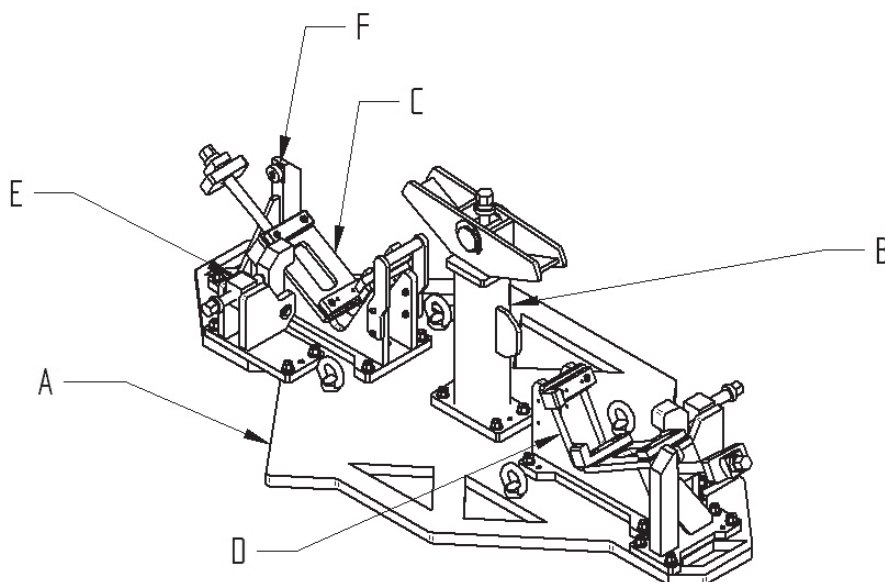


Rys. 2. Zespoły mocowane na pozycjoner IRBP B-500: a) podstawa obrotowa pozycjonera, b) zaprojektowane stanowisko z zamocowanymi elementami spawanymi

Fig. 2. Units fixe on the positioner IRBP B-500: a) turntable positioner, b) designer position of the fixe elements welded

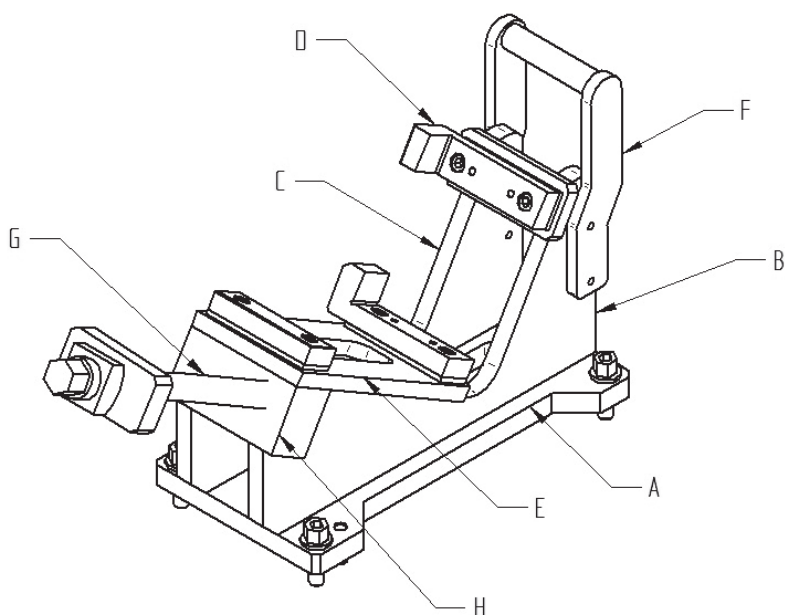
do mocowania podstawy obrotowej (rys. 2a). Na jej górnej powierzchni znajdują się elementy ustalające i mocujące, w których osadza się zaprojektowane stanowisko. Podczas gdy robot wykonuje cykl spawania na jednym przyrządzie, w tym samym czasie operator maszyny zdejmuje gotowe elementy i zakłada części składowe na aktualnie wolnym, drugim stanowisku. Widok kompletnego stanowiska spawalniczego wraz z zamocowanymi częściami zawiasów przedstawiono na rys. 2b.

Spawane zawiasy mają podobną konstrukcję. W obu korpus jest identyczny, różnią się jedynie kształtem elementu środkowego – element z uchmem i element z otwartą częścią prowadzącą (rys. 2b). Pojedyncze detale zawiasów mocowane są w uchwytach (*C*, *D* – rys. 3). Ze względu na konieczność uniknięcia pomyłek podczas zakładania detali w uchwytach, wyposażone są one w elementy orientujące i bazujące. Widok uchwytu z zaznaczonymi elementami składowymi przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Przyrząd spawalniczy: *A* – podstawa, *B* – wieża, *C* – uchwyt dla zawiasu z otwartą częścią prowadzącą, *D* – uchwyt dla zawiasu z uchmem, *E* – blok dociskowy, *F* – wysięgnik oporowy

Fig. 3. Construction of the welding position: *A* – basis, *B* – tower, *C* – champ for hinge with open guide portion, *D* – champ for hinge with lug, *E* – pressure block, *F* – outrigger bolster



Rys. 4. Uchwyt z elementami składowymi: A – podstawa, B – żebro prawe, C – żebro lewe, D – płytką do bazowania powierzchni pionowej, E – płytką do bazowania powierzchni poziomej, F – ramię bezpieczeństwa, G – śruba dociskowa, H – klocek

Fig. 4. Components of the clamp: A – basis, B – right fin, C – left fin, D – datum surface to vertical surface, E – datum surface to horizontal surface, F – safety arm, G – press bolt, H – block

### Elementy oporowe poprzeczne

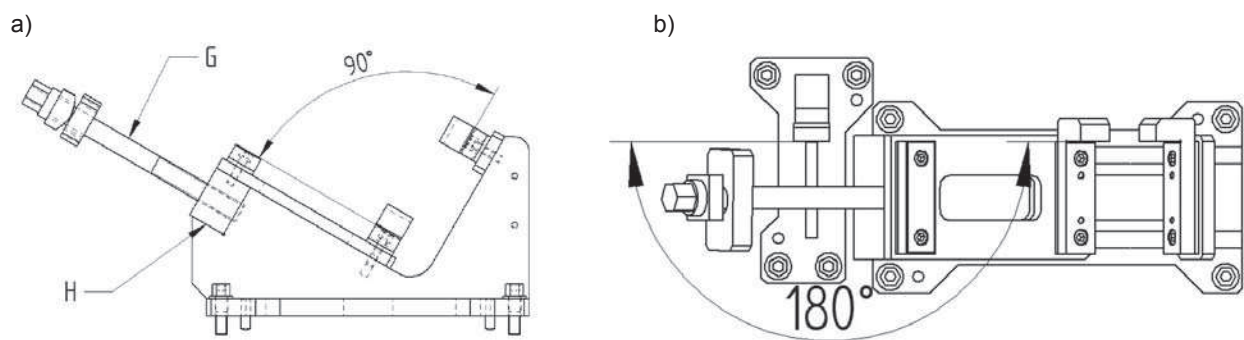
Oba spawane zawiasy mają porównywalne wymiary, co pozwoliło zastosować jeden typ uchwytu do unieruchamiania detali. W uchwycie przeznaczonym do mocowania zawiasów z otwartą częścią prowadzącą zainstalowano ramię bezpieczeństwa (F – rys. 4), które uniemożliwia pomyłki przy ich mocowaniu.

Głównymi elementami nośnymi uchwytu są dwa żebra (B, C – rys. 4) do których mocowane są płytki bazujące (D, E – rys. 4). Wewnętrzne powierzchnie płytek D stanowią powierzchnie oporowe pionowe dla zakładanych elementów. Płaskie, czołowe powierzchnie płytek muszą tworzyć kąt prosty (rys. 5a). Kolejnym elementem

oporowym jest ramię bezpieczeństwa (F – rys. 4), którego zadaniem jest ustalenie położenia powierzchni płaskiej ściany bocznej spawanego zawiasu. Elementem ustalającym zawiasu jest walec zamocowany w górnej części ramienia. Powierzchnia czołowa tego walca powinna być współliniowa z powierzchniami ustalającymi płytek oporowych (rys. 5b).

### Elementy dociskowe

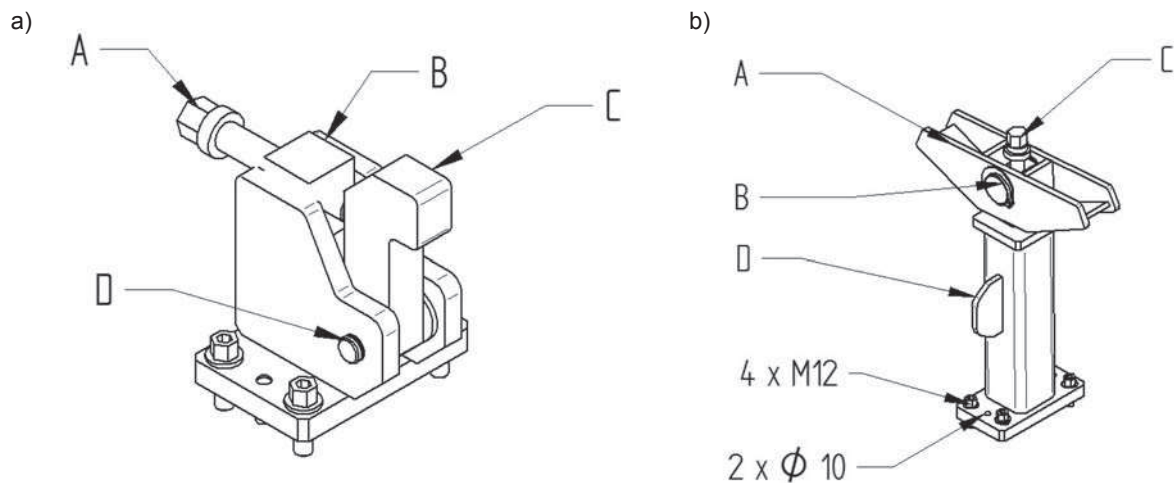
Docięnięcie elementów składowych zawiasów do powierzchni czołowych płytek bazujących (D, E – rys. 4) realizowane jest przez klocek H, dociskany śrubą G z podkładką (rys. 5).



Rys. 5. Położenie powierzchni oporowych: a) pomiędzy płytkami w uchwycie, b) wzajemne położenie poprzecznych powierzchni ustalających uchwytu i wysięgnika oporowego (rzut od góry)

Fig. 5. Position of support surfaces: a) between the plates on the clamp, b) relative position of surfaces for the transverse clamp and outrigger (top view)





Rys. 6. Elementy bazujące: a) blok dociskowy, b) wieża  
 Fig. 6. Pressure elements: a) pressure block, b) tower

Unieruchomienie zawiasu w płaszczyźnie prostopadłej realizowane jest przez blok dociskowy (rys. 6.a), którego zadaniem jest mocowanie elementu spawanego do wewnętrznych powierzchni pionowych płytek (*D*, *E* – rys. 4). Klocek *C* (rys. 6) zbliżany jest do powierzchni detalu spawanego, a śruba *A* (rys. 6) służy do likwidacji luzu. Zmiana położenia klocka *C* jest możliwa przez jego obrotowe zamocowanie na wałku *D*. W przyrządzie spawalniczym znajdują się dwa takie elementy bazujące, różniące się od siebie tylko wymiarami podstaw. Element z mniejszą podstawą bazuje element z uchem, natomiast z większą podstawą bazuje element z otwartą częścią prowadzącą.

Centralna część przyrządu spawalniczego – wieża (rys. 6b) wyposażona jest w ruchowe ramię *A* (rys. 6b), które dociska „od góry” elementy spawane. Jego obrotowe zamocowanie umożliwia ruchy kątowe ramienia w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Rozwiązanie takie umożliwia zakładanie i zdejmowanie elementów spawanych bez kłopotliwego luzowania elementów bazujących, przez co unika się kolizji z innymi elementami stanowiska. Zainstalowane żebro *D* (rys. 6b) w ścianie korpusu wieży, stanowiące rozwiązanie tzw. „Poka-yoke”,

zapobiega możliwym pomyłkom w montowaniu spawanych zawiasów.

#### Zakończenie

Spawanie zawiasów, wykonywane przy użyciu robota spawalniczego, współpracującego z pozycjonerem IRBP B-500 firmy ABB, wymagało od projektowanej konstrukcji szybkiego i pewnego mocowania spawanych detali oraz takiego jej ukształtowania, aby elementy nie kolidowały z trajektorią ruchu końcówki manipulatora. Zaprojektowane stanowisko do zrobotyzowanego procesu spawania zawiasów umożliwiło zmianę organizacji pracy ze spawania manualnego na spawanie zautomatyzowane. Stanowisko to umożliwiło 5-krotne skrócenie czasu technologicznego wytwarzania kompletu zawiasów ze 150 do 30 min.

Dr inż. Aleksander Nieoczym – Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki, Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: a.nieoczym@pollub.pl

# METODA INSPEKCJI USZCZELNIACZY WAŁU Z ZASTOSOWANIEM TRIANGULACJI LASEROWEJ 2D

## *The method for inspection of shaft seals using 2D laser triangulation*

Piotr CZAJKA, Piotr GARBACZ

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę automatycznej kontroli uszczelniaczy wału montowanych w silnikach spalinowych. W bezkontaktowej metodzie inspekcji wykorzystano technikę triangulacji laserowej typu 2D. W systemach wykorzystujących tą technikę na powierzchni badanego obiektu wyświetlana jest linia utworzona przez promieniowanie laserowe. Odbite od powierzchni obiektu światło następnie rzutowane jest na światłoczułą matrycę, umieszczoną pod kątem w stosunku do kierunku projektowania światła laserowego. Zmiana odległości badanej powierzchni względem głowicy pomiarowej powoduje zmianę położenia punktów na światłoczułej matrycy. Na potrzeby wykonanych prac badawczych opracowano stanowisko eksperymentalne, w którym kontrolowany uszczelniaacz umieszczany jest w gnieździe przykręconym do stolika obrotowego, natomiast nad detalem, na dołączonym ramieniu, zamocowana jest laserowa głowica pomiarowa typu 2D. Podczas obrotu stolika przesyłana jest informacja o bieżącym położeniu uszczelniacza. Na tej podstawie kontroler systemu pomiarowego gromadzi w pamięci poszczególne profile 2D kontrolowanego uszczelniacza. Po zebraniu ustawionej ilości profili 2D następuje analiza zeskanowanej powierzchni oraz wydanie decyzji o klasyfikacji badanego wyrobu. W ramach badań eksperymentalnych zidentyfikowano typowe wady występujące na wybranych powierzchniach uszczelniaczy i opracowano katalog wad. W artykule zaprezentowano również przykładowe wyniki skanowania powierzchni uszczelniaczy, zawierające wytypowane rodzaje wad. Omówiono zalety i ograniczenia proponowanej metody.

**Słowa kluczowe:** metoda triangulacji laserowej 2D, skanowanie powierzchni, uszczelniaacz wału, detekcja wad

**Abstract:** The article presents a inspection method for automatic control of internal combustion engines seals. The proposed non-contact method of inspection technique utilize 2D laser triangulation technique. In the systems based on this technique line created by the laser radiation is projected on the surface of the object. The reflected light surface is then recorded by the photosensitive array placed at an angle with respect to the direction of the laser light. Changing the distance of the test surface relative to the measuring head causes a change in the position of points on the light-sensitive sensor. For the purposes of research the experimental station was developed. During the inspection the inspected seals are placed in the socket on the rotary table. The 2D laser measuring head is mounted over the inspection zone. During the rotation of the table the current position of the seal is send to the control unit. On this basis, the measurement system controller accumulates the individual 2D profiles of inspected seal in the memory. After collecting a fixed amount of 2D profiles followed by analysis of the scanned surface of the product the inspection decision is reported. As part of the experimental studies typical seals defects were identified. Additionally in the article an example of the results of the scan surface of the seals with variety types of defects are presented. The advantages and limitations of the proposed method are discussed.

**Key words:** 2D laser triangulation method, surface scanning, shaft seals, detection of defects

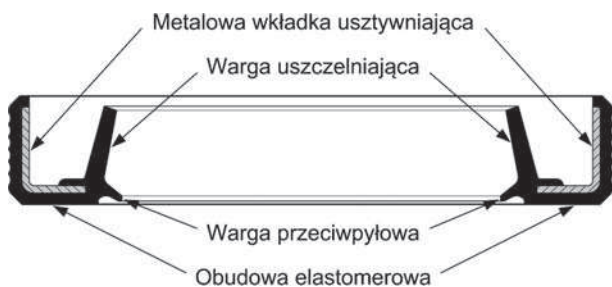
### Wprowadzenie

Zgodnie z aktualnymi trendami w przemyśle, wdrażane są obecnie rozwiązania umożliwiające kontrolę produkowanych wyrobów w celu osiągnięcia poziomu „zero braków” (zero defects) [8]. Ze względu na coraz większe wymogi kontroli jakości, inspekcja wizualna produktów przeprowadzana przez człowieka nie gwarantuje odpowiedniej skuteczności wykrywania i identyfikacji wad. Zastosowanie zautomatyzowanych systemów optycznej inspekcji w procesach produkcji umożliwia zwiększenie jakości wyrobów oraz wydajności procesu kontroli, przez wyeliminowanie lub zmniejszenie udziału czynnika ludzkiego. Ograniczenia w procesie kontroli jakości, związane z bezpośrednim udziałem pracownika wynikają m.in. z braku powtarzalności wykonywanych czynności kontrolnych, zmęczeniem i mniejszą sprawnością [14]. Przedmiotem artykułu jest metoda zautomatyzowanej inspekcji

powierzchni uszczelniaczy wału, w której zastosowano system wizyjny 3D [7, 11].

Zintegrowane, modułowe systemy automatycznej inspekcji, dedykowane do określonych zadań na przemysłowych stanowiskach kontroli jakości, zyskują znaczną popularność dzięki połączeniu dużych możliwości programistycznych z łatwością konfiguracji, przy jednoczesnym zachowaniu zwartości konstrukcyjnej, szybkości działania i odporności na warunki przemysłowe [5].

Uszczelniaacz wału stosowane są w przemyśle motoryzacyjnym i maszynowym do uszczelnienia szczeliny między obracającym się wałem i elementem nieruchomym. Do najważniejszych funkcji uszczelnień należą: zatrzymywanie środka smarnego, zapobieganie wnikaniu zanieczyszczeń, oddzielanie różnych czynników oraz uszczelnianie pod ciśnieniem. Uzyskiwanie żądanej skuteczności wymaga minimalizacji tarcia i zużycia uszczelnień również w niekorzystnych warunkach



Rys. 1. Poglądowy przekrój uszczelniacza wału  
Fig. 1. The cross section of the shaft seal

eksploatacji. W celu spełnienia wymagań, obowiązujących w różnych zastosowaniach i warunkach eksploatacji, produkuje się uszczelnienia do wałów w odmiennych wersjach konstrukcyjnych i technologiach oraz z różnych materiałów [10]. Uszczelniacze wału, które są przedmiotem inspekcji, mają postać pierścienia wykonanego z gumy usztywnionego metalową wkładką (rys. 1).

Zewnętrzny pierścień osadzany jest w gnieździe obudowy za pomocą połączenia wciskowego. Wewnętrzna gumowa warga przylega natomiast do powierzchni elementu obrotowego. Od jakości wykonania wargi uszczelniającej zależy szczelność i trwałość połączenia.

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania techniki triangulacji laserowej 2D do inspekcji powierzchni uszczelniaczy wału na obecność wad, powstających podczas procesu produkcyjnego, takich jak: rysy (pęknięcia), deformacje gumowej wargi oraz obecność resztek gumy na powierzchni.

Na rys. 2 zaprezentowano kontrolowane wyroby z zaznaczonym obszarem inspekcji.

Wady w postaci pęknięcia z perforacją oraz duże deformacje wargi (objawiające się brakiem przylegania do powierzchni wału na całym obwodzie), mogą być wykryte za pomocą kontroli szczelności [3]. Wykrywanie wad w postaci np. rys na powierzchni wargi (bez perforacji) tą metodą jest jednak nieskuteczne. Alternatywną

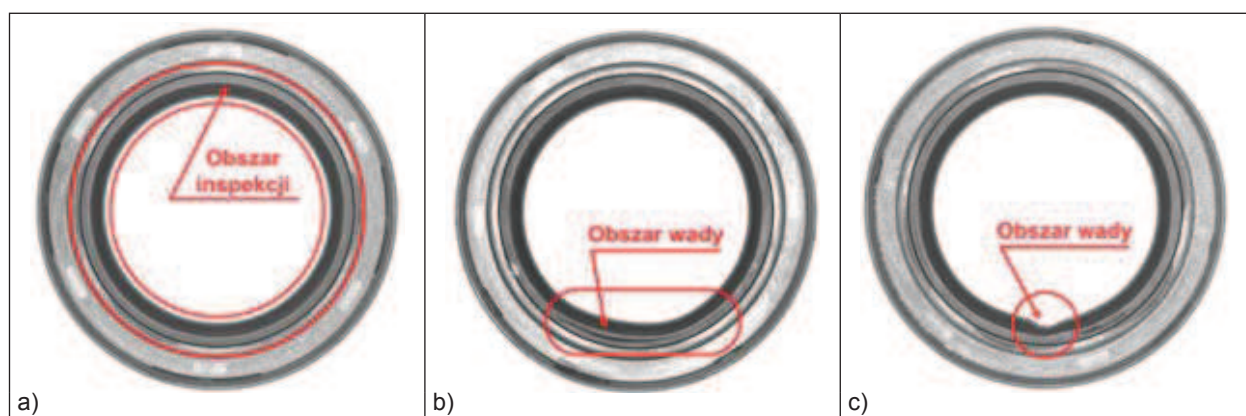
metodą inspekcji jest zastosowanie systemu wizyjnego 2D, składającego się z kamery i odpowiednio dobranego układu oświetleniowego, pozwalającego na wzmocnienie istotnych z punktu widzenia inspekcji cech badanego obiektu. Również w tym przypadku niektóre wady są trudne lub wręcz niemożliwe do wykrycia, np. drobne rysy, niewielkie zmiany na powierzchni uszczelniaczy. W celu zapewnienia wysokiego poziomu wykrywania wad zaproponowano rozwiązanie, bazujące na pomiarze geometrii powierzchni uszczelniacza w obszarze gumowej wargi.

### Metoda triangulacji laserowej 2D

Do wykonania badań zastosowano system pomiarowy, wykorzystujący bezkontaktową metodę triangulacji laserowej typu 2D. Metoda ta polega na projekcji wiązki lasera przez odpowiedni układ soczewek na powierzchni badanego obiektu [2]. Odbite od obiektu światło rzutowane jest na światłoczułą matrycę, umieszczoną pod odpowiednim kątem w stosunku do kierunku projektowania światła laserowego na badaną powierzchnię (rys. 3).

Zmiana odległości punktów oświetlonej powierzchni względem głowicy pomiarowej powoduje zmianę położenia obrazów tych punktów na światłoczułej matrycy. Podczas pojedynczego cyklu pomiarowego otrzymuje się współrzędne punktów określających geometrię badanego obiektu, oświetlonych rzutowanym na nie światłem laserowym. Optyczny układ oświetlający głowicy formuje wiązkę światła laserowego rozbieżną na jednym kierunku, a zbieżną na drugim, skupianą w formie linii na mierzonej powierzchni. Skutkuje to zmiennym zakresem pomiarowym wzdłuż projektowanej linii, w zależności od odległości płaszczyzny referencyjnej głowicy od powierzchni badanego obiektu [4].

W celu weryfikacji proponowanej metody, wytypowana została głowica laserowa firmy Keyence serii LJ-V, charakteryzująca się wysoką dokładnością pomiarową dla założonego zakresu pomiarowego (tab. 1).

