



## TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU

KWARTALNIK  
naukowo-techniczny



NR  
**I**  
1993

MONTAŻ SYGNAŁÓW DŹWIĘKOWYCH





2-4.10.2018

Centrum Targowo-Konferencyjne

**expo**silesia

[www.exposilesia.pl](http://www.exposilesia.pl)

Międzynarodowe  
Targi Obrabiarek, Narzędzi  
i Technologii Obróbki

**TOOLEX**

[www.toolex.pl](http://www.toolex.pl)

Międzynarodowe  
Targi Metod i Narzędzi  
do Wirtualizacji Procesów

**WIRTOTECHNOLOGIA**

[www.wirtotechnologia.pl](http://www.wirtotechnologia.pl)

Targi Olejów, Smarów  
i Płynów Technologicznych  
dla Przemysłu

**OILexpo**

[www.oilexpo.pl](http://www.oilexpo.pl)

Braci Mieroszewskich 124 | 41-219 Sosnowiec

tel.: +48 32 788 75 19 | +48 510 030 472; 510 031 684 | [toolex@exposilesia.pl](mailto:toolex@exposilesia.pl)

[www.toolex.pl](http://www.toolex.pl)

**ZESPÓŁ REDAKCYJNY:**

**Redaktor Naczelny** – prof. dr hab. inż. Jerzy Łunarski  
**Z-ca Redaktora Naczelnego** – dr inż. Martyna Jachimowicz  
 tel. 663 311 966  
**Redaktorzy tematyczni:**  
 Dr inż. Rafał Kluz (technologia, automatyzacja)  
 Dr inż. Katarzyna Antosz (niezawodność, eksploatacja)  
 Dr inż. Mirosław Chłosta (inżynieria, produkcja)  
 Dr inż. Andrzej Kubit (struktury i systemy montażu)

**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 Kosiciach, 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 Kuczmazewski (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 Techniczeskij Uniwersitet Ukrainy „Kijewskij Politechniczeskij Instytut”, Ukraina), prof. R. M. Chandima Ratnayake (University of Stavanger, Norwegia), prof. Emil Spisak (Technika Univerzita v Kosiciach, 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 Technologiczeskij Uniwersytet, Rosja), prof. Jan Żurek (Politechnika Poznańska) – przewodniczący

**ADRES REDAKCJI:**

Kwartalnik „Technologia i Automatyzaacja Montażu”  
 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 80 zł  
 Wersja pierwotna: elektroniczna

## W numerze

Stamirowski J.: Projektowanie architektury oprogramowania systemu sterującego zrobotyzowanym modułem technologicznym. Cz. I. Modelowanie struktury oprogramowania (statyka) . . . . .	7
Magiera M.: Monolityczna a hierarchiczna metoda harmonogramowania montażu wielowariantowych produktów – porównanie dwóch koncepcji. . . . .	13
Sąsiadek M., Kielec R.: Analiza złożoności konstrukcji wyrobu z uwzględnieniem zasad DfA . . . . .	19
Nieoczym A., Drozd K.: Alternatywne sposoby wytwarzania elementów żurawi przyczepowych . . . . .	24
Kyrylovych V., Kruzhanivska I., Yuskiv T.: Automatyczny przezbrajalny przyrząd modułowy typu “pryzma” . . . . .	28
Kuran M.: Modułowe narzędzia pomiarowe . . . . .	35
Cieślak R., Suszyński M., Żurek J., Peta K., Wiśniewski M.: Wybór metody badania czasochłonności montażu za pomocą wielokryterialnego wspomaganie decyzji . . . . .	39
Barylski A.: Modułowe konstrukcje narzędzi tarczowych do szlifowania na docierarkach . . . . .	45
Komorek A., Godzimirski J., Rośkiewicz M.: Wpływ wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej kleju na udarność połączeń klejowych blokowych . . . . .	53
Rudawska A., Miturska A.: Wybrane aspekty wytrzymałości połączeń lutowanych i klejowych blach miedzianych. . . . .	59

Stamirowski J.: Designing architecture software control system with a robotsizable technological module. Part I. Modeling of the software structure (static). . . . .	7	Стамировски Е.: Проектирование программного обеспечения управляющей системы роботизированного технологического модуля. Ч.1 Моделирование структуры программы (статической) . . . . .	7
Magiera M.: Monolithic and hierarchical method of scheduling for assembly of multi-option products – comparison of two concepts . . . . .	13	Магера М.: Монолитический и иерхический метод графики сборки многовариантных изделий – сравнение двоих концепции . . . . .	13
Sąsiadek M., Kielec R.: Product complexity analysis including DfA principles . . . . .	19	Сонсядек М., Келец Р.: Анализ сложности конструкции изделия с применением принципов DfA . . . . .	19
Nieoczym A., Drozd K.: Alternative methods manufacturing elements of trailers cranes. . . . .	24	Неочим А., Дрозд К.: Альтернативные способы изготовления деталей автоприцепного крана . . . . .	24
Kyrylovych V., Kruzhanivska I., Yuskiv T.: The automated readjusted modular prismatic setup . . . . .	28	Кирилович В., Крыжановская И., Юськив Т.: Автоматизованное переналаживаемое модульное приспособление типа «призма» . . . . .	28
Kuran M.: Modular measuring devices. . . . .	35	Куран М.: Модульные измерительные инструменты . . . . .	35
Cieślak R., Suszyński M., Żurek J., Peta K., Wiśniewski M.: Selection of the method of testing the life of assembly by means of multi-tionable support for decisions . . . . .	39	Цесьляк Р., Сушински М., Журек Я., Пета К., Висьневски М.: Подбор метода исследования трудоемкости сборки с помощью многокритериальной поддержки решения . . . . .	39
Barylski A.: Modular designs of abrasive disc tools for grinding on lapping machines . . . . .	45	Барыльски А.: Модульные конструкции дисковых инструментов для шлифовки на притирочных машинах . . . . .	45
Komorek A., Godzimirski J., Rośkiewicz M.: Influence of Young's adhesive modulus on impact strength of block adhesive joints . . . . .	53	Коморек А., Годзимирски Я., Роськович М.: Влияние величины коэффициента продольной упругости на сопротивление удару блочных клеевых соединений . . . . .	53
Rudawska A., Miturska A.: Selected aspects of strength soldered and adhesive joints od copper sheets. . . . .	59	Рудауска А., Митурска А.: Избранные вопросы прочности паянных и клеевых соединений медных жестей . . . . .	59

## 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 2018 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:** 100 zł (w tym 23% VAT).

### Rabaty:

30% – 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).

## 25 LAT WSPIERANIA TECHNIKI I TECHNOLOGII MONTAŻU MASZYN PRZEZ KWARTALNIK „TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU”

Jerzy ŁUNARSKI

Kwartalnik naukowo-techniczny „*Technologia i Automatykacja Montaży*” został utworzony w III kwartale 1993 r. z inicjatywy ówczesnego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Podstaw Technologii i Konstrukcji Maszyn TEKOMA Warszawa. Ośrodek ten utworzony w 1972 r. początkowo spełniał funkcję zaplecza badawczo-eksperymentalnego ówczesnego Ministerstwa Przemysłu, zajmując się takimi problemami jak: inżynieria materiałowa, technologia spieków, automatyzacja projektowania inżynierskiego, sterowanie obrabiarek, technologia montażu i inne, zatrudniając w szczytowym okresie blisko 500 osób i mając filie w Poznaniu, Kielcach i Legionowie. Kryzys lat 80. wymusił ograniczenie zakresu działalności i redukcję zatrudnienia do ok. 150 osób oraz ukierunkowanie specjalizacyjne na techniki montażu. W tym czasie inne techniki wytwarzania (skrawanie, spawanie, odlewanie, przeróbka plastyczna itp.) były reprezentowane przez branżowe instytuty naukowo-badawcze i specjalistyczne czasopisma naukowo-techniczne. Przeprowadzone przez Ośrodek badania w ponad 160 przedsiębiorstwach przemysłu maszynowego wykazały, że techniki montażu partycypują w ogólnej pracochłonności wytwarzania wyrobów średnio w 35%, podczas gdy inne techniki w stopniu mniejszym (skrawanie 34%, przeróbka plastyczna 8,5%, odlewanie 5%, inne techniki 17,5%). Ważność technik montażu dla konkurencyjności przedsiębiorstw podyktowana jest takimi względami, jak:

- znacznym udziałem w łącznych kosztach wytwarzania (25–60%),
- konstytuowaniem w procesach montażu ostatecznych cech użytkowych i eksploatacyjnych wyrobu.

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono również znaczne upośledzenie stanowisk montażowych w stosunku do stanowisk innych technik wytwarzania wyrażające się 6,5 razy mniejszymi kosztami stanowisk montażowych w porównaniu ze stanowiskami innych technik.

Sytuacja ta była pośrednio spowodowana brakiem zrozumienia ważności systemów montażowych dla zapewnienia jakości i konkurencyjności wyrobów jak również brakiem w jednostkach naukowo-badawczych odpowiedniej liczby samodzielnej kadry naukowej z zakresu technik montażu kształcących specjalistów z tego zakresu.

Szczególnie trudnym dla OBR PTIKM TEKOMA okresem okazały się lata transformacji politycznej i gospodarczej 1990–1995 związane z koniecznością dalszej redukcji

zatrudnienia do ok. 90 osób, konieczność ukierunkowania działań na potrzeby przedsiębiorstw z zakresu technik montażu i realizacja ich zleceń celem wypracowania środków umożliwiających znaczące samofinansowanie przy wsparciu środkami budżetowymi w wysokości około 20–25% potrzeb. W tej sytuacji Dyrekcja uznała za wskazane utworzenie i wydawanie czasopisma naukowo-technicznego, które popularyzowałoby problematykę technik montażu, promowało własne opracowania i ważniejsze krajowe oraz stanowiło formę wymiany doświadczeń i wsparcia działań szkoleniowych w zakresie techniki i technologii montażu. W tym celu utworzony został kwartalnik naukowo-techniczny „*Technologia i Automatykacja Montaży*” zespołów, maszyn i urzędzeń (TiAM), którego pierwszy numer ukazał się w III kwartale 1993 r. i zawierał znaczną część referatów prezentowanych na Międzynarodowym Sympozjum Naukowym „Perspektywy i kierunki rozwoju technik montażu” w dniach 29–30.09.1993 r. (przedstawiono tam ponad 20 referatów w tym 12 autorów zagranicznych). Kwartalnik ten o formacie A4 z okładką kartonową i czarno-białym drukiem opracowywany był i wydawany przez OBR TEKOMA do numeru 3/2007 zaś dalsze prace edytorskie przejął Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie w wyniku ogólnie dokonanej konsolidacji w trakcie której OBR TEKOMA został włączony w struktury tego Instytutu. Procesy wydawnicze od początku były realizowane przez 4-osobowy zespół redakcyjny (z redaktorem naczelnym prof. J. Łunarskim) oraz 7-osobową Radą Programową kierowaną przez prof. W. Szenajcha. Prace te wspierali dyrektorzy OBR TEKOMA dr J. Łajkowski, a następnie inż. R. Świerkowski, zaś po przejściu kwartalnika przez IMBIGS prof. S. Góralczyk i ostatnio prof. Z. Starczewski.

Treścią początkowych numerów kwartalnika w latach 1993–1998 były artykuły prezentowane na różnych imprezach naukowo-technicznych z zakresu technik montażu, organizowane przez redakcję, OBR TEKOMA oraz różne jednostki naukowo-badawcze, współuczestniczące w organizacji imprezy. Były to zagadnienia z zakresu technik i automatyzacji montażu, układów automatyzacji systemów montażowych, połączeń klejowych, rozłącznych i nierozłącznych w montażu, modułowych rozwiązań w konstrukcji i technologii systemów montażowych, jakości i ekonomiczności procesów montażowych itp.

W trakcie tych spotkań i wymiany poglądów zdecydowano się ograniczyć tematykę spotkań do trzech zasadniczych dla wspierania prac naukowych i wdrożeniowych z zakresu technik montażu, tzn.:

- Międzynarodowych konferencji naukowo-technicznych n.t. „Technika i technologia montażu maszyn”, odbywanej w cyklu 3-letnim od 1994 r.,
- Międzynarodowych konferencji naukowo-technicznych n.t. „Modułowe technologie i konstrukcje w budowie maszyn”, odbywanych w cyklu 3-letnim od 1996 r.,
- Ogólnokrajowej konferencji naukowo-technicznej „Połączenia montażowe – konstrukcja i technologia”, odbywanej w cyklu 3-letnim od 2007 r.

Kwartalnik *TiAM* w trakcie 25 lat istnienia podlegał szeregu zmianom podyktowanym zmianami sytuacji zewnętrznej oraz nowymi potrzebami. Można tu wyróżnić następujące charakterystyczne okresy:

1. Numery *TiAM* od 1/1993 do 3/2007 wydawane były przez OBR PTiKM TEKOMA Warszawa w stosunkowo skromnym formacie graficznym (forma A4, papier zwykły, druk czarno-biały, średnia liczba artykułów w numerze przeważnie w przedziale 8–12). Od numeru *TiAM* 4/2009 nastąpiło rozszerzenie składu Rady Programowej do 21 osób (nadal kierowanej przez prof. W. Szenajcha) w tym 6 członków zagranicznych.
2. Kolejne zmiany nastąpiły od numeru 1/2010 gdy zmiana uległa szata graficzna kwartalnika polegająca na zmianie koncepcji okładki i jej wyglądu, zastosowaniu jakościowego papieru błyszczącego, wprowadzeniu druku artykułów w języku angielskim i rosyjskim oraz dostosowaniem procesu recenzowania artykułów do wymagań sformułowanych przez MNiSZW. Kwartalnik był indeksowany w bazie BAZTECH.
3. Trudności finansowe wydawcy spowodowały, że od numeru 1/2015 wydawca zrezygnował z formy papierowej, zaś treść kwartalnika była zamieszczana na płycie CD i w takiej formie dostarczane czytelnikom. Kwartalnik był dodatkowo indeksowany w bazie IN-DEX COPERNICUS.
4. Kolejna zmiana nastąpiła od nr 1/2016, gdy zrezygnowano z dostarczania czasopisma na płytkach, a wysyłano je pocztą elektroniczną czytelnikom. Od tego numeru współwydawcą została firma SIGMA-NOT Sp. z o.o. oraz nastąpiła dalsza zmiana Rady Programowo-Naukowej, której przewodniczącym został prof. dr hab. inż. Jan Żurek, zaś skład Rady powiększono do 23 osób, zmieniając jednocześnie szereg członków wśród których jest 15 członków zagranicznych. Czasopismo jest notowane na liście czasopism punktowych, a artykuły (zgodnie z oceną MNiSZW) mają przyznane 7 pkt.

Bardziej szczegółowe informacje o historii i działaniach Redakcji i Rady Programowej zamieszczono w artykułach redaktora naczelnego „15 lat kwartalnika „Technologia i Automatykacja Montażu” (*TiAM* nr 3/2008, s. 2–3) oraz „Dwie dekady wspomaganie techniki i technologii montażu maszyn” (*TiAM* nr 3/2013 s. 3–7).

Aktualnie w każdym numerze kwartalnika prezentowanych jest 10–12 artykułów naukowo-technicznych, wstępny artykułów odredakcyjny o charakterze informacyjno-dydaktycznym oraz ogólne informacje o zawartości zagranicznych czasopism o tematyce montażowej, tzn. wydawanym w Moskwie (Rosja) miesięczniku „Sborka w maszynostrojenii i priborostrojenii” oraz angielskim kwartalniku „Assembly Automation”. Podawane są również wytyczne dla Autorów zaś poszczególne artykuły są recenzowane zgodnie z wytycznymi MNiSZW. Wśród artykułów zamieszczanych w *TiAM* 10–15% stanowią artykuły autorów zagranicznych, 20–25% to artykuły o praktycznych wdrożeniach nowych lub innowacyjnych technik montażu, zaś pozostałe to artykuły prezentujące prace naukowo-techniczne pracowników z różnych krajowych ośrodków naukowo-badawczych i dydaktycznych.

Redakcja *TiAM* deklaruje dość szeroki zakres tematyczny z dziedziny montażu maszyn (projektowanie wyrobów i systemów montażowych i ich technologiczność, operacje przed montażowe i po montażowe, konstrukcja i technologia połączeń montażowych i oprzyrządowania, sterowanie, kontrola, organizacja i ekonomia w systemach montażowych), których wstępną kwalifikacją zajmują się redaktorzy tematyczni tzn. dr R. Kluz – technologia i automatyzacja, dr K. Antosz – niezawodność i eksploatacja, dr M. Chłosta – inżynieria i produkcja, dr A. Kubit – struktury i systemy montażu.

Natomiast artykuły nadsyłane do Redakcji i publikowane po pozytywnych recenzjach, w znacznym stopniu dotyczą następujących zagadnień:

- nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych połączeń montażowych,
- nowych rozwiązań konstrukcyjnych różnych wyrobów maszynowych z uwypukleniem ich cech montażowych,
- różnorodnych sposobów doskonalenia i automatyzowania oprzyrządowania i urządzeń montażowych,
- racjonalizacji rozwiązań operacji przed montażowych i po montażowych sprzyjających optymalizacji zasadniczych procesów montażowych,
- specyficzne problemy wykonywania połączeń klejowych, nitowych i innych wprowadzanych przeważnie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i innych,
- specyficzne cechy i podejścia organizacyjno-technologiczne wprowadzane w produkcji wyrobów elektromaszynowych w celu polepszenia ich jakości i redukcji kosztów montażu.

Redakcja *TiAM* wspólnie z Redakcją *Przeglądu Mechanicznego* sprawują patronat medialny nad szeregiem imprez naukowych z zakresu montażu maszyn organizowanych wspólnie przez Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej oraz Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie publikując szczególnie interesujące opracowania. Opracowania takie nadsyłane są do redakcji praktycznie z wielu ośrodków naukowych w Polsce i z krajów sąsiednich (Słowacja, Rosja, Ukraina, Białoruś), zajmujących się zagadnieniami doskonalenia rozwiązań technologiczności

konstrukcji ze względu na montaż oraz doskonaleniem produkcyjnych systemów montażowych. Do szczególnie aktywnych ośrodków w tym zakresie można zaliczyć ośrodek: poznański, lubelski, rzeszowski, radomski, krakowski, częstochowski, gdański, kielecki, zielonogórski, warszawski i inne.

W okresie ćwierćwiecza istnienia kwartalnika *TiAM* wiele osób aktywnie wspierało jego prace i działania. Trudno wymienić wszystkie lecz do wyróżniających można zaliczyć: osoby wykonujące skład komputerowy czasopisma to: Ewa Czajkowska, Małgorzata Barańska, Dorota Stadnicka i Izabella Radziszewska. Profesorowie wspierający *TiAM* recenzjami i artykułami to m.in.: K. Tubielewicz, J. Kuczmaszewski, J. Żurek, W. Szenajch, J. Stamirowski, P. Łebkowski, A. Barylski, J. Godzimirski, F. Siemieniako, Ł. Węsierski, M. Styp-Rekowski, F. Stachowicz, A. Streubel, J. Bednarczyk, i in. Wśród profesorów zagranicznych do wyróżniających należy zaliczyć: M. Kristal (Wołgograd, Rosja), A. Gusiew (Moskwa, Rosja), M. Wartanow (Moskwa, Rosja), V. Kiryłowicz (Żytomierz, Ukraina),

V. Pasiecznik (Kijów, Ukraina), M. Hajduk (Koszyce, Słowacja), M. Kovac (Koszyce, Słowacja), R. Turnabidze (Tbilisi, Gruzja) i in. Wielu autorów zaczynając publikować jako inżynierowie awansowało z czasem na doktorów habilitowanych i profesorów np. O. Ciszak, M. Rośkowicz, W. Zielecki, M. Sąsiadek, A. Zbrowski, M. Matuszewski, J. Mucha, A. Rudawska i in. Dużą aktywnością wykazali się m.in. doktorzy: T. Kowalski, T. Smal, T. Samborski, B. Rajfur, M. Wiśniewski, A. Nieoczym, S. Tkaczuk, R. Cieślak, J. Domińczuk i wielu innych magistrów, inżynierów i specjalistów.

Na zakończenie udanego ćwierćwiecza kwartalnika *TiAM* pragnę, w imieniu Wydawcy (IMBIGS Warszawa i SIGMA-NOT), Rady Programowo-Naukowej *TiAM* oraz Redakcji, złożyć wymienionym i niewymienionym czytelnikom i sympatykom naszego czasopisma najlepsze podziękowania za dotychczasowe wspieranie naszych wysiłków i wspólnych celów rozwoju technik montażu oraz życzyć dalszych sukcesów w pracach zawodowych oraz pomyślności w życiu osobistym.



# PROJEKTOWANIE ARCHITEKTURY OPROGRAMOWANIA SYSTEMU STERUJĄCEGO ZROBOTYZOWANYM MODUŁEM TECHNOLOGICZNYM. CZĘŚĆ I. MODELOWANIE STRUKTURY OPROGRAMOWANIA (STATYKA)

## *Designing architecture software control system with a robotsizable technological module. Part I. Modeling of the software structure (static)*

Jerzy STAMIROWSKI

---

**Streszczenie:** Konsekwencją stosowania w systemach sterowania techniki komputerowej jest przeniesienie obciążenia funkcjonalnego z węzłów mechanicznych na składniki intelektualne (elektronika, komputery). Sformułowanie wymagań, modelowanie struktury i architektury oprogramowania, należą do trudnych problemów projektowania komputerowych systemów sterowania. Jest to szczególnie istotne w dobie zintegrowanego wytwarzania. Do najbardziej popularnych narzędzi modelowania struktury i zachowania systemów komputerowych należy język UML (Unified Modeling Language). W artykule przedstawiono modelowanie struktury oprogramowania sterującego zrobotyzowanym modułem technologicznym – ZMT (ang. robotic technological module – RTM) z użyciem języka UML. Jest to pierwszy etap projektowania oprogramowania systemów komputerowych do których należy system sterowania ZTM.

**Słowa kluczowe:** zrobotyzowany moduł technologiczny, system sterowania, modelowanie, struktura oprogramowania, architektura oprogramowania

**Abstract:** The consequence of using computer control systems is the transfer of functional load from mechanical nodes to intellectual components (electronics, computers). Formulating requirements, modeling the structure and architecture of software are among the difficult problems of designing computer control systems. This is particularly important in the era of integrated production. UML (Unified Modeling Language) is the most popular tool for modeling the structure and behavior of computer systems. The article presents the modeling of the software structure controlling the robotic technological module (ZMT) (statics) using the UML language. This is the first stage of designing software for computer systems to which the ZTM control system belongs.

**Keywords:** robotic technological module, control system, modeling, software structure, software architecture

---

### Wprowadzenie

Jednym z finalnych etapów kształtowania się kompleksowej automatyzacji produkcji przemysłowej jest integracja na bazie elastycznych systemów produkcyjnych (ESP) procesów wytwarzania, technicznego przygotowania produkcji i planowania. w wydziałach a następnie w zakładzie. Prawidłowe funkcjonowanie systemu produkcyjnego zapewnia hierarchiczny system zarządzania i sterowania.

Istnieje wiele określeń ESP, a według jednego z nich [5] ESP to sterowany środkami techniki komputerowej system o różnych powiązaniach urządzeń technologicznych, elastycznych modułów produkcyjnych (EMP), zrobotyzowanych modułów technologicznych (ZMT) i zautomatyzowanego systemu technicznego przygotowania produkcji. System powinien wykazywać zdolność do automatycznego przebrojenia przy zmianie gabarytów i asortymentu produkowanych wyrobów.

Należy podkreślić, że jest to system sterowany środkami techniki komputerowej o zwiększających się w stosunku do niego wymaganiach, wynikających z rozwoju integracji procesów produkcyjnych. Konsekwencją

stosowania w sterowaniu i zarządzaniu techniki komputerowej jest przeniesienie funkcji realizowanych dotychczas przez węzły mechaniczne na układy i systemy intelektualne. Procentowy udział funkcji realizowanych w systemach przez węzły i układy mechaniczne obniżył się z 70% na początku lat 90. XX w., do 25–30% w chwili obecnej [5].

Nieodłącznym komponentem systemów sterowania jest oprogramowanie dostosowane do każdego poziomu zarządzania i sterowania. Projektowaniu oprogramowania poświęca się w ostatnim okresie coraz więcej uwagi. Wysokie wymagania i złożoność współczesnych informatycznych systemów zarządzania i sterowania wymusiły na projektantach opracowanie metod systematyzujących i usprawniających procesy projektowania. Dotyczy to w szczególności: specyfikacji wymagań, projektowania struktury (statyka), projektowania współpracy komponentów oprogramowania (dynamika) oraz projektowania architektury.

Do najbardziej popularnych narzędzi modelowania i projektowania struktury oraz zachowania się systemów komputerowych należy specjalnie w tym celu stworzony język UML (Unified Modeling Language), oferujący

projektantom diagramy pozwalające modelować różne aspekty pracy systemu [1]. Należą do nich:

**Diagramy struktury:** diagram przypadków użycia, diagram klas, diagram obiektów, diagram pakietów, diagram struktur połączonych.

**Diagramy zachowań (dynamiki):** diagram stanów (maszyny stanowej), diagram czynności, diagram sekwencji, diagram sterowania interakcją (współpracy), diagram komunikacji, diagram harmonogramowania.

**Diagramy wdrożenia:** diagram komponentów, diagram rozlokowania.

W procesie modelowania nie muszą być wykorzystywane wszystkie diagramy oferowane przez język UML.

O ile UML jest powszechnie stosowany w procesach projektowania systemów przetwarzających dane, nie zdobył jeszcze zadowalającej popularności wśród twórców oprogramowania systemów produkcyjnych i wbudowanych. Należy jednak podkreślić, że język UML znajduje się w ciągłym rozwoju i występuje również w wersji dla systemów wbudowanych i produkcyjnych [2].

Komputerowy system sterowania i zarządzania pracą przedsiębiorstwa jest systemem rozproszonym z wieloma klientami i serwerami, pracującym w czasie rzeczywistym. Jednym z jego podsystemów jest zintegrowany podsystem technicznego przygotowania produkcji i sterowania pracą ZMT montażu (obróbki). Artykuł przedstawia propozycję użycia w procesie projektowania i modelowania zadań, struktury i architektury oprogramowania ZMT metodyki opartej na diagramach języka UML.

Komplet diagramów utworzonych przez analityków i projektantów systemu odgrywa w projekcie dwie role. Jest to po pierwsze podstawowe źródło informacji o strukturze i pracy oprogramowania wspomagające pracę twórców kodu programów. Po drugie jest to źródło informacji o funkcjach, strukturze i współpracy komponentów oprogramowania dla projektantów systemów produkcyjnych współpracujących z informatykami. Artykuł kierowany jest przede wszystkim do tej grupy projektantów. Zrozumienie procesu projektowania oprogramowania oraz informacji przekazywanej przez diagramy pozwala zaprojektować system o lepszej jakości i w krótszym czasie.

## Modelowanie zadań oprogramowania systemu sterowania ZMT obróbki (montażu)

### Zadania systemu sterowania ZMT montażu (obróbki)

Zakład produkcyjny wyposażony jest w moduł montażu (obróbki), w którym stacje robocze są usytuowane liniowo. Części przemieszczane są pomiędzy stacjami przy pomocy transportera. Na każdej stacji roboczej mają miejsce określone operacje procesu technologicznego. Dzięki temu, że stacje robocze są programowalne, możliwe jest wytwarzanie różnych wariantów gotowego produktu. Zwyczajowo detale montowane (obrabiane) są seriami.

Na stacji roboczej znajduje się robot montażowy (obróbkowy), przeznaczony do montażu (obróbki) oraz robot

transportowy, który przenosi części z transportera do strefy montażu (obróbki), a po montażu (obróbce) ze strefy montażu na taśmę. Każda stacja z robotem wyposażona jest w sensory i napędy. Sensory używane są do monitoringu stanu stacji roboczej (np. rozpoznanie przybycia kolejnej części), zaś napędy – do uruchamiania i zatrzymywania mechanizmów (np. transportera). Pierwsza stacja robocza jest stacją załadunku z magazynu bufora na transporter, a ostatnia stacją wyładunku z transportera do magazynu bufora. Stacje załadunku i wyładunku wyposażone są tylko w roboty transportowe. Wszystkie stacje na których realizowane są operacje montażu (obróbki) nazywane są stacjami liniowymi. Stan stacji i stan sygnałów alarmowych kontroluje operator [5], [6].

Operacje niezbędne do wytworzenia gotowego wyrobu z materiału wejściowego przedstawione są w karcie procesu technologicznego, przygotowanej przez inżynierów-technologów. Karta określa rodzaj operacji procesu technologicznego i kolejność ich wykonania. Każda operacja realizowana jest na określonej stacji roboczej. Uruchomienie nowego procesu wytwarzania zaczyna się od utworzenia przez kierownika zakładu zamówienia zawierającego rodzaje części oraz wielkość partii.

Do podstawowych zadań systemu sterowania ZMT należy kontrola pracy i organizowanie współpracy urządzeń technologicznych, transportowych i robotów w sposób pozwalający realizować zakładane zadania produkcyjne. Znaczącą rolę odgrywa w tych procesach oprogramowanie.

Opis funkcjonowania ZTM dla potrzeb oprogramowania systemu sterowania powinien być zwięzły i dokładny. Na podstawie opisu identyfikowani są użytkownicy systemu (rzeczowniki), obiekty obszaru przedmiotowego uczestniczące w zadaniach sterowania (rzeczowniki) oraz zachowanie obiektów (czasowniki).

Zadania każdego systemu komputerowego określone są przede wszystkim potrzebami użytkowników systemu. Użytkownikami systemu mogą być ludzie i inne systemy np. systemy sterowania urządzeń. Użytkownicy mogą być użytkownikami wewnętrznymi lub zewnętrznymi.

Użytkownicy i sposób ich współpracy z systemem przedstawiany jest w języku UML na diagramach przypadków użycia (opis graficzny). Użytkownicy nazywani są aktorami, a oferowane im usługi przypadkami użycia [3], [4].

### Aktorzy i przypadki użycia systemu sterowania ZMT

Diagram przypadków użycia stosowany jest do modelowania usług jakie programy systemu komputerowego świadczą aktorom, zgodnie z ich żądaniami i uprawnieniami. Nie pokazuje on na tym etapie (który jest najczęściej początkiem modelowania) konkretnych rozwiązań technicznych.

W przypadku systemu sterowania ZTM aktorami wewnętrznymi systemu są pracownicy pełniący istotne role w procesie sterowania i zarządzania. Jest to: **Kierownik Zakładu, Inżynier Technolog i Operator.**

Z systemem współpracują również aktorzy, którzy są odpowiednikami systemów zewnętrznych: **Robot Montażowy (obróbkowy) oraz Robot Transportowy**. Przypadki użycia można grupować w pakiety aktorów. O przypisaniu przypadku do pakietu decyduje inicjowanie przypadku przez aktora i udział aktora w realizacji przypadku. Poniżej przedstawiono pakiety przypadków użycia poszczególnych aktorów i należące do nich przypadki użycia

**Pakiet Przypadków Użycia Operatora:** *Kontrolować Sygnały Alarmowe, Kontrolować Stan Stanowiska Pracy, Zmienić Stan Stanowiska Pracy i Ogłosić, Reagować na Alarm i Ogłosić*

Np. *Reagować na Alarm i Ogłosić* Jeśli w procesie wytwarzania zaistniało zagrożenie, wszczynany jest alarm. Operator zawiadamia o tych sygnałach alarmowych do których ma uprawnienia. Jeżeli to jest możliwe usuwa przyczynę alarmu.

**Pakiet Przypadków Użycia Inżyniera Technologa:** *Utworzyć/Zmienić Kartę Technologiczną, Utworzyć/Zmienić Operację (extend)*

**Pakiet Przypadków Użycia Kierownika Zakładu:** *Utworzyć/Zmienić Zamówienie, Wyprodukować Detal*. Jako przykład, diagram użycia pakietu został przedstawiony na rys. 1.