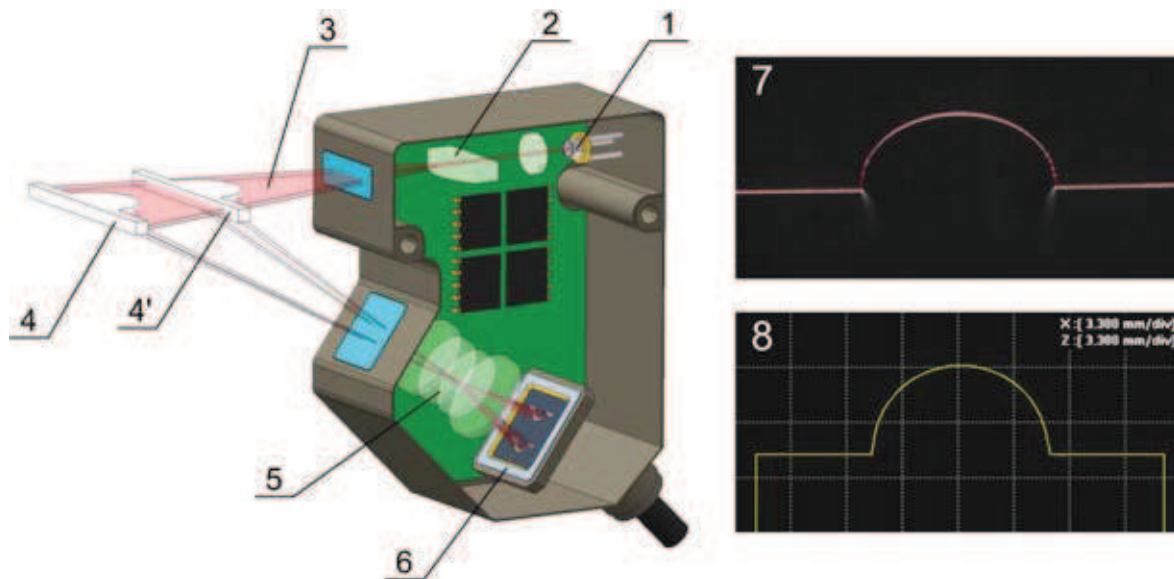


Rys. 2. Widok ogólny powierzchni przykładowych uszczelniaczy: a) wyrób wykonany poprawnie z zaznaczeniem obszaru inspekcji, b) wyrób z wadą w postaci pęknięcia wargi, c) wyrób z wadą w postaci deformacji wargi  
Fig. 2. General view of the surface of the sample seals: a) a product made correctly with marked inspection area, b) a product with a defect in the form of a crack on the lip, c) a product with a defect in the form of deformation of the lip

Tabela 1. Podstawowe parametry wytypowanej głowicy laserowej [13]

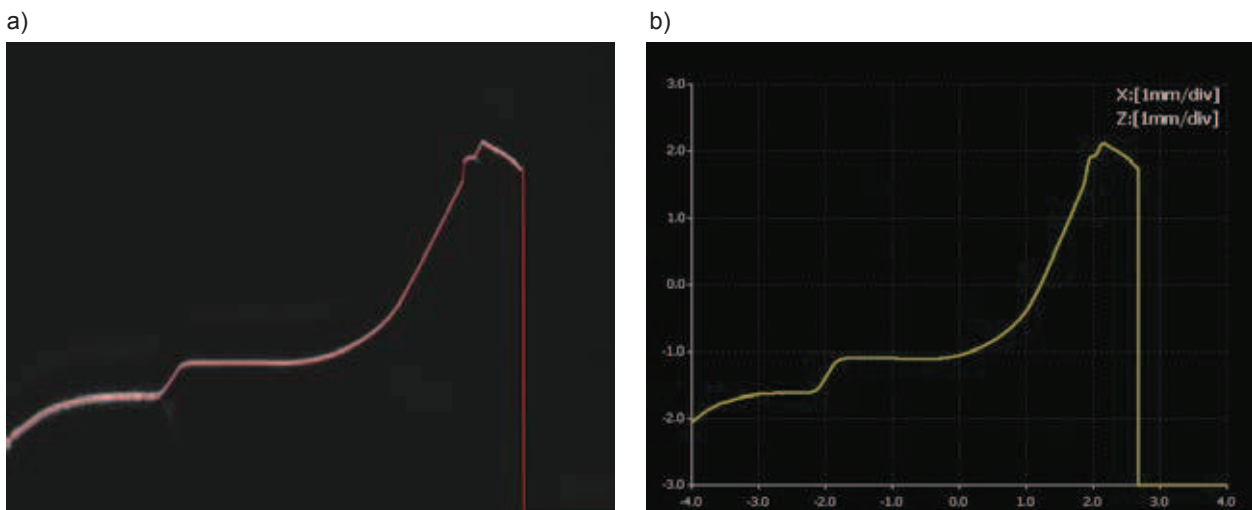
Table 1. Basic parameters for appointed laser head [13]

Parametr		Wartość
zakres pomiarowy	w osi X	6,5–7,5 mm
	w osi Z	± 2,6 mm
rozdzielczość pomiaru	w osi X	10 μm
powtarzalność pomiaru	w osi X	2,5 μm
	w osi Z	0,2 μm
nieliniowość pomiaru	w osi Z	± 0,1% zakresu pomiarowego



Rys. 3. Zasada pomiaru z wykorzystaniem metody triangulacji laserowej typu 2D: 1 – laser półprzewodnikowy, 2 – soczewki cylindryczne, 3 – oświetlająca wiązka laserowa, 4 – powierzchnia obiektu przy dwóch różnych położeniach, 5 – optyczny układ odbiorczy, 6 – matryca światłoczuła, 7 – przykładowy obraz zarejestrowany za pomocą matrycy, 8 – zmierzony profil 2D [4]

Fig. 3. The principle of the measurement using the 2D laser triangulation method: 1 – semiconductor laser, 2 – cylindrical lenses, 3 – illuminating laser beam, 4 – surface of an object at two different positions, 5 – receiving optical system, 6 – image sensor, 7 – an example of the image captured by the sensor, 8 – measured 2D profile [4]



Rys. 4. Przykładowe wyniki uzyskane za pomocą systemu pomiarowego serii LJ-V: a) obraz zarejestrowany za pomocą matrycy światłoczułej, b) wyskalowany w milimetrach profil 2D

Fig. 4. Selected results obtained using the LJ-V measurement system: a) the image captured by the sensor, b) scaled in millimeters 2D profile



wyznaczenie szerokości/pozycji, pomiar różnicy wysokości dwóch fragmentów profilu, wyznaczenie powierzchni kąta przecięcia oraz porównanie wyników z profilem wzorcowym. Ograniczeniem systemu pomiarowego jest fakt, iż dostępne funkcje pomiarowe bazują wyłącznie na analizie pojedynczych profili.

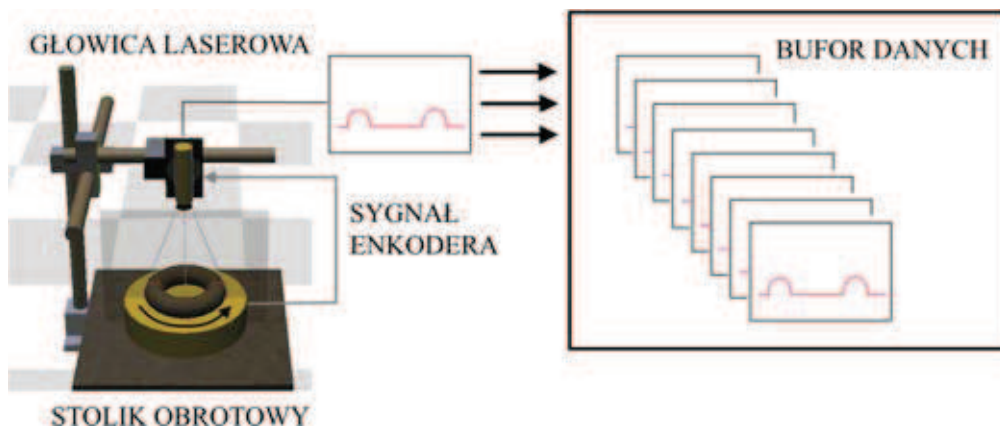
W celu prawidłowej detekcji wad powierzchni uszczelniaczy, wymagane jest wykonanie operacji rekonstrukcji 3D [12] całego obszaru podlegającego kontroli. Do realizacji tego zadania konieczne jest zapewnienie pełnego obrotu kontrolowanego produktu oraz gromadzenie profili 2D do bufora pamięci w celu ich późniejszej łącznej analizy (rys. 5).

Funkcje gromadzenia i analizy danych pomiarowych, w przypadku zastosowanej głowicy laserowej firmy Keyence, może pełnić komputer PC lub kompatybilny kontroler wizyjny Keyence serii CV-X. W przypadku pierwszego z wymienionych rozwiązań, konieczne jest opracowanie własnego oprogramowania, realizującego wszystkie operacje związane z przesyłaniem, przetwarzaniem i analizą danych. W tym celu można wykorzystać specjalistyczne biblioteki do analizy chmur punktów [1]. W drugim przypadku, wykorzystując dodatkowy kontroler wizyjny, zarejestrowany zbiór profili zostaje przekształcony na obraz,

którego wartości dla poszczególnych pikseli odpowiadają wysokości analizowanej powierzchni w danym punkcie. Rozwiązanie takie umożliwia bardzo szybką integrację systemu i opracowanie programu inspekcji z wykorzystaniem algorytmów do przetwarzania i analizy obrazów zaimplementowanych w sterowniku wizyjnym.

#### Opracowane stanowisko badawcze do kontroli uszczelniaczy wału

W celu zeskanowania kontrolowanego obszaru powierzchni uszczelniacza wału, wymagane było zapewnienie obrotu badanego obiektu względem głowicy pomiarowej. Informacja pochodząca z układu pomiarowego, w połączeniu z informacją o położeniu stolika pozycjonującego, umożliwia odtworzenie kształtu powierzchni badanego obiektu na podstawie zbioru zarejestrowanych profili. Do skanowania powierzchni uszczelniaczy wału został zastosowany, opracowany w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu, profilometr laserowy 3D-R, przeznaczony do bezkontaktowych pomiarów i odtwarzania kształtu powierzchni wyrobów [6]. Opracowane stanowisko badawcze zostało zaprezentowane na rys. 6. Kontrolowany uszczelniacz był umieszczany w gnieździe



Rys. 5. Idea odtwarzania geometrii powierzchni uszczelniacza z zastosowaniem głowicy laserowej i stolika obrotowego  
Fig. 5. The idea of the 3D reconstruction of the seal surface geometry using the laser head and rotary table



Rys. 6. Opracowane eksperymentalne stanowisko badawcze do kontroli uszczelniaczy wału: a) widok ogólny, b) zbliżenie na strefę pomiarową  
Fig. 6. The developed experimental test stand for the inspection of shaft seals: a) general view, b) close-up on the measurement area

przykręconym do stolika obrotowego, natomiast nad detalem, na dołączonym ramieniu, była zamocowana laserowa głowica pomiarowa typu 2D.

W badaniach wykorzystany został modułowy kontroler wizyjny firmy Keyence. W wyniku połączenia kontrolera wizyjnego serii CV-X z systemem pomiarowym serii LJ-V, kontroler przejmuje zadania analizy oraz parametryzacji procesu akwizycji. Istotną różnicą, wynikającą z wykorzystania dodatkowego kontrolera, jest możliwość analizy całego pakietu zarejestrowanych profili, zamiast pojedynczego profilu [9]. Na rys. 7 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru w postaci grupy zarejestrowanych profili.

W sterowniku wizyjnym został zaimplementowany program umożliwiający analizę danych w postaci pakietu profili pochodzących z systemu pomiarowego serii LJ-V. Program inspekcji umożliwia detekcję wad w postaci rys (pęknięć), deformacji gumowej wargi oraz obecności resztek gumy na powierzchni uszczelniaczy. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych kontroler wizyjny dokonuje klasyfikacji badanych wyrobów na dwie kategorie: wyroby dobre „OK” oraz wyroby wadliwe „NG” (not good). Informacja o ocenie jakościowej badanego wyrobu widoczna jest na ekranie monitora oraz dodatkowo sygnalizowana za pomocą wskaźnika w postaci lampki (umieszczonej z prawej strony profilometru).

Podczas prowadzonych badań w celu weryfikacji skuteczności zaproponowanej metody detekcji wad, wykorzystany został testowy program inspekcji. Opracowany algorytm inspekcji składał się z następujących głównych elementów:

- algorytmu pozycjonowania – zmniejszającego wpływ odchyłki pozycji obszarów inspekcji od pozycji referencyjnej,
- algorytmu detekcji deformacji na bocznej powierzchni uszczelniacza,
- algorytmów detekcji rys oraz pęknięć na powierzchni dolnej uszczelniacza.

Przedstawione operacje zostały zrealizowane z wykorzystaniem zaimplementowanych w systemie wizyjnym firmy Keyence funkcji z zakresu przetwarzania i analizy obrazu. Wstępne przetwarzanie obrazu możliwe jest za pomocą algorytmów przypisanych do grupy filtrów m.in.: binaryzacji, dylatacji, erozji. Natomiast analiza obrazu realizowana jest głównie przez zastosowanie narzędzi detekcji krawędzi.

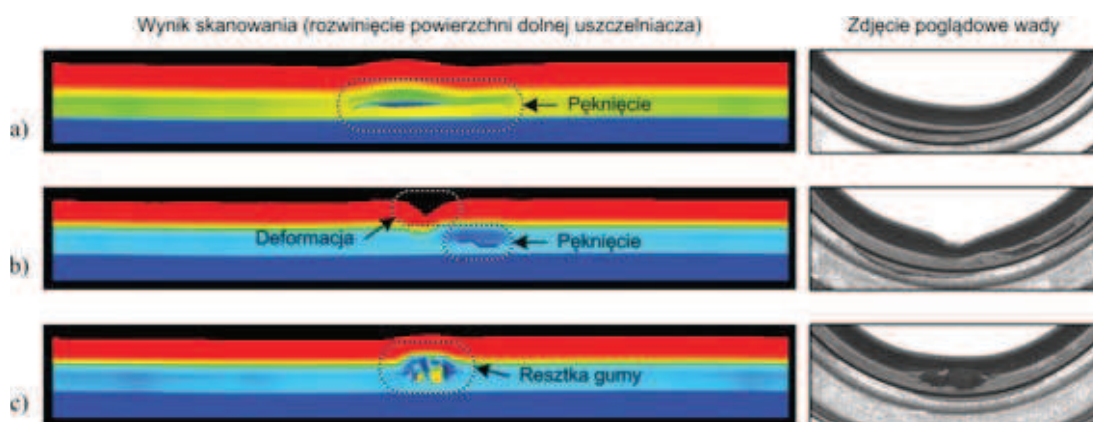
### Wyniki badań eksperymentalnych

Uszczelniacze były kontrolowane podczas wykonania jednego pełnego obrotu (360°). Przeprowadzone badania wykazały znaczny wpływ zanieczyszczeń, znajdujących się na powierzchni uszczelniacza (pyłki, drobne włókna) na wynik inspekcji. W związku z tym, do procedury testów, zdecydowano się wprowadzić wstępny etap oczyszczania uszczelki za pomocą sprężonego powietrza. Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki skanowania powierzchni uszczelniaczy wału z wadami w postaci rysy (pęknięcia), deformacji gumowej wargi oraz resztek gumy na powierzchni dolnej (rys. 8).

Podczas badań na podstawie oceny wizualnej uszczelki podzielono na: dobre, mające deformacje,



Rys. 7. Przykładowy wynik skanowania w postaci rozwinięcia powierzchni dolnej uszczelniacza (bez wady)  
Fig. 7. An example of the scanning result in the form of developed of the bottom seal surface (without defects)



Rys. 8. Prezentacja przykładowych wad występujących na powierzchni dolnej uszczelniaczy: a) wada w postaci rysy (pęknięcia), b) jednoczesna wada w postaci deformacji gumowej wargi oraz rysy (pęknięcia), c) wada w postaci resztek gumy  
Fig. 8. Presentation of the selected defects on the seals bottom surface: a) a defect in the form of scratch (crack), b) simultaneous defect in the form of a rubber lip deformation and scratch (crack), c) defect as a residual rubber

z występującymi rysami oraz z występującymi resztkami gumy. Wyniki przeprowadzonej inspekcji zamieszczono w tab. 2. W grupie uszczelki ocenionych przez operatora jako „dobre” występują produkty sklasyfikowane przez system automatycznej inspekcji jako wykonane wadliwie. Takie zdarzenie określane jest w systemach maszynowego widzenia jako fałszywy alarm (false positive). Ponadto system podczas inspekcji produktów, do których podczas oceny wizualnej przypisano jeden rodzaj wady (np. w postaci rysy), dodatkowo informował o występowaniu innego rodzaju uszkodzeń, które zostały pominięte przez człowieka lub błędnie zidentyfikowane przez program inspekcji. W wyniku czego występuje różnica w łącznej liczbie uszczelniaczy w klasyfikacji wad przez człowieka i system inspekcji. W przeprowadzonych testach proponowany system uzyskał 100% detekcję uszczelniaczy sklasyfikowanych przez człowieka jako wadliwe.

Tabela 2. Porównanie oceny operatora z wynikami systemu inspekcji dla 1000 sztuk uszczelniaczy

Table 2. Comparison of the assessment of the operator with the results of the inspection system for 1000 seals

Grupa uszczelki	Ocena wizualna człowieka [szt.]	Wynik inspekcji systemu [szt.]
Dobre	937	905
Deformacje	18	42
Rysy	17	64
Resztki gumy	28	28

## Podsumowanie

Zaproponowana metoda kontroli jakości powierzchni uszczelniaczy wału w postaci połączenia systemu pomiarowego serii LJ-V ze sterownikiem wizyjnym serii CV-X, umożliwia wykrywanie wad w postaci rys (pęknięć), deformacji gumowej wargi oraz obecności resztek gumy na powierzchni. Przeprowadzone prace badawcze w warunkach laboratoryjnych wykazały wysoką skuteczność opracowanego rozwiązania.

Istotnym czynnikiem w przypadku opracowania systemu pracującego on-line na liniach produkcyjnych jest wymagany czas inspekcji. W prezentowanym rozwiązaniu czas obrotu uszczelniacza na stoliku obrotowym wynosił średnio 9 s. Wynika to przede wszystkim z ograniczeń zastosowanego napędu w postaci silnika krokowego i przekładni. W planowanych dalszych pracach nad rozwiązaniem docelowym zostaną podjęte działania, mające na celu znaczne skrócenie czasu obrotu.

Podczas badań autorzy stwierdzili wrażliwość systemu pomiarowego na występujące zakłócenia w postaci widocznych na powierzchni uszczelniacza zanieczyszczeń, głównie w postaci pyłków, włókien. Zanieczyszczenia te mogą powodować zakwalifikowanie poprawnie wykonanej uszczelki jako wyrób wadliwy. Należy stwierdzić czy zanieczyszczenia te mogą wystąpić już na etapie produkcji, czy są efektem późniejszego przechowywania, magazynowania. Jeśli zanieczyszczenia mogą wystąpić

w miejscu inspekcji, należy rozważyć proces czyszczenia powierzchni uszczelki za pomocą sprężonego powietrza. Operacja ta może być realizowana podczas wykonywania obrotu wyrobu za pomocą dysz ustawionych przed głowicą pomiarową.

W docelowym rozwiązaniu oprócz czasu wymaganego na obrót uszczelki względem głowicy pomiarowej i czasu analizy należy doliczyć operacje związane z uchwyconiem badanego wyrobu do obrotu, następnie odłożenie i separację na wyroby wykonane poprawnie i wadliwie.

Dalsze prace nad systemem powinny być prowadzone w celu optymalizacji algorytmu inspekcji, która zapewni wysoką niezawodność detekcji wad, przy jednoczesnym zmniejszeniu poziomu fałszywych alarmów.

## LITERATURA

- [1] Biblioteka do przetwarzania i analizy chmury punktów pomiarowych PCL, <http://pointclouds.org>.
- [2] Bradshaw G. 1999. „Non – contact surface geometry measurement techniques”. Dublin: Image Synthesis Group, Trinity College.
- [3] Carrara M. 1992. „Seal withdrawal and testing device”. Patent US 5167141 A.
- [4] Czajka P. i in.. 2014. „Profilometr laserowy do odtwarzania geometrii powierzchni”. *Przegląd Elektrotechniczny* (8): 152–156.
- [5] Garbacz P., T. Giesko. 2011. „Integrated vision systems versus custom solutions for quality inspection in industry.” Wrocław: Materiały konferencyjne *Inżynieria Produkcji*, s. 213–217.
- [6] Karta katalogowa produktu: Profilometr laserowy 3D-R, ITeE-PIB, Radom, <http://www.itee.radom.pl>.
- [7] Kowal J., A. Sioma. 2012. „Surface defects detection using a 3D vision system”. 13 International Carpathian Control Conference (ICCC), 382–387.
- [8] Laser World of Photonics: White Paper Image Processing in the Automotive Industry, <http://www.world-of-photonics.com>.
- [9] LJ-V/CV-X200 Series Inline 3D Inspection Image Processing System, Keyence Corporation, 2014.
- [10] Materiały informacyjne firmy SKF: Zasady doboru i stosowania uszczelnień, <http://www.skf.com/pl>.
- [11] Sioma A., G. Struzikiewicz. 2010. „Bezdotkowy pomiar przedmiotu obrabianego”. *Świat obrabiarek* (10–12): 20–24.
- [12] Tornslev K. 2005. „3D scanning using multibeam laser”. Lyngby: Technical University of Denmark.
- [13] Ultra-High Speed In-line Profilometer, LJ-V7000 Series, User’s Manual, Keyence Corporation, 2014.
- [14] Wójcicki T., P. Czajka, T. Giesko. 2010. „Automatyczna inspekcja montażu uszczelki łożysk tocznych z wykorzystaniem komputerowych metod przetwarzania i analizy obrazów”. *Technologia i Automatyka Montażu* (3): 26–31.

Mgr inż. Piotr Czajka – Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: [piotr.czajka@itee.radom.pl](mailto:piotr.czajka@itee.radom.pl)

Mgr inż. Piotr Garbacz – Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: [piotr.garbacz@itee.radom.pl](mailto:piotr.garbacz@itee.radom.pl)



# WPLYW PARAMETRÓW ZGRZEWANIA TARCIOWEGO Z PRZEMIESZANIEM NA NOŚNOŚĆ POŁĄCZENIA

## *The influence of parameters of friction stir welding on the strength properties of joint*

Rafał KLUZ, Andrzej KUBIT

**S t r e s z c z e n i e:** Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym. Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak optymalnego doboru parametrów procesu zgrzewania, tj.: prędkości obrotowej narzędzia i prędkości posuwu. W pracy zaprezentowano wyniki badań procesu zgrzewania blach aluminiowych 2024-T3 o grubości 1 mm, przeprowadzonych zgodnie z planem badań PS/DK3<sup>2</sup>. Testy zgrzewania przeprowadzono na uniwersalnej frezarce pionowej, natomiast badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę rozciągania. W końcowej części artykułu dokonano analizy i interpretacji wyników badań. W wyniku badań opracowano model matematyczny, umożliwiający dobór parametrów ustawczych procesu oraz ustalono, że w pewnym zakresie parametrów prędkości obrotowej i prędkości posuwu, zbliżonych do optymalnych parametry procesu w niewielkim stopniu, wpływają na wytrzymałość złączy.

**S ł o w a k l u c z o w e:** zgrzewanie tarciove, stopy aluminium, stop 2024-T3

**A b s t r a c t:** Friction stir welding (FSW) is one of the most modern technology of joining metals and their alloys in solid state. The possibility of joining elements of aluminum alloys makes it possible to use this method in the production of aircraft structures. This technology provides a reduction of labor consumption, cost and weight of structures, while maintaining comparable or better strength properties as compared to conventional methods of joining. Quality assurance of joining requires selection of the optimal process parameters such as tool rotational speed and feed rate. The paper presents the results of the welding process of 2024-T3 aluminum alloy sheet with a thickness of 1 mm carried out in accordance with the study plan PS / DK32. Welding tests were conducted on a universal vertical milling machine, and strength tests included static tensile test. In the final part of the article the analysis and interpretation of research results were performed.

**K e y w o r d s:** friction stir welding, aluminum alloys, 2024-T3 alloy

### Wprowadzenie

Zgrzewanie tarciove z przemieszaniem FSW (Friction Stir Welding) jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym (w temperaturach niższych od temperatury topnienia łączonego materiału). Jest szczególnie przydatna do łączenia materiałów, które w rozumieniu tradycyjnych technologii są trudno spawalne, jak np. stale i wysoko wytrzymałe stopy aluminium, miedzi i tytanu, a także niektóre stopy niklu, cyrkonu i miedzi [1, 2].

Istota zgrzewania tarciowego z przemieszaniem polega na wprowadzeniu wirującego cylindrycznego narzędzia w obszar styku łączonych elementów i przemieszczania go wzdłuż linii złącza. W wyniku wydzielanego ciepła tarcia uplastycznione materiały tworzą mechaniczno-plastyczne połączenie. W tych warunkach dochodzi do pełnego, wzajemnego przemieszania materiałów, które w obszarze złącza bez osiągnięcia punktu topnienia wirują wokół osi narzędzia. Po wykonaniu złącza narzędzie jest wyprowadzane ze strefy obróbki [2, 3].

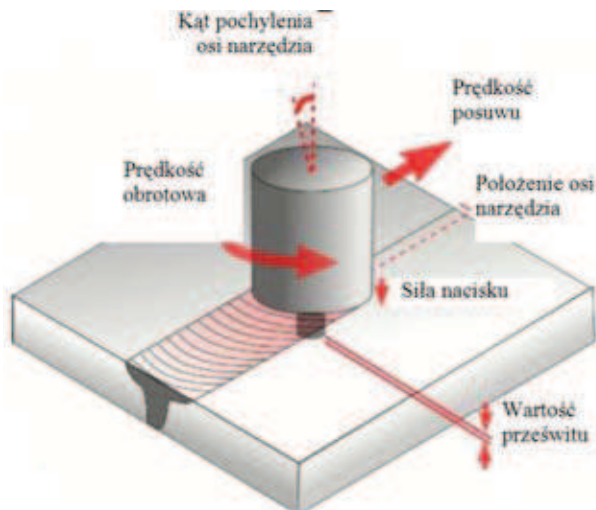
Możliwości łączenia elementów, wykonanych ze stopów aluminium, uzasadniają zastosowanie tej metody przy produkcji struktur lotniczych, przy jednocześnie obniżeniu pracochłonności, kosztów i ich ciężaru,

zachowując porównywalne lub wyższe parametry wytrzymałościowe w porównaniu do klasycznych metod łączenia elementów przy zastosowaniu elementów złącznych. Zapewniają to następujące zalety procesu [2, 4-7]:

- eliminacja konieczności ukosowania blach,
- wyższa odporność złącza na kruche pęknięcie niż rodzime materiały łączone,
- wysokie statyczne i dynamiczne właściwości wytrzymałościowe, wyższe od osiąganych konwencjonalnymi metodami,
- możliwość realizacji procesu na obrabiarkach konwencjonalnych,
- proste oprzyrządowanie technologiczne,
- nieprzegrzewanie stref wpływu ciepła, a zatem ich nieosłabianie efektami zmęczenia,
- brak tzw. pęknięć gorących, mogących powstać w wyniku spawania,
- możliwość łączenia różnych materiałów,
- brak emisji szkodliwych gazów i oparów.

Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak optymalnego doboru parametrów procesu zgrzewania, spośród których najważniejsze to: geometria i prędkość obrotowa narzędzia, wielkość posuwu, kąt pochylecia narzędzia, siła nacisku oraz głębokość zagłębienia czoła narzędzia [8-11] (rys. 1).





Rys. 1. Schemat procesu zgrzewania tarcowego [2]  
Fig. 1. Schematic of friction stir welding [2]

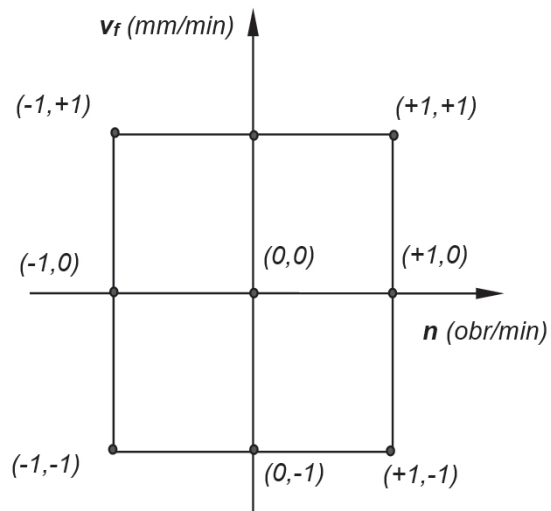
Celem pracy było opracowanie modelu matematycznego określającego wpływ przedstawionych parametrów na maksymalną siłę przenoszoną przez złącze wykonane metodą FSW, umożliwiającego dobór parametrów optymalnych.

#### Badania eksperymentalne

Badania procesu zgrzewania blach przeprowadzono na uniwersalnej frezarce pionowej FWF 32J2. Przedmiotem badań były złącza doczołowe blach ze stopu aluminium 2024-T3, należącego do grupy materiałów niespawalnych, trudno obrabialnych, charakteryzujących się dodatkowo bardzo niską odpornością na utlenienie (granica wytrzymałości na rozciąganie  $R_m = 360 \div 425$  Mpa, min. granica plastyczności  $R_{0,2} = 250 \div 290$  MPa, twardość



Rys. 2. Głowica narzędziowa i próbki do zgrzewania tarcowego  
Fig. 2. View of head with tool and FSW specimen



Rys. 3. Graficzna interpretacja planu PS/DK  $3^2$  [5]  
Fig. 3. Graphic interpretation of the plan PS/DK  $3^2$  [5]

104 ÷ 123 HB, wydłużenie  $A_5 = 12 \div 14\%$ , przewodność cieplna 137 ÷ 170 W/mk) o grubości 1 mm. Stop ten wykorzystywany jest do wykonywania wyposażenia samolotów, przekładni wałków, śrub, części zaworów hydraulicznych oraz tłoków i przekładni ślimakowych. Narzędzie w postaci trzpienia zakończonego częścią śrubową wykonano ze stali szybko tnącej i poddano obróbce cieplnej, zwiększającej twardość do 55HRC. W celu usprawnienia procesu zgrzewania zaprojektowano i wykonano specjalny uchwyt obróbkowy, zapewniający stałą wartość siły docisku i jednoznaczne położenie krawędzi łączonych blach względem narzędzia (rys. 2). Badania prowadzono przy kącie pochylenia osi narzędzia wynoszącym  $3^\circ$  i głębokości zagłębienia czoła narzędzia wynoszącym 90% grubości blachy (0.9 mm).

Badania wstępne wykazały, że największy wpływ na przebieg procesu zgrzewania mają: prędkość posuwu stołu frezarki  $v_f$ , prędkość obrotowa narzędzia  $n$  oraz siła docisku. Pozostałe parametry nie wywierały znaczącego wpływu na jakość spoiny. Ze względu na ograniczenia technologiczne, dotyczące możliwości kontrolowania siły nacisku narzędzia, w trakcie badań parametrami zmiennymi była jedynie prędkość posuwu i prędkość obrotowa wrzeciona frezarki. W celu uzyskania wiarygodnych informacji z przeprowadzonych prób przy minimum nakładów pracy, badania wykonano w oparciu o statyczny trójpoziomowy kompletny plan badań PS/DK  $3^2$ . W planie tym czynniki wejściowe występują na trzech poziomach [12]:

- wyższym – oznaczonym +1,
- średnim (zerowym) – oznaczonym 0,
- niższym – oznaczonym -1.

Tabela 1. Matryca planu badań PS/DK 3<sup>2</sup> i wyniki doświadczeń  
Table 1. Matrix test plan PS/DK 3<sup>2</sup> and test results

Lp.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1 x_2$	$y_1$	$y_2$	$\bar{y}$	$\bar{\bar{y}}$	$S^2(y)_i$
1	+	+	+	+	+	+	2,98	3,65	3,32	3,57	0,062
2	+	+	0	+	0	0	3,20	3,60	3,40	3,30	0,01
3	+	+	-	+	+	-	2,98	3,26	3,12	2,95	0,03
4	+	0	+	0	+	0	4,02	3,86	3,94	3,90	0,0014
5	+	0	0	0	0	0	3,01	3,22	3,12	3,16	0,0013
6	+	0	-	0	+	0	2,31	2,40	2,36	2,74	0,1413
7	+	-	+	+	+	-	1,19	1,61	1,40	1,57	0,028
8	+	-	0	+	0	0	0,98	1,21	1,095	1,16	0,032
9	+	-	-	+	+	+	1,08	0,71	0,89	0,67	0,052

Badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę rozciągania, na podstawie których rejestrowano maksymalną siłę przenoszoną przez złącze. Próbki do badań wytrzymałościowych (przeprowadzonych zgodnie z normą PN-EN 10002-1) wycinano z połączonych metodą FSW pasów blachy w kierunku prostopadłym do linii złącza. Szerokość próbek wynosiła 12,5 mm. Celem badań było uzyskanie adekwatnego modelu matematycznego w postaci wielomianu drugiego stopnia na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ :

$$y = b_0 + \sum b_k x_k + \sum b_{kk} x_k^2 + \sum b_{kj} x_k x_j \quad (1)$$

gdzie:

$x_k, x_j$  – czynniki wejściowe,

$b_0, b_k, b_{kk}, b_{kj}$  – współczynniki regresji równania,

$y$  – czynnik wynikowy (wielkość mierzona).

Wyniki pomiarów i niektórych obliczeń przedstawiono w tab. 1.

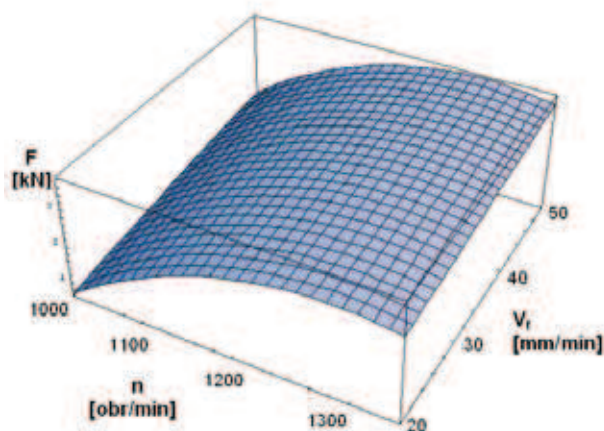
Na podstawie badań literaturowych [13, 14] wstępnie ustalono parametry procesu zgrzewania: prędkość posuwu 70 mm/min, prędkość obrotowa narzędzia 1120 obr./min. Przy tych parametrach zarejestrowano jedną z wyższych wartości siły użytecznej połączenia, jednak przy dużej wariancji uzyskiwanych wyników pomiarów, co uniemożliwiało uzyskanie adekwatnego modelu regresji. W celu uzyskania poprawnego modelu w trakcie badań skupiono się na mniejszych wartościach posuwu (20–50 mm/min) i prędkości obrotowej w zakresie (1000–1350 obr./min), przy których zaobserwowano znacznie mniejszy rozrzut wyników pomiarów przy nieznacznie mniejszej wartości siły przenoszonej przez złącze. Najlepsze wyniki uzyskano dla prędkości posuwu wynoszącej 50 mm/min i prędkości obrotowej wynoszącej 1175 obr./min, dla których zarejestrowano wartość siły użytecznej połączenia stanowiącej 69,12% wytrzymałości materiału rodzimego. Dalszy wzrost prędkości obrotowej narzędzia nie powodował wzrostu siły użytecznej połączenia. Zwiększał się jedynie obszar wpływu ciepła, powodujący deformację łączonych blach przy znacznie

zwiększonym udziale pustek widocznych na otrzymanym złomie. Należy jednak zauważyć, że w każdym z analizowanych przypadków uzyskano spoinę o bardzo stabilnej i równej grani i czole spoiny, wyraźnie uzależnionej od przyjętych parametrów ustawczych procesu zgrzewania.

Równanie regresji, obrazujące wpływ parametrów zgrzewania tarcowego na wartość siły użytecznej połączenia  $F$ , po odkodowaniu przyjęło następującą postać:

$$F = 3,16 + 0,0253(v_f - 35) - 0,000155(v_f - 35)^2 + 0,006114(n - 1175) - 0,000026(v_f - 35)(n - 1175) - 0,00003036(n - 1175)^2 \quad (2)$$

Na rys. 4 przedstawiono wykres zależności siły użytecznej połączenia od prędkości posuwu i prędkości obrotowej narzędzia. Siła ta osiąga wartość maksymalną wynoszącą 71,10% wytrzymałości materiału rodzimego przy prędkości obrotowej wynoszącej 1269 obr./min i prędkości posuwu wynoszącej 50 mm/min. W celu weryfikacji przedstawionego modelu przeprowadzono



Rys. 4. Wykres zależności siły użytecznej złącza od prędkości obrotowej i posuwu

Fig. 4. Dependence of force from rotational and travelling speed

próbę zgrzewania z wymienionymi parametrami, przy których zaobserwowano jedynie nieznaczny wzrost siły użytecznej połączenia (do ok. 70.% wytrzymałości materiału rodzimego). Analiza wykresu wskazuje na istniejące rezerwy, dotyczące możliwości zwiększenia wytrzymałości połączenia drogą modyfikacji parametrów ustawczych procesu (prędkości posuwu). Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych badań z wykorzystaniem adaptacyjnego układu sterowania z kontrolą siły nacisku narzędzia, zapewniającego wysoką stabilność procesu zgrzewania.

## Podsumowanie

Zgrzewanie tarciove jest jedną z najbardziej atrakcyjnych metod łączenia odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, ze względu na szczelność i wysoką wytrzymałość złącza oraz możliwość redukcji jego masy. Przeprowadzone badania, dotyczące zgrzewania tarciovego z przemieszeniem wykazały, że metoda ta może być wykorzystana do łączenia blach ze stopu aluminium 2024-T3 o grubości 1 mm. Zauważono, że zmniejszenie grubości blach wymaga zmiany parametrów ustawczych procesu. Najlepsze wyniki, zapewniające najwyższą wartość siły użytecznej połączenia, uzyskano dla prędkości obrotowej 1270 obr./min i prędkości posuwu 50 mm/min. Stwierdzono ponadto, że w pewnym zakresie prędkości obrotowej i liniowej (zbliżonych do optymalnych) parametry procesu wpływają w niewielki sposób na cechy jakościowe zgrzezin. Znaczne zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia podwyższa temperaturę procesu i prowadzi do lokalnych nadtopień zgrzewanego materiału, objawiających się spadkiem wytrzymałości złącza. Wydaje się jednak, że zwiększenie prędkości posuwu może zapewnić znacznie lepsze parametry jakościowe połączenia. Wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych badań przy kontrolowanej wartości siły nacisku narzędzia.

## LITERATURA

- [1] Mishra R.S. 2003. "Friction Stir Processing Technologies". *Advanced Materials&Processes*.
- [2] Pietras A., B. Rams, A. Węglowska. 2007. „Zgrzewanie tarciove metodą FSW stopów aluminium serii 6000”. Wydawnictwo Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, vol. 27 (1).
- [3] Hattingh D.G., C. Blignault, T.I. Niekerk, M.N. James. 2008. "Characterization of the influences of FSW tool

geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool". *Elsevier Journal of Materials Processing Technology* (203): 46–57.

- [4] Giraud L. et. al. 2016. "Investigation into the dissimilar friction stir welding of AA7020-T651 and AA6060-T6". *Journal of Materials Processing Technology*.
- [5] Yu Ch. et al. 2015. "Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (25): 2524–2532.
- [6] Seetharaman R., V. Ravisankar, V. Balasubramanian. 2015. "Corrosion performance of friction stir welded AA2024 aluminium alloy under salt fog conditions". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (25): 1427–1438.
- [7] Sadeesh P. et. al. 2014. "Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals". *Procedia Engineering* (75): 145–149.
- [8] Amancio-Filho S.T. et. al. 2008. "Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4". *Journal of materials processing technology* (206): 132–142.
- [9] Radisavljevic I. et. al. 2013. "Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints". *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (23): 3525–3539.
- [10] Yazdipour A., A. Heidarzadeh. 2016. "Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints". *Journal of Alloys and Compounds* (680): 595–603.
- [11] Kocańda D., A. Górka. 2010. „Nowe technologie łączenia tarciovego metali”. *Biuletyn WAT* (2), vol. LIX.
- [12] Korzyński M. 2006. „Metodyka eksperymentu”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [13] Kudła K., K. Wojsyk, Z. Kucharczyk. 2013. [Własności zakładkowych złączy spajanych metodą zgrzewania tarciovego z przemieszeniem (FSW – Friction Stir Welding)”. *Obróbka Plastyczna Metali* (3), vol. XXIV.
- [14] Balawender T., R.E. Śliwa, T. Gałczyński. 2014. „Zgrzewanie tarciove blach ze stopu aluminium 2024”. *Hutnik-WH* t.81 (7): 450–455.

Dr inż. Rafał Kluz – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkkmiop@prz.edu.pl

Dr inż. Andrzej Kubit – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: akubit@prz.edu.pl



# BADANIA PARAMETRÓW ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH, ISTOTNYCH W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH MONTAŻU

## *The study of industrial robots parameters essential in assembly technological processes*

Marcin WIŚNIEWSKI, Katarzyna PETA, Arkadiusz PIETROWIAK, Olaf CISZAK, Jan ŻUREK

**Streszczenie:** W artykule wymieniono obszary zastosowań robotów przemysłowych w montażu z uwzględnieniem tych operacji, które wymagają szczególnej dokładności wykonania. Scharakteryzowano kluczowe parametry robotów, tj. dokładność i powtarzalność pozycjonowania (w tym ich wartości podawane przez producentów), mające istotny wpływ na jakość montażu. Opisano procedurę badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB oraz przeanalizowano wybrane wyniki badań.

**Słowa kluczowe:** dokładność i powtarzalność pozycjonowania, montaż

**Abstract:** In this paper lists the areas of application of industrial robots in the assembly taking into account these operations, which require special manufacturing precision. It has been characterized the important parameters of the robot such as the accuracy and repeatability of positioning (including their values given by the producers), having a significant impact on the quality of the installation. Describes the procedure for testing the accuracy and repeatability of positioning of industrial robot Fanuc M16iB and analyzed the selected results.

**Keywords:** accuracy and repeatability of positioning assembly

### Wprowadzenie

Montaż [1] (z fr. montage) jest istotną częścią procesu produkcyjnego i ma ogromny wpływ na jakość wyrobu finalnego. Polega na połączeniu ze sobą gotowych elementów (części) zgodnie z wymogami. Coraz częściej realizowany jest przy pomocy zaawansowanych narzędzi technologicznych – robotów przemysłowych.

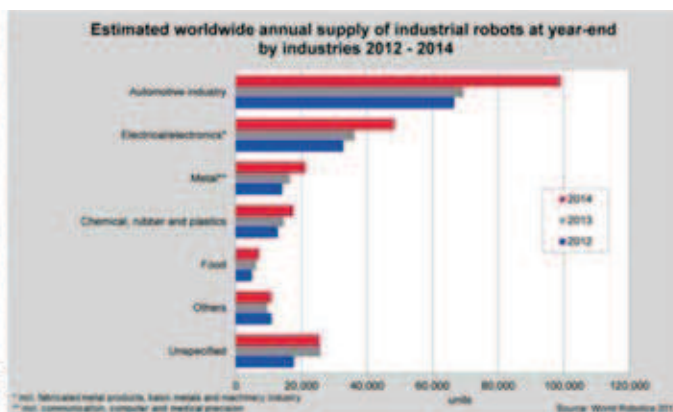
Większość sprzedawanych robotów przemysłowych jest sześciokościowych. Dzięki takiej konfiguracji oraz możliwości podłączenia do sterowania na stanowisku pracy dodatkowych osi (np. pozycjonerów), można je stosować w wielu operacjach procesu technologicznego, w tym montażu [2].

Od 2010 r. liczba sprzedawanych robotów przemysłowych co roku przekracza 100 tys. szt., a wg prognozy World Robotics 2015 Industrial Robots w 2018 r. ma wynieść 400 tys. szt.

Jak już wspomniano – montaż ma ogromny wpływ na jakość produktu finalnego, przy czym konieczne jest prawidłowe wykonanie elementów składowych. Jakość ta dotyczy:

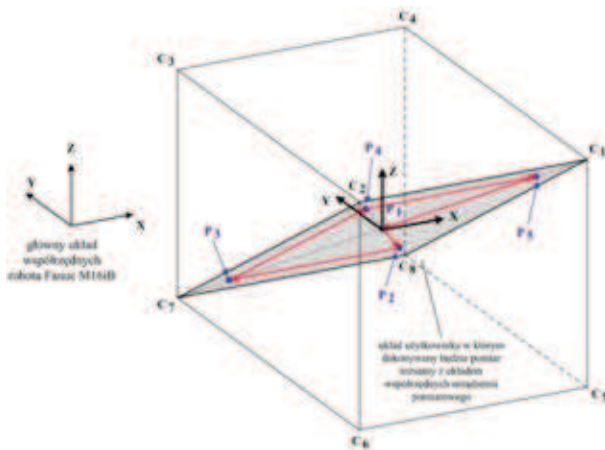
- funkcjonalności (stopień i zakres realizacji oczekiwanych funkcji),
- praktyczności (komfort użytkowania, łatwość obsługi i konserwacji, ergonomiczność),
- niezawodności (zdolność do pracy bezusterkowej),
- trwałości (okres zachowania cech użytkowych),
- bezpieczeństwa użytkowania [4].