Z przypadku użycia *Wykonać Detal* można wydzielić trzy przypadki użycia: *Załadować Detal*. – dostarczenie nowego detalu na pierwszą liniową stację roboczą. *Montować(Obrobić) Detal na Stacji Roboczej* – uzyskanie

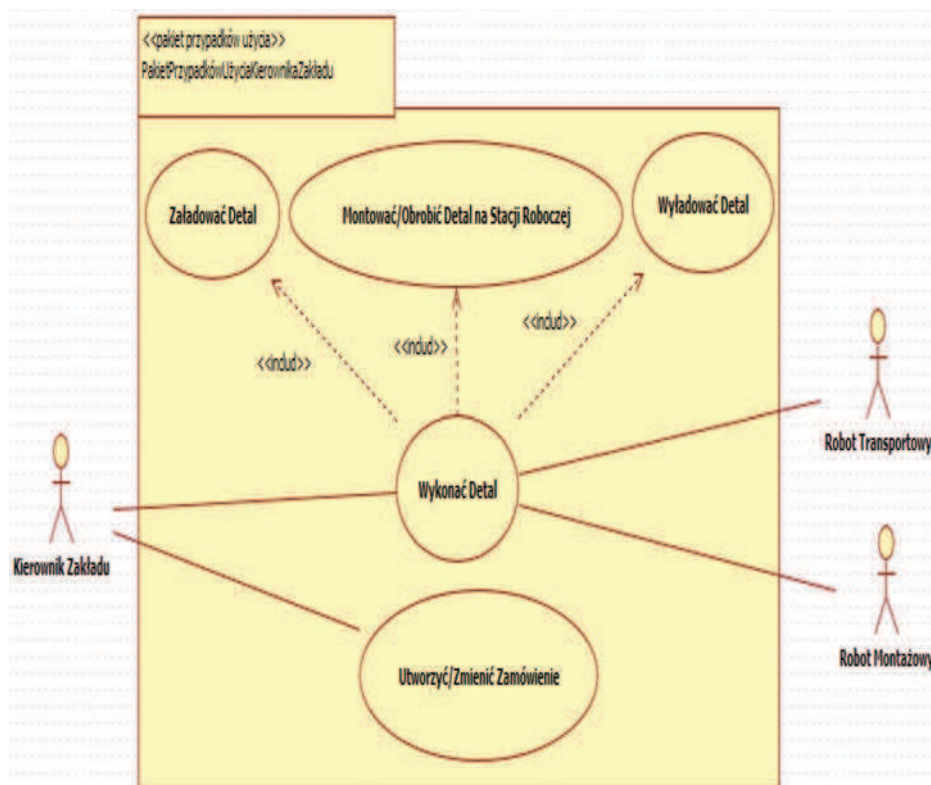
detalu od stacji poprzedzającej, wykonanie operacji i przesłanie do stacji następnej (przypadek powtarza się). *Wylądować Detal*. Wysłanie gotowego detalu z ostatniej stacji liniowej do stacji wylądunku, która jednocześnie informuje kierownika o zakończeniu montażu (obróbki).

Każdy przypadek użycia realizowany jest przez odpowiednie dla jego zadań oprogramowanie.

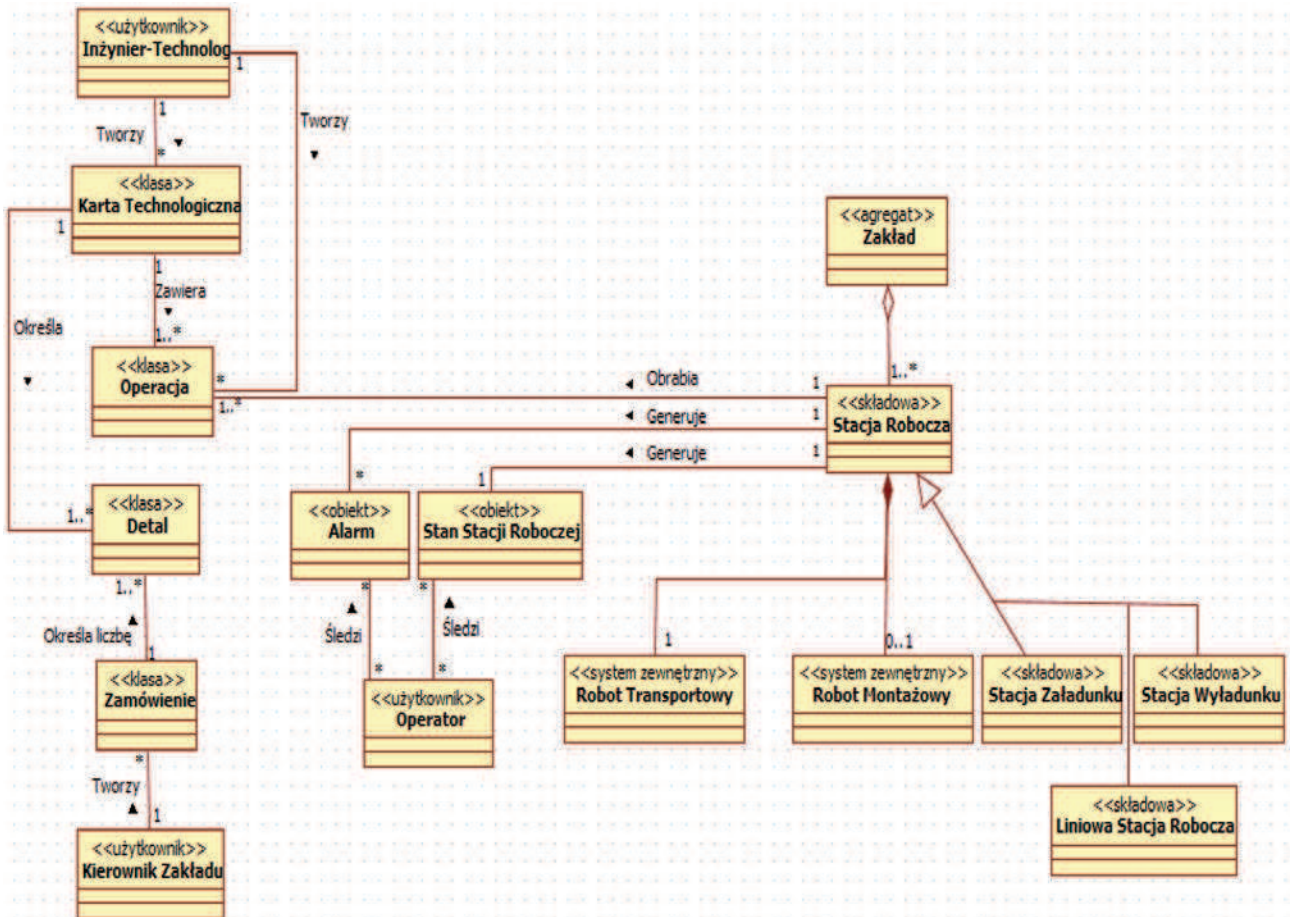
### Koncepcja statycznego modelu obszaru przedmiotowego ZMT

W oparciu o analizę opisu zadania sterowania i analizę przypadków użycia specyfikuje się klasy i obiekty obszaru przedmiotowego uczestniczące w procesie sterowania (role). Oprogramowanie systemów komputerowych realizowane jest w dużej części zgodnie z paradygmatem obiektowym, dlatego model obszaru przedmiotowego powinien być budowany z uwzględnieniem zależności w jakie wchodzi obiekty obszaru przedmiotowego. Do budowy statycznego modelu obszaru przedmiotowego ZMT wykorzystano koncepcje diagramu klas języka UML.

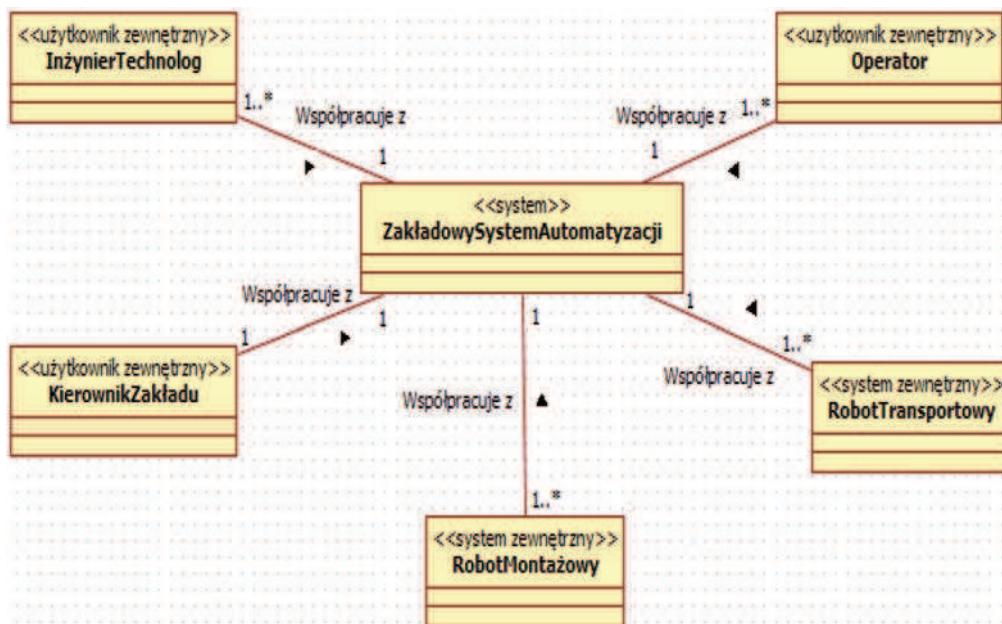
Można przyjąć, że ZMT jest klasą agregatem w skład której wchodzi klasy stacji roboczych. Wyróżnia się trzy rodzaje stacji roboczych: załadunku, wylądunku i liniową. Stacja liniowa realizuje operacje technologiczne (montażu/obróbki). Klasy stacji wchodzi w zależności specjalizacja/generalizacja. Pomiędzy klasami obszaru przedmiotowego istnieją wielorakie związki. Klasy i związki



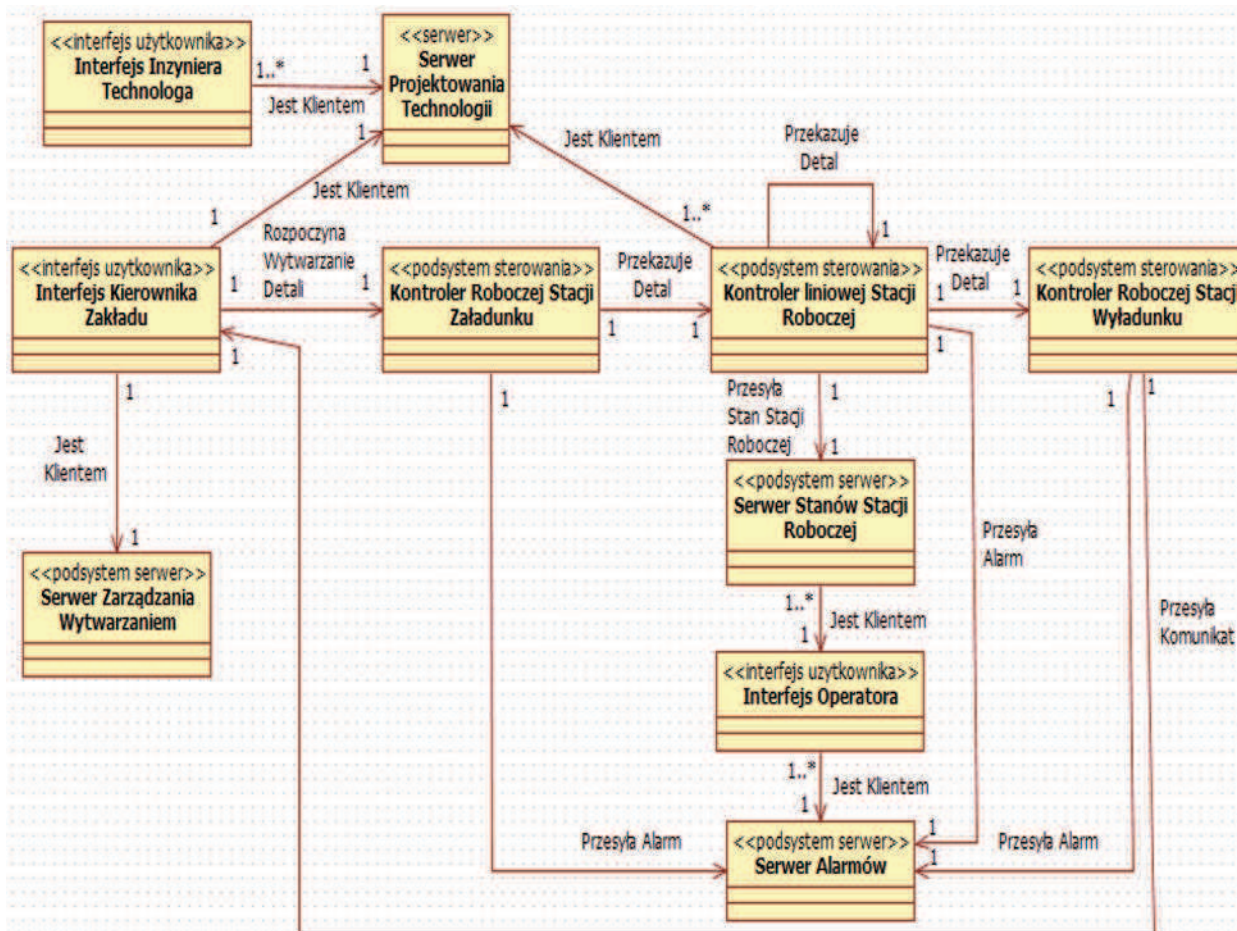
Rys. 1 Pakiet przypadków użycia Kierownika  
Fig. 1 Package of Manager usage cases



Rys. 2. Model struktury obszaru przedmiotowego ZMT (statyka)  
 Fig. 2. The structure model of the subject area of RTM (statics)



Rys. 3. Kontekstowy diagram klas ZMT (współpraca z użytkownikami i systemami zewnętrznymi)  
 Fig. 3. Contextual diagram of RTM classes (cooperation with users and external systems)



Rys. 4. Klasy składowe komputerowego systemu sterowania ZMT. Model statyki oprogramowania  
 Fig. 4. Component classes of the RTM computer control system. The model of software statics

klas z krotnościami związków zostały przedstawione na diagramie klas obszaru przedmiotowego (rys. 2). Z każdą klasą związane są charakteryzujące klasę atrybuty.

Przedstawiony na rys. 3 kontekstowy diagram klas pokazuje współpracę systemu nadrzędnego ZMT (agregatu) z użytkownikami i systemami zewnętrznymi. Stacje robocze są obiektami wewnętrznymi dla systemu sterowania, natomiast roboty montażowy(obróbkowy) i transportowy, obsługujący stację liniową, są dla systemu sterowania systemami zewnętrznymi. Każdy z nich sterowany jest swoim układem sterowania, realizującym programy załadowane z systemu automatyzacji przedsiębiorstwa.

#### Klasy składowe komputerowego systemu automatyzacji wytwarzania w ZMT. Model statyki systemu komputerowego

Obiekty obszaru przedmiotowego przekształcane są w obiekty oprogramowania komputerowego systemu sterowania.

Do obiektów które stosunkowo długo przechowują informację należą: *Karta Technologiczna*, *Operacja*, *Zamówienie* i *Detal*. Można również zaliczyć do nich obiekty: *Stan Stacji Robotczej* i *Alarm*. Obiekty te są istotnymi

obiettami i zostaną przekształcone na obiekty serwery do których zwracają się z żądaniem usług obiekty klienci. Na diagramie klas oprogramowania obiekty te są przedstawione jako: *Serwer Kart Technologicznych*, *Serwer Operacji*, *Serwer Zamówień*, *Serwer Detali*, *Serwer Stanów Stacji Robotczej* i *Serwer Sygnałów Alarmowych*. Każdy aktor-człowiek komunikuje się z systemem sterowania przy pomocy interfejsu. W systemie istnieją interfejsy: *Inżyniera Technologia*, *Kierownika Zakładu* i *Dyżurnego Operatora*. Do sterowania stacjami roboczymi wymagany jest koniecznie obiekt *Kontroler Stacji Robotczej*. W systemie istnieją: *Kontroler Stacji Załadunku* (jeden), *Kontroler Stacji Wyładunku* (jeden), *Kontroler Liniowej Stacji Robotczej* (po jednym dla każdej stacji roboczej). Przedstawiony na rys. 4 diagram klas komponentów systemu komputerowego kończy pierwszy wstępny etap projektowania struktury oprogramowania systemu sterowania. Struktura może być uszczegółowiona po etapie modelowania zachowania się systemu (dynamiki) [3], [4].

Zamieszczone w artykule diagramy zostały wykonane przy pomocy dostępnego oprogramowania STAR UML [7]. Proponowane są również inne aplikacje o różnicowanych możliwościach i warunkach dystrybucji.

## Wnioski i uwagi

Istniejący stan realizacji w zautomatyzowanych maszynach i systemach, szczególnie zintegrowanych, coraz większej liczby funkcji przez układy elektroniczne i systemy komputerowe (intelektualne), powinien zwrócić większą uwagę na proces projektowania oprogramowania.

Stosowanie wyspecjalizowanych narzędzi wspomagających proces projektowania oprogramowania, pozwala utworzyć komponentową (modułową) strukturę oprogramowania, skraca czas realizacji oprogramowania oraz poprawia współpracę w zespołach składających się z projektantów różnych specjalności.

Zaprojektowanie struktury oprogramowania ZMT metodą wykorzystującą diagramy języka UML pokazało, że metoda ta może być przydatna w procesie projektowania oprogramowania zautomatyzowanych maszynach i systemów.

Kolejnym bardzo istotnym etapem projektowania oprogramowania jest zbudowanie modelu współpracy komponentów oprogramowania. Etap ten jest etapem modelowania zachowania się komponentów programowych. Nazywa się go również analizą dynamiki oprogramowania. W języku UML używa się do tego celu diagramów: stanu, aktywności, sekwencji i współpracy. Etap ten pokazuje również w jaki sposób obiekty i komponenty uczestniczą w realizacji przypadków użycia a wnioski z modelowania dynamiki przyczyniają się często do wprowadzenia poprawek w strukturze oprogramowania. Kolejnym etapem jest projektowanie architektury oprogramowania, która pokazuje rozmieszczenia komponentów oprogramowania w węzłach sieci.

Diagramy tworzące projekt architektury, struktury i dynamiki oprogramowania są podstawowym i wyczer-

pującym źródłem wiedzy na temat funkcjonowania oprogramowania. Końcowym etapem jest napisanie z wykorzystaniem diagramów kodu programów i przetestowanie oprogramowania

Projekty struktury, dynamiki, architektury oraz przetestowany kod programów stanowią dokumentację projektową oprogramowania systemu komputerowego.

## LITERATURA

- [1] Craig Larman. UML i wzorce projektowe. Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2011. s. 752.
- [2] Douglass Brouce, Real-Time UML Workshop for Embedded Systems, Wydawnictwo Elsevier Science & Technology, 2014 s. 576.
- [3] Gomaa Hassan, Designing Concurrent, Distributed, and Real-Time Applications with UML, Wyd. Addison-Wesley 2002.
- [4] Gomaa Hassan, Software Modeling and Design: UML, Use Cases, Patterns, and Software Architectures, Cambridge University Press, New York 2011. s. 550.
- [5] Monografia. Komputerowo zintegrowane projektowanie elastycznych systemów produkcyjnych. Redakcja Bogdan Palczewski, Antoni Świć i inni. Wydawnictwo Politechniki Lubelska. Lublin. 2015. s. 376.
- [6] Zdanowicz Ryszard, Robotyzacja dyskretnych procesów produkcyjnych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009. s. 427.
- [7] [www.staruml.io](http://www.staruml.io). 05.03.2018

---

dr hab. inż. Jerzy Stamirowski, prof. PŚk – Katedra Automatyki i Robotyki Politechniki Świętokrzyskiej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: [j.stamirowski@tu.kielce.pl](mailto:j.stamirowski@tu.kielce.pl)

# MONOLITYCZNA A HIERARCHICZNA METODA HARMONOGRAMOWANIA MONTAŻU WIELOWARIANTOWYCH PRODUKTÓW – PORÓWNANIE DWÓCH KONCEPCJI

## *Monolithic and hierarchical method of scheduling for assembly of multi-option products – comparison of two concepts*

Marek MAGIERA

**Streszczenie:** W artykule porównano dwie metody przeznaczone do budowy najkrótszych harmonogramów montażu. Dotyczą one linii montażowych z maszynami równoległymi, wyposażonymi w bufory międzyoperacyjne o ograniczonych pojemnościach. Uwzględniono sztywne, a także alternatywne marszruty montażu. Metody przeznaczone są dla produktów wielowariantowych – każdy z produktów określonego typu może posiadać wyróżniające go cechy, uwzględniające wymagania odbiorców. W przypadku przedstawionej w artykule metody hierarchicznej najpierw dokonywany jest przydział operacji do maszyn, a następnie wyznaczane są czasy rozpoczęcia danych operacji. Zastosowano programowanie całkowitoliczbowe – poszczególnym poziomom metody przyporządkowano liniowe modele matematyczne zadań programowania całkowitoliczbowego. Zaprezentowaną w pracy metodę hierarchiczną porównano z metodą monolityczną, dzięki której operacje równocześnie rozdzielane są w przestrzeni i w czasie. W rezultacie zastosowaniu programowania całkowitoliczbowego metoda monolityczna umożliwia wyznaczanie optymalnych harmonogramów montażu. Przedstawiono wyniki eksperymentów obliczeniowych, których celem było porównanie obu koncepcji wyznaczania harmonogramu montażu.

**Słowa kluczowe:** linie montażowe, harmonogramowanie montażu, szeregowanie operacji, programowanie całkowitoliczbowe

**Abstract:** The monolithic and the hierarchical method are compared in the paper. They are intended to build as short assembly schedules as possible. The methods are constructed for assembly lines with parallel machines and with intermediate buffers. A fixed and an alternative assembly routes are regarded. The most important, distinctive feature of these methods, is that they are provided for multi-option products. Assembly of various products in different variants is the reply to the contemporary challenges faced by the manufacturers, who try to satisfy the demands of individual customers. The hierarchical method consists of two levels. The first level of the hierarchical method is connected with balancing machine workloads. The task scheduling is accomplished on the second level of the method. The mathematical models of integer programming tasks were built for its specific levels. The presented in the paper hierarchical method was compared with the monolithic method. The problems of balancing machine workloads and scheduling are solved simultaneously using the monolithic method. Using integer programming and the monolithic concept allowed to determine optimum solutions. The results of computational experiments with the proposed approaches for scheduling for assembly of multi-option products are presented.

**Key words:** assembly lines, assembly scheduling, scheduling, integer programming

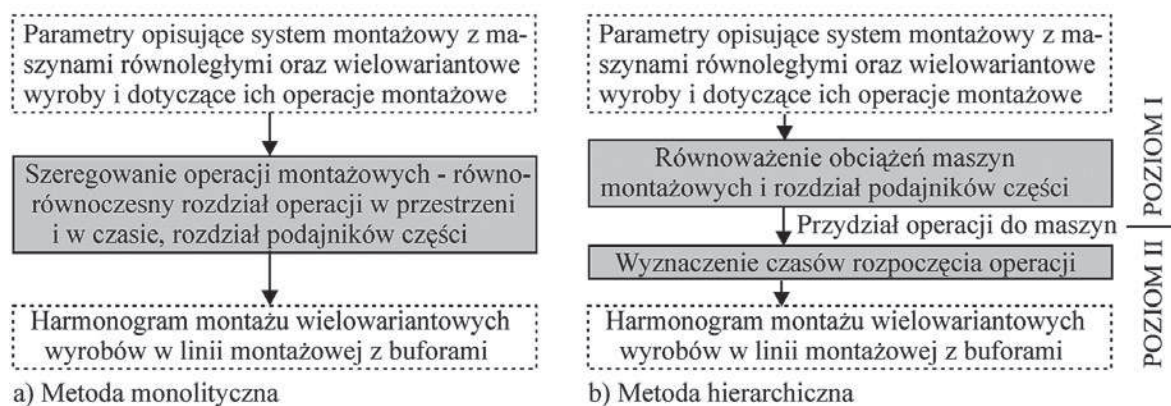
### **Wprowadzenie – koncepcje rozdziału zadań w harmonogramowaniu montażu**

Harmonogramowanie montażu – czynność polegająca na budowie harmonogramu montażu – obejmuje dwa podstawowe zadania: rozdział operacji montażowych w przestrzeni (ich przydział do maszyn) oraz rozdział operacji w czasie (wyznaczenie czasów rozpoczęcia wykonywania poszczególnych operacji) [2]. Zadania te mogą być wykonywane równocześnie – tak jest w przypadku koncepcji monolitycznej (jednopoziomowej) lub zadania wykonywane są kolejno – charakteryzuje się tym koncepcja hierarchiczna (wielopoziomowa) [9].

W artykule porównano obie koncepcje dotyczące harmonogramowania montażu z uwzględnieniem montażu wielowariantowych produktów. Odpowiedzią na konieczność montowania konkurencyjnych produktów było opracowanie metod dotyczących budowy harmonogramu montażu wielowariantowych produktów. Dzięki temu

wzięto pod uwagę indywidualne wymagania odbiorców, a produkty mają specyficzne cechy (dodatkowe części, odmienne parametry techniczne) – spełniane są zatem wymagania klientów. Konieczność spełniania szeregu specjalistycznych wymagań w systemach montażowych, mających wpływ na indywidualizację wytwarzania, zauważono m.in. w pracy [4].

Dwie koncepcje harmonogramowania montażu wielowariantowych produktów zilustrowano na rys. 1. W przypadku metody dotyczącej koncepcji hierarchicznej na poziomie I dokonywany jest przydział operacji do maszyn i rozdział podajników części, a następnie operacje są szeregowane. Nie jest to oczywiście jedyny wariant metody hierarchicznej. W pracach [7] oraz [5] opublikowano metody opracowane przez autora tego artykułu, w których na poziomie I operacje przydzielane są do stadiów, a przydziały operacji do maszyn (z uwzględnieniem wcześniej dokonanego rozdziału operacji pomiędzy stadia) oraz rozdział operacji w czasie dokonywany jest na



Rys. 1. Schematy blokowe dwóch metod: a) metoda monolityczna, b) metoda hierarchiczna  
 Fig. 1. Block diagram of two methods: a) the monolithic method, b) the hierarchical method

poziomie II. Jednakże w przypadku produktów wielowariantowych, których dotyczy znaczna liczba parametrów i zmiennych, praktyczniejsza jest koncepcja zilustrowana na rys. 1b – rozdział operacji do maszyn dokonywany jest na poziomie I. Ma to korzystny wpływ na złożoność obliczeniową.

W publikacji porównano metody oparte na obu koncepcjach – metodę monolityczną oraz hierarchiczną, zaproponowane przez autora artykułu. Postawione zadanie do rozwiązania za pomocą tych metod można sformułować następująco: mając dane parametry opisujące wielowariantowe produkty, linię montażową z maszynami równoległymi wyposażoną w bufory międzyoperacyjne o ograniczonej pojemności, należy zbudować jak najkrótszy harmonogram montażu tych produktów. Równocześnie należy dokonać rozdziału podajników montowanych części. Uwzględnić należy rodzaj marszruty montażu: sztywną (każdy typ operacji przydzielany jest do maszyn należących do jednego stadium) lub alternatywną (każdy typ operacji przydzielany jest do co najmniej jednego stadium). Należy wziąć pod uwagę także ograniczoną dostępność maszyn montażowych.

Schematy blokowe zamieszczone na rys. 1 dotyczą metod opracowanych w celu rozwiązania opisanego zadania. Wykorzystano programowanie całkowitoliczbowe w przypadku obu metod. Dzięki zastosowaniu tego narzędzia informatycznego i monolitycznego podejścia do rozwiązania problemu, można wyznaczać rozwiązania optymalne. Jednakże zastosowanie metody monolitycznej skutkuje koniecznością rozwiązywania problemów o znacznych rozmiarach, wpływa to też niekorzystnie na czas obliczeń. W związku z tym w przypadku problemów o relatywnie znacznych rozmiarach proponowane jest zastosowanie metody hierarchicznej. Opracowana metoda hierarchiczna charakteryzuje się przypisaniem modeli matematycznych poszczególnym poziomom. Modele te zawierają binarne zmienne decyzyjne. Oznaczenia modeli matematycznych zestawiono w tab. 1.

Ujętą w artykule problematykę harmonogramowania montażu szerzej opisano w pracach [7] i [8]. Zalety

Tabela 1. Zestawienie oznaczeń modeli matematycznych  
 Table 1. Symbols for the mathematical models

Metoda	Sztywne marszruty	Alternatywne marszruty
Monolityczna	M1	M2
Hierarchiczna	M3 – poziom I, M5 – poziom II	M4 – poziom I, M5 – poziom II

stosowania programowania matematycznego w budowie harmonogramów montażu potwierdzają m.in. prace [8] i [1]. W rozdziale drugim artykułu zawarto informacje dotyczące modeli matematycznych przypisanych poszczególnym metodom. Rozdział trzeci poświęcony jest porównaniu obu koncepcji na przykładzie zaprezentowanych metod.

#### Modele matematyczne dotyczące metody monolitycznej i hierarchicznej

Modele matematyczne M1 i M2, dotyczące metody monolitycznej zostały zaprezentowane szczegółowo w pracy [6] autora niniejszego artykułu. Do najważniejszych zmiennych, stosowanych w tych modelach należą zmienne binarne  $q_{ijls}$ , w przypadku których  $q_{ijls} = 1$ , jeżeli na maszynie  $i$  operacja  $j$  dotycząca produktu  $s$  jest wykonywana w przedziale czasowym  $l$ . W pracy [6] opisano również specyfikę struktury danych dotyczących wielowariantowych produktów, zamieszczono przykład cyfrowego przedstawienia ograniczeń dotyczących kolejności montażu części składowych produktów. W związku z uwzględnieniem planowanych przestojów maszyn, wskazane jest oszacowanie obciążenia tzw. wąskiego gardła  $LBP_{max}$ , np. za pomocą procedury opisanej w pracy [7] (str. 170).

Przedstawienie modeli matematycznych M3, M4 i M5, dotyczących koncepcji hierarchicznej, poprzedzone jest zestawieniem parametrów i zmiennych wykorzystanych w tych modelach, zamieszczonym w tab. 2.



Tabela 2. Zestawienie oznaczeń zbiorów, parametrów i zmiennych dotyczących koncepcji hierarchicznej

Table 2. Summary of sets, parameters and variables connected with hierarchic approach

Zbiory:	
$I$	– zbiór maszyn montażowych: $I = \{1, \dots, M\}$ ;
$J$	– zbiór typów operacji montażowych: $J = \{1, \dots, N\}$ ;
$K$	– zbiór typów montowanych produktów: $K = \{1, \dots, T\}$ ;
$L$	– zbiór przedziałów czasowych: $L = \{1, \dots, H\}$ ;
$S$	– zbiór indeksów wielowariantowych produktów;
$V$	– zbiór stadiów: $V = \{1, \dots, A\}$ ;
$J^C$	– zbiór operacji montażowych polegających na domontowaniu części pobranej z podajnika, $J^C \subset J$ ;
$J^1$	– zbiór operacji podstawowych, $J^1 \subset J$ ;
$J^2$	– zbiór operacji dodatkowych (nadających specyficzne cechy wielowariantowym produktom), $J^2 \subset J$ ;
$O^1$	– zbiór par $(k, j)$ , w przypadku których operacja podstawowa $j \in J^1$ dotyczy produktu typu $k \in K$ ;
$O^2$	– zbiór par $(s, j)$ , w przypadku których operacja dodatkowa $j \in J^2$ dotyczy produktu $s \in S$ ;
$R^1$	– zbiór uporządkowanych trójek $(k, r, j)$ , w których kolejno wykonywane operacje podstawowe $r, j \in J^1$ dotyczą produktu typu $k$ ;
$R^2$	– zbiór uporządkowanych trójek $(s, r, j)$ , w których kolejno wykonywane operacje $r, j \in J$ dotyczą produktu $s$ i co najmniej jedna operacja należy do zbioru $J^2$ ;
$T$	– zbiór uporządkowanych par $(s, k)$ , w których produkt $s$ jest typu $k$ ;
$V_j$	– zbiór stadiów zawierających maszyny zdadne do wykonania operacji $j \in J$ ;
$Z$	– zbiór uporządkowanych par $(i, v)$ , w przypadku których 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;
$d_v$	– pojemność bufora międzyoperacyjnego umieszczonego przed stadium $v$ ;
$g_{ev}$	– czas transportu produktu pomiędzy maszynami umieszczonymi w stadiach $e$ oraz $v$ ;
$P_{jk}^1$	– czas wykonywania operacji podstawowej $j \in J^1$ dotyczącej produktu typu $k$ ;
$P_{js}^2$	– czas wykonywania operacji dodatkowej $j \in J^2$ dotyczącej produktu $s$ ;
$n_{il}$	= 1, jeżeli maszyna $i$ jest dostępna w przedziale czasowym $l$ , inaczej $n_{il} = 0$ ;
Zmienne:	
• dotyczące modeli M3 i M4 (poziom I):	
$P_{max}$	– obciążenie najbardziej obciążonej maszyny montażowej (tzw. wąskiego gardła);
$x_{ij}$	= 1, jeżeli typ operacji $j$ przydzielono do maszyny $i$ , inaczej $x_{ij} = 0$ ;
$z_{ijs}$	= 1, jeżeli do maszyny $i$ przydzielono operację $j$ dotyczącą produktu $s$ , inaczej $z_{ijs} = 0$ ;
• dotyczące modelu M5 (poziom II):	
$q_{isl}$	= 1, jeżeli w przedziale czasowym $l$ operacje dotyczące produktu $s$ wykonywane są na maszynie $i$ ; inaczej $q_{isl} = 0$ ;
$y_{vsl}$	= 1, jeżeli w przedziale czasowym $l$ produkt $s$ znajduje się w buforze międzyoperacyjnym umieszczonym przed stadium $v$ , inaczej $y_{vsl} = 0$ ;

Przedstawione modele M3 i M4 dotyczące poziomu I metody hierarchicznej:

Zminimalizować:  $P_{\max}$  (1)  
przy ograniczeniach:

$$\sum_{(k,j) \in O^1} \sum_{s \in S} p_{jk}^1 z_{ijs} + \sum_{(s,j) \in O^2} p_{js}^2 z_{ijs} + \sum_{l \in L: l \leq LBP_{\max}} \sum_{i \in I} (1 - n_{il}) \leq P_{\max}; \quad i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1; \quad j \in J - \text{w przypadku modelu M3} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq 1; \quad j \in J - \text{w przypadku modelu M4} \quad (4)$$

$$x_{ij} = 0; \quad (i, v) \in D; \quad j \in J; \quad v \notin V_j \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J^c} a_{vj} x_{ij} \leq b_v; \quad (i, v) \in D \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} z_{ijs} = 1; \quad (s, k) \in T; \quad j \in J: (k, j) \in O^1 \vee (s, j) \in O^2 \quad (7)$$

$$z_{ijs} \leq x_{ij}; \quad i \in I; \quad j \in J; \quad (s, k) \in T: (k, j) \in O^1 \vee (s, j) \in O^2 \quad (8)$$

$$z_{ijs} + z_{trs} \leq 1; \quad (i, v), (\tau, v) \in D; \quad r, j \in J; \quad s \in S; \quad i \neq \tau; \quad r \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} i z_{ijs} \leq \sum_{i \in I} i z_{irs}; \quad j, r \in R; \quad (s, k) \in T: (k, j, r) \in R^1 \vee (s, j, r) \in R^2 \quad (10)$$

$$z_{ijs} \in \{0, 1\}; \quad i \in I; \quad j \in J; \quad s \in S \quad (11)$$

Modele M3 i M4 przeznaczone są do równoważenia obciążeń – minimalizowane jest obciążenie najbardziej obciążonej maszyny  $P_{\max}$  (1). Ograniczenia dotyczące tych modeli zapewniają: (2) – wyznaczenie obciążenia najbardziej obciążonej maszyny, (3) – sztywność marszrut montażu (w przypadku modelu M3), (4) – alternatywność marszrut montażu (w przypadku modelu M4), (5) – eliminację przydziałów operacji montażowych do niewłaściwych maszyn, (6) – umieszczenie podajników części przy poszczególnych maszynach tylko w przypadku dostępności przestrzeni roboczej tych maszyn, (7) – rozdział wszystkich operacji podstawowych oraz dodatkowych pomiędzy maszyny, (8) – przydział operacji dotyczących montażu wielowariantowych produktów do tych maszyn, którym przydzielono możliwość wykonywania odpowiednich typów operacji, (9) – obciążenie co najwyżej jednej z maszyn równoległych przez dany produkt, (10) – przepływ jednokierunkowy i wykonywanie operacji

zgodnie z danymi sekwencjami montażowymi (cyfrowo zapisanymi w zbiorach  $R^1$  i  $R^2$ ); (11) – binarność zmiennych decyzyjnych.