Country	2013	2014	2015*	2018*
<b>America</b>	<b>30,317</b>	<b>32,616</b>	<b>36,200</b>	<b>48,000</b>
Brazil	1,388	1,388	1,300	3,000
North America (Canada, Mexico, USA)	28,929	31,228	34,900	45,000
Other America	201	320	300	1,000
<b>Asia/Australia</b>	<b>98,807</b>	<b>139,344</b>	<b>169,000</b>	<b>275,000</b>
China	38,860	57,086	75,000	150,000
India	1,917	2,126	2,800	8,000
Japan	25,110	29,297	33,000	40,000
Republic of Korea	21,307	24,721	29,000	40,000
Taiwan	5,457	6,912	8,500	12,000
Thailand	3,221	3,657	4,300	7,000
Other Asia/Australia	5,235	18,535	16,700	18,000
<b>Europe</b>	<b>43,284</b>	<b>45,559</b>	<b>49,500</b>	<b>66,000</b>
Czech Rep.	1,337	1,533	1,900	3,500
France	2,161	2,944	3,300	5,700
Germany	18,287	20,051	21,000	25,000
Italy	4,701	6,215	6,800	8,000
Spain	2,784	2,312	2,700	3,200
United Kingdom	2,486	2,994	2,400	3,600
Other Europe	11,538	10,410	11,700	16,100
<b>Africa</b>	<b>733</b>	<b>428</b>	<b>650</b>	<b>1,000</b>
not specified by countries**	4,991	11,314	8,650	10,000
<b>Total</b>	<b>178,132</b>	<b>229,261</b>	<b>264,000</b>	<b>400,000</b>



Rys. 1. Prognoza zastosowania robotów przemysłowych i ich procentowy udział w wybranych gałęziach przemysłu [3]  
Fig 1. Forecast of industrial robots application and their percentage in the industries [3]





Rys. 2. Płaszczyzna pomiarowa  $C_1 - C_2 - C_7 - C_8$  z położeniami punktów  $P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5$  i zaznaczonym torem pomiarowym [5]

Fig 2. The  $C_1 - C_2 - C_7 - C_8$  measuring plane, with the  $P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5$  point's and marked measurement trajectory [5]

Na dwie pierwsze cechy montaż nie ma istotnego wpływu, gdyż zależą one bezpośrednio od projektanta gotowego wyrobu, który podczas procesu projektowania określa jego funkcjonalność i praktyczne zastosowanie. Pozostałe trzy kryteria są natomiast powiązane z operacjami montażu. Jeżeli wykonują je roboty przemysłowe, to można założyć, że operacja montażu przebiegnie prawidłowo. Należy jednak zaznaczyć, że m.in. dwie cechy charakteryzujące pracę robota przemysłowego, tj. dokładność (AP) i powtarzalność (RP) pozycjonowania, mogą znacząco wpływać na przebieg operacji montażu. Biorąc pod uwagę powyższe, celem publikacji jest przedstawienie metodyki badania tych dwóch kluczowych w procesach technologiczności montażu parametrów robotów przemysłowych, podawanych przez ich producentów. Zakres publikacji obejmuje

prezentację wyników przeprowadzonych badań dla dwóch różnych wielkości sześcianu pomiarowego i odległości urządzenia pomiarowego oraz ich wpływu na poprawność przebiegu procesu technologicznego montażu.

### Metodyka badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego

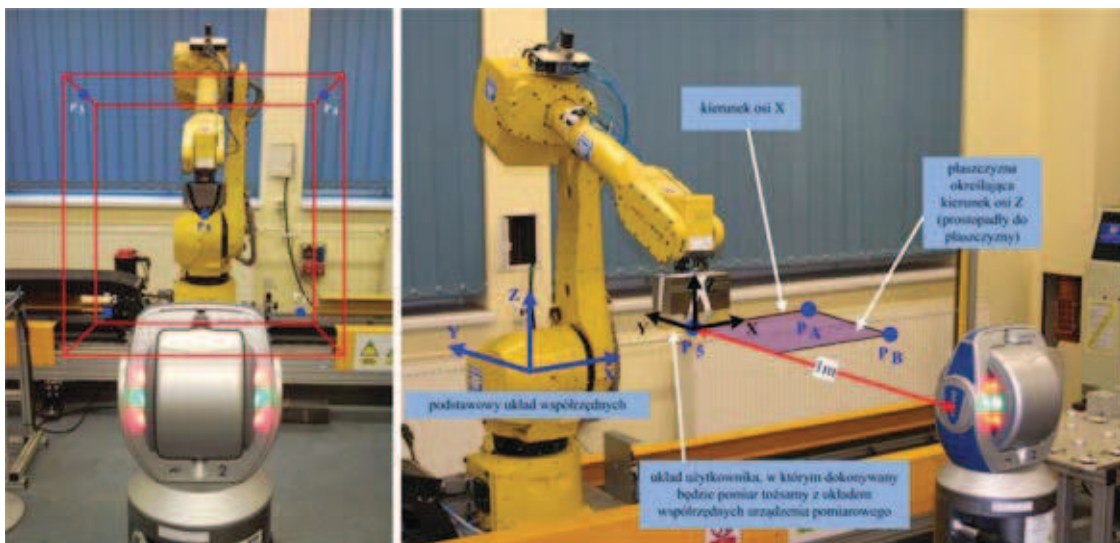
W celu określenia wpływu robota przemysłowego na przebieg operacji technologicznej montażu, należy zbadać parametry charakteryzujące jego pracę (AP, RP).

Do pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB zastosowano urządzenie pomiarowe laser tracker firmy Faro – Laser Tracker Ventage, w którym rejestracja położenia SMR-a (lustrzana sonda pomiarowa) odbywa się jednocześnie w trzech osiach: X, Y i Z (w określonym przez operatora układzie współrzędnych). Dzięki ciągłej analizie różnicy długości wiązki laserowej (wysłanej i odbitej z częstotliwością tysiąca razy na sekundę [5]), możliwe jest dynamiczne śledzenie położenia sondy pomiarowej [6].

Przed wykonaniem pomiaru ustabilizowano temperaturę wszystkich przegubów, uruchamiając program stabilizujący robota (ok. 30 min). Badanie przeprowadzono z obciążeniem nominalnym (10 kg) w pięciu punktach, położonych na wcześniej wybranej płaszczyźnie pomiarowej i powtórzono je 30 razy.

Układ współrzędnych użytkownika, w którym zdefiniowane były punkty pomiarowe, umocowano w punkcie  $P_1$ , równoległe względem głównego układu współrzędnych robota przemysłowego. Położenie układu współrzędnych użytkownika przedstawiono na rys. 2.

Podczas wykonywania programu położenie osi układu współrzędnych sondy pomiarowej (układ współrzędnych narzędzia) w kolejnych punktach pomiaru było stałe



Rys. 3. Położenie Laser Trackera w osi środka sześcianu i odległości 1 m od (punktu  $P_5$ ) [6]

Fig. 3. The Laser Tracker position along the cube's central axis, located 1 m from (the  $P_5$  point) [6]

(osie równoległe do osi układu współrzędnych użytkownika).

Urządzenie pomiarowe Laser Tracker ustawiono w osi symetrii i pewnej odległości od środka sześcianu (punktu P<sub>5</sub>), m.in. w odległości 1 m (rys. 3).

Do obsługi urządzenia Laser Tracker Venatge posłużono się programem CamMeasure 10, w którym opracowano nowy projekt (program pomiarowy) do rejestrowania 30 powtórzeń ruchów pomiędzy punktami P<sub>1</sub>-P<sub>5</sub>. Położenie środka układu współrzędnych urządzenia pomiarowego ustalono w punkcie P<sub>5</sub> – pokrywał się on z układem użytkownika, w którym wykonywany był pomiar.

Wartość dokładności (AP) i powtarzalności (RP) pozycjonowania robota przemysłowego [7, 8] obliczono na podstawie wzorów:

$$AP = \sqrt{AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2} \quad (1)$$

gdzie:

$$AP_x = (\bar{x} - x_c), AP_y = (\bar{y} - y_c), AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (3)$$

w których:

- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej, otrzymane przez  $n$ -krotne uzyskanie położenia zadanego,
- $x_c, y_c, z_c$  – współrzędne położenia zadanego,
- $x_j, y_j, z_j$  – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy  $j$ -tym ruchu do położenia zadanego,

$$RP = \bar{l} + 3S_l \quad (4)$$

gdzie:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (5)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (6)$$

w których:

- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – współrzędne środka punktów przestrzeni roboczej, uzyskanej przez  $n$ -krotne powtórzenie położenia zadanego,
- $x_j, y_j, z_j$  – współrzędne położenia rzeczywistego uzyskanego przy  $j$ -tym powtórzeniu położenia zadanego.

Tabela 1. Wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB-10L dla długości boku sześcianu pomiarowego 270 mm

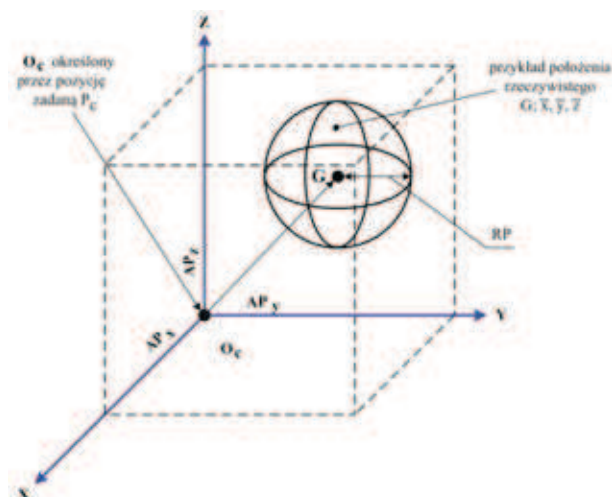
Table 1. Results of accuracy and repeatability measurement of industrial robots positioning (Fanuc M16iB-10L) for the side length of a cube measuring 270 mm

ROBOT					
Producent:	FANUC	Model	M16iB	Typ:	10L
Prędkość:	100%	Udźwig	10 kg		
Długość boku sześcianu pomiarowego [mm]	270,00	odległość urządzenia [mm]		2240,00	
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9					
	APx	APy	APz	AP	RP
P1	-0,191	0,043	-0,064	0,206	0,024
P2	-0,357	-0,105	0,008	0,372	0,021
P3	0,082	0,180	0,058	0,206	0,017
P4	-0,377	0,105	0,110	0,407	0,016
P5	0,037	0,033	0,043	0,065	0,030
Zmierzona max. wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego					
	RP =	0,030			
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta					
	RP =	0,100			
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?				<b>TAK</b>	

Tabela 2. Wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M16iB-10L dla długości boku sześcianu pomiarowego 900 mm

Table 1. Results of accuracy and repeatability measurement of industrial robots positioning (Fanuc M16iB-10L) for the side length of a cube measuring 900 mm

ROBOT					
Producent:	FANUC	Model	M16iB	Typ:	10L
Prędkość:	100%	Udźwig	10 kg		
Długość boku sześcianu pomiarowego [mm]	900,00	odległość urządzenia [mm]		2240,00	
Dokładność pozycjonowania punktów dla płaszczyzny C2 – C3 – C5 – C9					
	APx	APy	APz	AP	RP
P1	-0,704	-0,405	-0,165	0,829	0,026
P2	-1,077	-1,052	0,246	1,526	0,017
P3	1,131	0,907	-0,564	1,555	0,052
P4	-0,672	1,045	-0,144	1,251	0,063
P5	0,023	0,016	0,033	0,044	0,033
Zmierzona max. wartość powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego					
	RP =	0,063			
Powtarzalność pozycjonowania określona przez producenta					
	RP =	0,100			
Czy powtarzalność zmierzona mieści się w określonym przez producenta zakresie?				<b>TAK</b>	



Rys. 4. Dokładność i powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowych ruchów liniowych

$AP_{x,y,z}$  – dokładność pozycjonowania jednokierunkowego dla osi x, y, z

RP – powtarzalność pozycjonowania jednokierunkowego [8]

Fig. 4. The accuracy and repeatability of a one-way linear movements positioning

$AP_{x,y,z}$  – one-way positioning accuracy for the x, y, z

RP – repeatability of one-way positioning [8]

Wzory te zostały zaimplementowane do arkusza kalkulacyjnego, w którym po wstawieniu wyników pomiaru położenia punktów  $P_1$  do  $P_5$  (z programu CAMmeasure 10) wyliczono wartość dokładności i powtarzalności pozycjonowania.

#### Wyniki badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego

W tab. 1 i 2 przedstawiono wyniki pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania dla robota przemysłowego Fanuc M16iB-10L i długości boku sześcianu pomiarowego wynoszącego 270 i 900 mm.

#### Omówienie wyników – wnioski i podsumowanie

Rozpatrując rodzaj ruchu końcówki interfejsu robota przemysłowego podczas osiągnięcia zadanej pozycji, dokładność pozycjonowania jednokierunkowego można określić jako różnicę między położeniem zadanym a punktem będącym środkiem zbioru punktów przestrzeni roboczej (dokładność pozycjonowania jednokierunkowego ruchów liniowych), co pokazano na rys. 1.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że wartości dokładności pozycjonowania (AP) są różne

dla każdego punktu pomiarowego. Dla boku sześcianu pomiarowego o długości 270 mm wynoszą od 0,206 do 0,407 mm, a dla boku 900 mm od 0,044 do 1,555 mm. W przypadku powtarzalności pozycjonowania (czyli wielokrotnego osiągnięcia zadanej pozycji) nie ma tak znaczących rozbieżności, a uzyskane wyniki mieszczą się w granicach określonych przez producenta robota (tj. do 0,1 mm). We wszystkich przypadkach wartości te były nawet znacząco mniejsze, np. dla punktu P1 aż pięciokrotnie (tab. 1). Zauważone wyżej różnice wartości RP mogą wynikać m.in. ze zmieniającej się przestrzeni pracy i różnej konfiguracji robota dla każdego punktu pomiarowego.

Wynikająca z badań duża zmienność wartości AP, bezpośrednio wpływa na dokładność wykonywanych operacji procesu technologicznego/montażu, a w szczególności: spawania, zgrzewania, malowania, klejenia i uszczelniania. Niedokładności rzędu milimetra w wymienionych operacjach mogą powodować m.in. osłabienie konstrukcji, zmniejszenie/zwiększenie grubości warstwy lakieru, braki w uszczelnieniu (w szczególności wąskich ścieżek uszczelnienia), co z kolei wpływa na jakość produktu finalnego. Jednym ze sposobów zwiększenia dokładności pozycjonowania jest przeprowadzenie kalibracji urządzenia po wcześniejszym jego zbadaniu. Biorąc pod uwagę fakt, że wpływ na wartość AP ma wiele czynników (np. charakter pracy i środowisko jej wykonywania, materiał podzespołów, dokładność obróbki i montażu poszczególnych elementów konstrukcyjnych, elastyczność członów, sztywność konstrukcji, w tym luzy przekładni, parametry statyczne i dynamiczne), badania należy przeprowadzać w warunkach przemysłowych, czyli takich, w których robot będzie realizował operacje procesu technologicznego/montażu.

Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych nie są łatwe, wymagają bowiem wiedzy dotyczącej m.in. ich budowy, mechaniki, dynamiki [9], elektroniki oraz systemów pomiarowych. Pomiar z zastosowaniem Laser Tracker-a trwa ok. 40 min, a z zastosowaniem fotogrametrii nawet kilka godzin. Trzeba także uwzględnić wytyczne zawarte w normie PN-ISO 9283.

## LITERATURA

- [1] Żurek J. 1986. „Technologia i organizacja montażu”. Poznań: Stowarzyszenie Inżynierów i Mechaników Polskich.
- [2] Wojciechowski J., O. Ciszak. 2015. „Modular Flexible Production System: Construction and Application in Education,” w: *ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, Boston, Massachusetts, USA.
- [3] <https://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>, dostęp 9.05.2016 r.
- [4] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Jako%C5%9B%C4%87>, dostęp 25.03.2016 r.
- [5] FARO Laser Tracker Brochure.
- [6] Wiśniewski M. 2014. „Propozycja metody pomiaru dokładności i powtarzalności pozycjonowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (3): 39–43.
- [7] Żurek J. 2013. „Metodyka i warunki badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego Fanuc M-16iB”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 31–34.
- [8] ISO 9283.
- [9] Szkodny T. 2013. „Dynamika robotów przemysłowych”. Gliwice: Wydawnostwo Politechniki Śląskiej.

---

Mgr inż. Marcin Wiśniewski – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: marcin.wisniewski@put.poznan.pl

Mgr inż. Katarzyna Peta – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: katarzyna.p.peta@doctorate.put.poznan.pl

Mgr inż. Arkadiusz Piotrowiak – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: arkadiusz.pietrowiak@put.poznan.pl

Dr hab. inż. Olaf Ciszak – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: olaf.ciszak@put.poznan.pl

Prof dr hab. inż. Jan Żurek – Zakład Projektowania Technologii Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań, e-mail: jan.zurek@put.poznan.pl



# PROBLEMY KLEJENIA KOMPONENTÓW Z LEKKICH KOMPOZYTÓW ODPORNICH NA PRZEBICIA

## *Problems bonding components of lightweight composites resistant to punctures*

Jan GODZIMIRSKI, Sławomir TKACZUK

**Streszczenie:** Zbadano przydatność kilku klejów do łączenia ceramiki typu SiC i  $Al_2O_3$  z tkaniną aramidową Mikroflex. Zaproponowano próbki do badania wytrzymałości połączeń klejowych tych materiałów na ścinanie i oddzieranie. Przeprowadzone badania wykazały gorsze właściwości adhezyjne ceramiki SiC. Jednak w badaniach wytrzymałościowych na oddzieranie stwierdzono kohezyjne zniszczenie spoin klejowych na powierzchni ceramiki SiC. Założono, że przyczyną takiego zniszczenia może być ukosowanie krawędzi płytek, wytworzonych z tego materiału. Potwierdziły to przeprowadzone obliczenia numeryczne. Wynika z tego, że charakter zniszczenia połączeń klejowych (adhezyjny lub kohezjny) wynika nie tylko z właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych materiałów i właściwości kleju, ale również zależy od kształtu i sposobu obciążenia połączenia klejowego, z których wynika rozkład naprężeń w spoinie klejowej.

**Słowa kluczowe:** ceramika, tkanina aramidowa, połączenia klejowe, wytrzymałość na ścinanie i odrywanie

**Abstract:** Examining the feasibility of a number of adhesives for bonding ceramic type SiC and  $Al_2O_3$  with aramid fabric Mikroflex. Proposed sample for testing the strength of adhesive bonds these materials shear and peel strength. The study showed poorer adhesion properties of SiC ceramics. However, strength tests peel found cohesive destruction of the adhesive joints on the surface of SiC ceramics. It was assumed that the cause of such destruction can be scarfing tiles made from this material. This was confirmed by numerical calculations carried out. It follows that the failure mode of the bond (adhesive or cohesive) derives not only from the surface of the adhesive properties of the joined materials and adhesive properties, but also depends on the shape and method of loading of the glue joint, which shows the stress distribution in the adhesive joint.

**Keywords:** ceramics, aramid fabric, adhesive joints, shear and peel

### Wprowadzenie

Struktury wielowarstwowe nazywane są często kompozytami strukturalnymi. Kamizelki ochronne są strukturami wielowarstwowymi złożonymi z różnych materiałów, najczęściej z tkanin aramidowych i ceramiki. Preferowaną metodą łączenia ceramiki z pierwszą warstwą tkaniny jest klejenie. Przeprowadzono badania w celu oceny wytrzymałości połączeń klejowych tkaniny aramidowej Mikroflex z ceramiką typu SiC i  $Al_2O_3$ , łączonych różnymi klejami oraz wpływu kształtu ceramiki na wytrzymałość połączeń. Potwierdzono lepsze właściwości adhezyjne ceramiki  $Al_2O_3$  w porównaniu z ceramiką SiC. Stwierdzono, że ukosowanie krawędzi ceramiki pozwala zwiększyć wytrzymałość na oddzieranie jej połączeń klejowych z tkaninami.

Funkcjonariusze służb mundurowych wyposażeni są w kamizelki ochronne. Kamizelki do ochrony indywidualnej powinny zapewnić właściwą ochronę przed zagrożeniami pojawiającymi się w czasie służby, takimi jak: strzały z broni palnej, użycie broni miotającej lub siecznej, zaatakowanie szpikulcem lub igłą (służba więzienna) [1]. Kamizelki ochronne są strukturami wielowarstwowymi, złożonymi z różnych materiałów. Zewnętrzna część, zwykle wysokowytrzymała i twarda (np. warstwa ceramiki) [2], powinna zatrzymać lub przynajmniej zniekształcić penetrator (pocisk, odłamek, ostrze noża lub szpikulca),

co ułatwia jego „wychwycenie” i ogranicza dalszą perforację wewnętrznej części kamizelki, najczęściej złożonej z warstw wyrobów na bazie włókien aramidowych lub polietylenowych [3]. Warstwy ceramiczne lekkich osłon balistycznych są zazwyczaj wykonane z tlenku aluminium ( $Al_2O_3$ ), węgla krzemu (SiC) lub węgla boru ( $B_4C$ ) [4, 5]. Preferowaną metodą łączenia ceramiki z pierwszą warstwą tkaniny jest klejenie [6].

Przeprowadzone badania wykazały, że nie wszystkie absorbujące energię wyroby na bazie włókien można łączyć metodą klejenia [7]. Nie nadają się do tego wyroby o strukturze mat, ze względu na ich niewielką wytrzymałość w kierunku prostopadłym do ułożenia włókien. Wydaje się, że warstwa, do której ma być przyklejona ceramika, powinna mieć strukturę cienkiego płótna, co umożliwia jej przesycenie klejem o małej lepkości i uzyskanie zadawalającej adhezji mechanicznej. Wyrobem takim jest np. tkanina aramidowa Mikroflex. Możliwości aktywacji powierzchni ceramik w celu zwieszenia ich adhezji specyficznej są ograniczone – twardość ceramik wyklucza możliwość stosowania obróbek mechanicznych. W związku z tym ich przygotowanie do klejenia polega na dokładnym myciu ich powierzchni.

Celem prowadzonych badań było ocenienie wytrzymałości połączeń klejowych tkaniny aramidowej Mikroflex z ceramiką typu SiC i  $Al_2O_3$ , łączonych różnymi klejami oraz wpływu kształtu ceramiki na wytrzymałość połączeń.



Rys. 1. Próbkę zakładkowa  
Fig. 1. Lap joint specimen



Rys. 2. Próbkę z wklejoną ceramiką i przyklejonym paskiem tkaniny  
Fig. 2. Ceramics adhesively bound to socket of specimen and strips of fabric adhesively bound to ceramics

#### Materiały wykorzystywane w badaniach

Microflex jest tkaniną antybalistyczną o splocie płóciennym i gramaturze ok. 220 g/m<sup>2</sup>. Ceramika występowała w postaci płytek o kształcie graniastosłupa prostego, o podstawie sześciokąta foremnego (średnica okręgu wpisanego 20 mm, wysokość 4 mm – ceramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz średnica okręgu wpisanego 20,2 mm, wysokość 4,2 mm – ceramika SiC). Krawędzie ceramiki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> były ostre, a ceramiki SiC ukosowane. W badaniach wykorzystano kleje: cjanoakrylowy klej błyskawiczny firmy Dragon, epoksydowy klej Poxipol przezroczysty, epoksydowy kit klejowy Raychem S1125, klej epoksydowy Epidian 57 utwardzany utwardzaczem Z1 oraz rozpuszczalnikowy klej Butapren firmy Dorex.

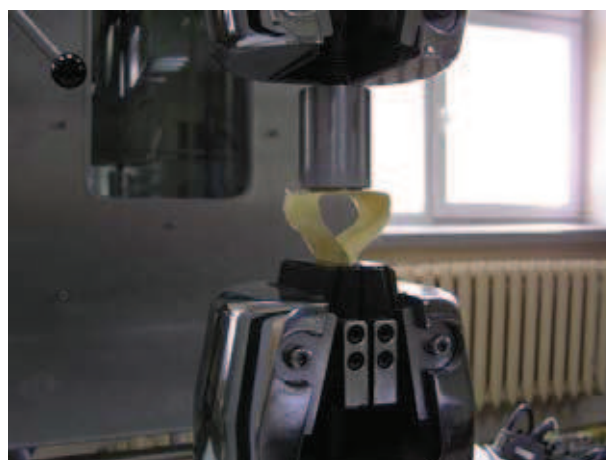
#### Metodyka badań

Uwzględniając sposób obciążenia płytek ceramicznych, przyklejonych do kamizelki ochronnej w warunkach noszenia jej przez osobę chronioną, badania realizowano stosując dwa rodzaje próbek.

1. Do płytek ceramicznych przyklejano z dwóch stron paski tkaniny Microflex o szerokości 30 mm i długości 100 mm (rys. 1). Płytki ceramiczne przemywano alkoholem izopropylenowym i przecierano tkaniną bawełnianą, aż do momentu braku śladów zanieczyszczeń na czystej tkaninie. Dokładniejszego przemywania wymagała ceramika tlenkowa typu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pokryta różowym nalotem. Po utwardzeniu spoin klejowych końce tkanin mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej i próbkę rozciągano. Badania prowadzono w maszynie

wytrzymałościowej Hung Ta HT-2402 przy prędkości przemieszczania trawersy maszyny 5 mm/min. Każdorazowo określano wytrzymałość pięciu próbek. Rejestrowano maksymalną siłę niszczenia każdej próbki i obliczano średnią wartość sił.

2. W czołowe gniazda stalowych próbek walcowych wklejano ceramikę (rys. 2) za pomocą kleju Epidian 57/Z1. Gwintowany otwór wykonany w próbce umożliwiał mocowanie jej w uchwycie maszyny wytrzymałościowej przez wkręcany w nią pręt z naciętym gwintem. Do ceramiki przyklejano paski tkaniny o wymiarach 30 × 150 mm (2).

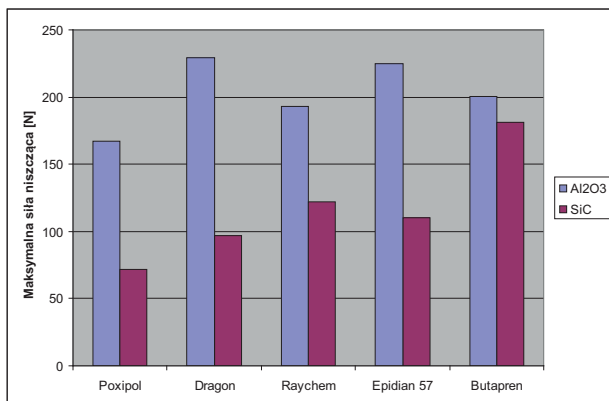


Rys. 3. Próbkę zamocowaną w uchwytach maszyny wytrzymałościowej  
Fig. 3. The sample mounted in the grips of the testing machine

Próbki mocowano w uchwytach maszyny wytrzymałościowej (rys. 3) i obciążano z prędkością 10 mm/min, co powodowało oddzieranie tkaniny od ceramiki.

#### Wyniki badań eksperymentalnych i ich ocena

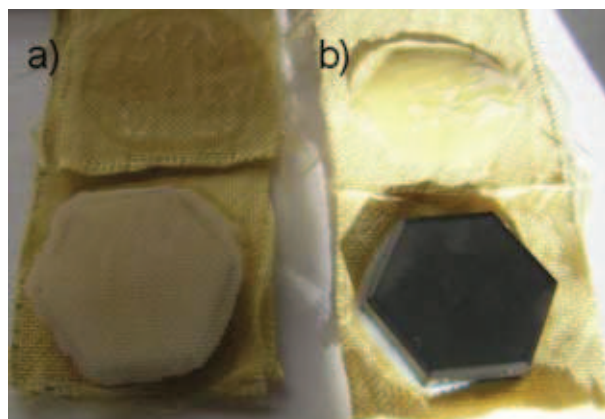
Wyniki badań próbek zakładkowych obciążonych na ścinanie pokazano na wykresie na rys. 4.



Rys. 4. Porównanie wytrzymałości próbek zakładkowych ceramika-tkanina, łączonych różnymi klejami  
Fig. 4. Strength comparison between the ceramic – fabric lap joint specimens bound with different adhesives

We wszystkich badanych przypadkach próbki z ceramiką Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cechowała większa wytrzymałość, co może wynikać z gorszych właściwości adhezyjnych ceramiki SiC w porównaniu z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Kohezyjne zniszczenie spoin wystąpiło jedynie przy klejeniu ceramiki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> klejami Poxipol, Dragon i Epidian 57. W pozostałych przypadkach zniszczenie miało charakter adhezyjny (rys. 5). Najmniejsze różnice wytrzymałości uzyskano klejąc różną ceramikę klejem Butapren.

W celu porównania właściwości adhezyjnych badanych ceramik przeprowadzono próby odrywania



Rys. 5. Charakter zniszczenia połączenia: a) kohezyjny (ceramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – tkanina), b) adhezyjny (ceramika SiC – tkanina)  
Fig. 5. The nature of the destruction of the adhesive joints: a) cohesive (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics – fabric) b) adhesive (SiC ceramics – fabric)

cylicydrycznych próbek metalowych od płytek ceramicznych, przyklejonych klejem Dragon i Poxipol (rys. 6).

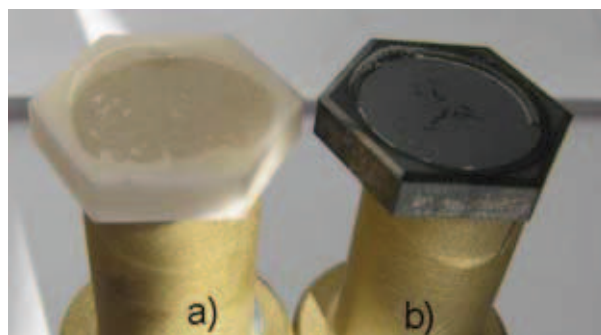
Dla obu badanych klejów przy klejeniu ceramiki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na granicy ceramika-klej występowało zniszczenie kohezyjne, a w przypadku ceramiki SiC adhezyjne (rys. 7), co może świadczyć o jej gorszych właściwościach adhezyjnych. Klejąc różną ceramikę z metalem klejem Dragon, stwierdzono wytrzymałość na odrywanie na poziomie 12 MPa niezależnie od rodzaju ceramiki i charakteru zniszczenia. Przy klejeniu klejem Poxipol kohezyjna wytrzymałość na odrywanie dla ceramiki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wynosiła ok. 20 MPa i była dwukrotnie wyższa od adhezyjnej wytrzymałości na odrywanie ceramiki SiC.

Wyniki badań na oddzieranie (rys. 3) uzyskiwano w postaci zmiany siły w funkcji przemieszczenia (rys. 8 i 9).

Różny charakter krzywych siła-przemieszczenie wynikał z tego, że przy łączeniu elementów próbek klejem Raychem o konsystencji pasty, powstawała wypływka kleju na krawędziach, której zniszczeniu odpowiadał pik siły na początku wykresu. Wypływka taka nie występowała przy klejeniu rzadkopląnym klejem Dragon. W związku z tym początek wykresu związany z niszczeniem wypływki należy pominąć w analizie wytrzymałości na oddzieranie. Wzrost sił wraz ze wzrostem przemieszczenia wynika z wydłużania się krawędzi oddzieranej spoiny

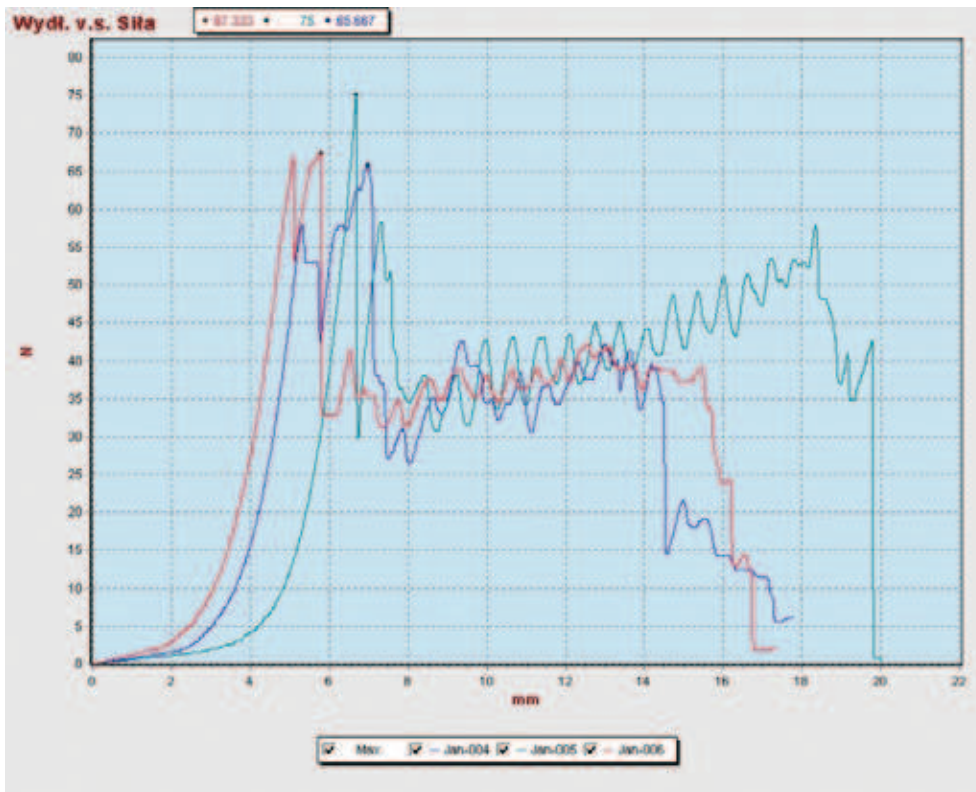


Rys. 6. Próbką stosowaną w badaniach właściwości adhezyjnych ceramik w próbie odrywania  
Fig. 6. Specimen used in the adhesive properties testing of the ceramics subjected to stretching

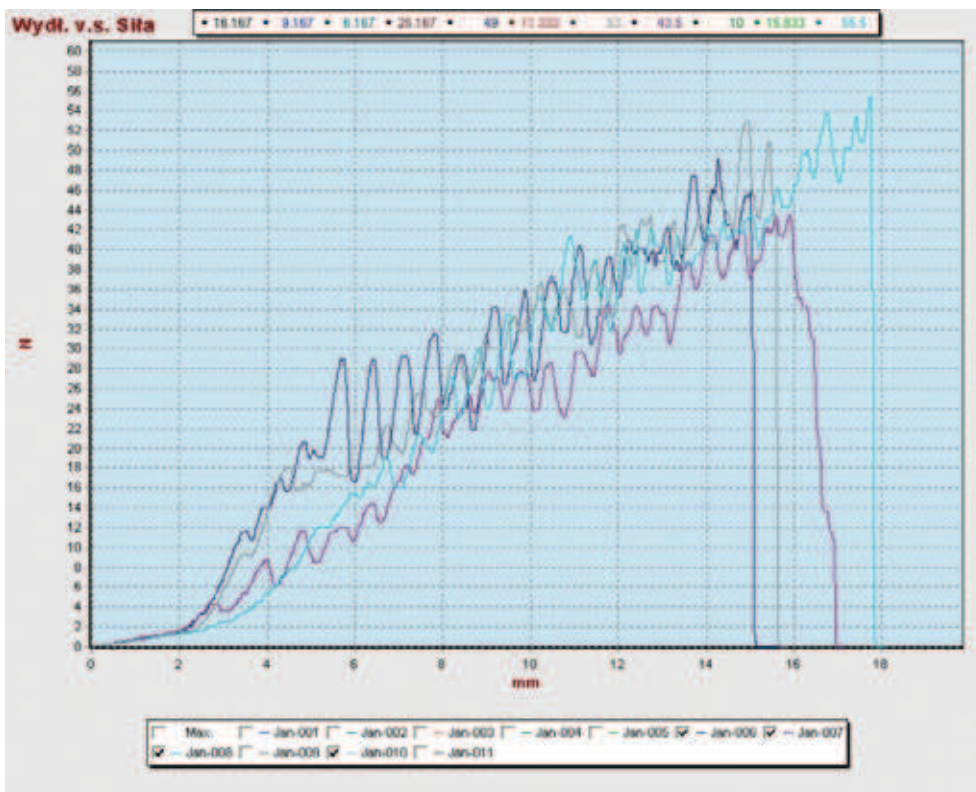


Rys. 7. Charakter zniszczenia połączenia: a) kohezyjny (ceramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – metal), b) adhezyjny ceramika SiC – metal  
Fig. 7. The nature of the destruction of adhesive layers: a) cohesive (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic – metal) b) adhesive SiC ceramics – metal



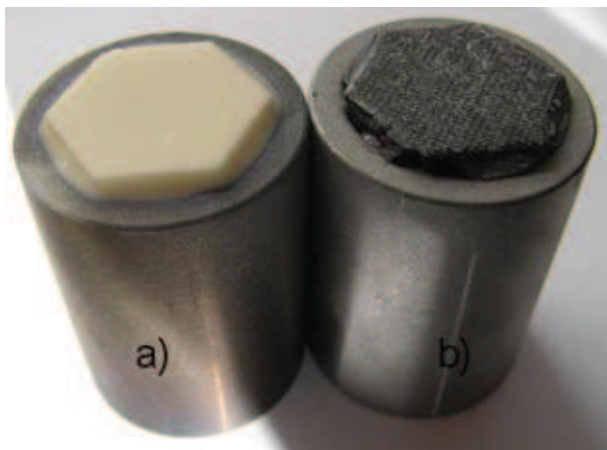


Rys. 8. Wyniki próby oddzierania tkaniny od ceramiki SiC (klej Raychem)  
 Fig. 8. Results of the SiC ceramic – fabric peel strength test (with the Raychem adhesive)



Rys. 9. Wyniki próby oddzierania tkaniny od ceramiki SiC (klej Dragon)  
 Fig. 9. Results of the SiC ceramic – fabric peel strength test (with the Dragon adhesive)





Rys. 10. Występujący w próbie oddzierania charakter zniszczenia połączenia: a) adhezyjny (ceramika  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – tkanina), b) kohezyjny (ceramika SiC – tkanina)

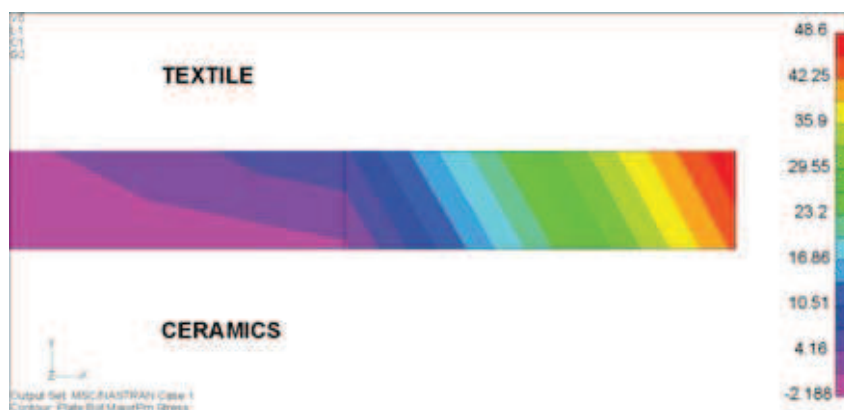
Fig. 10. Adhesive destruction of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramics – fabric binding and cohesive destruction of the SiC ceramic – fabric binding during the peel strength test

klejowej, co związane jest z kształtem płytek ceramicznych. Nie stwierdzono korelacji między wytrzymałością badanych próbek na odzieranie i ścinanie. Co dziwniejsze – odwrotnie niż w próbie ścinania kohezyjne zniszczenie wystąpiło przy klejeniu klejem Dragon ceramiki SiC, a adhezyjne w czterech z pięciu próbek z ceramiką  $\text{Al}_2\text{O}_3$  łączoną z tkaniną tym klejem (rys. 10).

Założono, że sposób zniszczenia (adhezyjny lub kohezyjny) może być związany z kształtem krawędzi płytek ceramicznych. W celu sprawdzenia słuszności tego założenia przeprowadzono obliczenia numeryczne.

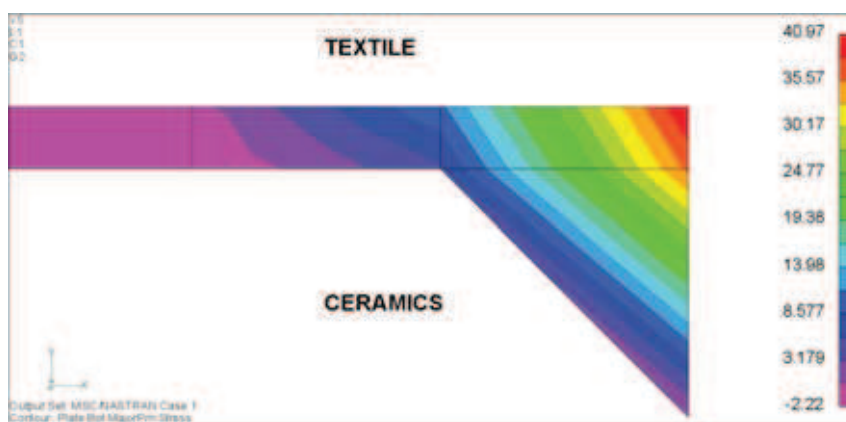
#### Analiza numeryczna

Analizę prowadzono z wykorzystaniem programu Nastran for Windows. Zbudowano płaskie modele badanych eksperymentalnie próbek. Spoiny klejowe modelowano jedną warstwą elementów prostokątnych. W wypadku analizowania płytek ceramicznych SiC z ukosowanymi krawędziami założono, że krawędzie te



Rys. 11. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia zakładkowego – ceramika z ostrymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do tkaniny)

Fig. 11. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the lap joint adhesive layer (ceramics with sharp edges, the maximal stress in the corner adjoining the fabric)



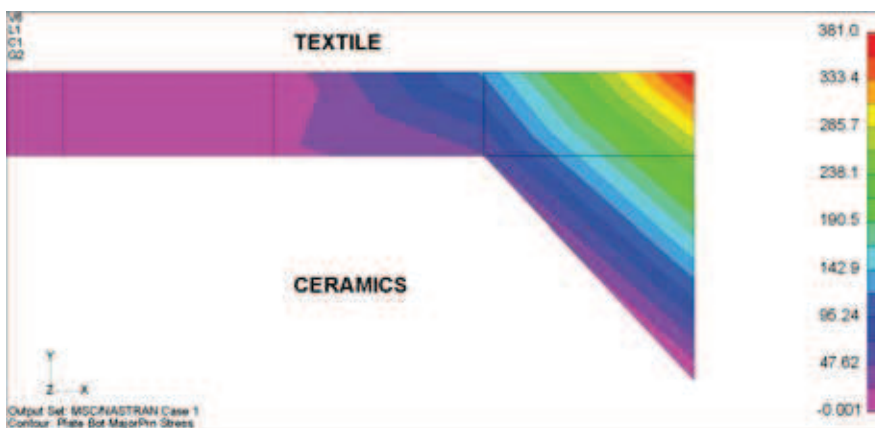
Rys. 12. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia zakładkowego – ceramika z ukosowanymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do tkaniny)

Fig. 12. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the lap joint adhesive layer (ceramics with chamfered edges, the maximal stress in the corner adjoining the fabric)



Rys. 13. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia obciążonego na oddzieranie – ceramika z ostrymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do ceramiki)

Fig. 13. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the adhesive layer of joint subjected to peeling (ceramics with sharp edges, the maximal stress in the corner adjoining the ceramics)



Rys. 14. Rozkład naprężeń maksymalnych głównych w krawędziowej części spoiny połączenia obciążonego na oddzieranie – ceramika z ukosowanymi krawędziami (maksymalne naprężenia w narożniku przylegającym do tkaniny)

Fig. 14. Distribution of the maximal principal stress on the edges of the adhesive of joint subjected to peeling (ceramics with chamfered edges, the maximal stress in the corner adjoining the fabric)

zostaną wypełnione klejem, co modelowano jednym dodatkowym elementem trójkątnym. Obliczenia prowadzono w zakresie liniowym, przyjmując dla kleju wartość modułu sprężystości wzdłużnej  $E = 1000 \text{ MPa}$  i współczynnika Poissona  $\nu = 0,35$ . Oceniano w którym punkcie spoiny klejowej występują maksymalne wartości naprężeń, które inicjują zniszczenie spoin, w związku z czym wartości obciążeń próbek w obliczeniach numerycznych nie miały istotnego znaczenia. Na rys. 11–14 przedstawiono obliczone rozkłady naprężeń w krawędziowych końcach spoin.

Obliczenia numeryczne wykazały, że ukosowanie krawędzi ceramiki ma niewielki wpływ na rozkład i wartość naprężeń w obciążonych na ścinanie połączeniach zakładkowych ceramiki z tkaninami, a istotny w wypadku połączeń obciążonych na odrywanie. W przypadku odrywania występowanie ostrych krawędzi płytek ceramicznych powoduje, że zniszczenie spoiny rozpoczyna się przy powierzchni ceramiki, gdzie występują największe

wartości naprężeń. Ukosowanie krawędzi powoduje zmianę położenia miejsca występowania maksymalnych naprężeń i może spowodować, że zniszczenie spoiny rozpocznie się przy tkaninie. Jest to istotne ze względu na to, że modyfikowanie właściwości adhezyjnych powierzchni wyrobów ceramicznych jest ograniczone.

#### Wnioski

W celu zwiększenia wytrzymałości na oddzieranie połączeń klejowych płytek ceramicznych z tkaninami kamizelek ochronnych, krawędzie płytek przylegające do tkanin powinny być ukosowane.

Charakter zniszczenia połączeń klejowych (adhezyjny lub kohezyjny) wynika nie tylko z właściwości adhezyjnych powierzchni łączonych materiałów i właściwości kleju, ale również zależy od kształtu i sposobu obciążenia połączenia klejowego, z których wynika rozkład naprężeń w spoinie klejowej. Zniszczenie spoin klejowych

spowodowane oddzieraniem, może mieć charakter kohezyjny jeśli maksymalne naprężenia zostaną odsunięte od powierzchni klejonego elementu o gorszych właściwościach adhezyjnych w głąb spoiny – w kierunku powierzchni elementu o lepszych właściwościach adhezyjnych.

#### LITERATURA

- [1] Cegła M., W. Habaj, P. Podgórzak. 2014. „Development of Lightweight Bulletproof Vest Inserts with Increased Protection Capability”. *Problemy Mechatroniki* (5): 23–33.
- [2] Godzimirski J., M. Rośkowicz, R. Gieleta. 2016. „Badania właściwości połączeń klejowych ceramiki z tkaninami antybalistycznymi”. *Problemy Mechatroniki* (23): 97–112.
- [3] Gonçalves D.P., F.C.L. de Melo, A.N. Klein, H.A. Al-Qureshi. 2004. “Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal, composite armour”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (44): 307–316.
- [4] Grabowska G., J. Błaszczuk, I. Kucinska. 2009. “Resistance to Bullets, Knives, Stabs and Needles

According to Current Standards, Procedures and Users' Expectations”. *Techniczne Wyroby Włókiennicze* (2-3): 90–95.

- [5] Hazell P.J. 2006. “Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms”. *Argos Press*.
- [6] Juskowiak E., R. Rybczyński, J. Kurowski, K. Jamroziak. 2012. „Koncepcja osobistej osłony balistycznej z wykorzystaniem tkanin aramidowych i węglików spiekanych”. *Przetwórstwo Tworzyw* (3): 217–221.
- [7] Senderski J., B. Płonka, A. Wiśniewski, Z. Witkowski. 2011. „Wielowarstwowe metalowo-ceramiczne pasywne pancerze dla helikopterów i pojazdów specjalnych”. *Problemy Techniki Uzbrojenia* (40): 57–64.

---

Prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

Dr inż. Sławomir Tkaczuk – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: slawomir.tkaczuk@wat.edu.pl

# ENERGIA POWIERZCHNIOWA WYBRANYCH KLEJÓW EPOKSYDOWYCH

## *The surface energy of the selected epoxy adhesives*

Jacek DOMIŃCZUK, Anna KRAWCZUK, Józef KUCZMASZEWSKI

**S t r e s z c z e n i e:** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych dla wybranych środków adhezyjnych. Badania przeprowadzono dla kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z dwoma utwardzaczami: PAC oraz Z1. Podstawą do określenia swobodnej energii powierzchniowej były pomiary kąta zwilżania materiału o określonym stanie energetycznym warstwy wierzchniej przez wybrane kleje epoksydowe. Pomiar stanu energetycznego warstwy wierzchniej materiału bazowego przeprowadzono w oparciu o metodę Owena-Wendta. W pracy przedstawiono analizę uzyskanych wyników pomiarów kąta zwilżania oraz wyznaczonej swobodnej energii powierzchniowej. W wyniku przeprowadzonych prac określono parametry energetyczne, jakie powinna mieć wierzchnia warstwa materiału łączonego, aby proces zwilżania przebiegał w sposób optymalny.