Wyznaczone za pomocą modeli M3 i M4 wartości zmiennych  $z_{ijs}$  stanowią dane wejściowe do zadania rozwiązywanego na poziomie II metody hierarchicznej. Wykorzystano je do wyznaczenia  $t_{is}$  – czasów obciążeń poszczególnych maszyn i przez wielowariantowe produkty  $s$  – zgodnie z równaniem (12).

$$t_{is} = \sum_{k \in K: (s, k) \in T} \sum_{j \in J^1: (k, j) \in O^1} p_{jk}^1 z_{ijs} + \sum_{j \in J^2: (s, j) \in O^2} p_{js}^2 z_{ijs}; \quad i \in I; \quad s \in S \quad (12)$$

Model M5, który dotyczy poziomu II metody hierarchicznej:

$$\text{Zminimalizować należy: } \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} l q_{isl} \quad (13)$$

$$\text{przy ograniczeniach: } \sum_{i \in I} q_{isl} = t_{is}; \quad l \in L; \quad s \in S \quad (14)$$

$$\sum_{s \in S} q_{isl} \leq n_{il}; \quad i \in I; \quad l \in L \quad (15)$$

$$\sum_{l \in L} \frac{l q_{isl}}{t_{is}} - \sum_{l \in L} \frac{f q_{rsf}}{t_{rs}} - \frac{t_{is} + t_{rs}}{2} \geq g_{ev}; \quad (i, v), (\tau, e) \in D; \quad s \in S; \quad e < v; \quad t_{is}, t_{rs} > 0 \quad (16)$$

$$l q_{isl} - f q_{rsf} \leq t_{is} - 1 + (H + 1)(1 - q_{rsf}); \quad i \in I; \quad l, f \in L; \quad l > f; \quad s \in S \quad (17)$$

$$\sum_{l \in L} \frac{l q_{isl}}{t_{is}} - \sum_{l \in L} \frac{l q_{tsl}}{t_{ts}} - \frac{t_{is} + t_{ts}}{2} - g_{ev} \leq \sum_{l \in L} y_{vsl}; \quad s \in S; \quad l \in L;$$

$$(i, v), (\tau, e) \in D; \quad e < v; \quad t_{is}, t_{ts} > 0; \quad \sum_{w=\tau}^i t_{ws} = t_{ts} + t_i \quad (18)$$

$$l y_{vsl} \leq \sum_{f \in L} \frac{f q_{isf}}{t_{is}} - \frac{t_{is} - 1}{2} - 1; \quad (i, v) \in D; \quad v > 1; \quad s \in S; \quad t_{is} > 0 \quad (19)$$

$$l y_{vsl} \geq \sum_{f \in L} \frac{f q_{rsf}}{t_{rs}} + \frac{t_{rs} + 1}{2} + g_{ev} - (H + 1)(1 - y_{vsl}); \quad s \in S; \quad l \in L;$$

$$(i, v), (\tau, e) \in D; \quad e < v; \quad t_{rs} > 0; \quad \sum_{w=\tau}^i t_{ws} = t_{rs} + t_i \quad (20)$$

$$\sum_{s \in S} y_{vsl} \leq d_v; \quad l \in L; \quad v \in V \setminus \{1\} \quad (21)$$

$$q_{isl}, y_{vsl} \in \{0, 1\}; \quad i \in I; \quad l \in L; \quad s \in S; \quad v \in V \quad (22)$$

Minimalizacja sumy (13) zapewnia nie tylko wyznaczenie najkrótszych harmonogramów, ale także najkrótsze czasy zakończenia montażu poszczególnych produktów. Ograniczenia dotyczące modelu M5 zapewniają: (14) – wykonanie wszystkich operacji na maszynach przydzielonych na poziomie I z uwzględnieniem czasu operacji montażowych, (15) – montaż wyłącznie w okresie dostępności poszczególnych maszyn, (16) – rezerwację czasu na transport produktów między stadiami i jednokierunkowy przepływ produktów, (17) – niepodzielność każdej operacji w czasie i w przestrzeni, (18) – wyznaczenie liczby przedziałów czasowych, w których poszczególne produkty będą umieszczone w buforach, (19) – umieszczenie produktów w buforach przed wykonaniem kolejnej operacji, (20) – obciążenie buforów przez produkty po wykonaniu ostatniej operacji, (21) – respektowanie ograniczonej pojemności buforów, (22) – binarność zmiennych decyzyjnych.

### Eksperymenty obliczeniowe – porównanie metody monolitycznej i hierarchicznej

Celem przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych była nie tylko weryfikacja modeli matematycznych, ale przede wszystkim porównanie metody monolitycznej i hierarchicznej – zmierzenie ich zalet oraz wad. Eksperymenty te objęły 5 grup zadań. W przypadku każdej z grup rozwiązano 25 przykładów testowych. Modele matematyczne zostały zakodowane w języku AMPL (A Modelling Language for Mathematical Programming) [3]. Do wstępnego testowania modeli (weryfikacja ograniczeń) wykorzystano pakiet optymalizacji dyskretnej GNU Linear Programming Kit (GLPK), do obliczeń zastosowano GUROBI [10].

Porównano długości wyznaczanych harmonogramów i czasy obliczeń. W przypadku metody hierarchicznej wyznaczono długość harmonogramu  $C_{\max}$  za pomocą równania (23). Analogiczne równanie dotyczące metody monolitycznej zamieszczono w pracy [6], w której opisano tę jednopoziomową metodę. Wskaźniki  $w_1$  i  $w_2$  służą do porównania długości harmonogramów. Wskaźnik  $w_1$  dotyczy sztywnych marszrut montażu, natomiast  $w_2$  określony jest dla marszrut alternatywnych. Zdefiniowano je

w równaniach (24), gdzie indeksy górne przy  $C_{\max}$  zawierają oznaczenia modeli zastosowanych w celu budowy harmonogramu.

$$C_{\max} = \max_{i \in I, l \in L, s \in S} lq_{is} \quad (23)$$

$$w_1 = \frac{C_{\max}^{M3,M5} - C_{\max}^{M1}}{C_{\max}^{M1}} \cdot 10\%, \quad (24)$$

$$w_2 = \frac{C_{\max}^{M4,M5} - C_{\max}^{M2}}{C_{\max}^{M2}} \cdot 10\%$$

Zdefiniowane w równaniach (25) wskaźniki  $c_1$  (dotyczący sztywnych marszrut montażu) i  $c_2$  (dotyczący alternatywnych marszrut montażu) przeznaczone są do porównania czasów obliczeń.  $CPU^M$  oznacza czas obliczeń przy wykorzystaniu modelu M.

$$c_1 = \frac{CPU^{M1} - CPU^{M3,M5}}{CPU^{M3,M5}} \cdot 10\%, \quad (25)$$

$$c_2 = \frac{CPU^{M2} - CPU^{M4,M5}}{CPU^{M4,M5}} \cdot 10\%$$

W tab. 3 zestawiono parametry grup zadań testowych i wartości średnie wskaźników porównań metod.

Wartości średnie wskaźników  $c_1$  i  $c_2$  potwierdzają skrócenie czasów obliczeń w przypadku zastąpienia metody monolitycznej metodą hierarchiczną. W przypadku zadań testowych o największych rozmiarach (grupa 5) harmonogramy budowane za pomocą metody monolitycznej wyznaczane były w dłuższym czasie – o ok. 20%, a w przypadku marszrut alternatywnych o ok. 22% dłuższym czasie niż w przypadku zastosowania metody hierarchicznej. To skrócenie czasów obliczeń zostało okupione pewną odchyłką od optimum, co wykazują wartości wskaźników  $w_1$  i  $w_2$ . Ponadto zastosowanie marszrut sztywnych przyczyniło się do zwiększenia długości harmonogramów maksymalnie do ok. 8% – w porównaniu do dozwolenia marszrut alternatywnych, czyli takich marszrut, w przypadku których każdy typ operacji przydzielony jest do maszyn należących do różnych stadiów.

Tabela 3. Parametry grup zadań testowych i wyniki porównania metod  
Table 3. Parameters of groups of tasks and results of comparison of the methods

Grupa zadań	Parametry grupy zadań						Sztywne marszrut		Alternatywne marszrut	
	A	M	N	W	S	H	$w_1$ [%]	$c_1$ [%]	$w_2$ [%]	$c_2$ [%]
1	2	4	10	3	6	16	6,7	3,8	6,2	4,1
2	2	6	12	4	8	18	6,4	9,7	5,8	9,7
3	3	6	14	5	10	18	4,5	12,2	4,5	12,9
4	3	6	14	5	10	20	3,7	16,5	3,3	18,2
5	4	8	16	6	12	25	3,9	20,1	3,3	21,9

Liczby: A – stadiów, M – maszyn, N – typów operacji montażowych, W – typów produktów, S – produktów, H – przedziałów czasowych

Należy ponadto podkreślić, że największą zaletą metody hierarchicznej jest możliwość zastosowania jej do rozwiązywania problemów o relatywnie znacznych rozmiarach, w przypadku których nie ma możliwości wykorzystania metody monolitycznej (ze względu na ograniczenia dotyczące stosowalności pakietów optymalizacji dyskretniej).

#### Uwagi końcowe

Dokonane porównanie dwóch metod dotyczących harmonogramowania montażu wielowariantowych produktów wykazało wady i zalety tych metod. Oczywiście największą zaletą metody monolitycznej jest wyznaczanie rozwiązań optymalnych – najkrótszych harmonogramów montażu. Zostało to osiągnięte dzięki zastosowaniu programowania całkowitoliczbowego. Dzięki rozwojowi techniki komputerowej i oprogramowania widoczne są bardzo dobre perspektywy dla tego narzędzia matematycznego – można rozwiązywać zadania o coraz większych rozmiarach, a czas obliczeń staje się coraz krótszy. Jednakże rozwiązywanie zadań o relatywnie dużych rozmiarach jest czasochłonne. W takim przypadku proponowane jest stosowanie metody hierarchicznej – zadania rozwiązywane są w wielokrotnie krótszym czasie kosztem pewnej odchyłki od optimum. Podział problemu globalnego na kolejno rozwiązywane zadania, co jest charakterystyczne dla metody hierarchicznej skutkuje tym, że na każdym poziomie uwzględnia się mniejszą liczbę parametrów, zmiennych, a także ograniczeń. Dzięki temu za pomocą metody wielopoziomowej można rozwiązywać zadania o większych rozmiarach niż w przypadku metody jednopoziomowej.

Metoda hierarchiczna może być skutecznie stosowana w przypadku konieczności reharmonogramowania – w związku z wielokrotnie krótszymi czasami obliczeń w porównaniu do metody hierarchicznej. Opisane metody uwzględniają tylko planowane przestoje maszyn. W przypadku awarii zachodzi konieczność budowy nowego harmonogramu montażu w relatywnie krótkim czasie – przy uwzględnieniu zmodyfikowanych danych dotyczących dostępności maszyn montażowych.

Uwzględnienie wielowariantowych produktów to korzyść dotycząca obu metod. Jest to odpowiedź na

wymagania stawiane przez rynek, charakteryzujący się dążeniem do uzyskania przewagi konkurencyjnej w montażu produktów spełniających wymagania klientów.

**Wydanie publikacji finansowane przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie (dotacje podmiotowe na utrzymanie potencjału badawczego).**

#### LITERATURA

- [1] Akpınar S., A. Baykasoglu. 2014. "Modelling and solving mixed-model line balancing problem with setups. Part I: A mixed linear programming model". *Journal of Manufacturing Systems* 33 (1):177–187.
- [2] Castillo L. et. al. 2005. "Planning, scheduling and constraint satisfaction: from theory to practice". Amsterdam: IOS Press.
- [3] Fourer R., D. Gay, B. Kernighan. 2003. „AMPL, A Modelling Language for Mathematical Programming”. Duxbury Press, Pacific Grove.
- [4] Łunarski J. 2017. „Doskonalenie procesów projektowania działaniami innowacyjnymi w zautomatyzowanej produkcji masowej”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (3): 4–5.
- [5] Magiera M. 2015. "Comparative analysis of two hierarchical methods of assembly planning for producers of electric and electronic equipment". *Przegląd Elektrotechniczny* (4): 86–90
- [6] Magiera M. 2017. „Monolityczna metoda harmonogramowania montażu wielowariantowych produktów w hybrydowych systemach przepływowych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (2): 13–18.
- [7] Magiera M. 2016. „Wybrane metody planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne i łańcuchy dostaw”. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- [8] Sawik T. 1999. "Production Planning and Scheduling in Flexible Assembly Systems". Berlin: Springer-Verlag.
- [9] Schneeweiss Ch. 1999. "Hierarchies in Distributed Decision Making". Berlin: Springer-Verlag.
- [10] [www.gurobi.com](http://www.gurobi.com) (Gurobi Optimizer), dostęp 01.2018.

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

# ANALIZA ZŁOŻONOŚCI KONSTRUKCJI WYROBU Z UWZGLĘDNIENIEM ZASAD DfA

## *Product complexity analysis including DfA principles*

Michał SAŚIADEK, Roman KIELEC

---

**Streszczenie:** Projektowanie inżynierskie jest złożonym ciągiem działań zamierzonym na opracowanie efektywnej konstrukcji wyrobu. Konstrukcja projektowanego wyrobu powinna być dostosowana do wymagań klienta i wymogów związanych z jego cyklem życia. W kontekście tych wymogów opracowano wiele zindywidualizowanych podejść projektowania dla X, gdzie X określa różne wymogi. Jednym z istotniejszych jest projektowanie dla montażu. W literaturze opracowano wiele ujęć tej metodologii projektowania, przy czym znaczna większość z nich ukierunkowana jest na analizę i zwiększenie efektywności procesu łączenia części składowych opracowywanego wyrobu.

W artykule zaproponowano nowe podejście do analizy złożoności projektowanego wyrobu z uwzględnieniem zasad projektowania dla montażu. Założenia polega ono na analizie poszczególnych węzłów konstrukcyjnych, definiowanych jako pary części, pod kątem możliwości dostosowania ich do łatwego, taniego i szybkiego procesu montażu. W kontekście tego opracowano macierzowy zapis struktury konstrukcyjnej wyrobu oraz zasady przydzielania określonych reguł „projektowania dla montażu” do odpowiednich węzłów konstrukcyjnych. Na przykładzie palnika gazowego przedstawiono praktyczne zastosowanie analizy złożoności oraz omówiono korzyści wynikające z jej wykorzystania.

**Słowa kluczowe:** analiza złożoności, projektowanie dla montażu, uproszczenie wyrobu

**Abstract:** Engineering design is a sequence of complex actions intended to develop an effective product structure. The designed product should be adapted to both the customer's requirements and the requirements related to its life cycle. In the context of these requirements, many individualised approaches of design for X have been developed, where X defines different requirements. One of the most important approaches in this field is design for assembly. There are many views of this designing methodology specified in literature, majority of which is aimed at analysis and increase of effectiveness of joining the integral parts of the designed product. The article proposes a new approach to the analysis of the designed product complexity, taking into account the principles of design for assembly. It is based on the analysis of construction nodes, defined as pairs of parts in terms of the possibility of adapting them to an easy, cheap and fast assembly process. In this context, a dependency matrix of the product structure was developed and the rules assigning specific principles of “design for assembly” to the relevant construction nodes. On the example of a gas burner, the practical application of complexity analysis is presented and the benefits of its application are discussed.

**Keywords:** complexity analysis, design for assembly, product simplification

---

### Wprowadzenie

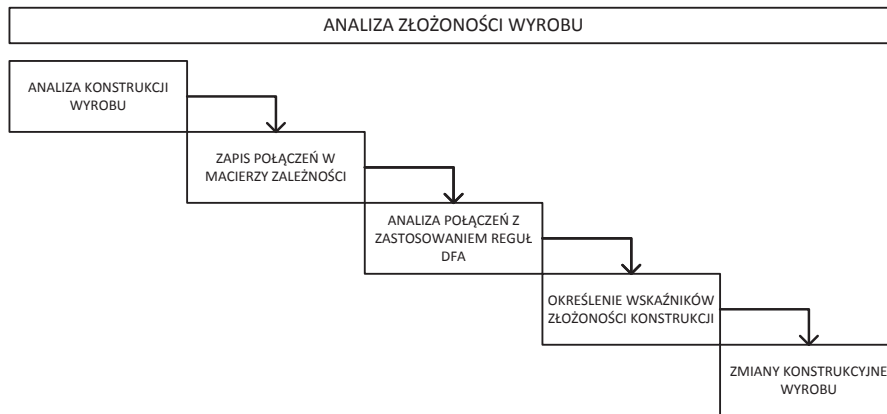
Projektowanie inżynierskie jest złożonym działaniem, zmierzającym do opracowywania efektywnej konstrukcji wyrobu. Na tym etapie należy uwzględnić wszystkie istotne wymagania cyklu życia produktu. Należą do nich m.in.: wytwarzanie, montaż, eksploatacja, wycofanie produktu z rynku i inne [5]. Jednym z istotniejszych wymogów jest montaż i w nurcie projektowania współbieżnego opracowano metodologię projektowania dla montażu DfA (z ang. Design for Assembly). Projektowanie dla montażu zorientowane jest na uwzględnienie wielu istotnych aspektów procesu montażu we wczesnej fazie projektowania inżynierskiego [1, 3, 9]. Metodologia ta jest skutecznie stosowana w wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych, zwłaszcza tam, gdzie istnieje dział projektowania (lub dział rozwoju produktu) [2].

Opracowano wiele podejść tej metodologii, przy czym część z nich bazuje na wyznaczeniu odpowiednich wskaźników DfA, obrazujących dostosowanie analizowanej konstrukcji do wymogów efektywnego procesu montażu [1, 8, 9]. Innym podejściem jest opracowanie [3] zakładające analizę konstrukcji

projektowanego wyrobu, celem wyznaczenia wskaźnika czasu jego montażu, z uwzględnieniem czasów realizacji poszczególnych operacji montażu jego kolejnych części składowych. Ponadto w literaturze spotkać można wiele ujęć, w których opracowano zasady projektowania dla montażu w postaci wytycznych projektowych [1, 4, 8, 9]. W kontekście tych opracowań w niniejszym artykule zaproponowano analizę złożoności konstrukcji projektowanego wyrobu, zorientowaną na dostosowanie jego konstrukcji do efektywnego – łatwego i taniego procesu montażu.

### Opis i charakterystyka analizy złożoności

Analiza złożoności wyrobu przeznaczona jest do wykorzystania w etapie projektowania koncepcyjnego, kiedy powstają różne warianty projektowanego wyrobu. Służyć ma do wyznaczenia stopnia skomplikowania wyrobu ze względu na montaż jego części składowych i stanowić narzędzie doradcze do uproszczenia konstrukcji (dostosowania jej do efektywnego procesu montażu). Ponadto ma wspomagać projektanta w selekcji i wybrze odpowiednich reguł DfA i przyporządkowaniu ich do



Rys. 1. Etapy analizy złożoności  
Fig. 1. Block diagram of product complexity analysis

Odpowiedzi (Y-tak/N-nie) na Pytanie (Q)	R_1 Integracja części	R_2 Poka-Yoke	R_3 Samopozycjonowanie części	R_4 Kierunek procesu montażu	R_5 Poprawny kształt części	R_6 Symetryczność części	R_7 Wizualny dostęp	R_8 Standaryzacja
<b>R1_Q1="N" i R1_Q2="N" i R1_Q3="N"</b> Q1 – Czy części A i B muszą wykonywać ruch względem siebie? Q2 – Czy części A i B muszą być wykonane z tego samego materiału? Q3 – Czy części A i B muszą być od siebie odseparowane/izolowane?	X							
<b>R2_Q1="N"</b> Q1 – Czy część B zabezpieczona jest przed niepoprawnym montażem?		X						
<b>R3_Q1="N" lub R3_Q2="Y"</b> Q1 – Czy części A i B orientują się samoczynnie poprzez ich konstrukcję? Q2 – Czy po zorientowaniu części A i B ich położenie może ulec zmianie?			X					
<b>R4_Q1="Y" i R4_Q2="N"</b> Q1 – Czy części A i B montowane są w innym kierunku niż „od góry”? Q2 – Czy po zmianie bazy możliwy jest montaż „od góry” bez zmiany oprzyrządowania?				X				
<b>R5_Q1="Y" lub R5_Q2="Y" lub R1_Q3="Y"</b> Q1 – Czy części dołączaną B trudno uchwycić? Q2 – Czy część dołączaną B jest zbyt elastyczna/delikatna podczas operowania nią? Q3 – Czy część dołączaną podczas przechowywania może się zaplątać/zakleszczyć?					X			
<b>R6_Q1="N" i R6_Q2="Y"</b> Q1 – Czy część dołączaną B jest symetryczna? Q2 – Czy niesymetryczność części dołączanej utrudnia jej orientowanie?						X		
<b>R7_Q1="N"</b> Q1 – Czy przy wykonywaniu połączenia dostęp wizualny jest zapewniony?							X	
<b>R8_Q1="Y" lub R8_Q2="Y"</b> Q1 – Czy zamiast części dołączanej B wykorzystać można istniejący komponent? Q2 – Czy część ta może być wytworzona w istniejącym parku maszynowym przedsiębiorstwa?								X

Rys. 2. Reguły przydzielania zasad DfA  
Fig. 2. Rules of selection of DfA principles

projektowanych węzłów konstrukcyjnych [6, 10]. Podstawowe etapy tej analizy przedstawiono na rys. 1.

Pierwszym etapem analizy złożoności jest zapis wszystkich możliwych połączeń pomiędzy częściami składowymi analizowanego wyrobu w macierzy zależności ( $M_d$ ). Macierz ta ma rozmiar  $n \times n$ , gdzie  $n$  jest liczbą części składowych wyrobu [7, 10]. Wiersze i kolumny indeksowane są identyfikatorami części. Każde możliwe połączenie dwóch części zapisywane jest znakiem (x) w komórce macierzy odzwierciedlającej wiersz i kolumnę reprezentującą odpowiednie części wyrobu. Przy założeniu, że jeżeli część A można dołączyć do części B i odwrotnie to macierz jest wypełniona symetrycznie. Symetryczność macierzy jest istotna celem zapewnienia poprawnej analizy wszystkich zdefiniowanych połączeń analizowanego wyrobu.

Kolejnym krokiem w analizie złożoności jest identyfikacja potencjalnej możliwości zmniejszenia liczby części (np. przez ich integrację) oraz przyporządkowanie właściwych reguł DfA do projektowanych węzłów (połączeń dwóch części) konstrukcyjnych. W omawianym podejściu zdefiniowano 8 reguł DfA dotyczących: integracji części (R1 – reguła 1), stosowania zasady Poka-Yoke (R2), wzajemnego samopozycjonowania łączonych części (R3), kierunku procesu montażu (R4), odpowiedniego ukształtowania części (R5), symetryczności części (R6), wizualnego dostępu do połączenia podczas montażu (R7) oraz standaryzacji (R8). Reguły przydzielane są do poszczególnych połączeń na podstawie odpowiedzi na odpowiednio sformułowane pytania. Pytania oraz zasady przydziału reguł przedstawiono na rys. 2.

Potencjalne możliwości integracji części oraz przydział reguły R\_1 do konkretnej pary łączonych części jest identyfikowana w oparciu o trzy pytania:

- czy części A i B muszą wykonywać ruch względem siebie? (R1\_Q1),
- czy części A i B muszą być wykonane z innego materiału? (R1\_Q2),
- czy części A i B muszą być odseparowane? (R1\_Q3).  
Odseparowanie części występuje na ogół wtedy, kiedy części współpracujące ze sobą muszą być

demontowalne ze względu na warunki eksploatacji, izolowane względem siebie ze względu na przenikanie temperatury, spełnianie dodatkowych funkcji itd.

Jeżeli odpowiedzi na trzy pytania (R1\_Q1, R1\_Q2, R1\_Q3) wskazują na „nie”, „nie” i „nie”, wówczas teoretycznie części A i B można zespolić i przydzielana jest im reguła R1 projektowania dla montażu. Jeżeli odpowiedzi na trzy pierwsze pytania są inne niż „nie”/”nie”/”nie”, wówczas część dołączana jest tzw. częścią krytyczną, której nie można scalać z częścią A.

Kolejnym elementem analizy złożoności jest wyznaczenie wskaźnika złożoności wyrobu. Wskaźnik ten (ang. Complexity index –  $C_i$ ), obliczany jest jako iloraz liczby części krytycznych i całkowitej liczby części wyrobu. Krytyczne części ustala się w oparciu, o wcześniej opisane, wnioski dotyczące odpowiedzi na pytania Q1 do Q3. Wzór do wyliczenia wskaźnika złożoności wyrobu przedstawiono poniżej.

$$C_i = \frac{n}{N} 100\%, \text{ gdzie} \quad (1)$$

$n$  – liczba części krytycznych,

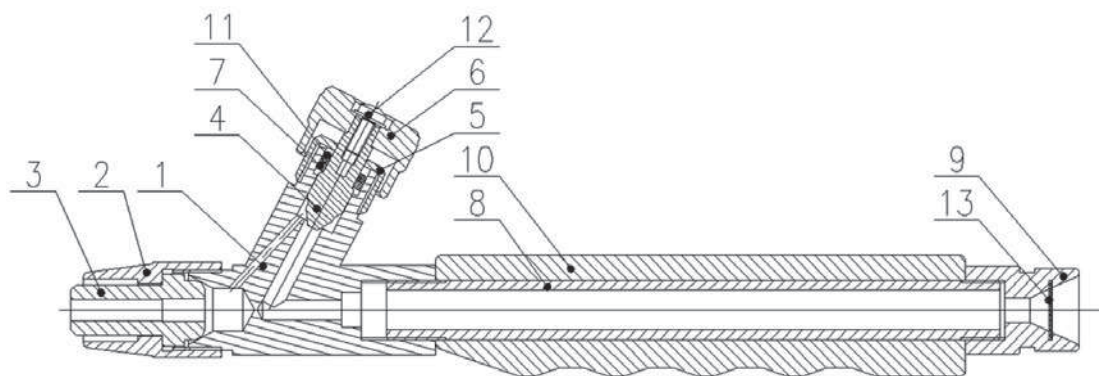
$N$  – całkowita liczba części.

#### Przykład zastosowania analizy złożoności

Proponowane podejście do analizy złożoności konstrukcji projektowanego wyrobu zobrazowano na przykładzie palnika gazowego przedstawionego na rys. 3. Palnik ten złożony jest z 13 części składowych. Zdefiniowano 36 relacji styczności pomiędzy jego częściami składowymi i przedstawiono je w macierzy zależności – tab. 1.

Na podstawie odpowiedzi na trzy pierwsze pytania (wg reguł przedstawionych na rys. 2) wyznaczono części krytyczne. Są nimi: korpus (1), tuleja gwintowana (2), tuleja łącząca (3), zawór (4), o-ring (11). Pozostałe części nie są krytyczne. Wskaźnik złożoności dla rozważanego przypadku wynosi 38,46%.

$$C_i = \frac{5}{13} 100\% = 38,46\%$$



Rys. 3. Konstrukcja palnika gazowego  
Fig. 3. Gas burner structure

Tabela 1. Macierz zależności połączeń części składowych palnika gazowego  
Table 1. Dependency matrix of the gas burner construction structure

	Korpus (1)	Tuleja g. (2)	Tuleja ł. (3)	Zawór (4)	Nakrętka (5)	Pokrętło (6)	Pierścień (7)	Łącznik (8)	Końcówka (9)	Rękojeść (10)	O-ring (11)	Śruba (12)	Siateczka (13)
Nazwa części	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Korpus (1)	1	x	x	x	x			x		x	x		
Tuleja g. (2)	2	x											
Tuleja ł. (3)	3	x	x										
Zawór (4)	4	x				x	x				x	x	
Nakrętka (5)	5	x											
Pokrętło (6)	6			x								x	
Pierścień (7)	7			x							x		
Łącznik (8)	8	x							x	x			
Końcówka (9)	9							x		x			x
Rękojeść (10)	10	x						x	x				
O-ring (11)	11	x		x			x						
Śruba (12)	12			x		x							
Siateczka (13)	13								x				

W kolejnym kroku na podstawie analizy odpowiednio przydzielonych reguł DfA do poszczególnych par połączeniowych zaproponowano zespolenie dwóch części, tj. zawór (4) i pierścień (7) – rys. 4.



Rys. 4. Integracja zaworu (4) z pierścieniem (7)  
Fig. 4. Integration of the valve (4) and the ring (7)

Ponadto, na podstawie odpowiedzi na pytanie 4, dotyczącego potencjalnej możliwości błędnego połączenia dwóch części zdecydowano się na zmiany konstrukcyjne w elementach: korpus (1), łącznik (8), końcówka (9) oraz rękojeść (10). Łącznik rękojeści w pierwotnym opracowaniu na obu końcówkach ma gwint zewnętrzny o różnych długościach. Daje to możliwość niepoprawnego montażu. Proponowane zmiany dotyczą zróżnicowania gwintów po obu stronach łącznika na wewnętrzny z jednej i zewnętrzny z drugiej jego strony. Wyeliminowany zostanie przez to niepoprawny montaż łącznika do korpusu.

Zmiana w konstrukcji łącznika wiąże się z koniecznością przeprojektowania końcówki łącznika (9). Końcówkę tę przeprojektowano celem dostosowania jej do zmienionego łącznika rękojeści, tzn. gwint wewnętrzny zmieniono na zewnętrzny. Ostatnią proponowaną zmianą jest dostosowanie konstrukcji rękojeści tak aby uniemożliwić odwrotny jej montaż na łączniku rękojeści

między korpusem a końcówką łącznika. Proponowane zmiany dotyczą zróżnicowania zakończeń rękojeści, aby jednoznacznie można było identyfikować strony poprawnego montażu. Zaprojektowana rękojeść od strony korpusu i łącznika konstrukcyjnie nie różni się i z tego względu istnieje możliwość błędnego montażu ze względu na spełnianą funkcję rękojeści. Rękojeść przy błędnym montażu byłaby zamontowana odwrotnie i nie byłaby dostosowana do ergonomii ręki użytkownika. Aby wyeliminować możliwość niepoprawnego montażu przeprojektowano rękojeść różnicując jej ukształtowanie na obu zakończeniach oraz dostosowując jej konstrukcję z jednej strony do korpusu, z drugiej do łącznika (9). Ponadto, zróżnicowanie zakończeń rękojeści pozwoli na eliminację niepoprawności jej montażu. Zmiany konstrukcyjne w poszczególnych częściach przedstawiono w tab. 2, w której część przed zmianami przedstawiono z lewej strony.

Na skutek wprowadzonych zmian konstrukcyjnych poprawie uległ wskaźnik złożoności ( $C_c$ ) z początkowej wartości 38,46% do 41,66% w ostatecznej konfiguracji oraz wyeliminowano możliwość błędnego montażu części składowych analizowanego palnika gazowego.