**S ł o w a   k l u c z o w e:** swobodna energia powierzchniowa, kąt zwilżania, kleje epoksydowe,

**A b s t r a c t:** The article presents the results of measurements of surface free energy and its components for selected adhesives. The research were carried out for the epoxy resin composition Epidian 5 with two hardeners: PAC and Z1. The basis for determining the surface free energy were measurements of the contact angle on the material with a specific energy state of the surface layer wetted by selected epoxy adhesives. Measurement of the energy of the surface layer of the base material were carried out using the Owens-Wendt method. The paper presents an analysis of the results of measurements of contact angle and the determined surface free energy. As a result of the work parameters of energy were specified, which should have a surface layer of the connected material, in order to the wetting process proceeds in an optimal way.

**K e y w o r d s:** surface free energy, contact angle, epoxy adhesives

### Wprowadzenie

Szerokie zastosowanie technologii klejenia wymaga od konstruktorów uwzględnienia wielu czynników, wpływających na wytrzymałość połączenia. Projektując połączenie klejowe zwracana jest uwaga nie tylko na czynniki technologiczne czy konstrukcyjne, ale również materiałowe, jak i warunki w jakich połączenie będzie eksploatowane (rys. 1) [1-5].

Analizując wytrzymałość połączenia klejowego, najczęściej brane są pod uwagę czynniki, które należą do grupy czynników technologicznych i konstrukcyjnych. Autorzy wielu prac skupiają się na analizie wpływu przygotowania powierzchni łączonych materiałów na wytrzymałość utworzonego złącza. Etap ten jest bardzo ważny z punktu widzenia jakości połączenia klejowego. Stosowanie odpowiedniego przygotowania powierzchni ma na celu możliwie najpełniejsze wykorzystanie właściwości adhezyjnych kleju do konkretnego elementu łączonego, zwłaszcza jego właściwości fizykochemicznych. Jak wskazują liczne badania, sposób przygotowania powierzchni jest czynnikiem, który istotnie wpływa na zwilżalność i wartość swobodnej energii powierzchniowej materiału. [6-9].

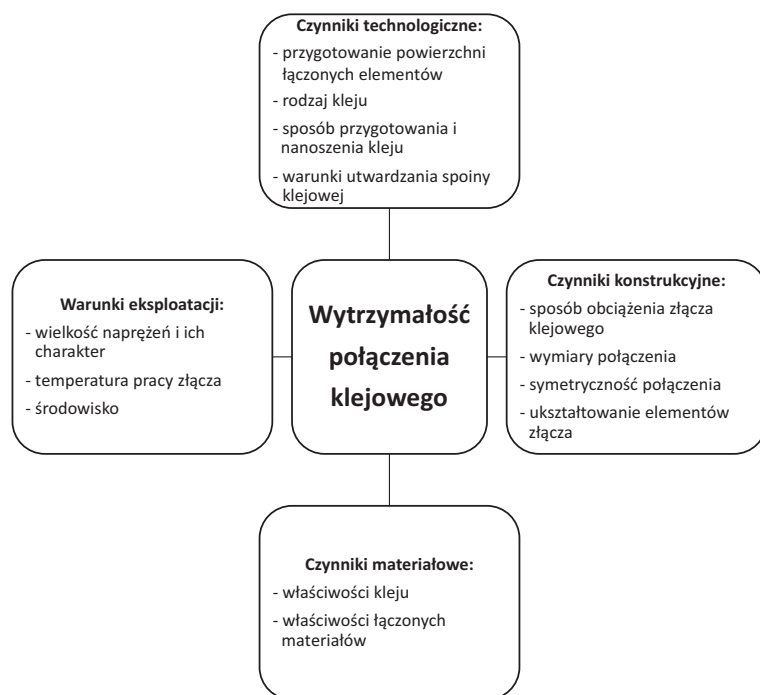
W połączeniach klejowych ważne jest, aby powierzchnie charakteryzowały się wysoką swobodną energią powierzchniową, co zapewnia uzyskanie wytrzymałego złącza klejowego. W procesie zapewnienia maksymalnych sił adhezji na granicy faz kleju i materiału łączonego istotne jest również, aby energia powierzchniowa kleju,

który zwilża materiał, była niższa od swobodnej energii powierzchniowej ciała zwilżanego. Ważne jest również zachowanie odpowiednich proporcji pomiędzy składowymi swobodnej energii powierzchniowej cieczy i ciała stałego [10]. Dla zapewnienia odpowiedniej zwilżalności i właściwości adhezyjnych istotne jest nie tylko określenie energii powierzchniowej modyfikowanej warstwy materiału, ale również poznanie składowych swobodnej energii powierzchniowej kleju. Znając właściwości energetyczne kleju i materiału na który będzie nanoszona kompozycja klejowa, można w dalszym kroku, bez konieczności przeprowadzania badań niszczących, określić prawidłowość doboru kleju w aspekcie zdolności zwilżania do łączonych określonych materiałów.

### Metodyka badań

Swobodna energia powierzchniowa została wyznaczona dla dwóch kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczami PAC oraz Z1 w stanie ciekłym. Wartość swobodnej energii powierzchniowej wyznaczono na podstawie pomiarów napięcia powierzchniowego mieszanek żywicy epoksydowej z utwardzaczami, stosując metodę wiszącej kropli. W tym celu żywicę epoksydową Epidian 5 połączono z utwardzaczem PAC w stosunku masowym 1:1, natomiast z utwardzaczem Z1 w stosunku 10:1. Po wymieszaniu składników za pomocą strzykawki przez przekręcenie śruby regulacyjnej o 180°, dozowano kroplę o objętości 20  $\mu$ l i wykonano pomiary napięcia powierzchniowego. Ze względu





Rys. 1. Czynniki wpływające na wytrzymałość połączenia klejowego  
Fig. 1. Factors influencing the strength of the adhesive joint

Tabela 1. Średnie wyniki pomiarów kąta zwilżania oraz wartości swobodnej energii powierzchniowej stali DC01 otrzymane metodą Owens-Wendta  
Table 1. The average results of contact angle measurements and the value of surface free energy of S235JR steel obtained by the Owens-Wendt method

STAL DC01				
Średni kąt zwilżania [°]		Metoda Owens-Wendta		
Woda	Dijodometan	Swobodna energia powierzchniowa [mJ/m <sup>2</sup> ]	Część polarna [mJ/m <sup>2</sup> ]	Część niepolarna [mJ/m <sup>2</sup> ]
92,2	57,5	30,3	2,0	28,3

Tabela 2. Uśrednione wartości pomiarów kąta zwilżania oraz wyznaczona wartość swobodnej energii powierzchniowej i jej składowe dla wybranych klejów epoksydowych  
Table 2. The average values of contact angle measurements and determined values of the surface free energy and its components for the chosen epoxy adhesives

Kompozycja klejowa	Średni kąt zwilżania [°]	Całkowita swobodna energia powierzchniowa [mJ/m <sup>2</sup> ]	Część polarna [mJ/m <sup>2</sup> ]	Część niepolarna [mJ/m <sup>2</sup> ]
Epidian 5 + PAC 1:1	85,1	39,6	33,3	6,3
Epidian 5 + Z1 10:1	73,3	36,6	27,4	9,2

na krótki czas przydatności mieszanek klejowych, wykonano po 20 pomiarów napięcia powierzchniowego dla obu założonych klejów epoksydowych.

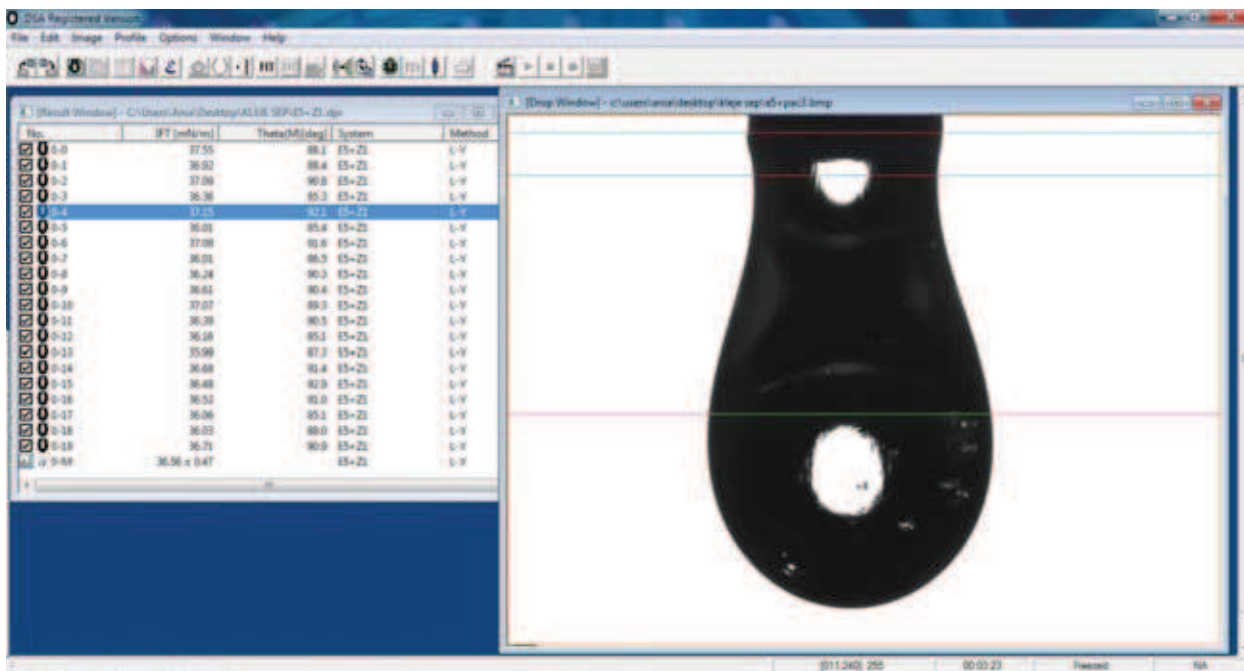
W celu określenia składowych swobodnej energii powierzchniowej wykonano pomiary kąta zwilżania dla założonych klejów epoksydowych na materiale o znanych właściwościach energetycznych, na podstawie których wyznaczono krzywe zwilżania, pozwalające na określenie przybliżonej wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej. Przed przystąpieniem do pomiarów kąta zwilżania dla założonych klejów epoksydowych wyznaczono swobodną energię powierzchniową materiału bazowego stosując metodę Owens-Wendta. Na próbce materiału bazowego – stali DC01 umieszczano krople wody oraz diiodometanu o pojemności 4 µl. Dla każdej z cieczy pomiarowych wykonano po 30 pomiarów kąta zwilżania. W tab. 1 przedstawiono otrzymane średnie kąty zwilżania oraz obliczoną swobodną energię powierzchniową stali DC01.

Po wykonaniu pomiarów napięcia powierzchniowego i obliczeniu swobodnej energii powierzchniowej materiału bazowego przystąpiono do wyznaczenia składowych swobodnej energii powierzchniowej kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z dwoma utwardzaczami PAC oraz Z1. Wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej wyznaczono, jako punkt przecięcia prostej, reprezentującej uśrednioną wartość 20 przeprowadzonych pomiarów napięcia powierzchniowego z krzywą zwilżania wyznaczoną na podstawie uśrednionej wartości 20 pomiarów kąta zwilżania, wyznaczonego dla odpowiedniego kleju epoksydowego na powierzchni stali DC01.

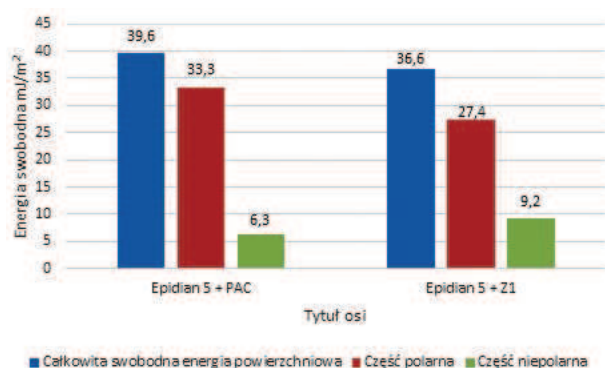
Pomiary napięcia powierzchniowego, kąta zwilżania kropelek kleju na stali DC01 oraz kąta zwilżania dwiema cieczami dla materiału bazowego wykonano na urządzeniu DSA30 firmy KRÜSS, z wykorzystaniem automatycznego modułu pozyskiwania i analizy wyników.

#### Wyniki pomiarów

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów napięcia powierzchniowego określono wartość swobodnej energii powierzchniowej kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC



Rys. 2. Tabela pomiarów napięcia powierzchniowego dla kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem Z1  
 Fig. 2. Table of surface tension for composition Epidian 5 epoxy resin and Z1 hardener



Rys. 3. Zestawienie wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych dla badanych klejów epoksydowych  
 Fig. 3. Summary of values surface free energy and its components for the tested epoxy adhesives

oraz Z1. Na rys. 2 przedstawiono przykładową tabelę pomiarów napięcia powierzchniowego.

W tab. 2 oraz na rys. 3 przedstawiono otrzymane uśrednione wartości kąta zwilżania oraz odpowiadające im wartości swobodnej energii powierzchniowej i przybliżone wartości składowych dla analizowanych mieszanek klejowych, wyznaczonych jako punkt przecięcia krzywej zwilżania i prostej, odpowiadającej wartości swobodnej energii powierzchniowej.

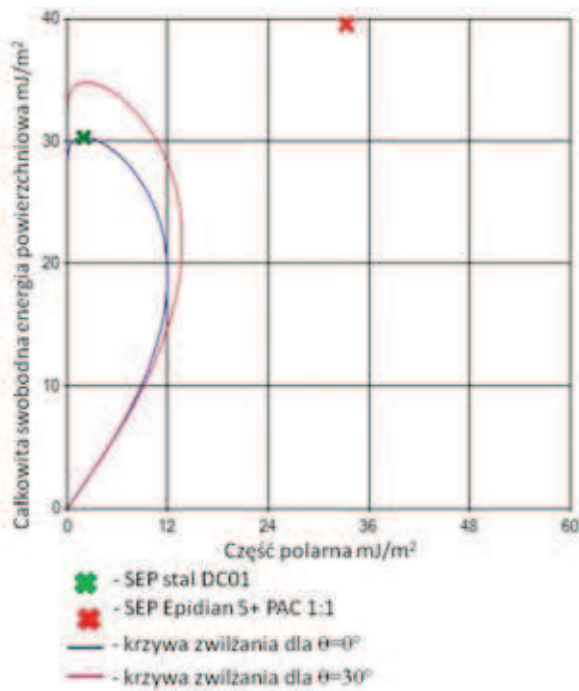
Z przedstawionego wykresu (rys. 3) wynika, że żywica epoksydowa Epidian 5 wymieszana z utwardzaczem PAC charakteryzuje się większą całkowitą swobodną energią powierzchniową w porównaniu do mieszanki żywicy z utwardzaczem Z1. Całkowita swobodna energia powierzchniowa kleju epoksydowego na

bazie żywicy Epidian 5 z utwardzaczem PAC wynosi 39,6 mJ/m<sup>2</sup>, a z utwardzaczem Z1 36,6 mJ/m<sup>2</sup>. Porównując składowe swobodnej energii powierzchniowej, decydujące o jakości połączenia stwierdzono, że składowa polarna mieszanki żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC przyjmuje wartość 33,3 mJ/m<sup>2</sup>, co stanowi ok. 84,1% całkowitej wartości swobodnej energii powierzchniowej. Kompozycja żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem Z1 charakteryzuje się niższą wartością składowej polarnej wynoszącą 27,4 mJ/m<sup>2</sup>, a jej udział w wartości całkowitej swobodnej energii powierzchniowej wynosi 74,9%. Wartość składowej niepolarniej mieszanki żywicy epoksydowej z utwardzaczem Z1 jest wyższa niż z utwardzaczem PAC i wynosi 9,2 mJ/m<sup>2</sup>.

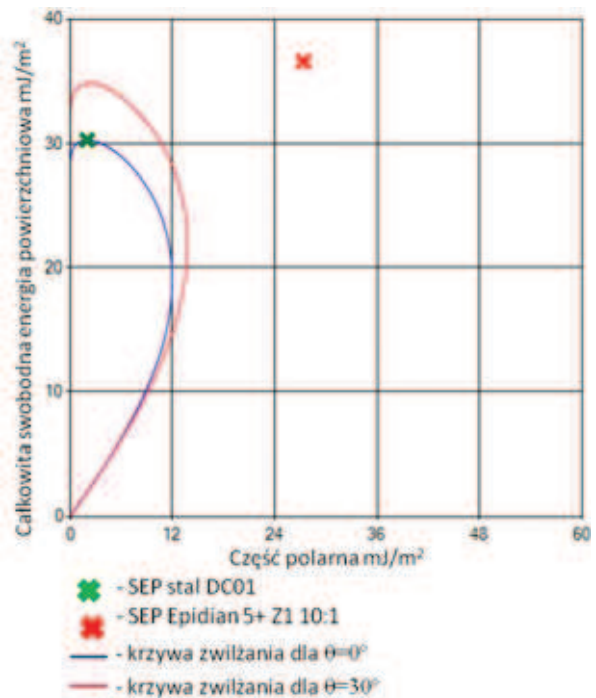
Na podstawie określonych składowych swobodnej energii powierzchniowej stali DC01 wyznaczono krzywe zwilżania przedstawiające zakres wartości swobodnej energii powierzchniowej, w tym jej składowych, jakie powinien mieć materiał zwilżany, aby osiągnąć najbardziej korzystne warunki zwilżania przez badane kompozycje (rys. 4-6).

Analizując krzywe zwilżania wyznaczone dla stali DC01 oraz krzywe napięcia międzyfazowego można określić swobodną energię powierzchniową i jej składowe, cieczy zwilżającej, zapewniającej najbardziej korzystne warunki zwilżania lub zwilżanie z określoną wartością kąta zwilżania, uwzględniając osiągnięcie minimalnego napięcia międzyfazowego.

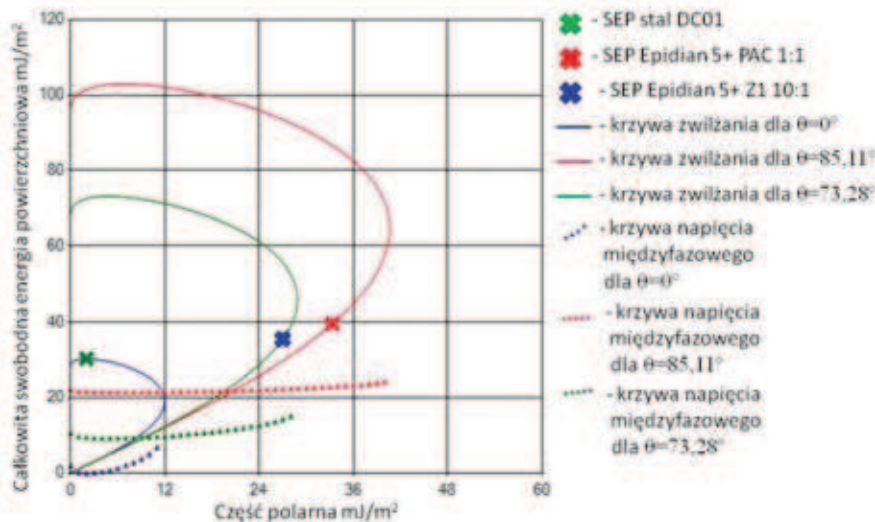
W przypadku zwilżania najbardziej skutecznego, cechy energetyczne kleju powinny znajdować się na krzywej zwilżania oznaczonej kolorem niebieskim (rys. 6), a napięcie międzyfazowe powinno przyjąć wartość minimalną. W przypadku łączenia stali DC01 klejem



Rys. 4. Krzywe zwilżania wyznaczone dla stali DC01 z zaznaczoną wartością swobodnej energii powierzchniowej kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC  
Fig. 4. The wetting envelopes determined for DC01 steel with marked value of surface free energy of composition Epidian 5 epoxy resin and PAC hardener



Rys. 5. Krzywe zwilżania wyznaczone dla stali DC01 z zaznaczoną wartością swobodnej energii powierzchniowej kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem Z1  
Fig. 5. The wetting envelopes determined for DC01 steel with marked value of surface free energy of composition Epidian 5 epoxy resin and Z1 hardener



Rys. 6. Krzywe zwilżania oraz krzywe napięcia międzyfazowego wyznaczone dla stali DC01 z zaznaczonymi wartościami swobodnej energii powierzchniowej badanych klejów epoksydowych  
Fig. 6. The wetting envelopes and interfacial tension curves determined for DC01 steel with marked values of surface free energy of the tested epoxy adhesives

zapewniającym lepsze zwilżanie powierzchni materiału jest klej na chemicznej podstawie żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem Z1. Wyznaczona krzywa napięcia międzyfazowego dla kąta wynoszącego  $\theta=73,3^\circ$  osiąga wartość minimalną równą 9,3 mN/m. Wartość napięcia

międzyfazowego w miejscu odnoszącym się do punktu wyznaczonego przez swobodną energię powierzchniową i składową polarną dla kleju z utwardzaczem Z1 wynosi 19,8 mN/m.

Punkt wyznaczony przez składowe swobodnej energii powierzchniowej dla kleju epoksydowego na chemicznej podstawie żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC jest oddalony od punktu wyznaczonego dla mieszanki żywicy z utwardzaczem Z1 o wartość całkowitej swobodnej energii powierzchniowej równą 3 mJ/m<sup>2</sup> oraz wartość składowej polarnej wynoszącą 5,9 mJ/m<sup>2</sup>. Krzywa napięcia międzyfazowego wyznaczona dla kąta zwilżania  $\theta=85,11^\circ$

osiąga minimalną wartość równą 21,5 mN/m. Natomiast wartość napięcia międzyfazowego dla punktu wyznaczonego przez swobodną energię powierzchniową i składową polarną dla kompozycji żywicy z utwardzaczem PAC wynosi 26,5 mN/m. Osiągnięcie najlepszych właściwości



adhezyjnych podczas klejenia mieszanką żywicy epoksydowej z utwardzaczem PAC można otrzymać zmniejszając wartości całkowitej swobodnej energii powierzchniowej kleju epoksydowego oraz składowej polarnej, aż do osiągnięcia minimalnego napięcia międzyfazowego lub zastosować odpowiedni sposób przygotowania powierzchni, zwiększający swobodną energię powierzchniową – szczególnie składową polarną.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania pomiarów napięcia powierzchniowego dla wybranych dwóch klejów epoksydowych, pozwoliły na określenie wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych. Było to możliwe dzięki wykorzystaniu materiału, dla którego wcześniej wyznaczono wartość swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych. Kompozycja żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC charakteryzuje się większą wartością całkowitej swobodnej energii powierzchniowej oraz składową niepolarną w porównaniu do kompozycji z utwardzaczem Z1. Wartość całkowita swobodnej energii powierzchniowej kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC wynosi  $39,6 \text{ mJ/m}^2$ , a jej składowa polarna  $33,3 \text{ mJ/m}^2$ . Natomiast dla kompozycji z utwardzaczem Z1 odpowiednio  $36,6 \text{ mJ/m}^2$  oraz  $27,4 \text{ mJ/m}^2$ . Porównując udział wartości składowej niepolarnej w wartości całkowitej swobodnej energii powierzchniowej można zauważyć, że w przypadku kompozycji z utwardzaczem PAC udział składowej polarnej jest większy i wynosi ok. 84,1%.

W procesie klejenia, w korzystnym przypadku relacji energetycznych kleju i materiału łączonego, energia powierzchniowa kleju, który zwilża materiał, powinna być niższa od swobodnej energii powierzchniowej ciała zwilżanego. Uwzględniając fakt, iż klej epoksydowy jest substancją o właściwościach polarnych, ważne jest zachowanie jak najmniejszej różnicy między wartością swobodnej energii powierzchniowej kleju i ciała stałego oraz zachowanie odpowiednich proporcji pomiędzy składowymi. Umożliwia to osiągnięcie jak najlepszych właściwości adhezyjnych.

W celu zapewnienia odpowiedniego zwilżania oraz osiągnięcia jak najlepszych właściwości adhezyjnych punkt wyznaczony przez całkowitą swobodną energię powierzchniową oraz składową polarną cieczy zwilżającej powinien znajdować się jak najbliżej krzywej wyznaczającej jak najkorzystniejsze zwilżanie. Punkty znajdujące się nad krzywą tego nie zapewniają, a w miarę zbliżania się do początku układu współrzędnych polepsza się zwilżalność materiału. Ważne jest również, aby osiągnąć minimalne napięcie międzyfazowe między cieczą a ciałem stałym dla określonego kąta zwilżania.

Wyznaczone składowe swobodnej energii powierzchniowej stali DC01 posłużyły do opracowania krzywych zwilżania, zawierających punkty wyznaczone przez składowe swobodnej energii powierzchniowej obu

analizowanych klejów epoksydowych. Analizując zdolność zwilżania należy stwierdzić, że bardziej odpowiednim klejem do wykonywania połączeń jest klej na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5 i utwardzacza Z1. Wartość swobodnej energii powierzchniowej tej kompozycji jest bardziej zbliżona do wartości swobodnej energii powierzchniowej stali DC01 niż kompozycji żywicy z utwardzaczem PAC. Napięcie międzyfazowe odnoszące się do punktu wyznaczonego przez wartość swobodnej energii powierzchniowej kleju epoksydowego z utwardzaczem Z1 wynosi  $9,3 \text{ mN/m}$ , natomiast dla kleju epoksydowego z utwardzaczem PAC  $21,53 \text{ mN/m}$ . Analizując różnice między minimalnymi wartościami napięcia międzyfazowego wyznaczonymi dla odpowiednich kątów zwilżania a wartościami wyznaczonymi dla punktów odnoszących się do wartości swobodnej energii powierzchniowej i składowej polarnej klejów można zauważyć, że w przypadku kleju epoksydowego z utwardzaczem PAC, różnica między tymi wartościami jest mniejsza niż dla kleju epoksydowego z utwardzaczem Z1.

Łączenie materiałów kompozycją żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC wymaga zastosowania odpowiedniego sposobu przygotowania powierzchni. Ma ono na celu zwiększenie wartości swobodnej energii powierzchniowej materiału do takiego stanu, aby odpowiadał on punktowi, który leży najbliżej wyznaczonej krzywej zwilżania określanego jako najbardziej korzystne dla stosowanego kleju epoksydowego. Tak określona wartość swobodnej energii powierzchniowej zapewni uzyskanie optymalnych właściwości adhezyjnych i utworzenie wytrzymałego połączenia.

Znajomość właściwości energetycznych klejów epoksydowych umożliwi przeprowadzenie analizy prawidłowości doboru środka łączącego materiały, szczególnie w przypadku klejenia materiałów różniących się właściwościami energetycznymi. Pozwoli również na weryfikację prawidłowości zastosowania odpowiedniego sposobu przygotowania powierzchni materiałów w celu zapewnienia dobrego zwilżania przez klej, co jest istotne z uwagi na wytrzymałość połączenia adhezyjnego [11].

## LITERATURA

- [1] Domińczuk J., A. Serwin. 2014. „Analiza stanu energetycznego warstwy wierzchniej stali OH18N9T i poliamidu PA6 po wybranych sposobach przygotowania powierzchni do klejenia”. *Technologia i Automatyka Montażu* (4): 42–46.
- [2] Domińczuk J. 2011. „Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej wybranych materiałów konstrukcyjnych”. *Postępy Nauki i Techniki* (9): 28–37.
- [3] Domińczuk J. 2012. „Wpływ stanu energetycznego warstwy wierzchniej na wytrzymałość połączenia adhezyjnego”. *Postępy Nauki i Techniki* (13): 30–36.
- [4] Domińczuk J. 2011. „Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych”. *Postępy Nauki i Techniki* (10): 14–26.



- [5] Kłonica M., J. Kuczmaszewski. 2012. „Wpływ stężenia ozonu na stan energetyczny warstwy wierzchniej stopu tytanu Ti-6Al-4V”. *Inżynieria Materiałowa* (4): 328–332.
- [6] Krawczuk A., J. Domińczuk. 2015. „Analiza możliwości wykorzystania krzywych zwilżania do optymalizacji procesów adhezyjnych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 43–47.
- [7] Kuczmaszewski J. 2006. “Fundamentals of metal-metal adhesive joint design”. Lublin University of Technology: Polish Academy of Sciences.
- [8] Kuczmaszewski J. 1995. „Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali”. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [9] Lucas F.M. da Silva et al. 2009. „Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (6): 621–632.
- [10] Mirski Z., T. Piwowarczyk. 2008. „Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości”. *Przegląd Spawalnictwa* (8): 12–21.
- [11] Rudawska A., M. Czarnota. 2011. „Wpływ operacji odtłuszczenia na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych”. *Postępy Nauki i Techniki* (8): 137–147.

---

Dr inż. Jacek Domińczuk – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: j.dominczuk@pollub.pl

Mgr inż. Anna Krawczuk – Wydziału Inżynierii Produkcji, Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, e-mail: anna.krawczuk@up.lublin.pl

Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl

# WPLYW OBRÓBKI MECHANICZNEJ POWIERZCHNI NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH ZE STALI ODPORNEJ NA KOROZJĘ

## *The influence of the mechanical surface treatment on the stainless steel sheets bonded joints strength*

Anna RUDAWSKA, Natalia ŚCIUBA, Dana STANČEKOVÁ

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano fragment badań, związanych z mechanicznym przygotowaniem powierzchni blach ze stali odpornej na korozję do klejenia. Badaniom poddano próbki połączeń klejowych jednozakładkowych, w których powierzchnie blach ze stali nierdzewnej przygotowano przy użyciu obróbki mechanicznej ściernymi narzędziami nasypowymi o różnej ziarnistości (P120, P320, P500) oraz za pomocą odtłuszczenia środkiem odtłuszczającym Loctite 7063. Do klejenia wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Loctite Hysol 9466 A&B. W badaniach doświadczalnych wykonano pomiary chropowatości powierzchni, badania wytrzymałościowe oraz przeprowadzono analizę statystyczną rezultatów badań. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań stwierdzono, iż największą wytrzymałość połączeń klejowych uzyskano po obróbce ściernym narzędziem nasypowym o wielkości ziarna P120, a najmniejszą po użyciu papieru ściernego P500. Dokonana analiza statystyczna pozwoliła na stwierdzenie, że po obróbce papierami ściernymi P120 i P320 brakuje statystycznie istotnych różnic pomiędzy wartościami wytrzymałości na przyjętym poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ . Ponadto zauważono również, że wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni, rośnie również wytrzymałość połączenia klejowego.

**Słowa kluczowe:** połączenia klejowe, wytrzymałość, obróbka mechaniczna

**Abstract:** The article shows a fragment of the studies related to the mechanical surface treatment of stainless steel sheet surfaces for bonding. The samples of single lap bonded joints were tested. The stainless steel sheet surfaces were prepared by mechanical treatment using grinding tools of various grain size (P120, P320, P500) and by degreasing using the Loctite 7063 agent degreasing. Loctite Hysol 9466 A&B two-component epoxy adhesive was used for preparing bonded joints. The surface roughness measurements, strength tests was carried out in the experimental studies and statistical analysis the research results was made.

On the basis of the analysis of the test results, it was found that the greatest strength of the bonded joints is obtained after treatment with P120 grinding tool, meanwhile the least – after using P500 grinding tool. Carried out statistical analysis has allowed to find that after P120 and P320 grinding tools treatment is a lack of statistically significant differences between the values of the strength on the accepted confidence  $\alpha = 0.05$ . In addition, it was also noted that with increasing surface roughness, also the strength of the bonded joints was increased.

**Keywords:** adhesive joints, strength, mechanical treatment

### Wprowadzenie

Klejenie pozwala na tworzenie połączeń wytrzymałych i funkcjonalnych, a coraz szersze doskonalenie klejów sprawia, że są one częściej stosowane w różnych gałęziach przemysłu [1, 2]. Wytrzymałość jest podstawowym parametrem, charakteryzującym właściwości połączenia klejowego i oznacza zdolność do przenoszenia obciążeń, jakie oddziałują na spoinę klejową. Na wytrzymałość połączeń wpływa wiele czynników konstrukcyjnych, technologicznych oraz eksploatacyjnych. Do czynników konstrukcyjnych można zaliczyć: sposób obciążenia, kształt i wymiar połączenia, a także wielkość spoiny. Do czynników technologicznych wlicza się: sposób przygotowania powierzchni klejonych materiałów, rodzaj kleju i technika jego nanoszenia oraz warunki utwardzania spoiny klejowej [3-5].

W artykule zwrócono uwagę na pierwszy etap technologii klejenia, jakim jest sposób przygotowania powierzchni. Właściwa obróbka powierzchni zwiększa

przyczepność kleju do powierzchni łączonych elementów, dzięki czemu następuje zwiększenie wiązań adhezyjnych. Celem pracy jest określenie wpływu sposobu przygotowania powierzchni blach ze stali odpornej na korozję przez zastosowanie obróbki mechanicznej i odtłuszczenia na wytrzymałość połączeń klejowych tych blach.

### Metodyka badań

#### Przedmiot badań

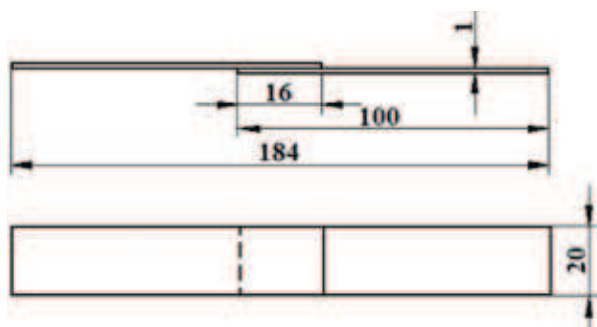
Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali odpornej na korozję, wg normy PN-EN 10088, o oznaczeniu X5CrNi1810/1.4301 [6]. Jest to jedna z najczęściej używanych gatunków stali odpornej na korozję ze względu na liczne zalety [7]. W tab. 1 przedstawiono właściwości mechaniczne stali X5CrNi1810 [6].

Przedmiotem badań były połączenia klejowe jednozakładkowe blach ze stali odpornej na korozję, których schemat przedstawiono na rys. 1.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne stali odpornej na korozję X5CrNi1810 [6]

Table 1. Mechanical properties of X5CrNi1810 stainless steel [6]

Właściwości mechaniczne	Oznaczenie	Wartość
Granica plastyczności	$R_{p0,2}$	230 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	$R_m$	540–750 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	A	45%
Twardość	-	215 HB



Rys. 1. Połączenie klejowe jednozakładkowe blach ze stali odpornej na korozję

Fig. 1. The single-lap bonded joint of stainless steel sheets

Grubość blach wynosiła 1 mm, szerokość 20 mm, długość 100 mm, natomiast długość zakładki połączenia klejowego przyjęto na 16 mm.

#### Charakterystyka sposobu przygotowania powierzchni

Powierzchnie próbek zostały poddane obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym o wielkości ziaren P120, P320 i P500 oraz odtłuszczeniu środkiem odtłuszczającym Loctite 7063, wykonanym po obróbce mechanicznej. Chropowacenie powierzchni papierami ściernymi polegało na wykonaniu na każdej z próbek trzydziestu okrężnych ruchów. Następnie przeprowadzono odtłuszczenie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063, które miało na celu oczyszczenie i odtłuszczenie powierzchni próbek przed procesem klejenia. Odtłuszczenie pozwoliło na usunięcie pozostałości we wgłębieniach, powstałych na skutek obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi.

Odtłuszczenie przebiegało w kilku etapach:

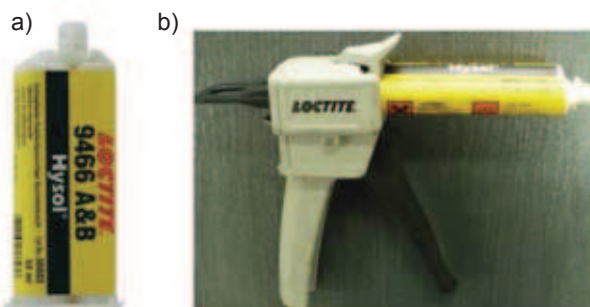
- rozpylono środek odtłuszczający w miejscu przeznaczonym do klejenia,
- oczyszczono wilgotne powierzchnie czystym ręcznikiem do sucha w celu usunięcia zanieczyszczeń,
- czynności te powtórzono dwukrotnie, przy czym po ostatnim nałożeniu odtłuszczacza pozostawiono środek do odparowania (ok. 1 min).

Po przygotowaniu powierzchni wyschnięciu środka odtłuszczającego, przystąpiono do aplikacji kleju oraz

wykonania czynności montażowych – odpowiedniego ustalenia obu łączonych elementów, wykorzystując przyrząd ustalający [8].

#### Klej

Do łączenia blach ze stali odpornej na korozję, wykorzystano klej dwuskładnikowy Loctite Hysol 9466 A&B [9] (rys. 2).



Rys. 2. a) Klej Loctite Hysol 9466 A&B, b) klej umieszczony w dozowniku

Fig. 2. a) Loctite Hysol 9466 A&B adhesive, b) adhesive placed in feeder

Klej Loctite Hysol 9466 A&B jest umieszczony w podwójnym opakowaniu (2 kartusze), które dostosowano do urządzenia dozującego w formie pistoletu. Dzięki temu można precyzyjnie odmierzać odpowiednie proporcje żywicy i utwardzacza oraz przygotować klej przed użyciem. Do mieszania kleju użyto mieszadła statycznego. Następnie po dokładnym wymieszananiu jego składników (żywicy i utwardzacza), klej nakładano na jedną z łączonych powierzchni. W trakcie wykonywania połączenia dostosowano się do zaleceń producenta odnośnie czasu przydatności przygotowanego kleju, w którym klej nie zmienia swoich właściwości.

#### Warunki wykonania i badania połączeń klejowych

Warunki technologiczne, w których wykonano połączenia klejowe były następujące:

- temperatura otoczenia:  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,
- wilgotność względna powietrza: 31–32%,
- nacisk podczas utwardzania: 0,03 MPa.

Utwardzanie próbek odbywało się w takiej samej temperaturze i wilgotności jak podczas ich klejenia. Czas ten wyniósł 48 godz. Następnie przeprowadzono badania wytrzymałościowe, dzięki którym określono wytrzymałość połączeń na ścinanie.

Badania doświadczalne, w których połączenia klejowe jednozakładkowe uległy zniszczeniu, przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [10], przy prędkości badania 5 mm/min. Próbki umocowano w specjalnym uchwycie maszyny wytrzymałościowej, co zobrazowano na rys. 3.



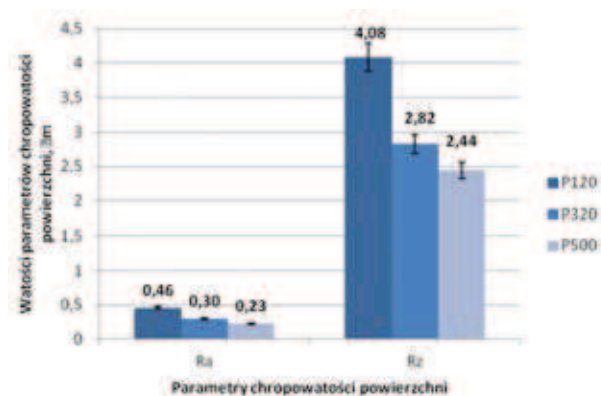
Rys. 3. Zamocowane połączenie klejowe w maszynie wytrzymałościowej

Fig. 3. Bonded joint fixed in the strength device

Badaniom wytrzymałościowym poddano od 8 do 12 połączeń klejowych w 3 seriach dla każdego sposobu przygotowania powierzchni.

#### Badania chropowatości powierzchni

W celu określenia parametrów struktury geometrycznej powierzchni przeprowadzono pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni. Do oceny chropowatości powierzchni wykorzystano 9 próbek ze stali nierdzewnej. Pomiaram poddano 3 serie po 3 próbki, przy czym każda z tych serii została poddana obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym P120, P320 i P500. Następnie dokonano pomiarów na każdej z tych próbek, łącznie po 9 z każdej partii, stosownie do sposobu przygotowania powierzchni. Pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni wykonano z wykorzystaniem profilografometru Perthometr 2 firmy Mahr.



Rys. 4. Średnie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni stali odpornej na korozję po obróbce mechanicznej

Fig. 4. Mean value of selected surface roughness parameters of stainless steels after mechanical treatment

#### Analiza statystyczna

W oparciu o właściwe hipotezy i testy statystyczne zawarte w literaturze [11] przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników wytrzymałościowych. Obliczono średnie wartości wytrzymałości po odrzuceniu skrajnych wartości. Do porównania wartości średnich badanej cechy w dwóch populacjach generalnych użyto testów istotności, w których brany jest pod uwagę błąd pierwszego rodzaju. Błąd ten nazywany jest poziomem istotności. W przeprowadzonej analizie wynosi on  $\alpha = 0,05$ . Istota tych testów opiera się na odrzuceniu sprawdzanej hipotezy, jeżeli jest ona prawdziwa. Badania przeprowadzono dla próbek zawierających po 8–12 elementów. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano test F-Snedecora, t-Studenta, C-Cochrana i Coxa oraz właściwe modele statystyczne [11].

#### Wyniki badań

##### Rezultaty badań chropowatości powierzchni

Wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni zaprezentowano na rys. 4. Analizując wyniki tych badań stwierdzono, że zastosowanie obróbki narzędziem nasypowym o wielkości ziaren P120, pozwala na uzyskanie największych wartości średnich parametrów chropowatości powierzchni Ra ( $0,46 \pm 0,06 \mu\text{m}$ ) oraz Rz ( $4,08 \pm 0,53 \mu\text{m}$ ). W przypadku wartości parametrów chropowatości powierzchni po obróbce papierem ściernym P320, można zauważyć zmniejszenie wartości parametrów chropowatości względem poprzedniej obróbki. Stosując papier ścierny P320 otrzymano wartości średnie Ra =  $0,30 \pm 0,04 \mu\text{m}$  i Rz =  $2,82 \pm 0,41 \mu\text{m}$ . Natomiast najniższe wartości parametrów chropowatości powierzchni otrzymano przy obróbce papierem ściernym P500 (Ra =  $0,23 \pm 0,03 \mu\text{m}$  i Rz =  $2,44 \pm 0,17 \mu\text{m}$ ). Również w tym wariancie przygotowania powierzchni otrzymano dobrą powtarzalność wyników chropowatości.

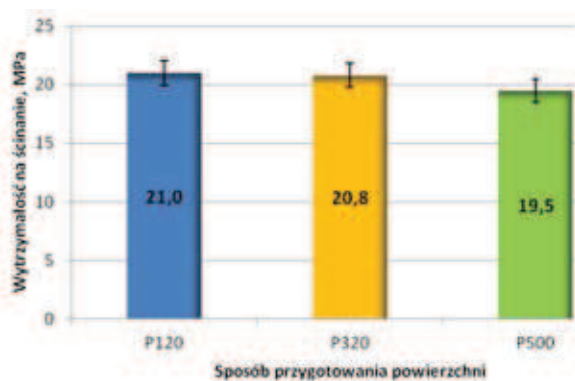
##### Wytrzymałość połączeń klejowych

Otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję, których powierzchnie poddano trzem wybranym badaniom obróbki mechanicznej, zamieszczono na rys. 5.

Rozpatrując wyniki badań przedstawionych na rys. 5 zauważono, że:

- 1) w przypadku obróbki papierem ściernym P120 średnia wytrzymałość na ścinanie wynosi 21,0 MPa, natomiast odchylenie standardowe 0,75 MPa, przy czym jest to największa uzyskana wartość wytrzymałości spośród badanych wariantów przygotowania powierzchni,
- 2) drugą co do wartości wytrzymałością charakteryzowały się próbki, których powierzchnie poddano





Rys. 5. Średnia wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję po obróbce ściernymi narzędziami nasypowymi: P120, P320 oraz P500

Fig. 5. The shear strength of stainless steel sheets bonded joints after treatment of P120, P320 and P500 grinding tools

obróbce papierem ściernym P320, wartość wytrzymałości na ścinanie wyniosła  $20,8 \pm 0,85$  MPa,

- 3) stosując obróbkę mechaniczną papierem ściernym P500, otrzymano najmniejszą wytrzymałość równą  $19,5 \pm 0,77$  MPa.

Ponadto można zauważyć, iż dla rozpatrywanych wariantów przygotowania powierzchni otrzymano dobrą powtarzalność wyników wytrzymałości. Można sądzić, że zastosowana technologia przygotowania powierzchni oraz inne czynniki technologiczne pozwolą na uzyskanie zbliżonych wartości wytrzymałości. Ze względu na niewielkie różnice otrzymanych wartości wytrzymałości, wyniki poddano analizie statystycznej.

#### Omówienie wyników badań

#### Omówienie pomiarów chropowatości powierzchni

W wyniku analizy (rys. 4) rezultatów stwierdzono, że wraz ze zmniejszeniem się wielkości ziarna zmniejsza się chropowatość. Po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P120 jest ona dwa razy większa, niż w przypadku chropowatości po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500. Im większa jest chropowatość, tym zostają

bardziej zwilżone wgłębienia nierówności powierzchni, dzięki czemu połączenie jest bardziej trwałe, tak jak pokazują uzyskane w tej pracy wyniki badań wytrzymałości na ścinanie. Należy zwrócić uwagę na przedstawione w pracy [2] informacje, że zbyt duże schropowacenie powierzchni może wywołać wzrost koncentracji naprężeń, a następnie wpłynąć negatywnie na wytrzymałość połączenia.

Badania wykazały, że po zastosowaniu obróbki mechanicznej nastąpiło zwiększenie chropowatości próbek, przez co powiększyła się rzeczywista powierzchnia zwilżania, a zagadnienie to opisane jest m.in. w pracach [1, 2]. Otrzymana struktura ma znaczący wpływ na wnikanie masy klejowej w powstałe nierówności oraz w rezultacie wpływa na wytrzymałość połączenia klejowego.

#### Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych

Po przeanalizowaniu wyników zaprezentowanych na rys. 5 można zauważyć, że największą wytrzymałość na ścinanie wykazują połączenia klejowe, w których powierzchnie łączonych elementów zostały poddane obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym o ziarnistości P120. Jednak zauważa się, że w badanych przypadkach obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi, różnice w uzyskanych wynikach wytrzymałości są niewielkie. Wytrzymałość połączeń klejowych po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500, stanowi prawie 93% wytrzymałości połączeń po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P120. Ze względu na niewielkie różnice wartości wytrzymałości przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań, której wyniki zamieszczono w tab. 2.