#### Podsumowanie i wnioski

Efektywne projektowanie wyrobów spełniających oczekiwania klientów (z reguły odpowiednia jakość, cena i niezawodność) oraz wymagania związane z ich cyklem życia (wytwarzanie, montaż, eksploatacja, recykling i inne) stanowi duże wyzwanie. Celem dostosowania procesu projektowo-konstrukcyjnego do tych wymogów, w nurcie inżynierii współbieżnej, opracowano wiele



Tabela 2. Zestawienie zmian konstrukcyjnych w wybranych częściach palnika gazowego  
Table 2. Structure changes in the selected components of the gas burner

Zmiany konstrukcyjne części – korpus (1)	Zmiany konstrukcyjne części – końcówka (9)
	
Zmiany konstrukcyjne części – łącznik (8)	Zmiany konstrukcyjne części – rękojeść (10)
	

podejść ukierunkowanych na te wymogi. Jednym z nich jest projektowanie dla montażu. W artykule przedstawiono propozycję analizy złożoności konstrukcji projektowanego wyrobu z uwzględnieniem zasad DfA. Na podstawie przykładowego zastosowania proponowanego podejścia wykazano celowość przeprowadzania tego typu analiz, zwłaszcza w początkowych, tj. koncepcyjnych fazach projektowania wyrobów. Na podstawie przeprowadzonych wielu analiz sformułowano następujące wnioski:

- analiza złożoności umożliwia uproszczenie konstrukcji wyrobu i dostosowanie jej części składowych do łatwego i szybkiego montażu,
- analiza złożoności umożliwia przydzielenie odpowiednich reguł DfA do ich zastosowania przy projektowaniu węzłów konstrukcyjnych wyrobu,
- przez wyznaczenie wskaźnika złożoności uzyskuje się możliwość analizowania i wybrania najkorzystniejszej spośród wielu różnych konstrukcji wyrobu.

## LITERATURA

- [1] Andreasen M., S. Kähler, T. Lund. 1983. "Design for assembly". New York: Springer-Verlag.
- [2] Booker J.D., M. Raines, K.G. Swift. 2001. "Designing capable and reliable products". Butterworth-Heinemann.
- [3] Boothroyd G., P. Dewhurst, A. Knight Winston. 2002. "Product Design for Manufacture and Assembly, revised and expanded". CRC Press, 2002

[4] Bralla J.G. 1997. "Design for manufacturability handbook".

[5] Eder W.E., S. Hosnedl. 2010. "Introduction to design engineering: systematic creativity and management". CRC Press.

[6] Hosnedl S., M. Kopecky, M. Sasiadek. 2014. „Rationalising the use of design for assembly as DfX knowledge to increase competitiveness of designed technical products”. 55th International Conference of Machine Design Departments ICMD. Beroun, Czechy, Prague: Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering: 329–334.

[7] Kielec R., M. Sasiadek. 2014. Macierzowe planowanie procesów produkcyjnych w inżynierii współbieżnej”. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego.

[8] Lotter B. 2013. "Manufacturing assembly handbook". Butterworth-Heinemann.

[9] Redford A., J. Chal. 1994. "Design for Assembly: Principles and Practice".

[10] Sasiadek M. 2015. "Planning and analysis of mechanical assembly sequences in design engineering—Part I: The Method". Tehnicki vjesnik 22.2: 337–342.

dr hab. inż. Michał Sasiadek, prof. UZ – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Prof. Szafrana 4, 65-001 Zielona Góra, e-mail: m.sasiadek@iizp.uz.zgora.pl

dr inż. Roman Kielec – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Prof. Szafrana 4, 65-001 Zielona Góra, e-mail: r.kielec@iizp.uz.zgora.pl

# ALTERNATYWNE SPOSOBY WYTWARZANIA ELEMENTÓW ŻURAWI PRZYCZEPOWYCH

## Alternative methods manufacturing elements of trailers cranes

Aleksander NIEOCZYM, Kazimierz DROZD

**Streszczenie:** W procesie konstruowania żurawia przyczepowego uwzględnia się możliwości technologiczne zakładu produkcyjnego. Przeprowadzony proces optymalizacji poszczególnych elementów ze względu na wytrzymałość lub koszty wytwarzania może wskazać alternatywne sposoby wykonania. W artykule poddano analizie technologicznej ramię wysuwane wysięgnika. Wskazano na możliwość wykorzystania standardowych elementów hutniczych w procesie jego wytwarzania. W przypadku zaczepu chwytaka rotatora wskazano na możliwość zastosowania gotowych chwytaków lub zmianę półfabrykatu skutkującą zwiększeniem wytrzymałości elementu.

**Słowa kluczowe:** żuraw przyczepowy, zaczep rotatora, ramię, spawanie

**Abstract:** The process of constructing a trailer crane takes into account the technological capabilities of the production plant. The optimization process of individual components due to their strength or production costs may indicate alternative methods of implementation. In the article, the extension arm of the jib was analyzed. The possibility of using standard metallurgical elements in the process of its production was indicated. In the case of hitching the rotator gripper, it was indicated the possibility of using ready grippers or changing the blank resulting in increased strength of the element.

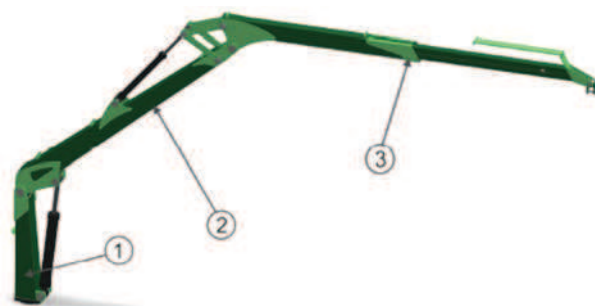
**Key words:** trailer crane, hook of the rotator gripper, arm, welding

### Wstęp

Podczas projektowania podzespołów i całych maszyn bazuje się na dostępnych w zakładzie maszynach technologicznych i użytkowanym oprzyrządowaniu. Postępowanie takie ma na celu obniżenie kosztów produkcji i wykorzystanie potencjału produkcyjnego. Wybór określonej technologii wykonania nie zawsze musi być optymalny ze względu na wytrzymałość elementu czy całego zespołu lub też ze względu na koszty wykonania.

W artykule przeprowadzono analizę sposobów wytwarzania wybranych elementów konstrukcyjnych i próbę znalezienia korzystniejszych rozwiązań pod względem ekonomicznym i wytrzymałościowym. Autorzy przedstawili alternatywne sposoby wykonania w oparciu o elementy żurawia przyczepowego: zaczepu chwytaka rotatora oraz ramienia stałego wysięgnika teleskopowego. Żuraw przyczepowy stosowany jest jako integralna część przyczep do przewozu drewna [2]. W [3] przedstawiono wyniki projektowania żurawi o określonym udźwigu i wysięgu, podczas którego starano się wykorzystać elementy wspólne, pogrupowane w modułach funkcjonalno-konstrukcyjnych. Modułowość konstrukcji miała na celu uproszczenie procesu projektowania i wytwarzania żurawi przy jednoczesnym stworzeniu większego wachlarza oferowanych modeli urządzenia. Dodatkowym atutem modułów jest większa możliwość dostosowania urządzenia do potrzeb klienta, możliwość modyfikowania żurawi w procesie eksploatacji, większa dostępność części zamiennych oraz sprawne przeprowadzanie napraw i remontów żurawi.

Żuraw (rys. 1) jest konstrukcją spawaną, wykonaną ze stali drobnoziarnistych o podwyższonej wytrzymałości o oznaczeniu S355N oraz S420N. Tego rodzaju stale ze względu na spawalność mają ograniczoną zawartość węgla do 0,2% [1]. Blachy stosowane w konstrukcji mają grubość 5 mm i 6 mm. Ograniczona różnorodność materiałowa daje możliwość trasowania wytwarzanych detali na tych samych arkuszach blachy, czego efektem są małe straty materiałowe podczas wypalania profili.



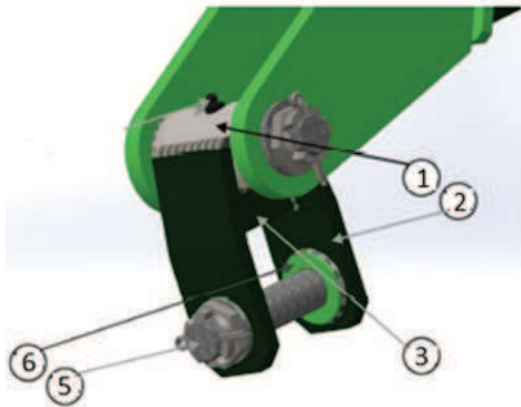
Rys. 1. Główne elementy składowe żurawia przyczepowego: 1 – obrotowa podstawa, 2 – wysięgnik pierwszy, 3 – wysięgnik teleskopowy złożony z ramienia stałego oraz ramienia wysuwanego

Fig 1. The main components of a trailer crane: 1 – rotary stand, 2 – first extension arm, 3 – telescopic extension arm consisting of a fixed arm and a retractable arm

### Zaczep chwytaka rotatora

Rotator hydrauliczny jest elementem nośnym układu hydrauliki siłowej. Trzpień rotatora jest umocowany do chwytaka przejmując obciążenia od ładunku,

a dodatkowo umożliwia przenoszenie i obrót ładunku w pozycji poziomej. W projekcie żurawia zaczep chwytaka został skonstruowany jako element spawany (rys. 2). Zaczep chwytaka rotatora jest elementem montowanym na końcu ramienia wysuwanego na sworzniu o średnicy 25 mm (1). Średnice trzpieni i tulejek zostały dostosowane do występujących na rynku rotatorów. Dwa ucha gięte (2) oraz żebro usztywniające (3) wykonane zostały z blachy o grubości 10 mm ze stali S355N. W uchach wykonano otwory wzmocnione tulejkami (6), które służą do mocowania sworznia (5). Sworzeń (5) to element do którego bezpośrednio montowany jest rotator z chwytakiem.



Rys. 2. Zaczep chwytaka rotatora w konstrukcji żurawia – opis w tekście

Fig. 2. Hook of the rotator gripper in the trailer crane construction – description in the text

Zmiany w konstrukcji zaczepu chwytaka związane są z dwiema przesłankami:

- deformacje i naprężenia cieplne w elemencie wskutek procesu skrawania oraz obniżona wytrzymałość spoiny w porównaniu z materiałem rodzimym,

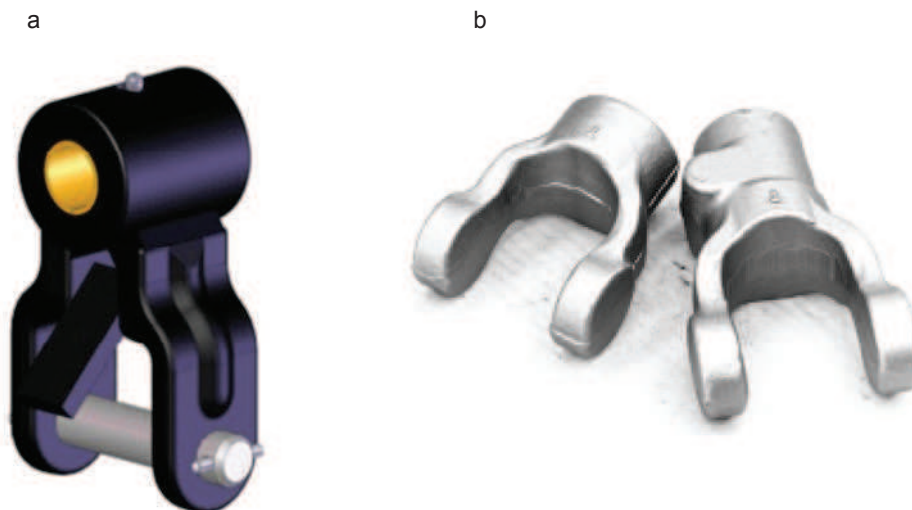
- możliwość zamontowania na żurawiu narzędzia dostosowanego do indywidualnych potrzeb i rodzaju wykonywanej pracy (chwytaki, hak, specjalistyczny uchwyt) powoduje, że rozstaw uszu (2) oraz średnica trzpienia (5) mogą różnić się nawet w przypadku jednakowego udźwigu żurawia. Wykonanie konstrukcji spawanej będzie wymagało zróżnicowanych uchwytów spawalniczych.

Zaprojektowany wieszak można zastąpić:

- elementem gotowym dostępnym na rynku,
- elementem wykonanym w procesie kucia;

Zaczep przedstawiony na rys. 3a jest przykładem zaczepu uchwytu rotatora, wchodzącego w skład serii uchwytów zaprojektowanych do obciążenia masą do 3 t. Chwytki zróżnicowane są pod względem średnicy otworu w uchu oraz w główce, rozstawu otworów oraz rozstawu uszu. Zastosowanie w konstrukcji gotowych zaczepów umożliwi rozszerzenie uniwersalności zastosowania żurawia poprzez możliwość pracy z różnymi narzędziami oraz wyeliminuje konieczność konstruowania jednostkowych uchwytów spawalniczych.

Drugim rozwiązaniem służącym podniesieniu wytrzymałości zaczepu wieszaka jest zmiana technologii wykonania ze spawania do kucia. Podczas procesu kucia uzyskujemy ujednorodnienie materiału oraz jednorodny rozkład naprężeń, co przekłada się na większą wytrzymałość elementów kutych. Na rys. 3b przedstawiono odkuwkę detalu zbliżonego kształtem i wymiarami do zaczepu. Przeprowadzono analizy technologiczne wykorzystania odkuwek będących półfabrykatami widełek przegubów krzyżakowych. Oprócz frezowania otworu pod sworzeń w mocujący chwytak rotatora należy wykonać frezowanie powierzchni walcowej, a następnie wykonać otwór pod sworzeń mocujący zaczep do wysięgnika.



Rys. 3. Przykłady alternatywnych elementów: a) zaczep rotatora Finn Rotox CR 310 [4], b) kuty półfabrykat [5]

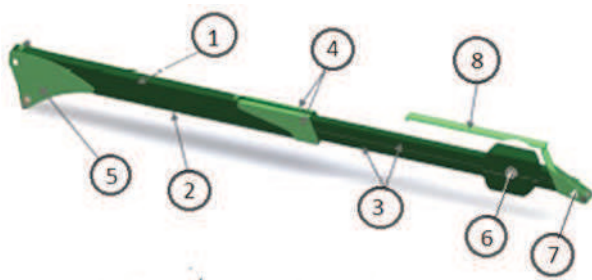
Fig. 3. Examples of alternative elements: a) rotor hook Finn Rotox CR 310 [4], b) forged blank [5]

## Ramię wysuwne

Wysięgnik teleskopowy jest ruchomą konstrukcją spawaną, składa się z ramienia stałego oraz ramienia wysuwanego (rys. 4). W oryginalnej konstrukcji głównym elementem ramienia wysuwanego jest element nośny (3). W górnej części wykonane jest wzmocnienie z otworem do umocowania sworznia (6) służącego do mocowania siłownika hydraulicznego, sterującego ruchem ramienia teleskopowego.

Element nośny ramienia wysuwanego wykonany z dwóch ceowników połączonych spoiną czołową. Ceowniki zostały wykonane z dwóch blach giętych o grubości 5 mm ze stali S420N. Można wskazać alternatywne sposoby wykonania ramienia wysuwanego:

- konstrukcja z dwóch standardowych ceowników,
- konstrukcję wykonaną z ceownika zaślepionego płaskownikiem,
- ramię z gotowego profilu prostokątnego o wymaganym przekroju poprzecznym.



Rys. 4. Wsięgnik teleskopowy w położeniu maksymalnego wysunięcia ramienia wysuwanego: 1 – element nośny ramienia stałego, 2 – pokrywa, 3 – element nośny ramienia wysuwanego, 4, 5 – kształtowe wzmocnienie, 6 – sworzень, 7, 8 – elementy prowadzące przewodów hydraulicznych

Fig. 4. Telescopic extension arm in the position of the maximum extension of the retractable arm: 1 – support arm of the fixed arm, 2 – cover, 3 – support arm of the extension arm, 4, 5 – shaped reinforcement, 6 – pins, 7, 8 – elements leading hydraulic conduits

Ramię wysuwne jest elementem podlegającym największym naprężeniom. Jego wytrzymałość determinowana jest długością ramienia oraz udźwigiem, przykładowo:

- dla żurawia PKM6790 dopuszczalny udźwig przy maksymalnym wysuwie wynosi 400 kg, przekrój poprzeczny ramienia 100×130×5,
- dla żurawia PKM7390 dopuszczalny udźwig przy maksymalnym wysuwie wynosi 620 kg przekrój poprzeczny ramienia 80×140×5.

W przypadku wykonania ramienia z gotowych zamkniętych profili o przekroju prostokątnym można wykorzystać następujące elementy hutnicze [5] w konstrukcji następujących żurawi:

- żuraw PKM7390 – profil 80×140 mm,
- żuraw PKM7140 – profil 100mm×140 mm,
- żuraw PKM6790 – profil 100mm×130 mm,
- żuraw PKM6490 – profil 80mm×130 mm.

Zastosowanie gotowych profili umożliwia pominięcie procesu spawania, który zwiększa koszty i wprowadza osłabienie konstrukcji w miejscach łączenia. Kolejną zmianą konstrukcyjną ramienia wysuwanego jest połączenie spoiną standardowych ceowników. Przykładowe typy ceowników w odniesieniu do rodzaju żurawia przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Ceowniki możliwe do zastosowania w konstrukcji ramienia wysuwanego (opracowano na podstawie [6])

Table 2. C-profiles possible to use in the construction of a retractable arm (developed on the basis [6])

Grubość ścianki/ szerokość x wysokość	Grubość ścianki					
	2	3	4	5	6	8
Ceowniki na ramię wysuwne – żuraw PKM 7390						
80 x 70			x	x	x	
Ceowniki na ramię wysuwne – żuraw PKM 7140						
100 x 70			x	x	x	x
Ceowniki na ramię wysuwne – żuraw PKM 6790						
100 x 60			x	x	x	x
100 x 70			x	x	x	x
Ceowniki na ramię wysuwne – żuraw PKM 6940						
80 x 60			x	x	x	
80 x 70			x	x	x	

Tabela 2. Ceowniki możliwe do zastosowania w konstrukcji ramienia wysuwanego (opracowano na podstawie [6])

Table 2. U-bars and flat bars that can be used in the construction of a retractable arm (developed on the basis of [6])

Nazwa wyrobu hutniczego	Grubość ścianki							
	2	3	4	5	6	8	10	12
Ramię wysuwne – żuraw PKM 7390								
Ceownik 140 x 80			x	x	x	x		
Płaskownik 80			x	x	x	x	x	x
Ramię wysuwne – żuraw PKM 7140								
Ceownik 140 x 100			x	x	x	x		
Płaskownik 100			x	x	x	x	x	x
Ramię wysuwne – żuraw PKM 6790								
Ceownik 120 x 100			x	x	x	x		
Płaskownik 100			x	x	x	x	x	x
Ramię wysuwne – żuraw PKM 6940								
Ceownik 120 x 80			x	x	x	x		
Płaskownik 80			x	x	x	x	x	x

Trzecim rozwiązaniem konstrukcyjnym ramienia wysuwanego jest konstrukcja spawana powstała ze standardowego ceownika zespawanego z płaskownikiem. Przykładowe typy ceowników i płaskowników w odniesieniu do rodzaju żurawia przedstawiono w tab. 2.

### Wnioski

W procesie produkcyjnym technologia wykonania części może ulec zmianie pod wpływem warunków ekonomicznych związanych z pracą na określonym stanowisku lub zmianami oprzyrządowania technologicznego. Na przykładzie ramienia wysuwanego żurawia zamieszczono specyfikację techniczną półfabrykatów do wykonania ramienia jako zespołu spawanego z dwóch ceowników lub ceownika i płaskownika. Wskazano także na możliwość całkowitej rezygnacji z procesu spawania i wykonanie elementu z gotowego profilu hutniczego. W przypadku zaczepu rotatora, który w oryginalnym wykonaniu jest elementem spawanym, zaproponowano zastosowanie półfabrykatu w formie odkuwki lub w granicznym przypadku rezygnacji z własnej produkcji i zastosowania typowego rotatora.

### LITERATURA

- [1] Bąk R., T. Burczyński. 2014. „Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego”. Warszawa: WNT.
- [2] Krzysiak Z. i in. 2018. „Modelowanie przyczepy do przewozu drewna z wykorzystaniem programu Inventor”. *Mechanik* (1): 79–81.
- [3] Nieoczym A., K. Drozd. 2018. „Modułowa konstrukcja żurawi przyczepowych”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (2): 36–38.
- [4] <http://www.mecanil.fi/en/tuotteet/rotaattorit/>, [www.rotatory.com.pl/rotatory/hydrauliczne](http://www.rotatory.com.pl/rotatory/hydrauliczne), dostęp 14.04.2017.
- [5] <http://www.wostal.pl/produkty/odkuwki-matrycowe>, dostęp 14.04.2017.
- [6] <https://www.koenigstahl.pl> – dostęp 14.04.2017.

---

dr inż. Aleksander Nieoczym – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: a.nieoczym@pollub.pl

dr inż. Kazimierz Drozd – Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: k.drozd@pollub.pl

# АВТОМАТИЗОВАННОЕ ПЕРЕНАЛАЖИВАЕМОЕ МОДУЛЬНОЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЕ ТИПА “ПРИЗМА”

*The automated readjusted modular prismatic setup*

*Automatyczny przezbrajalny przyrząd modułowy typu “pryzma”*

Валерий КИРИЛОВИЧ, Илона КРЫЖАНОВСКАЯ, Тарас ЮСЬКИВ

---

**А н н о т а ц и я:** Существующие конструкции приспособлений типа “призма” указывают только лишь на принципиальную возможность их переналадки для базирования в них объектов манипулирования (ОМ) с различными диаметральными и линейными размерами поверхностей базирования, имеют низкую производительность и неавтоматизированы при переналадке. Предлагаемая конструкция переналаживаемого приспособления типа “призма” позволяет расширять параметры технологического взаимодействия схвата (Сх) промышленного робота (ПР) с ОМ, сбазируемым в приспособлении (векторы подхода Сх к ОМ, координаты точки зажима ОМ в Сх), за счет наличия двух базирующих призм, установленных с возможностью перемещения вдоль оси ОМ (реализуется модулем горизонтальных перемещений – МГП), и перпендикулярно оси ОМ (реализуется модулями вертикальных перемещений – МВП каждой из призм). Составляющими разработанной схемы компоновочной разработанного приспособления есть шаговые двигатели для перемещений рабочих органов МГП и МВП. Рабочими органами для МГП есть модуль линейных перемещений с двумя каретками, установленными в корпусе с возможностью согласованного одновременного противоположно направленного взаимного перемещения каждой из двух кареток (выпускается серийно), а для МВП – два модуля линейных перемещений с одной кареткой на каждом модуле (выпускаются серийно). На каждой из кареток неподвижно установлена одна базирующая призма МВП. Процесс наладки (переналадки) реализует разработанный модуль наладки (МАН), состоящий из блока датчиков, контролирующих величины горизонтальных и вертикальных перемещений призм при наладке приспособления для базирования в нем ОМ с другими размерами поверхностей базирования, главного контроллера, информационно взаимодействующего с персональным компьютером и с тремя парами контролер-драйвер для МГП и МВП каждой из двух базирующих призм. Процесс переналадки разработанного приспособления сводится к управлению работой шаговых двигателей, перемещаемых базирующие призмы на основании предварительно рассчитанных параметров переналадки. Предлагаемая конструкция переналаживаемого приспособления типа “призма” предназначена для использования в роботизированных механосборочных технологиях, реализуемых в гибких компьютерно-интегрированных системах серийного и мелкосерийного типов производств.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** приспособление, призма, объект манипулирования, переналадка, роботизированное производство, модуль

**A b s t r a c t:** The existing designs of prismatic setup indicate only the theoretical possibility of their changeover for basing on them objects for manipulation (OM) with different diametrical and linear dimensions of the basing surfaces, have low productivity and are not automated when reconfiguring. The proposed design of a re-adjustable prismatic setup allows to advance the parameters of the technological interaction of the gripper (Gr) of the industrial robot (IR) with the OM basing on the prismatic device (translation vectors to OM, the coordinates of the clamping point of OM in Gr, due to the presence of two base prisms installed with the possibility of moving along the axis of OM (implemented by the module of horizontal displacements – MHD), and perpendicular to the axis of OM (implemented by the modules of vertical displacements – MVD of each prism). The components of the designed layout of the proposed setup are stepper motors for moving the working parts of the MHD and the MVD. The working part for MHD is a module of linear movements with two carriages having the possibility of coordinated simultaneous opposite mutual movement of each of the two carriages (manufactured commercially), and for MVD it is two linear displacement modules with one carriage on each module (manufactured commercially). On each of the carriages, a basing prism of MVD is fixed. The adjustment process is implemented with the help of developed the automated adjustment module (AAM) consisting of a block of sensors controlling the horizontal and vertical displacements of the prisms when adjusting the setup for basing OM on it with other dimensions of the basing surfaces, the main controller interacting with the personal computer and with three pairs of controller-driver for MGD and MVD of each of the two prisms. The process of readjustment of the developed setup is reduced to controlling the operation of stepper motors, moving basing prisms in accordance with previously calculated parameters of the changeover. The proposed adaptable prismatic setup is designed for using in robotic mechanic-assembly technologies implemented in flexible computer-integrated systems of large and small-scale types of production.

**К e y w o r d s:** setup, prism, manipulation object, readjustment, robotic production, module

---

## Введение

По данным Международной федерации робототехники (International Federation of Robotics – IFR) [1] ежегодный мировой прирост выпуска и внедрения промышленных роботов (ПР) в различные сферы производства за последние 5 лет в среднем составляет около 15%.

При реализации роботизированных механосборочных технологий (РМСТ), т.е. технологий с использованием ПР в металлообработке и сборке, важным является положение объекта манипулирования (ОМ) в призме. Именно соотношения геометрических особенностей приспособления и ОМ определяют параметры технологического взаимодействия Сх с установленным в призме ОМ [2], определяют параметры синтезируемых траекторий перемещения Сх как таковых [3] и оптимальных в заданном смысле (например, по быстродействию, по энергоемкости и т.д.) [4].

## Постановка проблемы

Как правило, в условиях упорядоченной роботизированной среды [5] необходимо выполнить определенные требования относительно положения средств технологического оснащения, в том числе призм, в системе координат ПР для обеспечения последующего технологического взаимодействия Сх ПР с ОМ, базирующих в призме [2, 4]. Это особенно важно для условий мелкосерийного и серийного типов производств, характерных для гибких производств, когда очевидна необходимость в переналадке приспособлений типа “призма” в связи с частой сменой номенклатуры ОМ, изменения объемов их выпуска и т.д.

Поэтому очевидно, что неэффективное использование средств технологического оснащения роботизированных производств (в том числе приспособлений типа “призма”) отрицательно влияет на эффективность использования таких дорогостоящих и универсальных средств производственной автоматизации, каковыми есть ПР [1].

**Анализ информационных источников**, указанных выше и далее, показал наличие в производственной практике металлообработки двух основных подходов к проектированию и эксплуатации многих типов приспособлений, в том числе приспособлений типа “призма”.

Первый подход характерен для базирования ОМ в приспособлениях типа “призма” для выполнения различных металлообрабатывающих технологий в основном в условиях массового и крупносерийного типов производств. Его смысл заключается в проектировании и изготовлении приспособлений типа “призма” для каждой партии конкретного ОМ. С изменением ОМ предварительно сконструированное и изготовленное приспособление за редким исключением является непригодным для использования, и для ОМ другой номенклатуры проектируется и изготавливается другое

приспособление и т.д. Очевидна при этом большая трудоемкость конструкторской и технологической подготовки производства компонентов и их сборки в приспособление, большая их стоимость, невозможность многократного использования приспособлений типа “призма” при изменении ОМ и фактическая невозможность их переналадки.

Другой подход характерен для базирования ОМ в условиях мелкосерийного и среднесерийного типов производств с использованием, например, универсально-сборных приспособлений (УСП), универсально-переналаживаемых приспособлений (УПП) и т.д., в состав которых входят стандартные наборы типовых элементов, включая призмы, элементы крепления, базовые элементы (пластины) и т.п. При этом для конкретных цилиндрических ОМ проектируются конкретные приспособления с установкой базирующих призм различных конструктивных исполнений на соответствующей базовой пластине, выдерживая геометрические параметры их относительного положения в зависимости от длины и диаметров поверхностей базирования ОМ. После выпуска партии определенного ОМ приспособление разбирается и для ОМ другой номенклатуры проектируется и собирается другое приспособление [6, 7]. Указанное выполняется вручную, что свидетельствует о значительной трудоемкости проектирования и изготовления таких приспособлений, невозможности переналадок, тем более автоматизированных, уже собранных приспособлений.

Такой подход не обеспечивает быстродействия и автоматизации процессов переналадки, уменьшает гибкость роботизированных механосборочных производств и отрицательно влияет на эффективность выпуска изделий относительно производительности, себестоимости и т.п. при реализации РМСТ.

Указанное подчеркивает актуальность и важность проведения исследований по решению разноплановых задач конструктивного, технического и технологического содержания, повышающих эффективность роботизированных механосборочных производств в целом.

**Целью работы** является повышение эффективности использования средств технологического оснащения роботизированных механосборочных производств для реализации в них РМСТ за счет разработки конструкции приспособления типа “призма” и системы его автоматизированной переналадки, что увеличивает производительность процесса переналадки, повышает гибкость и уровень автоматизации при использовании таких приспособлений в условиях гибких компьютерно-интегрированных систем.

## Изложение основного материала

Основными требованиями к базированию ОМ в призме с учетом того, призма рассматривается как “вход” в определенную роботизированную

технологическую структуру, например, гибкую производственную ячейку, кроме обеспечения определенной точности базирования ОМ, является обеспечение устойчивого положения ОМ в призме (призмах) за счет обеспечения проекции центра тяжести ОМ на тело призмы или в междупризмовое пространство, а также обеспечение горизонтальной оси ОМ. В связи с этим у проектанта появляется возможность формировать такие конструкции приспособлений с использованием призм, которые при РМСТ реализовывали бы необходимые геометрические параметры их (призм) взаимного расположения, значительно расширяя множество возможных ориентаций Сх, векторов подхода Сх к ОМ и линейные координаты базирования ОМ в Сх при этих подходах, обеспечивая при этом так называемые линейные (ЛПС) и угловые (УПС) параметры сервиса [2, 4].

Для одноступенчатого цилиндрического вала (простейший случай ОМ) базирующие призмы устанавливаются с возможностью перемещения в горизонтальном направлении (вдоль оси ОМ). Параметры этих перемещений зависят от осевых размеров ОМ, от расположения призм в системе координат ПР и от конструктивных особенностей их (призм) базирующих поверхностей при одинаковых диаметральных и варьируемых осевых размерах поверхностей базирования конкретного ОМ в приспособлении с обеспечением при этом горизонтальной оси ОМ. Указанное

в значительной степени определяет количество альтернатив ЛПС и КПС [4].

ОМ в форме трех- или четырехступенчатого вала с различными диаметральными и осевыми размерами есть примером более показательным. Основные элементы анализа в его первичной постановке, выполняемого, как правило, технологом, заключаются в определении геометрических параметров осевого положения базирующих поверхностей призм между собой с учетом положения базирующих поверхностей ОМ в призмах.

Для примера на рис.1 диаметры  $D_1$  и  $D_3$  имеют различные размеры и для компенсации линейных размеров базирующих диаметральных размеров ОМ призмы должны быть подвижными как в осевом направлении относительно ОМ, так и подвижными в вертикальном направлении для компенсации разницы диаметральных размеров  $D_1$  и  $D_3$  и обеспечения ЛПС и УПС при закреплении ОМ в Сх ПР (Схват 1, Схват 2, Схват 3 на рис. 1).

Иллюстрации примеров определения величин горизонтальных и вертикальных перемещений при переналадке призм Пр1 и Пр2 при базировании цилиндрических ОМ в переналаживаемом приспособлении типа "призма" представлены на рис. 2, пример 1. Здесь трехступенчатый ОМ имеет разные диаметральные размеры  $D_1$  и  $D_3$  (базирующие поверхности ОМ) и различные осевые размеры.