Na podstawie uzyskanych wyników analizy statystycznej można stwierdzić, iż wytrzymałość połączeń klejowych po obróbce papierem ściernym P120 i P320 nie wykazuje statystycznie istotnych różnic na przyjętym poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ . Natomiast wytrzymałość połączeń klejowych po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500 statystycznie różni się od pozostałych. W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, iż korzystne jest wykorzystanie narzędzia nasypowego o wielkości ziarna P120 oraz P320 do obróbki

Tabela 2. Wyniki analizy statystycznej uzyskanych wyników badań  
Table 2. Statistical analysis of test results

Nr	Wartość statystyki $F_{obl}$	Wartość statystyki $F_{\alpha}$	Wniosek	Wartość statystyki $T_{obl}$	Wartość statystyki $F_{\alpha}$	Wniosek
1–2	1,78	3,18	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,531	1,734	$m_1 = m_2$
2–3	1,22	3,18	$\sigma_2^2 = \sigma_3^2$	3,427	1,734	$m_2 \neq m_3$
1–3	1,95	3,18	$\sigma_1^2 = \sigma_3^2$	4,201	1,734	$m_1 \neq m_3$

gdzie:

$\sigma^2$  – wariancja,

$m$  – średnia.

mechanicznej stali nierdzewnej w celu uzyskania znacznej wytrzymałości połączenia.

#### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można stwierdzić, iż największą wytrzymałość połączenia uzyskano po obróbce ściernym narzędziem nasypowym o wielkości ziarna P120, natomiast najmniejszą po użyciu papieru ściernego P500. Zauważono jednak, że pomiędzy wynikami nie występują duże rozbieżności, gdyż wytrzymałość po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500, stanowi 93% wytrzymałości po obróbce papierem ściernym P120. Po przeprowadzeniu analizy statystycznej stwierdzono, że po obróbce papierami ściernymi P120 i P320 nie ma istotnych różnic pomiędzy wartościami wytrzymałości na przyjętym poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ . W każdym wariancie przygotowania powierzchni zauważono dobrą powtarzalność wyników, co świadczy o tym, iż zastosowanie obróbki mechanicznej papierem ściernym, umożliwi otrzymanie porównywalnych wartości, co uzależnione jest także od przyjętej technologii tej obróbki. Zauważono także, że wraz ze wzrostem chropowatości, rośnie również wytrzymałość połączenia, co potwierdza wpływ przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń.

Podsumowując, przygotowanie powierzchni przy użyciu mechanicznej obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi korzystnie wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozji. Przedstawione wyniki uzyskano dla określonego rodzaju kleju (klej epoksydowy Loctite Hysol 9466 A&B) i materiału (stal odporna na korozję) oraz przyjmując dane warunki wykonywania połączeń.

Na wyniki badań wpływa wiele czynników, dlatego podczas ich wykonywania wskazane jest minimalizowanie błędów, które mogą przyczynić się do rozbieżności wyników. Ważne jest również, aby podczas wykonywania połączeń stosować się do zaleceń stosowania klejów, środków odtłuszczających czy warunków utwardzania spoiny.

#### LITERATURA

- [1] Czaplicki J., J. Ćwikliński, J. Godzimirski, P. Konar. 1987. „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych”. Warszawa: WKiŁ.
- [2] DIN EN 1465. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded joints.
- [3] Godzimirski J. 2002. „Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych”. Warszawa: WNT 81–82, 97–115.
- [4] <http://www.loctite.pl>, data pobrania 5.01.2015
- [5] <http://www.stalkwasoodporna.pl>, data pobrania 22.12.2015.
- [6] „Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika”. 1977. Praca zbiorowa pod red. Charles V.Cagle'a. Warszawa: WNT.
- [7] Krysicki W. i in. 1999. „Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II. Statystyka matematyczna”. Warszawa: PWN. 85–94.
- [8] Mirski Z., T. Piwowarczyk. 2008. „Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości”. *Przegląd Spawalnictwa* (8): 12–21.
- [9] PN-EN 10088-1: 2007.
- [10] Rudawska A., Ł. Dzwonkowski. „Przyrząd do ustalania próbek połączeń klejowych, zwłaszcza powierzchni płaskich”. Zgłoszenie patentowe P403112. Biuletyn Urzędu Patentowego (19): 40–41.
- [11] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Lublin: Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej 40–45, 70–72, 83–93.

---

Dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. Politechniki Lubelskiej – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: a.rudawska@pollub.pl

Mgr inż. Natalia Ściuba – absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

Doc. Ing. Dana Stančeková, PhD – Katedra Obróbki i Technologii Produkcyjnych Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technicznego w Žilinie, Univerzita 8215/1, 010-26 Žilina



## INNOWACJE – TECHNOLOGIE – MASZYNY POLSKA 2016



### Lista produktów nagrodzonych Złotym Medalem MTP

1. LCG3015AJ + ASF 3015 EU – wycinarka laserowa w technologii fiber z systemem załadunkowo-rozładunkowym AMADA Co., Japonia Zgłaszający AMADA Sp. z o.o., Kraków
2. BIAx MB 30 E – nowy napęd elektryczny z wałkiem giętkim Schmidt & Wezel Maschinenfabrik BIAx, GmbH & Co. KG, Niemcy Zgłaszający: BIAx Schmidt & Wezel GmbH & Co., Niemcy
3. Linia do obróbki blach z kręgu DALCOS EXN ERGO 1000 DALLAN S.p.A., Włochy Zgłaszający: BOSCHERT POLSKA Sp. z o.o., Katowice
4. Delcam PowerMILL Machine DNA Delcam LTD, Wielka Brytania Zgłaszający: Delcam sp. z o.o., Warszawa
5. Pionowe centrum obróbkowe ecoMill 600V Famot Pleszew Sp. z o. o., Pleszew DMG MORI POLSKA Sp. z o.o., Pleszew
6. Onyx- przecinarka plazmowo-tlenowa Eckert AS Sp. z o.o., Legnica
7. Centrum tokarskie ze sterowaną osią Y typu AVIAturn 50MY z rodziny uniwersalnych wysokowydajnych centrów tokarskich nowej generacji AVIAturn 50 i 63 Fabryka Obrabiarek Precyzyjnych AVIA S.A., Warszawa
8. Drutowe centrum elektroerozyjne AgieCharmilles CUT E 350 GF Machining Solutions Management S.A., Szwajcaria Zgłaszający: GF Machining Solutions Sp. z o.o., Sękocin Nowy
9. Centrum do obróbki laserowej AgieCharmilles LASER P 400 GF Machining Solutions Management S.A., Szwajcaria Zgłaszający: GF Machining Solutions Sp. z o.o., Sękocin Nowy
10. Przemysłowe urządzenie myjące TARRA Compact 200HP GT85 Polska Sp. z o. o., Lublin
11. Precyzyjna głowica wytaczarska VARIOBORE Wohlhaupter GmbH, Niemcy Zgłaszający: Hahn + Kolb Polska Sp. z o.o., Poznań
12. Laser włóknowy wysokiej mocy YLS-5000-BR IPG Laser GmbH, Niemcy IPG Photonics Sp. z o.o., Gliwice
13. Światłowodowa wycinarka laserowa PHOENIX FL LVD Company NV, Belgia Zgłaszający: LVD-Polska Sp. z o.o., Kędzierzyn – Koźle
14. High Speed Disc ALUMASTER August Rüggeberg GmbH & Co KG PFERD Werkzeuge, Niemcy Zgłaszający: PFERD-VSM Sp. z o.o., Kostrzyn Wielkopolski
15. Centrum obróbcze CNC HSM Linear KIMLA, Częstochowa Zgłaszający :POLCOM Przemysł Kimla, Częstochowa
16. Zautomatyzowane gniazdo do cięcia laserowego Kimla LaserCEL KIMLA, Częstochowa Zgłaszający: POLCOM Przemysł Kimla, Częstochowa
17. Urządzenia do cięcia plazmą i wiercenia PROMOTEC KOMPACT Promotec LSMC Srl Grupa Gigant Industries, Włochy Zgłaszający: POL-WELT Maszyny-Narzędzia-Zaopatrzenie Przemysłu Jolanta Ganczarek Katowice
18. Laser GENIUS-maszyna do cięcia laserowego z rezonatorem fiber Finn Power OY, Finlandia Zgłaszający: Prima Power Central Europe Sp. z o.o., Czosnów
19. Punch Genius 1225 Dynamic – wykrawarka rewolwerowa nowej generacji. Prima Power, Finlandia Zgłaszający: Prima Power Central Europe Sp. z o.o., Czosnów
20. Pionowe Centrum Obróbcze ER-VMC 1363 LB EVERRICH COMPANY LTD, Taiwan RICH POLSKA Piotr Pawlicki, Gdańsk
21. Przecinarka plazmowo-gazowa PRO Master3D STIGAL Marcin Stępień. Legnica
22. Wycinarka laserowa 3D TruLaser Tube 5000 fiber do rur i profili TRUMPF GmbH + Co. KG, Niemcy Zgłaszający: TRUMPF POLSKA sp. z o.o. sp. k., Warszawa

## ITM Polska 2016 – WSZYSTKIE RĘCE NA POKŁAD!

**Targi Innowacje-Technologie-Maszyny Polska wyprzedzają swój czas, przecierają szlak firmom, które, podążając za ideą Przemysłu 4.0, nie stoją w miejscu i nieustannie szukają nowych metod optymalizacji procesów, podnoszenia wydajności, jakości oraz sprawności biznesowej. Tegoroczna edycja targów cieszy się ogromnym zainteresowaniem i już śmiało można stwierdzić, że będzie rekordowa! Przedsięwzięcie to z pewnością zapisze się na mapie głównych wydarzeń branży jako najważniejsze i najbardziej efektywne!**

Targi ITM Polska to znakomita okazja do handlowych negocjacji, wymiany doświadczeń i dyskusji na najważniejsze tematy dotyczące sektora automatyzacji produkcji, metalurgii i obróbki metali. W czasach cyfrowej rewolucji przemysłowej, szybko następujących zmian, warto znaleźć się w miejscu, gdzie spotykają się liderzy z sektora innowacji, miłośnicy nowinek technologicznych, producenci maszyn i nowatorskich rozwiązań. Możliwość korzystania z skondensowanej wiedzy oraz doświadczenia przedstawicieli przodujących firm z Polski i z zagranicy przekłada się na efektywność działania i idealne dopasowanie do sytuacji na rynku.

### Poznań wyznacza trendy!

Stolica Wielkopolski w przeciągu 4 dni stanie się wyznacznikiem zmian i trendów w branży przemysłowej, wychodzenia naprzeciw oczekiwaniom rynku i miejscem prezentacji najnowszych produktów i rozwiązań, które zapewnią sukces przyszłych inwestycji. Każdy, kto pojawi się w terminie 7 – 10 czerwca br. na terenie Międzynarodowych Targów Poznańskich, będzie pod ogromnym wrażeniem, zarówno ekspozycji wystawienniczej, jak i oferty wydarzeń towarzyszących, w tym konferencji, warsztatów i seminariów.

Podczas najbliższej edycji targów ITM Polska, **Polska Unia Dystrybutorów Stali** przygotowuje konferencję pt. **Forum Techniczne Stali Konstruktoryjnych**. Wydarzenie to jest dedykowane przedstawicielom przedsiębiorstw związanych z wytwarzaniem, przetwórstwem oraz dystrybucją stali konstrukcyjnych. Zakres tematyczny wydarzenia obejmuje stale konstrukcyjne dla: budownictwa, branży offshore, motoryzacyjnej i transportowej oraz dla producentów maszyn i urządzeń. Odbędzie się również seminarium **Stowarzyszenia Stal Nierdzewna** pt. **Czyszczenie i Konserwacja Stali Nierdzewnej**. Organizatorom zależy na podkreśleniu szerokich i stale rozwijających się możliwości aplikacji stali nierdzewnych z perspektywy producenta i użytkownika oraz właściwych metod zapewniających dużą jej żywotność. Z inicjatywy czasopisma MM Magazyn Przemysłowy, reprezentanci firm przemysłowych, świata nauki i administracji, rozmawiać będą o kondycji polskiego przemysłu oraz kierunkach jego rozwoju, a także rozwiązaniach, których wdrożenie umożliwi zwiększenie konkurencyjności rodzimych firm na rynku krajowym i globalnym. Debata **MM Speakers Corner** to 4 panele tematyczne: **Inteligentna Fabryka 4.0, Internet Rzeczy w zarządzaniu i produkcji, Efektywność energetyczna w przemyśle oraz Kapitał ludzki w firmie przemysłowej**. Firma Lenso organizuje bezpłatne dwudniowe **Warsztaty 3D dla przemysłu odlewniczego i tłocznictwa**. Wiodące firmy z Polski przybliżą zainteresowanym przykłady dotyczące własnej praktyki, m.in. jak optyczne systemy pomiarowe wspierają proces produkcyjny w celu skrócenia czasu

rozwoju produktu, optymalizacji produkcji i co się z tym wiąże – poprawienia rentowności firmy, a zespół Lenso zaprezentuje najnowsze optyczne systemy pomiarowe i oprogramowanie do kontroli jakości i seryjnych pomiarów.

### Kompedium wiedzy

Z kolei wydawca magazynu Nowa Stal zorganizuje drugą edycję konferencji poświęconej rodzimej branży aluminium – „**Aluminium. Biznes Trendy Technologie**”. Mowa będzie m.in. o kondycji polskiej, europejskiej oraz światowej branży aluminium, międzynarodowej ekspansji rodzimych przedsiębiorstw, zastosowaniu aluminium w architekturze, przemyśle lotniczym oraz w sektorze energetyki odnawialnej. **Polsko-Niemiecka Izba Przemysłowo-Handlowa** zaprasza na konferencję **Gospodarka 4.0 – jedyna droga do rozwoju...**, której celem jest porównanie stanu zaawansowania gospodarki Niemiec i Polski w drodze do tworzenia tzw. inteligentnej produkcji, gdzie wdrażane są rozwiązania automatyzacji i wzajemnej komunikacji między maszynami. Wyjątkową okazją do poszerzenia wiedzy i podniesienia kompetencji będzie także seminarium pt. **Objętościowa obróbka cieplna stopów metali**, przygotowane przez Instytut Mechaniki Precyzyjnej, zorganizowane dla przedstawicieli branży zgromadzonych wokół salonu Surfex. Program seminarium, skierowany do osób zainteresowanych technologią i zabiegami powodującymi zmianę w strukturze, a co za tym idzie – poprawą właściwości stopów, składać się będzie m.in. z zagadnień: podwyższania odporności korozyjnej stali, nanostrukturyzacji średniostopowych stali do ulepszenia cieplnego – efekt TRIP, Technologii rapid prototyping w inżynierii biomedycznej. Także w przestrzeni salonu Surfex zorganizowany zostanie **Poligon Umiejętności**, którego przygotowaniem zajmuje się redakcja czasopisma *Lakiernictwo Przemysłowe*. W ramach PU odbywać się będą prezentacje nowatorskich rozwiązań czołowych producentów w branży z zakresu technologii przygotowania powierzchni w procesach lakierowania i malowania, a obecni na miejscu specjaliści będą dzielić się wiedzą i doświadczeniem. Targom ITM Polska towarzyszy druga edycja **Forum Odlewniczego FOCAST** – unikatowe przedsięwzięcie, organizowane z myślą o odlewniach, producentach maszyn i urządzeń, dostawcach komponentów, usługodawcach oraz przedstawicielach nauki. Idealnym uzupełnieniem są Targi Kooperacji Przemysłowej Subcontracting i międzynarodowe spotkania kooperacyjne Subcontracting ITM Meetings – wyjątkowa formuła budowania trwałych relacji między oferentami usług podwykonawczych oraz potencjalnymi zlecającymi.

Goście tegorocznych targów ITM Polska 2016 poznają nowe metody i informacje, jak inwestować, wdrażać i wykorzystać ideę Przemysłu 4.0 w celu radykalnej poprawy operacji przemysłowych i produkcyjnych. Wraz z Wystawcami, Partnerami i Patronami stwarzamy zainteresowanym dostęp do najlepszej oferty rynkowej w jednym miejscu i czasie. Tegoroczna ekspozycja obfitować będzie w premiery rynkowe, produkty uhonorowane Złotym Medalem MTP, nowości z całego świata, a wszystkie wydarzenia towarzyszące, będące źródłem wiedzy i inspiracji, staną się także narzędziem propagowania innowacji, technologii i nowoczesnych rozwiązań w służbie rodzimych przedsiębiorstw.

Więcej informacji na stronie [www.itm-polska.pl](http://www.itm-polska.pl)



## SMART WIRING – UPROSZCZONE OKABLOWANIE W SZAFIE STERUJĄCEJ

**Na targach Hannover Messe firma EPLAN zaprezentowała oprogramowanie Smart Wiring. Oprogramowanie wizualizuje okablowanie i dostarcza 100% danych cyfrowych niezbędnych do produkcji. Użytkownicy mogą zaoszczędzić czas przy zmianach wprowadzanych w ostatniej chwili, ponieważ oprogramowanie obsługuje również często bardzo trudne zadanie porównywania projektów.**

Funkcją tego oprogramowania jest ułatwienie tworzenia okablowania w szafie sterowniczej. Niezależnie czy jest to opis source/target, obsługa punktów terminala, przekrój, kolor, długość przewodu, rodzaj zakończenia kabla czy samo jego ułożenie – oprogramowanie zapewnia wizualizację niezbędnych informacji dotyczących okablowania i danych inżynierskich potrzebnych do montażu podzespołów w szafie sterowniczej. Zaletą jest to, że projektowanie połączeń wykorzystujące schemat, a więc proces czasochłonny wymagający dużej wiedzy, podczas którego łatwo o popełnienie błędu – nie jest już potrzebny. Cyfrowa reprezentacja

w Smart Wiring odpowiada wirtualnemu modelowi 3D w EPLAN Pro Panel. Jednak nowa aplikacja może zwiększyć produktywność nawet i bez widoku 3D. Przykładowo, do programu mogą zostać wczytane listy z Excela wraz ze wszystkimi wymaganymi informacjami o połączeniach; wizualizacja 3D poprowadzonych ścieżek i kroków montażowych nie będą tu dostępne, jednak pozostają funkcje projektowania *krok po kroku* i porównywania różnych list połączeniowych w celu wyszukiwania zmian wprowadzanych w ostatniej chwili. Pracownicy uzyskują przez cały czas czytelne informacje pozwalające określić, na jakim etapie są prace, jakie połączenia pozostały do wykonania i jakie potencjalne zmiany należy wprowadzić w projekcie.

### Podejście systemowe

Przejrzyście zaprojektowane menu opisuje każde połączenie. Ta informacja jest uzupełniona o wizualizację sprzętową, włączając w to punkty terminali i planowany

routing okablowania w szafie sterowniczej. Oprogramowanie dostarcza ponadto informacje o wymaganej średnicy przewodów, zastosowanym kolorze i zdefiniowanym zakończeniu punktów terminalowych – na przykład w postaci połączeń (zagniatanych lub zgrzewanych ultradźwiękowo). Są tu pokazane wzajemne połączenia wiązek kablowych, co oznacza, że po zebraniu razem wszystkich dostępnych informacji kolejne kroki projektowe są zrozumiałe i przejrzyste. Gdy tylko połączenie zostanie w pełni wykonane, zostaje oznaczone na schemacie kolorem zielonym. Jest to bardzo pomocne w sytuacji, gdy nad wykonaniem projektu pracuje kilka zmian, kolejni pracownicy mogą zacząć prace dokładnie tam, gdzie skończyli ich poprzednicy.



### Szybki proces wprowadzania zmian końcowych

Aplikacja Smart Wiring jest szczególnie przydatna podczas wprowadzania zmian końcowych przy finalizacji projektu, które mogą być łatwo rejestrowane w EPLAN Pro Panel i aktualizowane. Dzięki Smart Wiring mogą być ze sobą porównane dwa statusy projektów

i automatycznie wychwycone wszystkie różnice, co skraca czas w porównaniu z ręczną realizacją tego procesu. Oprogramowanie pokazuje wszystkie zbędne połączenia, które zostały poprowadzone, lecz powinny zostać usunięte oraz te, które muszą zostać dodane.

### Zalety aplikacji Smart Wiring

- zintegrowany przepływ prac od wymogów klienta poprzez proces inżynierii po produkcję i testowanie,
- 100% danych cyfrowych,
- projektowanie połączeń bez schematów,
- perfekcyjna wizualizacja,
- instrukcje dla pracowników krok-po-kroku,
- porównywanie projektów z uwzględnieniem zmian wprowadzanych w końcowym etapie,
- rejestracja statusu okablowania,
- lepsza skalowalność obciążenia pracami.

*Źródło: Eplan Software & Service*

# PORTAL INFORMACJI TECHNICZNEJ

www.sigma-not.pl



ponad  
90 000 e-publicacji  
ponad  
30 tytułów w jednym miejscu

PRASA FACHOWA

**SIGMA-NOT**

www.sigma-not.pl



WWW.SIGMA-NOT.PL





# XXV Kongres Techników Polskich III Światowy Zjazd Inżynierów Polskich



Wrocław, 16-18 czerwca 2016 r.



Zapraszamy wszystkich inżynierów  
do udziału w

**XXV KONGRESIE TECHNIKÓW  
POLSKICH (KTP)**

i **III ŚWIATOWYM ZJEŹDZIE  
INŻYNIERÓW POLSKICH (SZIP)**

organizowanych w dniach

**16-18 czerwca 2016 r.**

**we Wrocławiu**

Europejskiej Stolicy Kultury

**WEŹ UDZIAŁ WE WROCŁAWSKIM  
SPOTKANIU TWÓRCÓW TECHNIKI**

Organizatorami XXV KTP i III ŚZIP są:

- Federacja Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT
- Europejska Federacja Polonijnych Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych
- Rada Polskich Inżynierów w Ameryce Północnej
- Rada Główna Instytutów Badawczych
- Akademia Inżynierska w Polsce
- Konferencja Rektorów Polskich Uczelni Technicznych
- Politechnika Wrocławska

Więcej informacji na stronach: [ktp.enot.pl](http://ktp.enot.pl) i [szip.org.pl](http://szip.org.pl)

Celem obu spotkań inżynierskich jest integracja i wymiana doświadczeń będących udziałem inżynierów z kraju oraz mieszkających i pracujących poza jego granicami. Tematami debat plenarnych i konferencji naukowo-technicznych w czasie obu wydarzeń będą m.in. istotne dla polskiej gospodarki zagadnienia: relacje między nauką a gospodarką, w tym transfer zaawansowanych technologii; kształcenie inżynierów; stan polskiej elektryki oraz transportu; rozwój techniki a uwarunkowania ekologiczne. Uczestnicy XXV KTP i III SZIP będą mogli zapoznać się z raportem wypracowanym na II Kongresie Elektryków Polskich (przygotowanym przez Stowarzyszenie Elektryków Polskich - SEP), a także z najnowszymi tendencjami IT (Information Technology) w odniesieniu do urządzeń i aplikacji. Interesującymi tematami będzie współdziałanie techniki z medycyną, gospodarka wodna a zmiany klimatyczne oraz infrastruktura – budownictwo – BIM.

W czasie wrocławskich obrad zostaną podjęte także aktualne obecnie zagadnienia strefy wolnego handlu między USA a UE oraz roli inżynierów w reindustrializacji.

Kongresy Techników Polskich są ważnym wydarzeniem dla całego polskiego środowiska naukowo-technicznego. Hasłem XXV Kongresu jest „Technika-Człowiekowi”. Pierwszy, historyczny Kongres odbył się w 1882 r. w Krakowie. Przyjechali nań technicy i inżynierowie z trzech zaborów oraz spoza kraju. Tę ideę wspólnych obrad polskich inżynierów z kraju i spoza jego granic chcemy kontynuować organizując oba spotkania inżynierskie wspólnie.

Idea zwoływania Zjazdów zrodziła się z inicjatywy polonijnych środowisk technicznych, jako kontynuacja wcześniejszych sympozjów integracyjnych „Polacy Razem” środowisk inżynierów polskich oraz polonijnych organizowanych przez Federację Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT od 1996 r. Każdy kolejny Zjazd przyciągał uwagę coraz większej liczby uczestników.

Hasło III Światowego Zjazdu Inżynierów Polskich brzmi „Inżynierowie Polsce i Światu”.