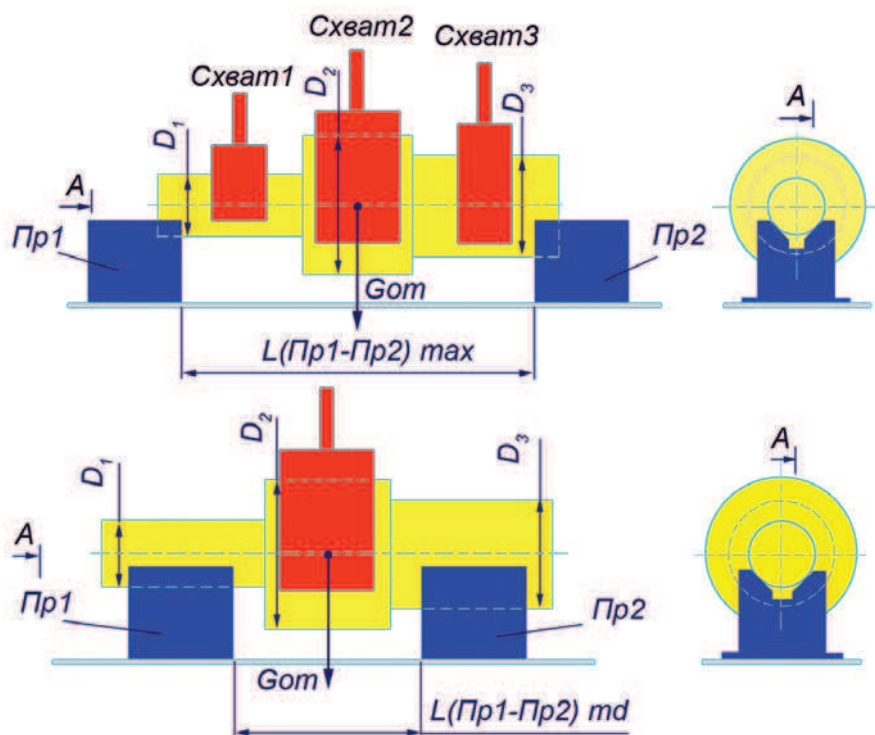


Рис. 1. Примеры базирования цилиндрических ОМ (желтый цвет) в переналаживаемом приспособлении типа "призма" (синий цвет) с указанием возможных поверхностей базирования и закрепления ОМ в ИР's Gr (красный цвет) при различном положении призм Пр1 и Пр2

Fig. 1. The examples of basing cylindrical OM (yellow color) in the redistributable prismatic setup (blue color) with indication of possible surfaces of the basing and fixing the OM in IR's Gr (red color) with different position prisms Pr1 and Pr2



Условия сохранения горизонтального положения оси данного ОМ рассчитываются по результатам несложного анализа указанных размеров  $D_1$  и  $D_3$ .

Пример 2 (рис. 2) иллюстрирует расчеты для двухступенчатого ОМ, имеющего различные диаметральные и осевые размеры поверхностей базирования. Если в примере 1 разница базирюемых диаметров ОМ равна 15 мм, то в примере 2—50 мм. И поэтому, как видно из схемы на рис. 2, необходимо либо Пр1 перемещать на 15 мм в вертикальном направлении, либо Пр2 перемещать на 15 мм в противоположном направлении, либо обе призмы Пр1 и Пр2 одновременно перемещать вертикально в противоположных направлениях на 7,5 мм каждую.

Относительные положения призм Пр1 и Пр2 определяются проектировщиком (пользователем) и тем самым формируется возможность Сх ПР подходить к соответствующим поверхностям ОМ с теми или иными векторами подхода (УПС), по тем или иным линейными параметрами (ЛПС) в системе координат ОМ, что в целом определяет параметры технологического взаимодействия Сх ПР с ОМ, а именно: изменяется количество альтернатив относительно базирования и закрепления ОМ в Сх ПР, установки ОМ в других приспособлениях рабочих позиций для дальнейшей реализации РМСТ.

Для примера 2 (см. рис. 2) величина полуразницы диаметров  $D_1$  и  $D_3$  равна 50 мм. Это предполагает альтернативность конструктивных решений проектируемого приспособления, а именно: или Пр1 перемещается в вертикальном направлении на 50 мм, или Пр2 перемещается в другом направлении на такую же величину, или обе призмы Пр1 и Пр2 одновременно перемещаются в противоположные стороны на 25 мм

каждая. Очевидно, что одновременное перемещение призм Пр1 и Пр2 увеличивает производительность процесса переналадки, а автоматическое их выполнение повышает как производительность, так и уровни автоматизации и гибкости таких приспособлений.

Изложенное выше позволило разработать схему компоновочную переналаживаемого приспособления типа “призма”, являющейся комбинированным представлением предварительно разработанной схемы кинематической (здесь не приводится, но очевидна из рис. 3) с учетом размещения исполнительных механизмов перемещений базирюющих призм Пр1 и Пр2.

Указанная схема реализована по модульному принципу и содержит:

- МГП – модуль горизонтальных перемещений призм Пр1 и Пр2, приводимый в движение соответствующим двигателем  $M_{МГП}$ ;
  - МВП – модуль вертикальных перемещений призм Пр1 и Пр2, приводимых в движение двигателями соответственно  $M_{МВППр1}$  и  $M_{МВППр2}$ .
- МГП и МВП образуют ММП – модуль механических перемещений.

В качестве исполнительного механизма МГП избран серийно выпускаемый модуль линейный (KS05-04-0250-C-2-M1DB-S1-5-F1) [8] с двумя каретками (здесь и далее в скобках () указаны конкретные модели аппаратных составляющих предлагаемого приспособления), установленных в одном корпусе с возможностью их (карок) синхронного противоположно направленного взаимного перемещения, а в качестве исполнительных механизмов МВП выбраны два модуля линейные (KS05-04-0400-C-M1DB-S1-5-F1) [8] с одной кареткой на каждом модуле.

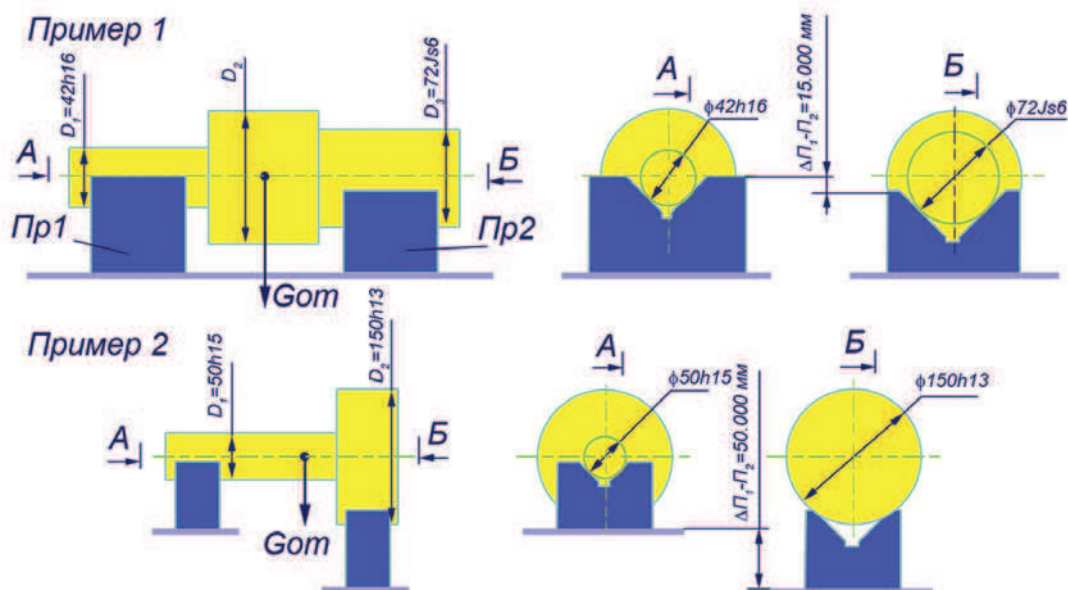


Рис. 2. Графическая иллюстрация примера определения величин вертикальных перемещений при переналадке призм Пр1, Пр2  
Fig. 2. The graphical illustration of an example of determining the values of vertical displacements when adjusting prisms Pr1, Pr2

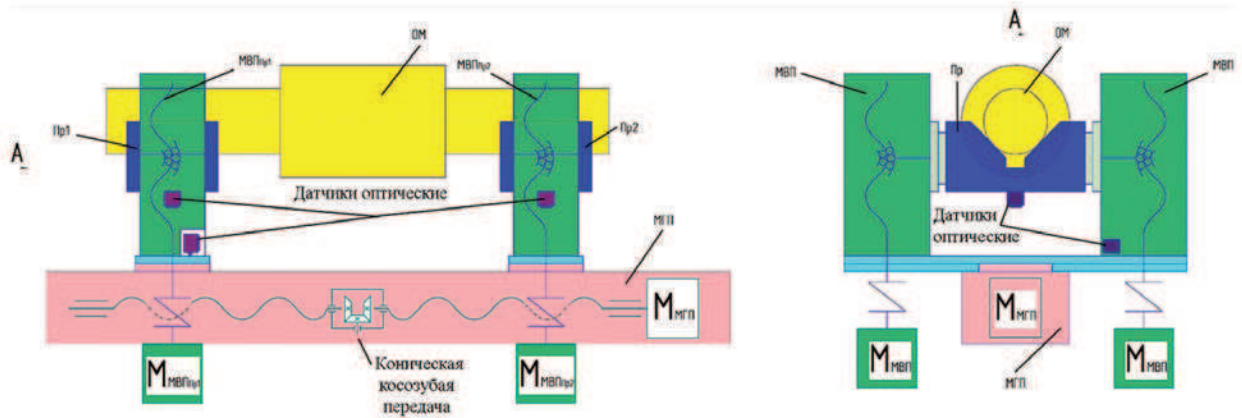


Рис. 3. Схема компоновочная переналаживаемого приспособления типа "призма"  
 Fig. 3. The layout schema of the readjusting prismatic setup

Каждая из призм Пр1 и Пр2 неподвижно закреплена на каретке каждого из модулей вертикальных перемещений (KS05-04-0400-C-M1DB-S1-5-F1).

Исполнительные механизмы МГП и МВП призм приводятся в движение шаговыми двигателями (9FRST01102401) [9]. Контроль величин указанных перемещений выполняется с помощью трех датчиков [10].

Конструктивная реализация переналаживаемого приспособления типа "призма" обеспечивает базирование ОМ со следующими параметрами:

- базисуемых ОМ:  $D_{max} = 150$  мм;  $D_{min} = 30$  мм;  $L_{max} = 300$  мм;  $L_{min} = 50$  мм;
- дискретность линейных перемещений МГП ( $\Delta_{МГП}$ ) и МВП ( $\Delta_{МВП}$ ), т. е. перемещений призм Пр1 и Пр2 в горизонтальном и вертикальном направлениях, составляет 0,02 мм.

Последний параметр получен с учетом технических характеристики выбранных шаговых двигателей FRST01102401, имеющих угловой шаг  $\alpha_M = 1,8^\circ$  (всего 200 угловых шагов за 1 оборот ротора) и технических характеристик исполнительных механизмов МГП

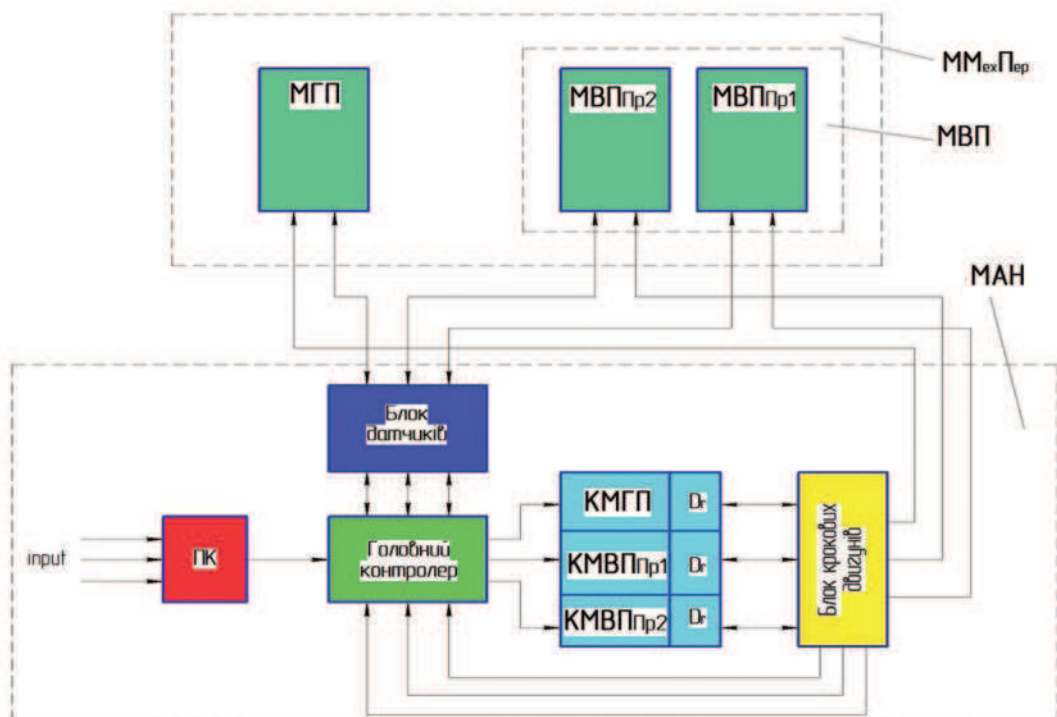


Рис. 4. Схема структурно-функциональная автоматизированной системы наладки (переналадки) приспособления типа "призма"  
 Fig. 4. The structural-functional scheme of the automated adjustment (readjustment) system of the prismatic setup

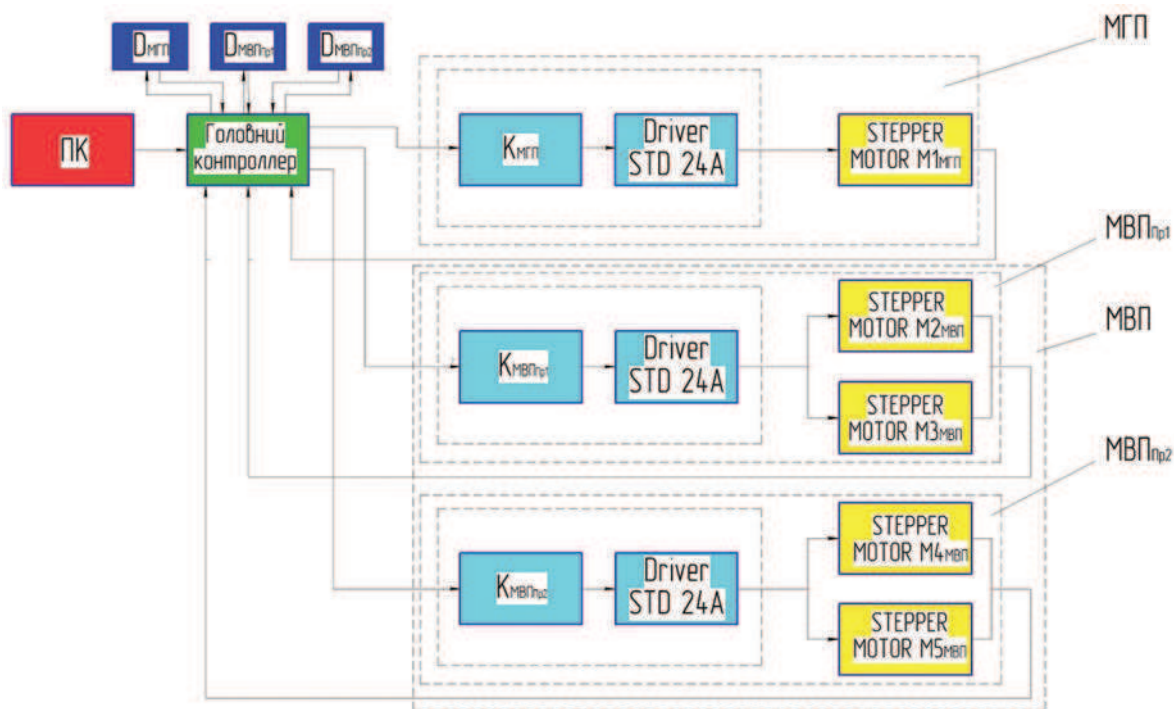


Рис. 5. Схема структурная модуля автоматизированной наладки (МАН) приспособления типа "призма"  
 Fig. 5. The structural scheme of the automated adjustment module (AAM) of the prismatic setup

и МВП, имеющих однозаходные ( $k = 1$ ) механические передачи "винт-гайка качения" с шагом  $t_{Г-ГК} = 4$  мм. Поэтому:

$$\Delta_{МГП} = \Delta_{МВП} = \frac{\alpha_M \cdot t_{Г-ГК} \cdot k}{360^\circ} = \frac{1,8 \cdot 4 \cdot 1}{360^\circ} = 0,02 \text{ мм.}$$

Для обеспечения функционирования предложенной конструкции переналаживаемого приспособления типа "призма" разработана схема структурно-функциональная автоматизированной системы наладки (переналадки) приспособления типа "призма" (рис. 4). Ее основные компоненты следующие:

- модуль горизонтальных перемещений МГП;
- модули вертикальных перемещений призм Пр1 и Пр2, то есть МВП<sub>Пр1</sub>, МВП<sub>Пр2</sub>;
- лок датчиков;
- блок шаговых двигателей, информационно связанных с их контроллерами и драйверами;
- главный контролер (SIMENS CPU1211C), который обрабатывает необходимую входную информацию и выдает команды на соответствующие пары драйвер-контроллер каждого из шаговых двигателей (FRST01102401).

Кроме названных модулей МГП и МВП в состав указанной схемы входит модуль автоматизированной наладки (МАН). Схема структурная МАН представлена на рис. 5 и содержательно представляет собой основные модули и их составляющие и информационные связи между ними. Функции МАН заключаются

в управлении исполнительными механизмами перемещений призм Пр1 и Пр2.

Содержание процесса наладки (переналадки) сводится к управлению работой шаговых двигателей и выполняется по предварительным расчетам, выполняемым пользователем на персональном компьютере (ПК), и кратко сводится к следующему:

- для существующих типовых форм ОМ (или вновь внесенных в их базу данных на ПК) определяются необходимые настроечные размеры и параметры наладки;
- результаты расчетов передаются на главный контроллер, откуда поступают на контроллеры  $K_{МГП}$ ,  $K_{МВП_{Пр1}}$ ,  $K_{МВП_{Пр2}}$  команды с которых через соответствующие драйверы Driver STD 24A управляют шаговыми двигателями STEPPER MOTOR  $M1_{МГП}$ , STEPPER MOTOR  $M2_{МВП_{Пр1}}$ , STEPPER MOTOR  $M3_{МВП_{Пр1}}$ , STEPPER MOTOR  $M4_{МВП_{Пр2}}$ , STEPPER MOTOR  $M5_{МВП_{Пр2}}$ , приводящими в движение исполнительные механизмы соответствующих модулей МГП, МВП<sub>Пр1</sub>, МВП<sub>Пр2</sub>. Контроль величин перемещений производится датчиками соответственно  $D_{МГП}$ ,  $D_{МВП_{Пр1}}$ ,  $D_{МВП_{Пр2}}$ .

## Выводы

Разработана модульная конструкция переналаживаемого приспособления типа "призма" и автоматизированная система его (приспособления) переналадки. Модульность конструкции определена

разработанными МГП, МВП и МАН. Это обеспечивает автоматизированную переналадку взаимного положения двух базирующих призм в горизонтальном и вертикальном направлениях, в свою очередь обеспечивающих базирование ОМ с широким интервалом диаметральных и осевых размеров, повышенную производительность процесса переналадки, а также повышенную гибкость технологической оснастки типа “призма” для использования таких приспособлений при реализации РМСТ в условиях мелко- и среднесерийного типов производств в гибких компьютерно-интегрированных системах машино- и приборостроения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots. URL: [https://ifr.org/downloads/press/Executive\\_Summary\\_WR\\_2017\\_Industrial\\_Robots.pdf](https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf) (дата обращения 04.02.2018).
- [2] Мельничук П.П., Кирилович В.А., Моргунов Р.С. Задачі технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання в механо-складальних гнучких виробничих комірках // Збірник наукових праць Житомирського державного технологічного університету “Процеси механічної обробки в машинобудуванні”. – Житомир. – 2011. – Вип. № 10. – С. 24-41.
- [3] Automated research of trajectory problems in Industrial Robotics by the criterion of power consumption / [Valerii Kyrylovych, Petro Melnychuk, Lubomir Dimitrov, Roman Morgunov, Aleksandr Pidtychenko] // Recent. Industrial Engineering Journal.- Transilvania University of Brasov, Romania. – Vol. 15 (2014). – №3 (43). – November, 2014. – P. 184–190.
- [4] Кирилович В.А., Мельничук П.П., Моргунов Р.С. Методично-програмне забезпечення визначення технологічних параметрів сервісу для тіл обертання // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – № 1 (8). – С. 226-232.
- [5] Siciliano Bruno, Oussama Khatib. Handbook of Robotics / Berlin: Springer, 2008. – 1631 p.
- [6] Детали, сборочные единицы и средства механизации универсально-сборных приспособлений к металлорежущим станкам. Каталог 31.1123.40-83. – Москва, 1985. – 367 с.
- [7] Приспособления универсально-сборные. Рекомендации по агрегатированию. – М.: НИИмаш., 1980. – 150 с.
- [8] Модули линейного перемещения. [https://www.hiwin.com.ru/linear\\_stages/](https://www.hiwin.com.ru/linear_stages/) (дата обращения 04.02.2018).
- [9] Шаговые моторы. <https://www.hiwin.com.ru/servoprivods/> (дата обращения 04.02.2018).
- [10] ИК-датчики оптические для измерения расстояний. [https://arduino.ua/prod193-IK\\_datchik\\_dvijeniya](https://arduino.ua/prod193-IK_datchik_dvijeniya) (дата обращения 04.02.2018).

---

Валерий Кирилович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий (А и КИТ) им. проф. Б.Б. Самотокина Житомирского государственного технологического университета (ЖГТУ), г. Житомир, Украина, e-mail: kiril\_va@yahoo.com

Илона Крыжановская, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий (А и КИТ) им. проф. Б.Б. Самотокина Житомирского государственного технологического университета (ЖГТУ), г. Житомир, Украина, e-mail: krilonika@gmail.com

Тарас Юськив, магистр, выпускник кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий (А и КИТ) им. проф. Б.Б. Самотокина Житомирского государственного технологического университета (ЖГТУ), г. Житомир, Украина, e-mail: desdichydo@ukr.net

# MODUŁOWE NARZĘDZIA POMIAROWE

## *Modular measuring devices*

Marek KURAN

---

**Streszczenie:** W pracy opisano narzędzia Multimar firmy Mahr. Opisano zalety zastosowania modułowej budowy urządzeń w stosunku do uniwersalnych narzędzi pomiarowych. Pokazano możliwość wykorzystania przyrządów do nietypowych zadań pomiarowych. Wskazano na możliwość ograniczenia inwestowanych środków w przypadku wyboru przyrządów modułowych w porównaniu z uniwersalnym sprzętem pomiarowym. Dokonano porównania niepewności pomiaru uzyskiwanych w przypadku wykorzystania przyrządu modułowego Multimar 25 EWR w porównaniu z uniwersalnymi narzędziami pomiarowymi.

**Słowa kluczowe:** narzędzia pomiarowe, modułowa konstrukcja, niepewność pomiaru

**Abstract:** In a paper Mahr's Multimar measuring tools has been described. Advantages of using modular construction of devices in relation to universal measuring tools have been presented. The possibility of using instruments for a typical measurement tasks has been shown. The possibility of limiting invested funds in the case of choosing modular devices in comparison with universal measuring equipment was indicated. The comparison of measurement uncertainty obtained when using the Multimar 25 EWR modular instrument was compared to universal measuring tools.

**Keywords:** measuring tools, modular design, measurement uncertainty

---

### Wprowadzenie

W praktyce warsztatowej powszechnie wykorzystuje się uniwersalne, ręczne narzędzia pomiarowe jak np. suwmiarki, mikrometry, czujniki itp. Doskonale spełniają one swoje zadanie podczas weryfikacji typowych cech geometrycznych wyrobów, zarówno w produkcji jednostkowej jak i wielkoseryjnej, pod warunkiem zapewnienia przez nie odpowiedniej niepewności pomiaru.

W przypadku wprowadzenia do produkcji wyrobu o nietypowej geometrii, utrudniającej wykonanie pomiaru narzędziami uniwersalnymi, pojawia się konieczność zlecenia pomiarów jednostce zewnętrznej lub uzupełnienia stanu o narzędzia w specjalnym wykonaniu, umożliwiającym pomiar kłopotliwych cech geometrycznych.

Pierwszy z przypadków ma sens ekonomiczny jedynie w przypadku jednostkowej produkcji. W drugim, producenci sprzętu pomiarowego oferują narzędzia pomiarowe przystosowane do mniej typowych przypadków. Niestety, zwiększenie specjalizacji wiąże się z jednoczesnym ograniczeniem ich uniwersalności, co często wyklucza zastosowanie w pomiarach innych cech geometrycznych. Istnieje więc prawdopodobieństwo – zwłaszcza w przypadku produkcji jednostkowej i małoseryjnej – niecałkowitej amortyzacji narzędzi pomiarowych.

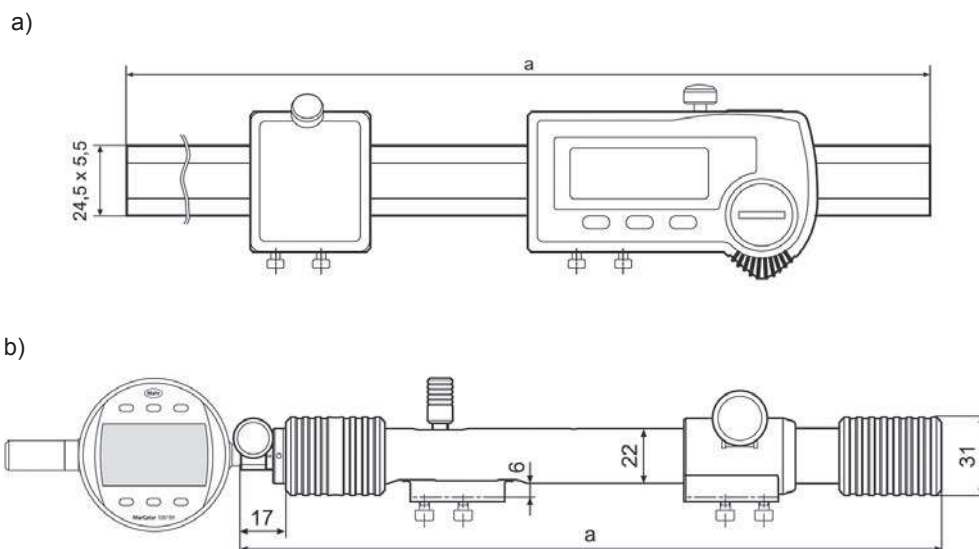
### Narzędzia pomiarowe Multimar

Rozwiązaniem opisanych powyżej problemów mogą być narzędzia pomiarowe, zaprezentowane przez firmę Mahr. Ręczne narzędzia pomiarowe o konstrukcji modułowej oferowane są przez producenta w dwóch wersjach.

W pierwszym przypadku układem nośnym i jednocześnie odmierzającym jest pojemnościowy liniał inkrementalny, na którym zamontowano ruchomy uchwyt

wyposażony w mocowanie wymiennej szczęki pomiarowej oraz cyfrowy układ odczytowy mający takie samo mocowanie. W nomenklaturze producenta jest to „uniwersalna suwmiarka cyfrowa” o handlowej nazwie Multimar 25 EWR. Producent oferuje cztery modele, różniące się przede wszystkim zakresem pomiarowym. Wszystkie wyposażone są w ten sam układ odczytowy o kroku cyfrowym 0,01 mm. Przewidziano dla nich zastosowanie, w zależności od użytego wyposażenia, w pomiarach zewnętrznych i wewnętrznych średnic wyrobów, stożków zewnętrznych i gniazd stożkowych, kołnierzy, pogłębień, kanałków zewnętrznych i wewnętrznych, a także odległości pomiędzy osiami otworów

Drugi typ narzędzia pomiarowego Multimar ma całkowicie odmienną konstrukcję. Główna część składa się korpusu wykonanego z sztywnej rury, do której zamocowano uchwyt wymiennej szczęki pomiarowej. Istnieje możliwość przemieszczania tego uchwyty wzdłuż obudowy narzędzia w celu dokonania zgrubnych ustawień. Wewnątrz obudowy znajduje się część ruchoma narzędzia wraz z mocowaniem drugiej szczęki pomiarowej. Jest ona łożyskowana za pomocą łożyska kulkowego liniowego, co ma zapewnić ograniczenie tarcia oraz luzów pomiędzy ruchomymi elementami. Zastosowanie sprężyny naciągowej pozwala na uzyskanie stałego nacisku pomiarowego. Prosty układ pozwala na zmianę zwrotu nacisku pomiarowego tak, aby możliwy był pomiar zarówno wymiarów zewnętrznych jak i wewnętrznych. Jako układ odmierzający można zastosować każdy z czujników mechanicznych, zębatych oraz cyfrowych, mający część chwytową o średnicy  $\varnothing 8h6$ , czyli typową dla tego rodzaju urządzeń. Ten typ nosi handlową nazwę Multimar 844 T i zgodnie z przewidywaniami producenta powinien znaleźć zastosowanie w pomiarach wymiarów liniowych zewnętrznych



Rys. 1. Narzędzia pomiarowe typu Multimar firmy Mahr: a) Multimar 25 EWR, b) Multimar 844 T  
Wymiar „a” zależy od modelu i zakresu pomiarowego [1]  
Fig1. Mahr's Multimar measuring devices:a) Multimar 25 EWR, b) Multimar 844 T  
The „a” dimension depends on type of device and it's measuring range [1]

Tabela 1. Dane techniczne narzędzi pomiarowych typu Multimar 25 EWR  
Table 1. Technical data of Multimar 25 EWR measuring devices

Typ	25 EWR			
Model	4119003	4119003	4119003	4119003
Zakres pomiarowy (wym. zewnętrzne) [mm]	0-300	0-600	0-1000	0-1250
Krok cyfrowy [mm]/[cal]	0,01/0,0005			
MPE [mm]	0,03		0,04	

i wewnętrznych, pomiaru średnic podziałowych gwintów zewnętrznych i wewnętrznych, kołnierzy centrujących, pogłębień i kanałków, stożków zewnętrznych i gniazd stożkowych oraz zewnętrznych i wewnętrznych uzębień kół zębatach oraz wielowypustów.

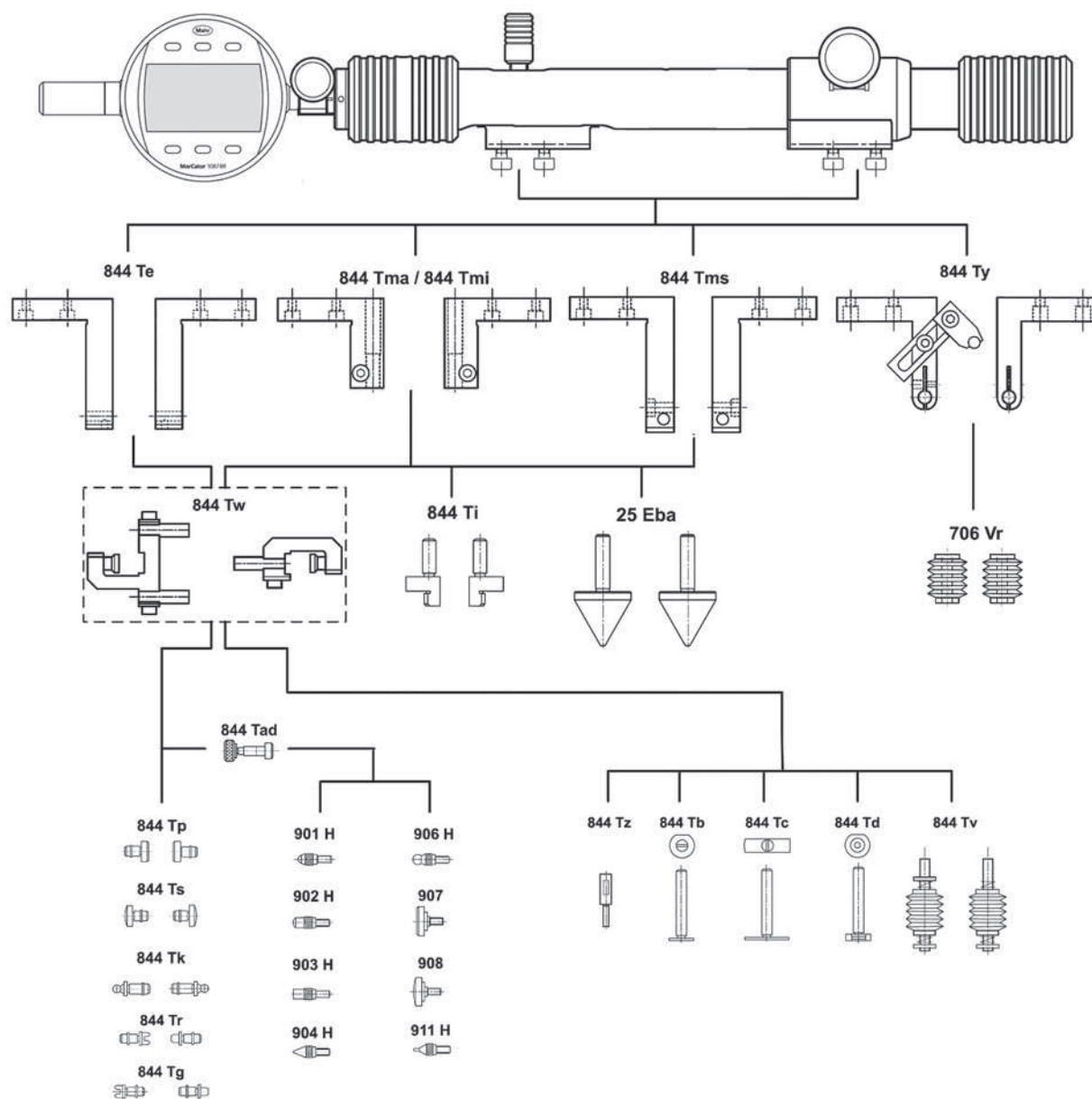
Widok ogólny obu rodzajów przyrządów Multimar przedstawiono na rys. 1, natomiast dane techniczne [1],[2] w tab. 1 oraz 2.

Szeroką gamę możliwości pomiarowych przyrządów Multimar uzyskują dzięki modułowej konstrukcji. Pozwala ona na dobór niezbędnych komponentów do konkretnego zadania pomiarowego. Elementy podzielono na 3 grupy. Możliwe kombinacje wykorzystania elementów z poszczególnych grup przedstawiono na rys. 2.

Pierwszą grupę tworzą szczęki pomiarowe, mocowane bezpośrednio do urządzenia. Sposób ich montażu

Tabela 2. Dane techniczne narzędzi pomiarowych typu Multimar 844 T  
Table 2. Technical data of Multimar 844 T measuring devices

Typ	844 T						
Model	4503001	4503002	4503003	4503004	4503005	4503006	4503007
Zakres pomiarowy (wym. zewnętrzne) [mm]	0-85	80-235	230-585	580-985	970-1470	1470-1970	1970-2470
Zakres pomiarowy (wym. wewnętrzne) [mm]	30-115	110-265	260-615	610-1015	1000-1500	1500-2000	2000-2500
Nacisk pomiarowy [N]	5				10		
Przedział pomiarowy czujnika [mm]	12						
MPE [mm]	Zależne od typu użytego czujnika						



Rys. 2. Dostępne moduły wyposażenia na przykładzie Multimar 844 T [1]  
 Fig. 2. Available equipment modules on the example of Multimar 844 T [1]

decyduje o możliwości pomiaru wymiarów zewnętrznych lub (przy odwrotnym zamocowaniu) wymiarów wewnętrznych. W zależności od wybranego rodzaju szczęk można do nich mocować elementy z drugiej grupy.

Drugą grupę stanowią elementy, które stykają się z powierzchnią mierzonych wyrobów – końcówki pomiarowe. Różnorodność ich geometrii oraz opcjonalność kierunku mocowania w szczękach bezpośrednio wpływa na mnogość zastosowań omawianego sprzętu pomiarowego.

Trzecią grupę stanowią elementy wyposażenia pomocniczego, takie jak ograniczniki położenia czy uchwyty.

Elementy wymienionych powyżej grup można stosować zamiennie zarówno w przyrządzie Multimar 25 EWR jak i Multimar 844 T.

### Niepewność pomiaru przyrządami Multimar

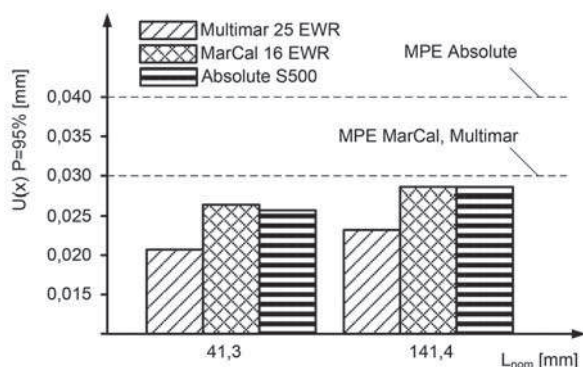
Przyrządy Multimar z założenia mają zastąpić uniwersalny sprzęt pomiarowy o konstrukcji dostosowanej do specjalnych zadań pomiarowych. Celowym zatem wydaje się sprawdzenie niepewności pomiaru urządzenia w porównaniu z niepewnością uzyskiwaną podczas pomiaru przyrządami uniwersalnymi.

Do prób wybrano przyrząd Multimar 25 EWR model 4119003. Jest to najtańsze z oferowanych przez producenta urządzeń, zatem potencjalnie będzie ono najczęściej wybieranym przez ewentualnych klientów W celu porównania wybrano suwmiarkę cyfrową MarCal 16 EWR firmy Mahr oraz suwmiarkę cyfrową Absolute Series 500 firmy Mitutoyo. Dane techniczne urządzeń przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3. Dane techniczne narzędzi pomiarowych użytych do pomiarów

Table 3. Technical data of measuring devices used for measurements

Typ	Multimar 25 EWR	MarCal 16 EWR	Absolute S500
Model	4119003	4103064	4119003
Zakres pomiarowy (wym. zewnętrzne) [mm]	0–300	0–150	0–150
Krok cyfrowy [mm]/[cal]	0,01 / 0,0005		
MPE [mm]	0,03	0,03	0,04



Rys. 3. Niepewność pomiaru wzorców długości za pomocą Multimar 25 EWR, MarCal 16 EWR oraz Absolute S500 w porównaniu z MPE deklarowanymi przez producentów urządzeń

Fig. 3. Uncertainty of measuring the length standards with Multimar 25 EWR, MarCal 16 EWR and Absolute S500 in comparison with MPE declared by device manufacturers

Przyrząd Multimar wyposażony był w szczęki pomiarowe 844 Te wraz z końcówkami pomiarowymi 844 Tp (rys. 2). Sprawdzenia dokonano mierząc płytki wzorcowe o wymiarach nominalnych  $L_{nom} = 41,3$  mm oraz  $L_{nom} = 141,4$  mm, pochodzące z zestawu firmy Mitutoyo do wzorcowania suwmiarek. Dokonano 50 pomiarów każdego wzorca (w przypadku suwmiarek z pełnym kontaktem powierzchni mierniczych z powierzchnią płytek) każdym z badanych przyrządów, zerując je przed pomiarem przy zetkniętych ze sobą powierzchniami mierniczych. Wyznaczono rozszerzoną niepewność pomiaru mierzonych wielkości  $U(x)$  dla poziomu ufności  $P = 95\%$ .

Na rys. przedstawiono wyniki porównania uzyskanych niepewności dla poszczególnych urządzeń na tle deklarowanej dla nich przez producentów wartości MPE.

Jak można zauważyć, uzyskana niepewność pomiaru za pomocą Mahr Multimar 25 EWR jest nieznacznie, lecz zauważalnie mniejsza od niepewności uzyskanych podczas pomiarów za pomocą Mahr MarCal 16 EWR oraz Mitutoyo Absolute S500. Świadczy to o zastosowaniu w przyrządzie Multimar liniału o lepszych właściwościach niż w przypadku suwmiarek uniwersalnych, zarówno firmy Mahr jak i Mitutoyo, które uzyskały praktycznie identyczne w stosunku do siebie wyniki. Żadne z urządzeń nie przekroczyło maksymalnych wartości granicznych błędów określonych przez producentów (co wydaje się oczywiste w przypadku produktów renomowanych producentów sprzętu pomiarowego), jednakże suwmiarka Mitutoyo uzyskała wynik zauważalnie lepszy od deklarowanego.

## Podsumowanie

Modułowe narzędzia pomiarowe Multimar wydają się być ciekawą alternatywą dla dedykowanych urządzeń przeznaczonych do pomiaru cech geometrycznych wyrobu, niemożliwych do zmierzenia za pomocą uniwersalnego sprzętu pomiarowego. Konstrukcja umożliwia – po zakupie elementu bazowego – stosunkowo łatwe i niezwiązane z dużymi inwestycjami rozbudowanie przyrządu za pomocą kolejnych modułów i dostosowywanie go do szerokiej gamy zadań pomiarowych.

Dokładność pomiaru oferowana przez przyrząd Multimar 25 EWR – w przypadku nieskomplikowanych pomiarów wymiarów zewnętrznych – jest zauważalnie większa niż w przypadku korzystania z przyrządów uniwersalnych. Wydaje się jednak konieczne sprawdzenie jaki wpływ na dokładność pomiarów mają charakterystyki metrologiczne, związane z geometrią wymiennych modułów przyrządów Multimar.

## LITERATURA

- [1] Exactly. Catalog. Dimensional metrology. Mahr 2017.
- [2] Katalog przyrządów pomiarowych 2017–2019. Mitutoyo 2017.

dr inż. Marek Kuran – Pracownia Metrologii, Katedra Obróbki Plastycznej i Metrologii, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, ul. Łukasiewicza 5, bud. B-9, e-mail: marek.kuran@pwr.edu.pl



# WYBÓR METODY BADANIA CZASOCHŁONNOŚCI MONTAŻU ZA POMOCĄ WIELOKRYTERIALNEGO WSPOMAGANIA DECYZJI

## *Selection of the method of testing the life of assembly by means of multi-criteria support for decisions*

Robert CIEŚLAK, Marcin SUSZYŃSKI, Jan ŻUREK, Katarzyna PETA, Marcin WIŚNIEWSKI

**Streszczenie:** Praca zawiera przegląd metod badania czasu pracy najczęściej stosowanych do procesów technologicznych montażu. Na przykładzie wybranych wielokryterialnych metod wspomaganie decyzji dokonano przykładowego wyboru metody badania czasu pracy w procesie montażu. W podsumowaniu zawarto wyniki analizy kryteriów.

**Słowa kluczowe:** montaż, metody badania czasu pracy

**Abstract:** The work contains an overview of the most frequently used work-time testing methods for assembly processes. On the example of selected multicriteria decision support methods, a choice of the way of testing the working time in the assembly process was made. The summary contains the results of the criteria analysis.

**Key words:** assembly, methods of working time analysis

### Badanie czasochłonności montażu

W przemyśle maszynowym norma czasu pracy to technicznie uzasadniona jego ilość niezbędna dla wykonania określonego zakresu pracy w danych warunkach techniczno-organizacyjnych zakładu, przez określoną liczbę wykonawców o określonych kwalifikacjach. Można ją wyrazić zależnością [2]:

$$t = t_{pz} + n \cdot t_j$$

gdzie:

$t$  – norma czasu,

$t_{pz}$  – czas przygotowawczo-zakończeniowy,

$n$  – liczba sztuk przedmiotów w serii,

$t_j$  – czas jednostkowy.

Badanie czasu pracy stanowi jeden z podstawowych elementów ekonomicznego i technicznego zarządzania przedsiębiorstwem. Do planowania, kierowania i kontroli przebiegu montażu, potrzebnych do realizacji danego programu produkcyjnego, niezbędne jest dokładne poznanie czasochłonności jego poszczególnych elementów. Ustalenie to jest potrzebne, gdy kształtowane mają one być świadomie i przy tym ekonomicznie. Powinno się zadbać także o to, aby ludzie, którzy wykonują pracę byli w stanie zrobić to bez nadmiernego wysiłku [15].

### Metody badania czasochłonności procesu montażu

W praktyce przemysłowej w zależności od celu i przedmiotu badań stosuje się różne metody normowania czasochłonności. Do najczęściej stosowanych technik normowania pracy można zaliczyć: chronometraż,

fotografię dnia roboczego, obserwacje migawkowe i analizę ruchów elementarnych – MTM [4].

Wyniki badania czasochłonności pracy stanowią materiał do:

- opracowania normatywów czasochłonności na typowe czynności lub ruchy robocze, które będą stanowiły późniejsze źródło danych liczbowych do ustalania norm pracy,
- badania metod pracy w celu ich racjonalizowania, tj. wyszukiwania lepszych pod względem wydajności sposobów wykonywania poszczególnych zabiegów i czynności oraz właściwej ich kolejności,
- badania warunków pracy wielomaszynowej jako jednego ze sposobów lepszego wykorzystania czasu pracy pracowników,
- obserwowania pracy linii potokowych dla uzyskania lepszej ich synchronizacji,
- opracowywania technicznych norm czasochłonności na wykonanie poszczególnych operacji w przypadku braku odpowiednich normatywów (analityczno-pomiarowa metoda określania norm),
- zestawiania osiągniętej sprawności przez poszczególnych pracowników albo wykrywania przyczyn niemożności uzyskiwania przez nich 100% wyrobienia normy [17].

Techniki pomiaru pracy można pogrupować również na:

- bezpośrednie, tam gdzie podejmuje się bezpośrednie obserwacje pracujących, porównując badanie czasochłonności oraz metod pracy,
- pośrednie, polegające na ustalaniu czasochłonności pracy na podstawie syntezy danych, systemach PMTS (Predetermined Motion Time Systems) oraz szacunkach analitycznych [11].

Chronometraż jest najbardziej znaną i najszerzej używaną metodą badania czasochłonności pracy. Jest to metoda pomiaru powtarzalnych operacji lub ich elementów (zabieg, czynność, ruch roboczy) w celu ustalenia, na podstawie określonej liczby pomiarów, właściwego czasu ich trwania i racjonalnego wykonania w normalnym tempie pracy. Obserwacje chronometryczne można prowadzić w sposób ciągły lub wyrwykowy [10].

Do wykonywania pomiarów chronometrycznych konieczne jest wyposażenie, specjalnie przygotowanych (przeszkolonych) pracowników, w odpowiednie oprzyrządowanie. Do najczęściej stosowanego oprzyrządowania należą: zegary i sekundomierze, samopiszące przyrządy pomiarowe, foto- i kinoaparatura, automatyczne aparaty do badania czasu pracy oraz automatyczne aparaty kontrolne [4].

Fotografia dnia pracy polega na ciągłej obserwacji i wykonywaniu pomiarów czasochłonności na stanowisku, uwzględniając przy tym pracę i przerwy. Czasochłonność jednej fotografii pokrywa się zwykle z okresem jednej zmiany roboczej lub jej części. Celem fotografii jest określenie stopnia wykorzystania czasu pracy oraz wielkości rzeczywistego jego zużycia do opracowania normatywu [9].

Obiektem obserwacji najczęściej jest pracownik, maszyna, pracownik i maszyna równocześnie, a także zespół pracowników lub zespół pracowników i maszyn równocześnie. W zależności od zadań i rodzaju obiektów obserwacji, wyróżnić można następujące odmiany fotografii czasu pracy: indywidualną, grupową, zespołową, fotografię obsługi większej liczby maszyn przez jednego pracownika oraz samofotografię [4].

Obserwacje migawkowe polegają na określeniu częstotliwości, ustalanych z góry, rodzajów przebiegu jednego albo kilku systemów pracy za pomocą przeprowadzonych wyrwykowo krótkotrwałych obserwacji. Można dokonywać obserwacji ludzi i środków pracy.

W przypadku stosowania metody obserwacji migawkowych nie używa się w ogóle chronometru ani też nie wymaga się ciągłej obserwacji obserwatora przy stanowisku pracy. Metoda ta polega bowiem na zastosowaniu rachunku prawdopodobieństwa do dokonywanych (rejestrowanych), co pewien określony czas, spostrzeżeń.

Aby wyniki badań przeprowadzonych na próbie mogły być z dostateczną wiarygodnością przeniesione na całą zbiorowość, muszą być spełnione następujące warunki:

- próba musi być reprezentatywna, tzn. musi odtwarzać związki i proporcje, jakie zachodzą w całej badanej zbiorowości,
- dowolne zdarzenie występujące w badanej zbiorowości musi mieć równe prawdopodobieństwo znalezienia się w próbie [4].

Analiza ruchów elementarnych – nazywana inaczej metodą MTM (Methods Time Measurement), jest jedną z najbardziej znanych metod badania czasu operacji. MTM powstała głównie z połączenia podstaw metodycznych badania ruchów i ich czasochłonności. Służy

jednocześnie do usprawnienia przebiegu pracy, wyznaczenia jej czasochłonności oraz kwalifikowania (określenia stopnia trudności). MTM zakłada, że każde działanie człowieka można rozłożyć na proste ruchy elementarne wykonywane przez jego korpus i kończyny oraz, że jest on sumą czasów ruchów składających się na to działanie. W metodzie tej występują trzy główne grupy ruchów: 9 ruchów rąk, 2 ruchy oczu oraz 15 ruchów ciała i nóg.

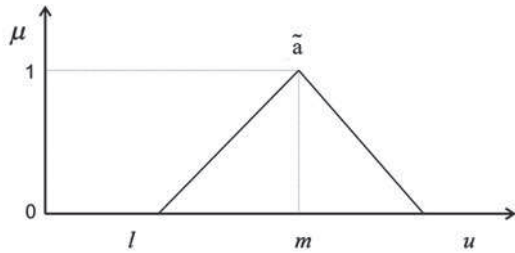
Metoda ta nie ogranicza się tylko do 26 ruchów głównych. W pierwszej grupie ruchy dzielą się na kategorie, a te w niektórych przypadkach w zależności od ich charakteru i warunków wykonania, na klasy. Kategorie i klasy ruchów w tabelach metody MTM mają przypisane wartości czasowe. Podstawową jednostką czasu w metodzie MTM jest 1 TMU (Time Measurement Unit) = 0,0006 min. [4].

### Wielokryterialne wspomaganie decyzji

Wielokryterialne wspomaganie podejmowania decyzji, może być używane do analizy podejmowania decyzji w różnych dziedzinach aktywności przemysłowej. Metody analizy wielokryterialnej mogą służyć wspomaganie procesu decyzyjnego w sytuacjach, gdy dokonywany wybór następuje między wieloma możliwymi wariantami. Zasadniczą częścią tych systemów jest właściwy wybór kryteriów oceny oraz przypisanie im wag. Oznacza to, iż w zależności od rozważanego problemu decyzyjnego kryteria te powinny dobrze go odzwierciedlać. Celem stosowania analizy jest więc wybór najlepszego wariantu z punktu widzenia przyjętych kryteriów. W niniejszej pracy, w celu dokonania oceny czasochłonności montażu, uwzględniono metody: 1) rozmytą analitycznej hierarchizacji FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) oraz 2) addytywną SAW (Simplc Additive Weighting Method).

FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) jest rozmytym analitycznym procesem hierarchicznym, stosowanym w budowie modeli decyzyjnych w celu określenia wartości współczynników wagowych określających ważność poszczególnych kryteriów. Przy wyborze narzędzia wspomagającego normowanie czasochłonności w montażu, dzięki zastosowaniu FAHP, można dokonać oceny ważności tych kryteriów [1].

W rozpatrywanym przypadku dokonywany jest wybór najważniejszych kryteriów jakimi należy się kierować podczas wyboru metody badania czasochłonności w montażu. Określenie ważności zdefiniowanych kryteriów wyboru rozwiązania umożliwi dokonanie obiektywnej oceny elementów. Przy określaniu relacji relatywnej dominacji należy zdefiniować skalę preferencji. Zmiennej lingwistycznej opisującej relacje, zgodnie ze stanowiskiem Nydick i Hill [12], może być przypisana liczba rozmyta  $\tilde{a} = (l, m, u)$  o trójkątnej funkcji przynależności. Trójkątna liczba rozmyta  $\tilde{a} = (l, m, u)$  jest zdefiniowana w przedziale  $[l, u]$ , a jej funkcja przynależności przyjmuje wartość równą 1 w punkcie  $m$  (rys. 1). Skalę preferencji zaprezentowano w tab. 1.



Rys. 1. Triangular fuzzy number  $\tilde{a} = (l, m, u)$  [12]  
 Fig. 1. Triangular fuzzy number  $\tilde{a} = (l, m, u)$  [12]

Tabela 1. Skala preferencji w metodzie rozmytej FAHP [12]  
 Table 1. Preference scale in the FAHP fuzzy method [12]

Relatywna dominacja	FAHP -Triangular fuzzy scale)	FAHP -Triangular fuzzy scale)
Jednakowa istotność	(1, 1, 1)	(1,1,1)
Umiarkowana przewaga	(1, 3, 5)	(1/5,1/3,1/1)
Silna przewaga	(3, 5, 7)	(1/7,1/5, 1/3)
Bardzo silna przewaga	(5, 7, 9)	(1/9, 1/7, 1/5)
Absolutna przewaga	(7, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/7)

Do wyboru metody badania czasochłonności w procesach montażu, jednymi z najistotniejszych kryteriów ich oceny są: najmniejszy (NK) koszt, najkrótszy czas (NC),

ciągłość obserwacji (CO), największa dokładność (ND), złożoność pomiarów (ZP). Określenie ważności zdefiniowanych kryteriów wyboru rozwiązania umożliwi dokonanie ich hierarchizacji i wybór najkorzystniejszej w danych warunkach metody badania procesu montażu. Na ich podstawie oraz rozmytej skali preferencji metody FAHP (tab. 1) przyjęto wartości elementów macierzy porównań zawarte w tab. 2.:

Tabela 2. Elementy macierzy porównań kryteriów wyboru narzędzia analizy czasochłonności w montażu (opracowanie własne)  
 Table 2. Elements of the matrix of comparisons of the criteria for selecting the time-consuming analysis tool in assembly (own elaboration)

Kryteria	NK	NC	CO	ND	ZP
NK	(1,1,1)	(1,3,5)	(1, 3, 5)	(1/7, 1/5, 1/3)	(5,7,9)
NC	(1/5, 1/3/1)	(1,1,1)	(1, 3, 5)	(1/7, 1/5, 1/3)	(1, 3, 5)
CO	(1/5, 1/3/1)	(1/5, 1/3/1)	(1,1,1)	(1/7, 1/5, 1/3)	(1, 3, 5)
ND	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(3, 5, 7)	(1,1,1)	(7, 9, 9)
ZP	(1/9, 1/7, 1/5)	(1/5, 1/3, 1)	(1/5, 1/3, 1)	(1/9, 1/9, 1/7)	(1,1,1)

NK – najmniejszy koszt, NC – najkrótszy czas, CO – ciągłość obserwacji, ND – największa dokładność, ZP – złożoność pomiarów

Średnia geometryczna ocen dla kryterium NK, zgodnie z zależnościami w FAHP, przyjmuje następującą wartość:

$$N\tilde{K} = r\tilde{1} = (\tilde{a}_{11} \times \tilde{a}_{12} \times \tilde{a}_{13} \times \tilde{a}_{14} \times \tilde{a}_{15})^{\frac{1}{5}}$$

$$N\tilde{K} = r\tilde{1} = \left( \left(1 \times 1 \times 1 \times \frac{1}{7} \times 5\right)^{\frac{1}{5}}, \left(1 \times 3 \times 3 \times \frac{1}{5} \times 7\right)^{\frac{1}{5}}, \left(1 \times 5 \times 5 \times \frac{1}{3} \times 9\right)^{\frac{1}{5}} \right)$$

$$N\tilde{K} = r\tilde{1} = (0,93492; 1,65987; 2,37144)$$

W sposób analogiczny otrzymano wartości kolejnych kryteriów:

$$N\tilde{C} = r\tilde{2} = \left( \left(\frac{1}{5} \times 1 \times 1 \times \frac{1}{7} \times 1\right)^{\frac{1}{5}}, \left(\frac{1}{3} \times 1 \times 3 \times \frac{1}{5} \times 3\right)^{\frac{1}{5}}, \left(1 \times 1 \times 5 \times \frac{1}{3} \times 5\right)^{\frac{1}{5}} \right)$$

$$N\tilde{C} = r\tilde{2} = (0,49111; 0,90288; 1,52814)$$

$$C\tilde{O} = r\tilde{3} = \left( \left(\frac{1}{5} \times \frac{1}{5} \times 1 \times \frac{1}{7} \times 1\right)^{\frac{1}{5}}, \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times 1 \times \frac{1}{5} \times 3\right)^{\frac{1}{5}}, \left(1 \times 1 \times 1 \times \frac{1}{3} \times 5\right)^{\frac{1}{5}} \right)$$

$$C\tilde{O} = r\tilde{3} = (0,35595; 0,58181; 1,10756)$$

$$N\tilde{D} = r\tilde{4} = \left( (3 \times 3 \times 3 \times 1 \times 7)^{\frac{1}{5}}, (5 \times 5 \times 5 \times 1 \times 9)^{\frac{1}{5}}, (7 \times 7 \times 7 \times 1 \times 9)^{\frac{1}{5}} \right)$$

$$N\tilde{D} = r\tilde{4} = (2,85293; 4,07596; 4,98778)$$

$$\underline{L}\tilde{P} = r\tilde{5} = \left( \left( \frac{1}{9} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{9} \times 1 \right)^{\frac{1}{5}}, \left( \frac{1}{7} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{9} \times 1 \right)^{\frac{1}{5}}, \left( \frac{1}{5} \times 1 \times 1 \times \frac{1}{7} \times 1 \right)^{\frac{1}{5}} \right)$$

$$\underline{L}\tilde{P} = r\tilde{5} = (0,21812; 0,28137; 0,49111)$$

Stąd otrzymano:

$$\tilde{r}1 + \tilde{r}2 + \tilde{r}3 + \tilde{r}4 + \tilde{r}5 = (4,85303; 6,92008; 10,48603)$$

Wagę kryterium NK obliczono w sposób następujący:

$$\tilde{w}1 = \tilde{r}1 \times (\tilde{r}1 + \tilde{r}2 + \tilde{r}3 + \tilde{r}4 + \tilde{r}5)^{-1} = (0,08915; 0,23986; 0,48865)$$

A następnie w analogiczny sposób dla pozostałych kryteriów:

$$\tilde{w}2 = \tilde{r}2 \times (\tilde{r}1 + \tilde{r}2 + \tilde{r}3 + \tilde{r}4 + \tilde{r}5)^{-1} = (0,04683; 0,13047; 0,31488)$$

$$\tilde{w}3 = \tilde{r}3 \times (\tilde{r}1 + \tilde{r}2 + \tilde{r}3 + \tilde{r}4 + \tilde{r}5)^{-1} = (0,03394; 0,08407; 0,228222)$$

$$\tilde{w}4 = \tilde{r}4 \times (\tilde{r}1 + \tilde{r}2 + \tilde{r}3 + \tilde{r}4 + \tilde{r}5)^{-1} = (0,27206; 0,58900; 1,02776)$$

$$\tilde{w}5 = \tilde{r}5 \times (\tilde{r}1 + \tilde{r}2 + \tilde{r}3 + \tilde{r}4 + \tilde{r}5)^{-1} = (0,02080; 0,04065; 0,10119)$$

Wartości wyostrzone wag wynoszą:

$$\tilde{w}1 = \frac{1}{3}(0,08915; 0,23986; 0,48865) = 0,27255$$

$$\tilde{w}2 = \frac{1}{3}(0,04683; 0,13047; 0,31488) = 0,16406$$

$$\tilde{w}3 = \frac{1}{3}(0,03394; 0,08407; 0,228222) = 0,11541$$

$$\tilde{w}4 = \frac{1}{3}(0,27206; 0,58900; 1,02776) = 0,62960$$

$$\tilde{w}5 = \frac{1}{3}(0,02080; 0,04065; 0,10119) = 0,05421$$

Po standaryzacji wagi przyjmują następujące wartości:

$$w1 = 0,22054; w2 = 0,13275; w3 = 0,09338; w4 = 0,50945; w5 = 0,04386$$

Przy wyborze metody badania czasu pracy za pomocą metody FAHP uzyskano następujące ważności kryteriów:

- ważność kryterium: ND – największa dokładność – wartość: 0,50945,
- ważność kryterium: NK – najniższy koszt – wartość: 0,22054,
- ważność kryterium: NC – najkrótszy czas – wartość: 0,13275,
- ważność kryterium: CO – ciągłość obserwacji – wartość: 0,09338,
- ważność kryterium: ZB – złożoność pomiarów – wartość: 0,04386.

Tabela 3 przedstawia końcowy zhierarchizowany ranking metod normowania czasu pracy w procesach montażu, obliczony zgodnie z metodyką FAHP. Z rankingu

wynika, że najkorzystniejszą metodą jest chronometraż, który wykazuje zarazem największą dokładność. Przy dokonywaniu wyboru metody badania czasu pracy za pomocą FAHP należy wziąć pod uwagę wszystkie zmienne dotyczące konkretnego procesu technologicznego montażu w celu poprawnego zdefiniowania szeregu preferencji ważności kryteriów.

Zastosowanie FAHP i uzyskanych za jej pomocą wag kryteriów oceny, pozwala na dokonanie obiektywnego wyboru narzędzia wspomagającego wybór metody badania czasochłonności w procesach montażu. Wyrażenie preferencji w postaci liczb rozmytych odwzorowuje niepewność formułowania ocen w podejmowaniu decyzji.

SAW (Simple Additive Weighting Method) jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych i stosowanych dyskretnych metod wielokryterialnych. Charakteryzuje

Tabela 3. Wybór najkorzystniejszej z metod (opracowanie własne)  
Table 3. Selection of the most advantageous method (own elaboration)

Metody		Suma	Ranking
Chronometraż	WA	0,87	1
Fotografia dnia roboczego	WB	0,72	4
MTM	WC	0,84	2
MOST	WD	0,23	8
WORK-FACTOR	WE	0,45	7
Obserwacje migawkowe	WF	0,47	6
Porównanie i szacowanie	WG	0,75	3
Ankiety	WH	0,65	5

się stosunkowo dużą prostotą, czy intuicyjnością w porównaniu do innych metod tego typu. Wynika to z faktu, że w modelowaniu preferencji decydenta posługuje się addytywną funkcją liniową. Polega na przygotowaniu macierzy znormalizowanych ocen, a następnie wyborze wariantu decyzyjnego, dla którego ich suma ważona jest największa.

Zgodnie z przedstawionym w poprzednim podrozdziale sposobem postępowania, najpierw zostaje opracowana macierz składająca się z porównywanych metod badania czasu oraz kryteriów oceny (tabela 4), czyli macierz decyzyjna D. Kryteria oceny służące porównaniu metod przyjęto zgodnie z ustaleniami wynikającymi z metody FAHP.

Tabela 4. Macierz decyzyjna  
Table 4. Decision matrix

	NK	NC	CO	ND	ZP
Chronometraż	0,04	0,36	0,05	0,30	0,38
Fotografia dnia roboczego	0,03	0,03	0,06	0,18	0,04
MTM	0,03	0,18	0,07	0,16	0,20
MOST	0,30	0,07	0,26	0,04	0,06
WORK-FACTOR	0,25	0,05	0,19	0,05	0,05
Obserwacje migawkowe	0,20	0,05	0,25	0,04	0,05
Porównanie i szacowanie	0,03	0,12	0,04	0,07	0,10
Ankiety	0,13	0,15	0,10	0,17	0,13

Tabela 5 zawiera wektor wag kryteriów W, który tworzony jest według subiektywnej oceny istotności kryteriów, na podstawie ich zbioru zawartego w macierzy decyzyjnej (tabela 4). Mając na uwadze jednakowe dane wejściowe w przeprowadzanych wyborach wielokryterialnych, wagi kryteriów dla metody SAW przyjęto na podstawie wyznaczonych wag dla metody FAHP.

Przyjęte w metodzie SAW kryteria należy podzielić na kosztowe i jakościowe. Należy określić dla każdego kryterium minimalizację (kryterium kosztowe) oraz maksymalizację wartości (kryterium jakościowe),

Tabela 5. Znormalizowany wektor wag  
Table 5. Normalized weight vector

	NK	NC	CO	ND	ZP	SUMA
Waga kryterium	0,21	0,13	0,09	0,51	0,05	1,00

a także przeskalować macierz decyzyjną D zgodnie z wzorami:

- dla kryterium jakościowego:

$$v_{ij \text{ kryt. jakościowe}} = \frac{d_{ij} - d_j^{\min}}{d_j^{\max} - d_j^{\min}}$$

- dla kryterium kosztowego:

$$v_{ij \text{ kryt. kosztowe}} = \frac{d_j^{\max} - d_{ij}}{d_j^{\max} - d_j^{\min}}$$

gdzie:

$d_{ij}$  – element macierzy decyzyjnej,

$d_j^{\min}$  – element z kolumny j o najmniejszej wartości,

$d_j^{\max}$  – element z kolumny/ o najwyższej wartości.

W wyniku przeskalowania za pomocą powyższych wzorów powstała nowa macierz  $V[m \times k]$ , składająca się z elementów  $v_{ij}$ . Otrzymane dane znajdują się w tab. 6.

Tabela 6. Skalowana macierz decyzyjna  $V_n$   
Table 6. Scale decision matrix  $V_n$

	NK	NC	CO	ND	ZP
	koszt	jakość	koszt	jakość	jakość
Chronometraż	0,96	1,00	0,95	1,00	1,00
Fotografia dnia roboczego	1,00	0,00	0,91	0,54	0,00
MTM	1,00	0,45	0,86	0,46	0,47
MOST	0,00	0,12	0,00	0,00	0,06
WORK-FACTOR	0,19	0,06	0,32	0,04	0,03
Obserwacje migawkowe	0,37	0,06	0,05	0,00	0,03
Porównanie i szacowanie	1,00	0,27	1,00	0,12	0,18
Ankiety	0,63	0,36	0,73	0,50	0,26

Otrzymane wyniki po pomnożeniu skalowanej macierzy decyzyjnej  $V_{ij}$  przez wektor wag  $W[ixl]$  zostały przedstawione w tab. 6. Przez zsumowanie wierszami wyników z tab. 6, powstaje wektor rankingowy (wyniki w tab. 7). Wektor rankingowy obliczono na podstawie wzoru:

$$R_j = \sum a_{ij}$$

gdzie:

$R_j$  – suma elementów w wierszu „j”,

$A_{ij}$  – element macierzy przedstawionej w tabeli 7.

Tabela 7. Wynik mnożenia macierzy  $V_n$  przez wektor  $W$   
Table 7. The result of multiplication of the matrix  $V_n$  by the vector  $W$

	NK	NC	CO	ND	ZP
<b>Chronometraż</b>	0,20	0,13	0,09	0,51	0,05
<b>Fotografia dnia roboczego</b>	0,21	0,00	0,08	0,27	0,00
<b>MTM</b>	0,21	0,06	0,08	0,24	0,02
<b>MOST</b>	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
<b>WORK-FACTOR</b>	0,04	0,01	0,03	0,02	0,00
<b>Obserwacje migawkowe</b>	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00
<b>Porównanie i szacowanie</b>	0,21	0,04	0,09	0,06	0,01
<b>Ankiety</b>	0,13	0,05	0,07	0,26	0,01

Analiza metod normowania czasochłonności w procesach montażu wg SAW pozwala stwierdzić, że podobnie jak to miało miejsce dla FAHP, największą wagę otrzymało kryterium dokładności wykonywania badań w procesie montażu (ranking metod dla tego procesu przedstawiono w tab. 8).

Tabela 8. Wektor rankingowy R  
Table 8. Ranking vector R

<b>Chronometraż</b>	0,98
<b>Fotografia dnia roboczego</b>	0,57
<b>MTM</b>	0,61
<b>MOST</b>	0,02
<b>WORK-FACTOR</b>	0,10
<b>Obserwacje migawkowe</b>	0,09
<b>Porównanie i szacowanie</b>	0,40
<b>Ankiety</b>	0,51

## Podsumowanie

Celem badań było przedstawienie możliwości zastosowania rozmytego analitycznego procesu hierarchicznego (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process* – FAHP) oraz metody SAW (ang. Simple Additive Weighting Method) do wyboru metody badania czasochłonności w kontekście procesu technologicznego montażu. FAHP i SAW wykorzystuje opinie ekspertów do ustalania współczynników wagowych określających ważności kryteriów niezbędnych do hierarchizacji ocenianych metod. Na przedstawionym przykładzie udowodniono skuteczność oby metod wielokryterialnego wspomaganie decyzji, choć należy zauważyć, że lepsza byłaby większa liczba analizowanych metod badania czasochłonności.

Obie przedstawione analizy wielokryterialne dały podobne wyniki dotyczące metod badania czasu pracy w procesie montażu.

## LITERATURA

- [1] Chang D.Y. 1996. "Application of the Extent Analysis Method on fuzzy AHP". *European Journal of Operational Research*, Vol. 95, No. 2: 649–655.
- [2] Feld M. 2000. „Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, s. 221–223.
- [3] Giddens A. 2004. „Socjologia”. Warszawa: PWN: 24.
- [4] Jasiński Z. 1999. „Zarządzanie pracą – organizowanie, planowanie, motywowanie, kontrola”. Warszawa: Agencja Wydawnicza „Placet”, s. 92, 99, 101.
- [5] Kieźun W. 1980. „Podstawy organizacji i zarządzania”. Warszawa: Wydawnictwo Książka i Wiedza (12): 195.
- [6] Kodeks Pracy, art. 128.
- [7] Libal V. i in. 1976. „Organizacja i zarządzanie produkcją”. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, s. 590–591.
- [8] Mikołajczyk Z. 1997. „Techniki organizatorskie w rozwiązywaniu problemów zarządzania”. Warszawa: PWN, s. 54.
- [9] Mrela H. 1979. „Metody badania pracy – metody i techniki organizatorskie”. Warszawa: PWE, s. 84.
- [10] Mrela H. 1975. „Technika organizowania pracy”. Warszawa: Wydawnictwo Wiedza Powszechna, s. 289–290.
- [11] Muhlemann A.P., J.S. Oakland, K.G. Lockyer. 2001. „Zarządzanie, produkcja i usługi”. Warszawa: PWN, s. 33.
- [12] Nydick R.L., R.P. Hill. 1992. "Using the Analytic Hierarchy Process to Structure the Supplier Selection Procedure". *International Journal of Purchasing and Materials Management* Vol. 28, No. 2.
- [13] Podobiński A. 2004. „Zarządzanie przedsiębiorstwem w warunkach integracji europejskiej”. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne (37): 614–615.
- [14] Prabhu Girish V. et. al. 1995. "Effect of Product Structure on Manual Assembly Performance" [w:] *The International journal of Human Factors in manufacturing* 5 (2), 7: 151.
- [15] REFA., Metody badania prac cz.1 i cz.2, Cieszyńska Drukarnia Wydawnicza, 1984, s. 12.
- [16] Wołek R., T.J. Strzelecki. 1993. „Badanie metod i normowanie pracy”. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, s. 39–45.
- [17] Wołek R. 2002. „Podstawy normowania pracy w przemyśle maszynowym”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, s. 252, 475.
- [18] Żurek J. i in. 2007. „Dobór metod badania czasu pracy procesie montażu”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (2/3): 40–45.

dr inż. Robert Cieślak – Katedra Mechaniki i Energetyki, Wydział Techniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Koninie, ul. Przyjaźni 1, 62-510 Konin, e-mail: robertcieślak@wp.pl

dr inż. Marcin Suszyński – Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, ul: Piotrowo 3, 61-965 Poznań, e-mail: marcin.suszynski@put.poznan.pl

prof. dr hab. inż. Jan Żurek – Prorektor ds. Współpracy z Gospodarką, Politechnika Poznańska, Pl. Marii Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, e-mail: jan.zurek@put.poznan.pl

mgr inż. Katarzyna Peta – Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, ul: Piotrowo 3, 61-965 Poznań, e-mail: katarzyna.p.peta@doctorate.put.poznan.pl

dr inż. Marcin Wiśniewski – Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, ul: Piotrowo 3, 61-965 Poznań, e-mail: marcin.wisniewski@put.poznan.pl

# MODUŁOWE KONSTRUKCJE NARZĘDZI TARCZOWYCH DO SZLIFOWANIA NA DOCIERARKACH

## *Modular designs of abrasive disc tools for grinding on lapping machines*

Adam BARYLSKI

---

**Streszczenie:** Przedstawiono nowe konstrukcje tarczowych narzędzi jednolitych i składanych do obróbki powierzchni płaskich na docierarkach jedno- i dwutarczowych. Szlifowanie z kinematyką docierania to jedna z obecnych tendencji rozwoju bardzo dokładnej obróbki powierzchni płaskich i płasko-równoległych.

**Słowa kluczowe:** ściernice, narzędzia modułowe, docierarki tarczowe

**Abstract:** New designs of disc-shaped uniform and folding tools for machining flat surfaces on one- and two-disk lapping machines are presented. Grinding with lapping kinematics is one of the tendencies for the development of machining a very precise flat and flat-parallel surfaces.

**Key words:** abrasive tools, modular tools, disk lapping machines

---

### Wstęp

Bardzo dokładna obróbka ścierna obejmuje szeroki zakres kształtowania powierzchni elementów maszyn i narzędzi. Jedną z najczęściej stosowanych w praktyce operacji jest w tym przypadku docieranie elementów konstrukcyjnych luźnym ścierniwem, występujące niezależnie od rodzaju obrabianego materiału (struktury i twardości), przy czym dominujące znaczenie ma obecnie obróbka powierzchni płaskich i płasko-równoległych. Od kilkunastu lat wiele specjalistycznych firm [7-18] i zespołów badawczych [1, 4, 5, 19, 20, 22] rozwija też technologię bardzo dokładnego szlifowania elementów płaskich na docierarkach tarczowych, nazywaną często mikroszlifowaniem (lub gładzeniem) z kinematyką docierania. W obróbce tej, w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego, zdejmowany jest niekiedy także duży naddatek, przy większym kontakcie przedmiotu obrabianego z narzędziem i przy zmienionych prędkościach szlifowania [2]. W związku z tym wymagane jest także dobranie parametrów obróbki, właściwości ściernicy i obfite dawkowanie płynu obróbkowego, aby zagwarantowane było skuteczne usuwanie z powierzchni czynnej narzędzia zeskranych cząstek materiału i produktów zużycia ściernicy, przy czym występuje również zwiększona intensywność wydzielania się ciepła w układzie roboczym. Cechą charakterystyczną mikroszlifowania na docierarkach tarczowych jest występujący mniejszy rzeczywisty nacisk jednostkowy na obrabianą powierzchnię, niż podczas docierania konwencjonalnego, przy tym samym dociążeniu górnego docieraka (w obróbce dwutarczowej) lub przedmiotów umieszczonych w separatorach (w obróbce jednotarczowej). Wynika to z różnicy w sumarycznej powierzchni styku poszczególnych ziaren z obrabianą powierzchnią elementu.

Do podstawowych cech mikroszlifowania należy: szybkość usuwania materiału (od kilku do 500  $\mu\text{m}/\text{min}$ ), prędkość obwodowa narzędzia (zależnie od wielkości tarczy – od 10 do 600  $\text{m}/\text{min}$ ), jakość obrobionych powierzchni (płaskość i równoległość 1–2  $\mu\text{m}$ , a dla elementów precyzyjnych nawet do 0,3  $\mu\text{m}$ ), dokładność wymiarowa (najczęściej do  $\pm 1 \mu\text{m}$ ), stosowane wielkości ziaren (najczęściej 180–46, zaś w przypadku gładkich powierzchni nawet 6–10  $\mu\text{m}$  i drobniejszych), możliwość jednoczesnej obróbki wielu przedmiotów (w zależności od wielkości, nawet 150 szt. – w kilka minut) oraz automatyczny załadunek i wyładunek przedmiotów (w czasie zwykle krótszym niż minuta). Główną wadą tej metody obróbki wykończeniowej jest większy przyrost temperatury w obszarze skrawania. Przeważają jednak (w stosunku do tradycyjnego docierania) zalety: zwiększona wydajność obróbki, porównywalne z docieraniem parametry chropowatości powierzchni i dokładność wymiarowo-kształtowa, możliwość stosowania bezpośrednio po obróbce kształtującej (niekiedy i po obróbce zgrubnej), niższe koszty utylizacji mediów technologicznych i znacząco mniejsze ilości odpadów w procesie, zamknięty obieg środków smarująco-chłodzących, mniejsze nakłady związane z oczyszczaniem obrobionych przedmiotów, potencjalnie duże możliwości automatyzacji układu wykonawczego, możliwość kompensacji zużycia tarcz roboczych i porównywalny zakres obrabianych materiałów [3].

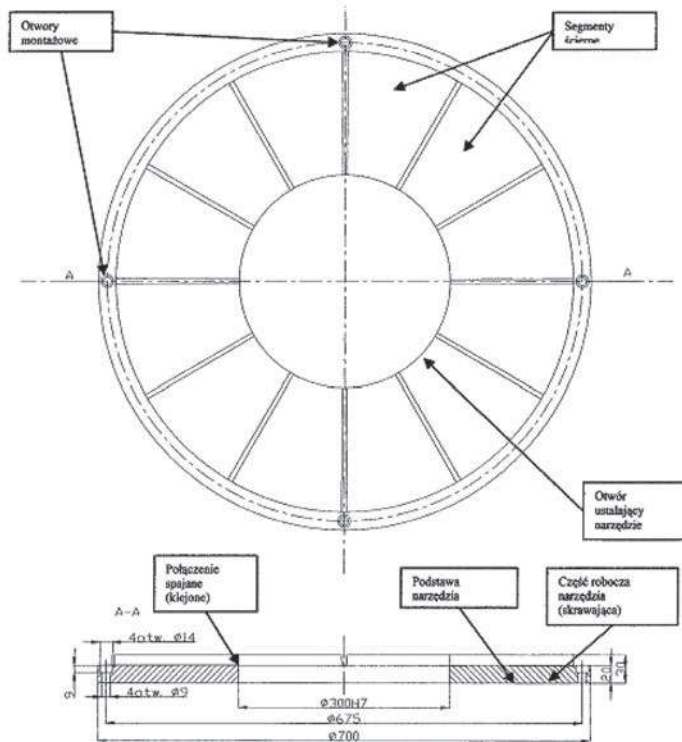
Biorąc pod uwagę stosunkowo duże koszty wykonania narzędzi jednolitych, szczególnie tarcz o większych średnicach zewnętrznych, intensywnie prowadzone są prace nad konstrukcjami modułowymi. Głównym celem artykułu jest zatem omówienie niektórych rozwiązań budowy takich narzędzi, przeznaczonych dla docierarek tarczowych.

## Wybrane konstrukcje narzędzi

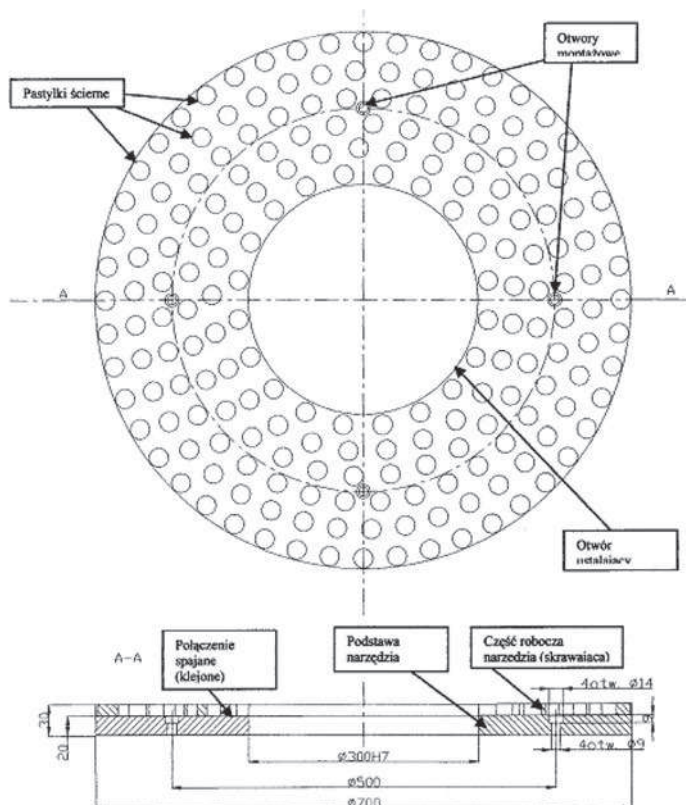
### Przykład I

W przypadku klejonych narzędzi segmentowych, poszczególne konstrukcje różnić się mogą

rozstawieniem elementów mocujących tarczę roboczą z jej korpusem nośnym [21]. Otwory mocujące mogą wystąpić na średnicy wewnętrznej lub wewnętrznej (rys. 1), zaś w przypadku kołowych pastylek (tabletek) ściernych – także na średnim promieniu części roboczej (rys. 2).

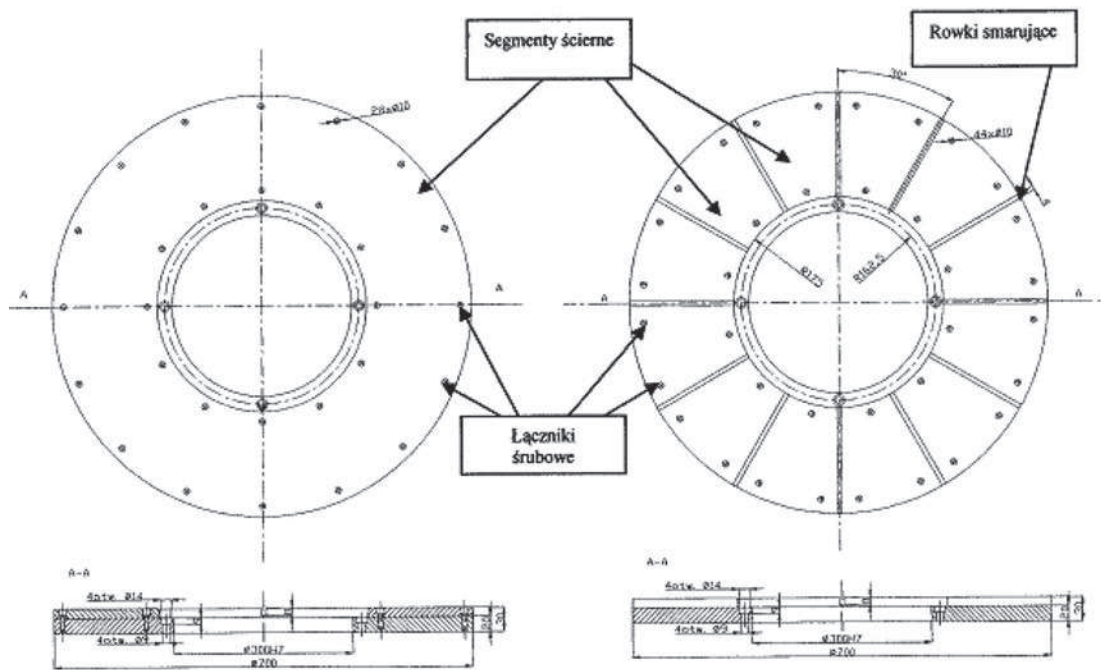


Rys. 1. Narzędzie klejone – koncepcja A  
Fig. 1. Adhesived tools – version A



Rys. 2. Narzędzie klejone – koncepcja B  
Fig. 2. Adhesived tools – version B



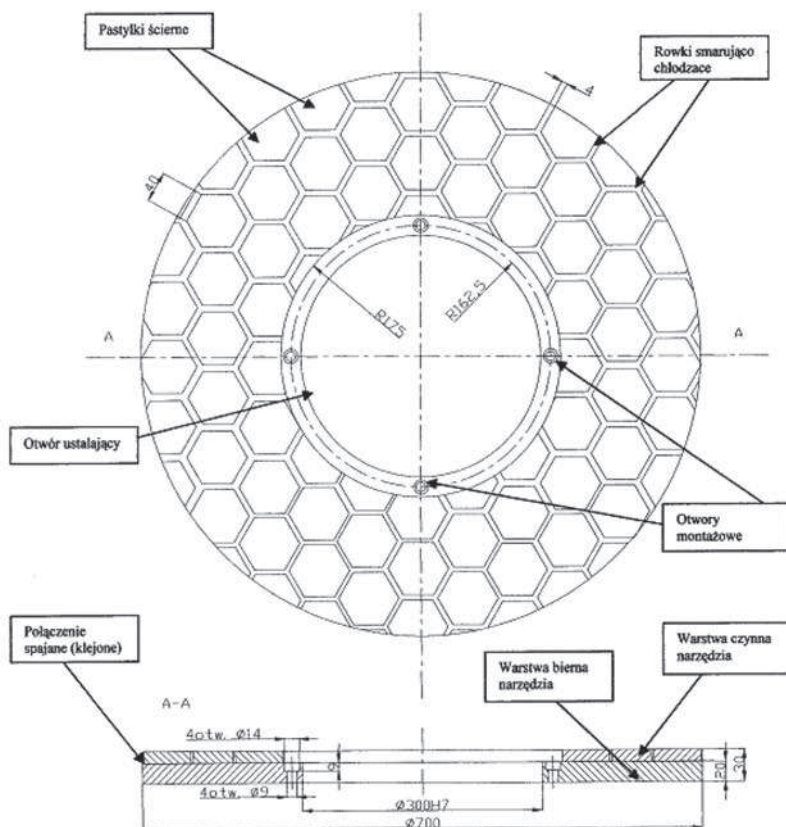


Rys. 3. Narzędzie jednolite i segmentowe – koncepcja C  
Fig. 3. Uniform and segment tool – version C

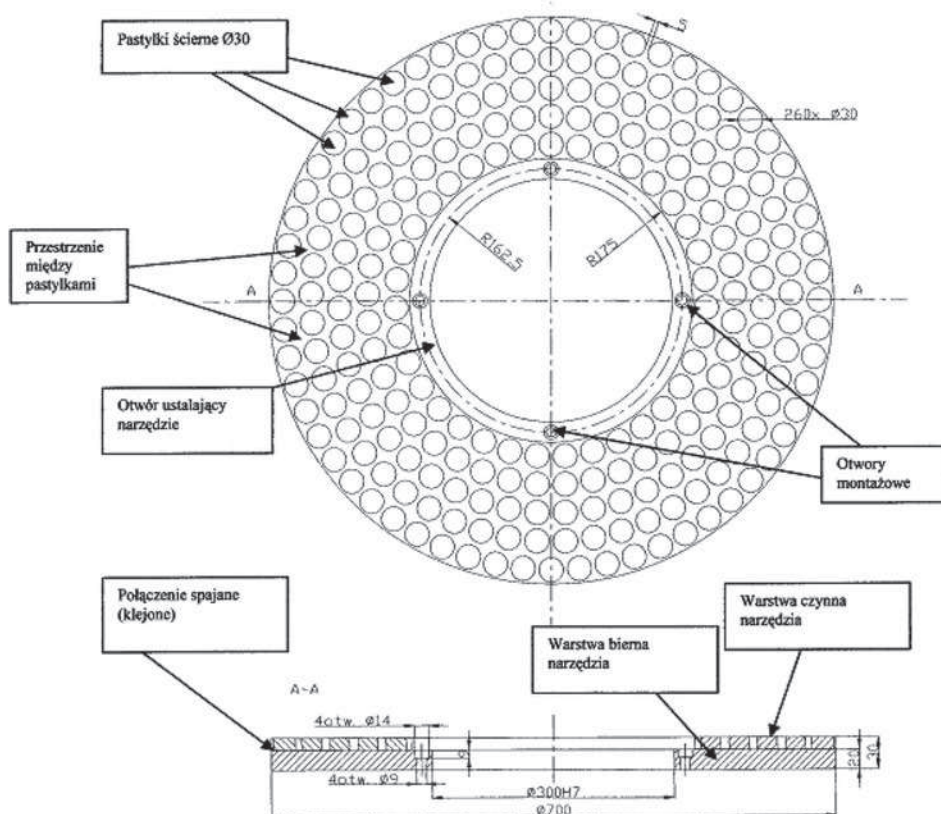
W narzędziach o większych wymiarach gabarytowych, oprócz konstrukcji jednolitej możliwe jest wykorzystanie segmentów ściernych połączonych śrubowo z tarczą nośną (rys. 3). Ułatwione jest wówczas odpowiednie (promieniowe) rowkowanie narzędzia.

Możliwe są też płaskie segmenty sześciokątne (rys. 4) lub kołowe (rys. 5), klejone do tarczy nośnej.

Przykładowo, w przypadku występowania w narzędziu 236 klejonych (żywicą syntetyczną – Epidian Parbond 400 o lepkości ok. 70 tys. cps) ściernych pastylek



Rys. 4. Pastylki ścierno sześciokątne – narzędzie segmentowe (koncepcja D)  
Fig. 4. Hexagonal abrasive pellets – segment tool (version D)

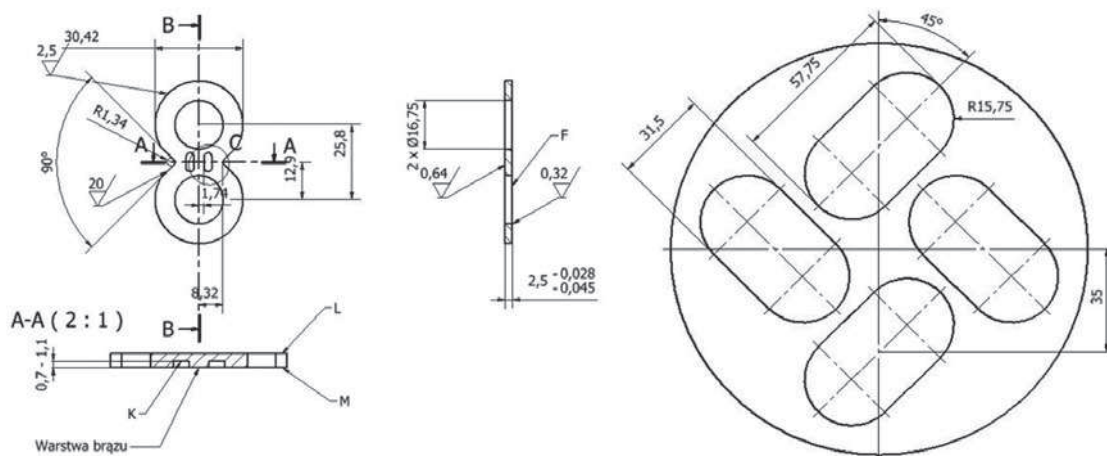


Rys. 5. Pastylki ściernie kołowe – narzędzie segmentowe (konceptja E)  
 Fig. 5. Circular abrasive pellets – segment tool (version E)

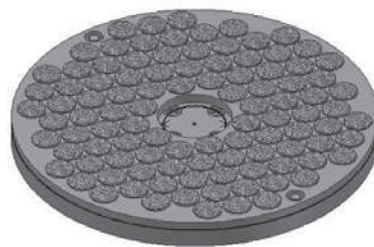
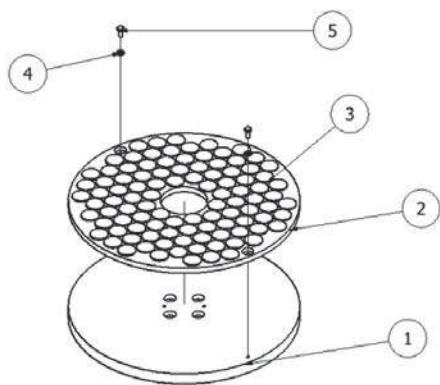
kołowych (z CBN o średniej wielkości ziaren 26–30  $\mu\text{m}$ ) o średnicy 30 mm i wysokości 10 mm (o łącznej powierzchni 1667,34  $\text{cm}^2$ ), rozmieszczonych równomiernie (w odstępach co 5 mm) na tarczy nośnej ze stali S235JR o średnicy zewnętrznej 700 mm (o średnicy wewnętrznej 300 mm i grubości 20 mm), sumaryczna masa narzędzia tarczowego wynosi ok. 50 kg, zaś łączny czas uzyskania połączenia tabletek ściernych z podłożem stalowym to ok. 6 godz.

#### Przykład II

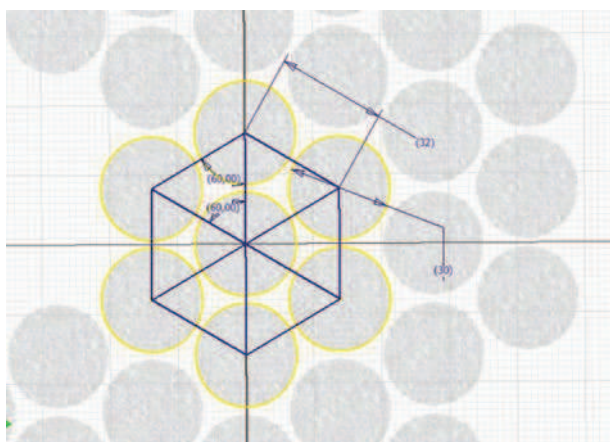
Również w przypadku docierarki jednotarczowej o zewnętrznej średnicy narzędzia 381 mm (średnica wewnętrzna 178 mm, średnica wewnętrzna trzech pierścieni prowadzących 140 mm) możliwe jest przeprowadzenie, przykładowo, jednoczesnej obróbki 12 elementów bimetalowych (rys. 6) – warstwa brązu na podłożu stalowym [6]. Z uwagi na możliwość szkodliwego skażenia



Rys. 6. Element obrabiany i konstrukcja separatora  
 Fig. 6. Workpiece and separator construction



Rys. 7. Konstrukcja narzędzia – wersja 1  
Fig. 7. Tool design – version 1

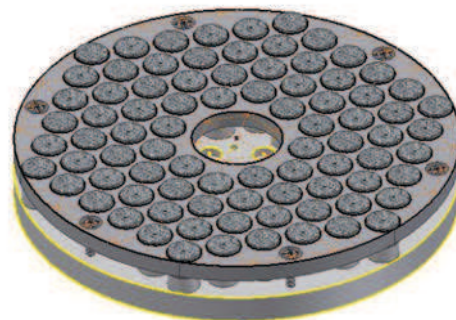
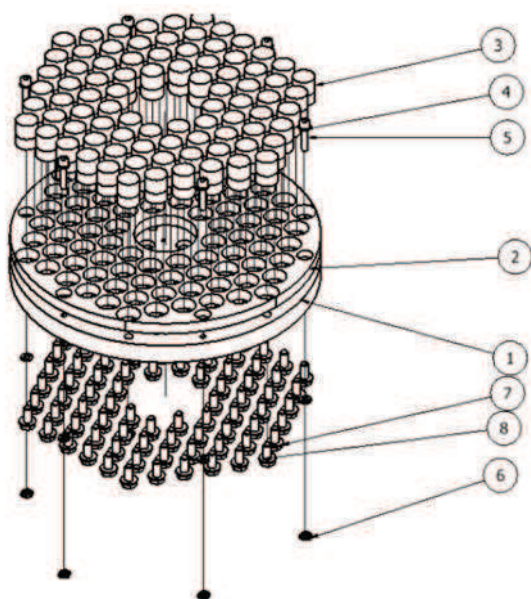


Rys. 8. Rozmieszczenie wkładek ściernych – wersja 1  
Fig. 8. Deployment of abrasive pellets – version 1

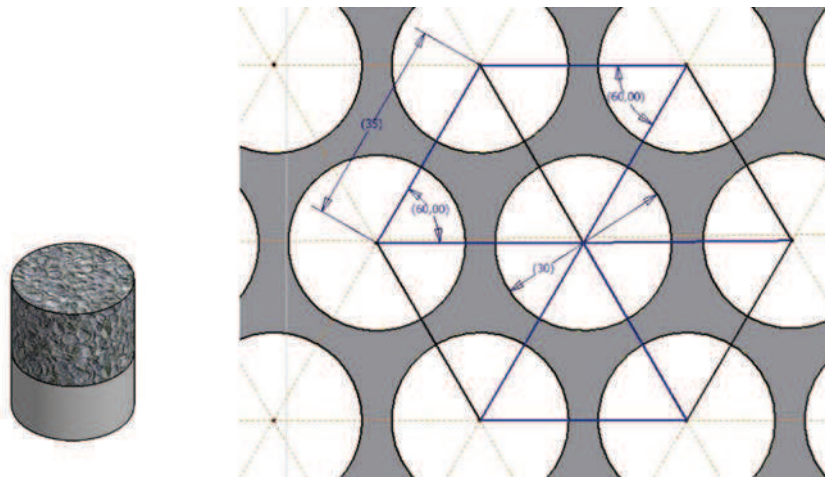
powierzchni mikroziarnami ściernymi w docieraniu konwencjonalnym (przy dawkowaniu kropłowym zawiesiny ścierniej), zastosowano obróbkę ściernicami składanymi.

Opracowano trzy wersje konstrukcyjne narzędzi tarczowych. Wersja 1 (rys. 7) składa się z minimalnej liczby elementów. Na tarczy nośnej 1 umieszczona jest wymienna tarcza 2 z segmentami ściernymi 3. Rozwiązanie to nie przewiduje regulacji wysunięcia wkładek 3 ponad powierzchnię czołową tarczy 2. Całość skręcona jest śrubami 5 (przez podkładki 4). Wkładki ściernie o średnicy 28 mm i wysokości 4 mm przyklejone są do tarczy nośnej, a ich minimalny odstęp wynosi 2 mm (rys. 8). W ten sposób 102 wkładki ściernie stanowią łączną koncentrację powierzchniową na poziomie 67% powierzchni czynnej narzędzia.

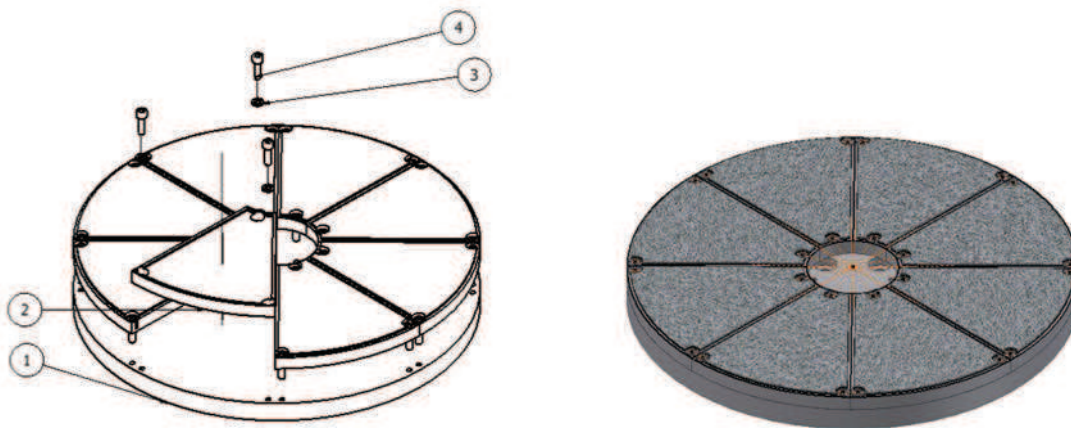
W przypadku wersji przedstawionej na rys. 9, 84 wkładki ściernie 3 (przyklejone do obsady – rys. 10)



Rys. 9. Konstrukcja narzędzia – wersja 2  
Fig. 9. Tool design – version 2



Rys. 10. Rozmieszczenie wkładek ściernych – wersja 2  
Fig. 10. Deployment of abrasive pellets – version 2



Rys. 11. Konstrukcja narzędzia – wersja 3  
Fig. 11. Tool design – version 3

zamocowane są śrubami 8 (przez podkładki 7) do tarczy nośnej 1 (koncentracja powierzchniowa 53%). Obracając śrubami 5 (z użyciem przeciwnakrętki 6 i podkładki 4) możliwa jest regulacja wysunięcia wkładek ściernych ponad tarczę górną 2. Regulacja wysunięcia wkładek lub ich wymiana na inne odbywa się bez konieczności demontażu narzędzia z obrabiarki.

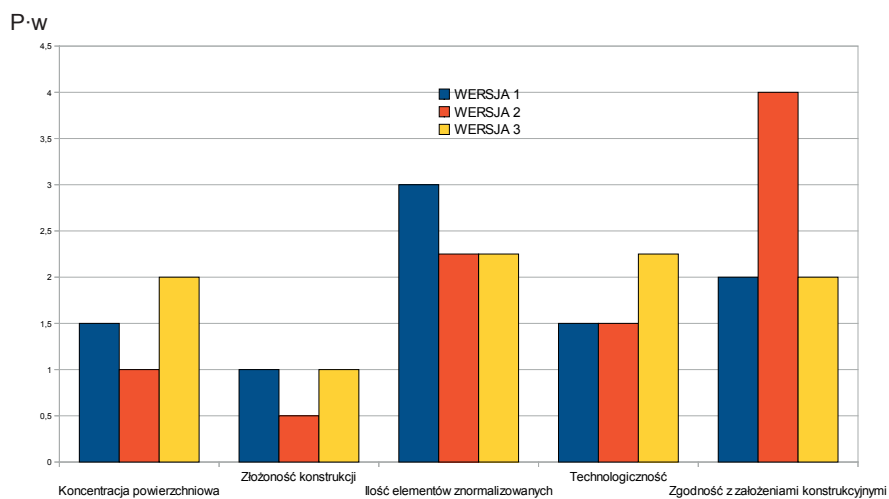
W wersji 3 narzędzia (rys. 11) zastosowano osiem wymiennych płaskich segmentów ściernych 2 (udział części czynnej 87%) skręconych z korpusem 1 śrubami 4 (przez podkładki 3) – podobnie jak w narzędziu składanym o średnicy 700 mm (rys. 3). Odstęp między segmentami wynosi 6 mm.

Analizując opracowane wersje konstrukcyjne narzędzi (1, 2 i 3) przyjęto cztery poziomy oceny P: 4 – bardzo dobry, 3 – dobry, 2 – zadowalający, 1 – błędny. Piętnaście kryteriów szczegółowych (z uwzględnieniem założonego wskaźnika ważności  $w$ ) dotyczyło aspektów projektowo-technologicznych: koncentracja powierzchniowa

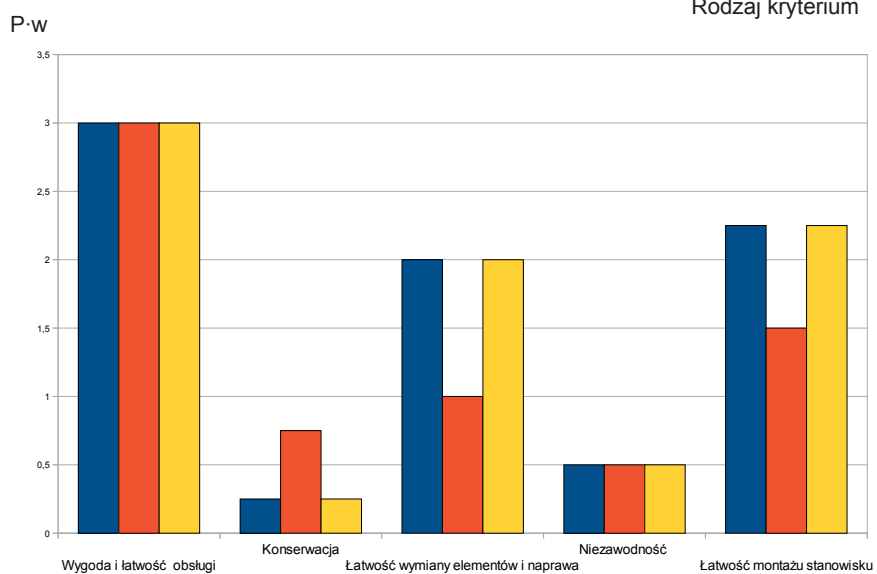
wkładek ściernych ( $w=0,5$ ), ogólna złożoność konstrukcji narzędzia ( $w=0,25$ ), liczba składowych elementów znormalizowanych ( $w=0,75$ ), technologiczność konstrukcji ( $w=0,75$ ), zgodność z założeniami przyjętymi przed projektowaniem ( $w=1$ ) oraz cech użytkowych: łatwość obsługi ( $w=0,75$ ), dogodność konserwacji ( $w=0,25$ ), łatwość wymiany wkładek i naprawy ( $w=0,5$ ), niezawodność działania ( $w=0,25$ ), łatwość montażu na stanowisku roboczym ( $w=0,75$ ), możliwość regulacji wysunięcia wkładek ściernych ( $w=0,75$ ), wielofunkcyjność obróbkowa ( $w=0,5$ ), koszty eksploatacyjne ( $w=0,5$ ), czas przygotowania do pracy ( $w=0,5$ ) i „czystość” w obsłudze ( $w=0,25$ ). Wyniki oceny przedstawiono na rys. 12.

## Podsumowanie

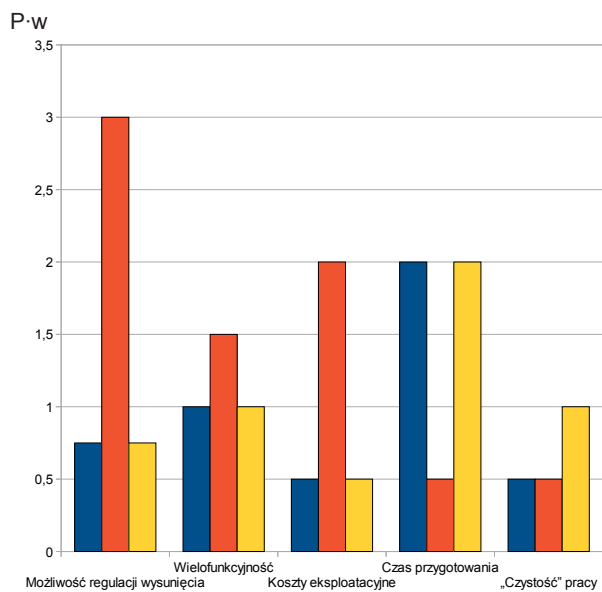
Mikroszlifowanie powierzchni płaskich na docierarkach tarczowych wymaga spełnienia określonych warunków materiałowych, kinematycznych i technologicznych



Rodzaj kryterium



Rodzaj kryterium



Rodzaj kryterium

Rys. 12. Ocena punktowa (P-w) konstrukcji (wersja narzędzia 1, 2 i 3)  
 Fig. 12. Point assessment (P-w) of tools' design (versions 1, 2 and 3)

[3]. W przypadku narzędzi jednolitych, mikroziarna powinna być równomiernie rozmieszczona w spoiwie. Dla ściernic o dużych wymiarach (o średnicach od 700 do 2000 mm) jest to wymóg technologicznie trudny do spełnienia. Wprowadzenie konstrukcji składanych znacznie upraszcza ten proces. Jak wykazały przytoczone powyżej przykłady, szczegółowych rozwiązań budowy takich narzędzi modułowych może być wiele. Przykład konstrukcyjny z możliwością regulacji wysunięcia ponad korpus narzędzia okazał się najkorzystniejszy (wersja 2 – rys. 9). Jego sumaryczna ocena punktowa jest na poziomie 23,5, zaś kolejne to: wersja 3 (22,75 pkt.) i wersja 1 (21,75 pkt.), a więc uzyskano zbliżone wyniki oceny – przy przyjętych kryteriach uniwersalnych.

Warto podkreślić wielokrotność użycia tego typu narzędzi modułowych, jak również możliwość takiego usytuowania wkładek ściernych, względem powierzchni tarczy metalowej (powierzchnia czynna narzędzia tworzy jedną płaszczyznę), aby istniały warunki do dodatkowego wykorzystania zdolności skrawnych ziaren ściernych, które po wykruszeniu z kołowej tabletki zbroją powierzchnię części żeliwnej narzędzia. Pewną wadą modułowych narzędzi ściernych, wykorzystywanych na docierarkach tarczowych, jest ich podwyższony poziom hałasu. Prace nad tą tematyką będą kontynuowane z uwzględnieniem takiego rozmieszczenia wymiennych wkładek ściernych, aby możliwa była poprawa w utrzymywaniu płaskości powierzchni narzędzia (ograniczenie wyrównywania) i właściwego usuwania produktów obróbki.

## LITERATURA

- [1] Ardelt Th. 2001. „Belastung der Schleifscheiben beim Planschleifen mit Planetenkinematik”. *IDR* (2): 116–124.
- [2] Bakoń A., A. Barylski. 2017. „Ziarna i mikroziarna diamentowe. Rodzaje ścierniw i przykłady zastosowania”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [3] Barylski A. 2013. „Obróbka powierzchni płaskich na docierarkach”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [4] Barylski A. 2016. „Połączenia konstrukcyjne w narzędziach tarczowych do szlifowania na docierarkach”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (3): 35–39.
- [5] Barylski A. 2014. „Docieranie powierzchni płaskich w operacjach montażowych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (3): 50–54.
- [6] Guz M. 2011. „Konstrukcja narzędzia składanego do mikroszlifowania powierzchni płaskich”. Prowadzący pracę A. Barylski.
- [7] Materiały informacyjne firmy Engis.
- [8] Materiały informacyjne firmy SpeedFam.
- [9] Materiały informacyjne firmy Mitsunaga.
- [10] Materiały informacyjne firmy Peter Wolters.
- [11] Materiały informacyjne firmy PR Hoffmann.
- [12] Materiały informacyjne firmy Hamai.
- [13] Materiały informacyjne firmy Hahn u. Kolb.
- [14] Materiały informacyjne firmy Spitfire.
- [15] Materiały informacyjne firmy Lapmaster.
- [16] Materiały informacyjne firmy Stähli.
- [17] Materiały informacyjne firmy Fujikoski.
- [18] Materiały informacyjne firmy Dae Chang.
- [19] Materiały informacyjne firmy Hygrade Precision Technologies Inc.
- [20] Materiały informacyjne firmy PTG Precision Technology Group.
- [21] Pędziwilk M. 2007. „Konstrukcja i technologia narzędzi tarczowych do mikroszlifowania powierzchni płaskich”. Prowadzący pracę A. Barylski.
- [22] Stähli A.W. 2000. “Flat honing with diamond or CBN grinding discs”. *IDR* (1): 9–13.

prof. dr hab. inż. Adam Barylski, prof. zw. PG – Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: abarylsk@pg.edu.pl

# WPŁYW WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA SPRĘŻYSTOŚCI WZDŁUŻNEJ KLEJU NA UDARNOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLOKOWYCH

## *Influence of Young's adhesive modulus on impact strength of block adhesive joints*

Andrzej KOMOREK, Jan GODZIMIRSKI, Marek ROŚKOWICZ, Jarosław GAŚSIOR

**Streszczenie:** Opisane w artykule badania stanowią część poszukiwań autorów, zmierzających do określenia zależności pomiędzy określonymi właściwościami klejów a udarnością wykonanych z ich użyciem połączeń.

Kleje konstrukcyjne (jako materiały polimerowe) charakteryzują się różnymi wartościami modułów Younga, wynoszącymi od kilku do prawie 10 000 MPa w temperaturze pokojowej. Wstępne badania wskazują, że powinna istnieć zależność pomiędzy modułem Younga klejów a wytrzymałością udarową wykonanych nimi połączeń. Hipotezę tę zweryfikowano przeprowadzając badania eksperymentalnie i numeryczne połączeń wykonanych klejami o znacznie różniących się wartościach modułów Younga.

W celu realizacji badań doświadczalnych przygotowano próbki, w których elementy ze stali S235 łączono klejami epoksydowymi: Epidian 57/Z1 oraz Loctite EA 9492, EA 9480, EA 9450 i EA 9455.

Testy połączeń klejowych przeprowadzono za pomocą młota wahadłowego, dedykowanego do badań połączeń klejowych. Maksymalna energia wahadła stosowanego w badaniach wynosiła 15 J. Do określenia udarności badanych połączeń wykorzystano zależność według której, energia zużyta do oderwania górnego elementu próbki w takim teście, czyli energia wytracona przez wahadło, jest miarą wytrzymałości udarowej połączenia klejowego.

Modele do obliczeń numerycznych opracowano na podstawie próbek stosowanych w badaniach eksperymentalnych. Przygotowane modele z uwzględnieniem warunków początkowych i brzegowych zostały poddane dynamicznym obliczeniom numerycznym metodą elementów skończonych z wykorzystaniem modułu Explicit Dynamics programu ANSYS.

Rezultaty badań eksperymentalnych i numerycznych wyraźnie wskazują na zależność udarności połączeń klejowych blokowych od modułu Younga zastosowanego kleju. Najwyższą udarnością spośród badanych cechują się połączenia wykonane klejami o najniższych modułach Younga.

**Słowa kluczowe:** połączenie klejowe, udarność, młot wahadłowy, obliczenia numeryczne

**Abstract:** The research described in this article is part of the authors' search to determine the relationship between specific properties of adhesives and the impact strength of their joints.

At impact loads, there may be a relationship between the adhesive Young's modulus and the impact strength of the joints made using the adhesive. This hypothesis was verified by conducting experimental and numerical tests of joints made with adhesives of significantly different Young's modulus values.

In order to carry out the experimental tests, samples were prepared with the S235 steel adherends which were joined with epoxy adhesives: Epidian 57/Z1 and Loctite EA 9492, EA 9480, EA 9450 and EA 9455.

The tests were carried out using a pendulum hammer dedicated to testing adhesive joints. The maximum energy of the pendulum used in the tests was 15 J. To determine the impact strength of the tested joints, was used the dependence according to which the energy used to detach the upper element of the sample in such a test, i.e. the energy lost by the pendulum, is a measure of the impact strength of the adhesive joint.

Models for numerical calculations were developed on the basis of samples used in experimental tests. The prepared models, taking into account the initial and boundary conditions, were subjected to dynamic numerical calculations using the finite element method using the Explicit Dynamics module of the ANSYS program.

The results of experimental and numerical tests clearly indicate the dependence of the impact strength of the block adhesive joints on the Young's modulus of the applied adhesive. The highest impact strength among the tested joints are joints made with the lowest Young's modulus adhesive.

**Keywords:** adhesive joint, impact strength, pendulum hammer, numerical calculations

## Wprowadzenie

Producenci środków transportu, poszukując możliwości zmniejszenia masy całkowitej swoich konstrukcji, zastępują połączenia mechaniczne połączeniami klejowymi, ponieważ w połączeniach mechanicznych masa elementów łączących jest nawet kilka razy większa niż masa kleju tworzącego takie same połączenia. Jednak aby poprawnie projektować i stosować połączenia klejowe, należy znać ich właściwości. Jednym z istotnych parametrów wytrzymałościowych połączeń klejowych, stosowanych do łączenia elementów w konstrukcjach, jest odporność na działanie obciążeń dynamicznych, która może mieć związek z modułem Younga

kleju zastosowanego do wykonania połączenia. W opisanych w artykule badaniach autorzy poszukują zależności jakościowej pomiędzy modułem Younga kleju a udarnością wykonanego nim połączenia. Autorzy podjęli również próbę oszacowania związku pomiędzy udarnością kleju a udarnością wykonanego nim połączenia.

W testach połączeń klejowych stosowano metodykę badania udarności z wykorzystaniem próbek blokowych, w których spoina klejowa jest niszczona poprzez udarowe obciążenia ścinające. Używając tej technologii, energię traconą podczas niszczenia próbki – czyli wytrzymałość udarową połączenia [6] można wyznaczyć na podstawie różnicy wysokości wahadła przed i po uderzeniu.

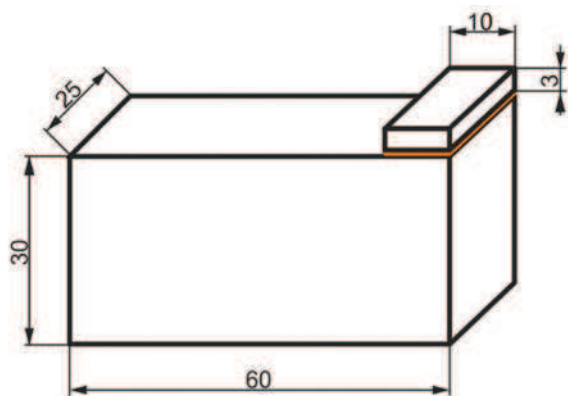
W badaniach analizowano wyniki badań udarności połączeń wykonanych klejami: Epidian 57/Z1 oraz Loctite EA 9492, EA 9480, EA 9450 i EA 9455.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzono obliczenia numeryczne badanych przypadków w programie ANSYS, analizując rozkłady i przebieg w czasie naprężeń maksymalnych głównych w spoinach.

W celu wyznaczenia udarności klejów, wykonano odlewane próbki, które poddano badaniom udarności metodą Charpy'ego.

### Metodyka i wyniki badań eksperymentalnych

W celu przeprowadzenia badań udarowych połączeń klejowych przygotowano próbki blokowe (rys. 1), których elementy wykonano ze stali zwykłej jakości S235.



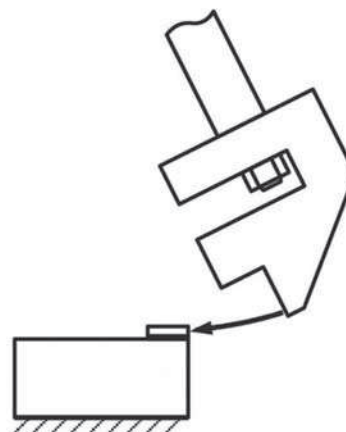
Rys. 1. Próbką stosowana w badaniach udarności  
Fig. 1. The sample used in impact strength tests

Jako kleje zastosowano tworzywa adhezyjne o istotnej różnicy modułu Younga, wymienione w tabeli (tab. 1). Do badań przygotowano 10 serii próbek.

Elementy metalowe przed klejeniem oczyszczono oraz nadano ich powierzchni odpowiednią strukturę i chropowatość metodą obróbki strumieniowo-ściernej, stosując jako medium ścierny żużel pomiedziowy. Następnie powierzchnie próbek przemyto benzyną ekstrakcyjną i umieszczono w komorze suszarki laboratoryjnej celem odparowania benzyny. Tak przygotowane elementy jak najszybciej klejono, aby uniknąć przypadkowego zabrudzenia powierzchni klejonych bądź osadzenia się kurzu, tlenków lub wilgoci. Podczas składania elementów do klejenia, zwracano uwagę na właściwe położenie elementów względem siebie, gdyż nawet niewielkie nieprawidłowości geometrii próbek skutkują istotnymi zmianami charakteru obciążenia i w efekcie – uzyskiwanych wyników [1, 2, 3, 5]. Sklejone serie próbek umieszczano na płycie podstawy i dociskano ciśnieniem 40 kPa na czas utwardzania, którego długość złożono na 7 dób w temperaturze otoczenia (21°C). Po utwardzeniu spoin, przeprowadzono ocenę jakości uzyskanych połączeń oraz usunięto wypływkę kleju.

Tabela 1. Moduły Younga klejów stosowanych w badaniach  
Table. 1. Young's modulus of adhesives using in tests

Lp.	Nazwa kleju	Moduł Younga E [MPa]
1.	Epidian 57/Z1	1800
2.	Loctite EA 9455	60
3.	Loctite EA 9450	1025
4.	Loctite EA 9480	4400
5.	Loctite EA 9492	6700



Rys. 2. Schemat przyłożenia obciążenia do próbki  
Fig. 2. Scheme of the block impact test

Badania przeprowadzono na dedykowanej maszynie do badania udarności połączeń klejowych blokowych i zakładkowych. Maksymalna energia stosowanego w badaniach wahadła wynosiła 15 J, a prędkość w najniższym położeniu – 2,96 m/s. Badania prowadzono przykładając obciążenie udarowe wg schematu przedstawionego na rys. 2 [4]. W czasie badań zwracano szczególną uwagę na utrzymywanie stałej odległości impaktora od spoiny klejowej, ze względu na istotny wpływ tego parametru na uzyskiwane wyniki.

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono na rys. 3.

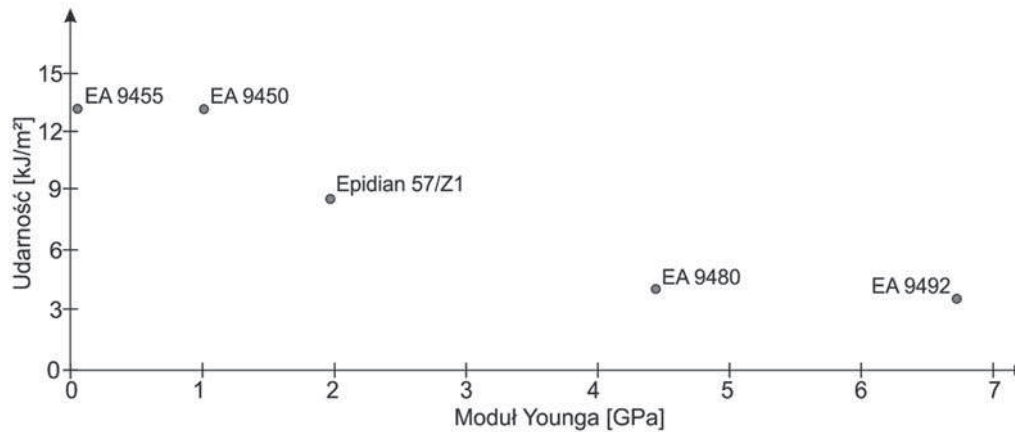
Uzyskane wyniki (rys. 3) wyraźnie wskazują na zależność udarności połączeń klejowych blokowych od modułu Younga zastosowanego kleju. Najwyższą udarnością cechują się połączenia wykonane klejami o najniższym module Younga. Wydaje się, że takie zjawisko jest związane z kruchością i niewielkim odkształceniem niszczącym klejów o wysokiej sztywności.

### Analizy numeryczne

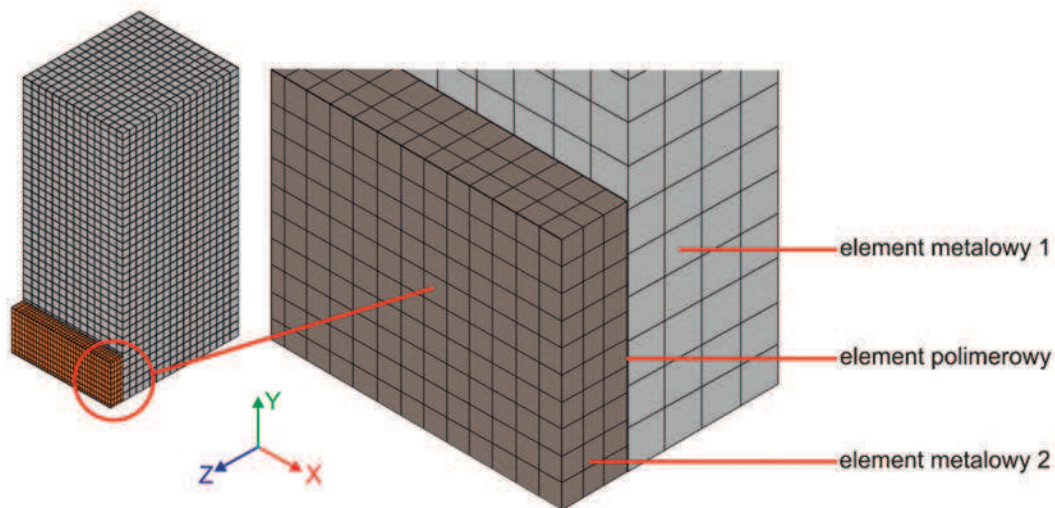
Obliczenia prowadzono w programie Ansys z wykorzystaniem modułu Explicit Dynamics.

Zbudowany model numeryczny próbki (rys. 4) został obciążony dynamicznie modelem prostopadłościennego impaktora o wymiarach 5×25×3 mm, któremu

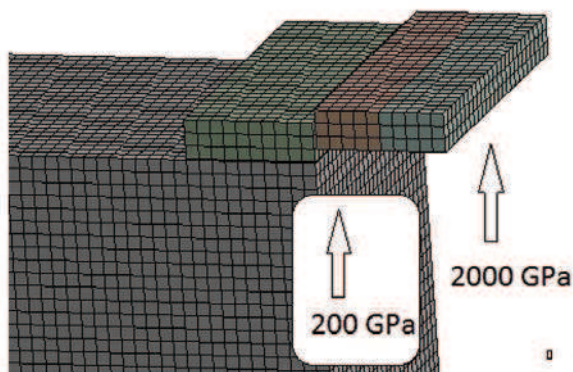




Rys. 3. Zależność udamności blokowych próbek stalowych od modułu Younga klejów  
 Fig. 3 The dependence of impact strength of block steel samples on the adhesives Young's modulus



Rys. 4. Model 3D próbki z przyklejonym prostopadłościennym elementem  
 Fig. 4. 3D model of the sample with a bonded cuboid element



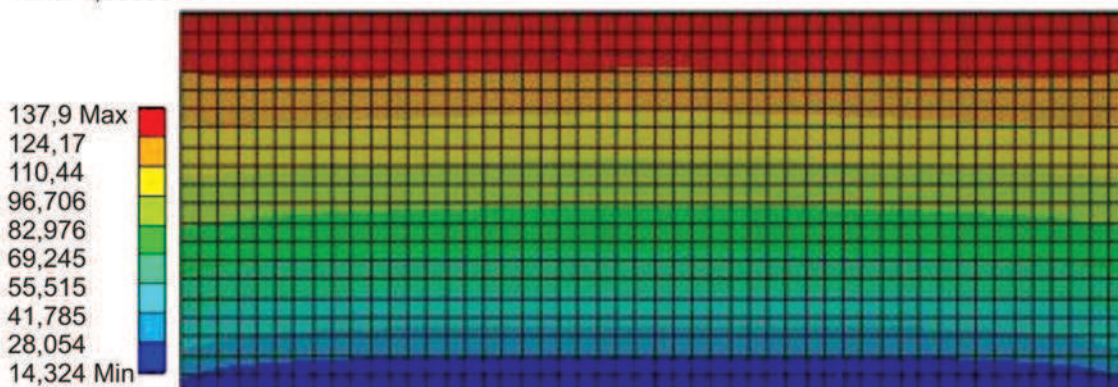
Rys. 5. Model impaktora składającego się z dwóch części o różnej sztywności  
 Fig. 5. The impactor model consisting of two parts of varying stiffness

została nadana prędkość 2960 mm/s oraz odpowiednia gęstość tak, aby obciążenie odpowiadało rzeczywistej energii uderzenia młota udarowego stosowanego w eksperymencie – 15 J. Impaktor zamodelowano jako element składający się z dwóch części – uderzającej bezpośrednio w próbkę nadano właściwości stali, drugiej moduł sprężystości o rząd wielkości większy (2000 GPa), aby zapewnić odpowiednią sztywność elementu uderzającego (rys. 5).

Porównano rozkłady naprężeń maksymalnych głównych w spoinach dla jednakowych czasów obliczeniowych (rys. 6–7) zakładając, że większym wartościom naprężeń powinna odpowiadać mniejsza udamność.

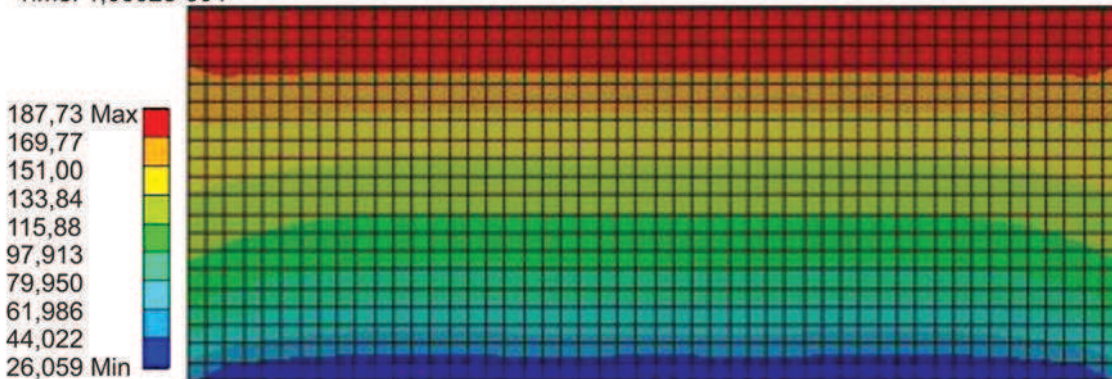
Analiza map naprężeń maksymalnych głównych w spoinach badanych połączeń (rys. 6–7) dla czasu obliczeniowego 0,0001 s wskazuje, że zwiększanie modułu

Maximum Principal Stress  
Unit: MPa  
Time: 1,0005e-004



Rys. 6. Mapa naprężeń maksymalnych głównych w spoinie dla czasu obliczeniowego 0,0001s – moduł Younga kleju 2000 MPa  
Fig 6. Map of Max Principal Stresses distribution in the joint for the computational time equal to 0.0001 s – Young's modulus of adhesive 2000 MPa

Maximum Principal Stress  
Unit: MPa  
Time: 1,0002e-004



Rys. 7. Mapa naprężeń maksymalnych głównych w spoinie dla czasu obliczeniowego 0,0001 s – moduł Younga kleju 6000 MPa  
Fig 6. Map of Max Principal Stresses distribution in the joint for the computational time equal to 0.0001 s – Young's modulus of adhesive 6000 MPa

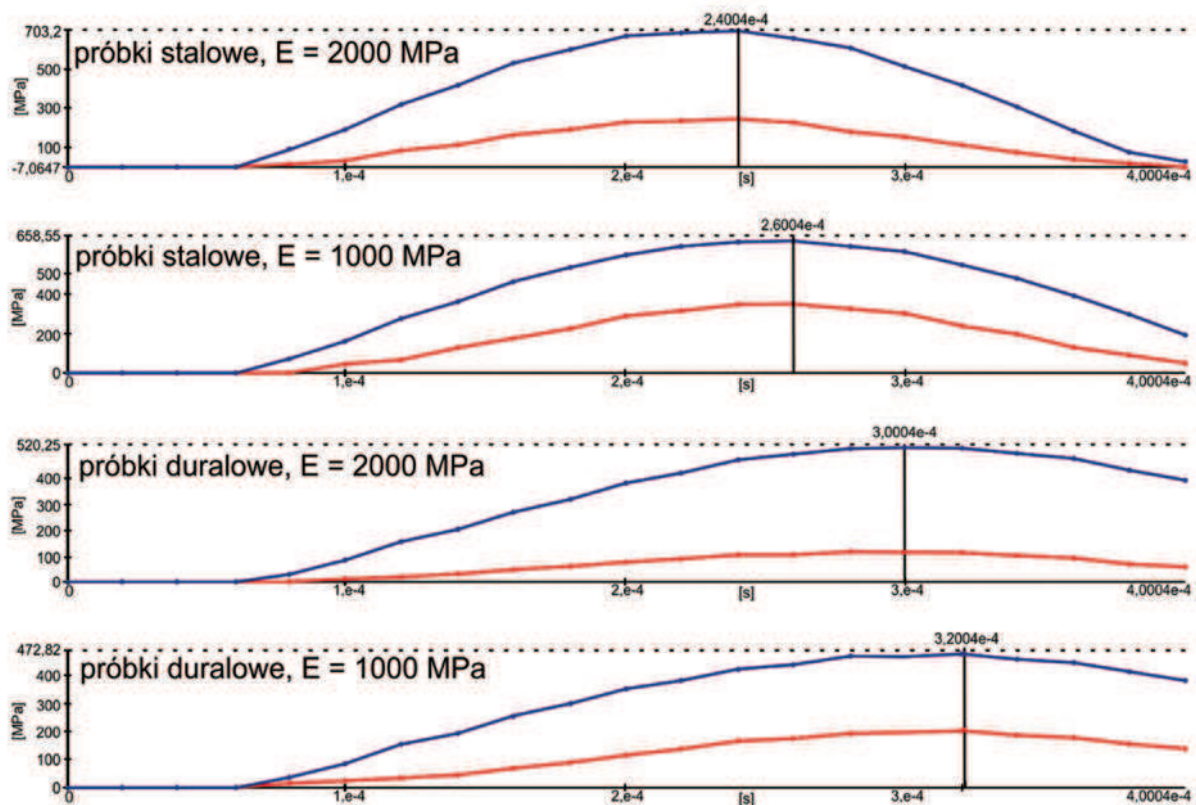
Younga kleju powoduje wzrost naprężeń, co powinno skutkować niższą udarnością połączenia.

Przeanalizowano również jak zmieniają się w czasie przebiegi naprężeń maksymalnych głównych w spoinach próbek blokowych obciążonych dynamicznie, jeśli klejone elementy są wykonane z różnych materiałów oraz klej charakteryzuje różna sztywność (rys. 8).

Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że zarówno zmniejszenie modułu Younga klejonych elementów oraz kleju powoduje wydłużenie czasu (rys. 8), w którym w spoinach występuje wzrost naprężeń oraz zmniejszenie wartości naprężeń maksymalnych (zaobserwowane również na rys. 6 i 7), co powinno skutkować zwiększeniem udarności. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych.

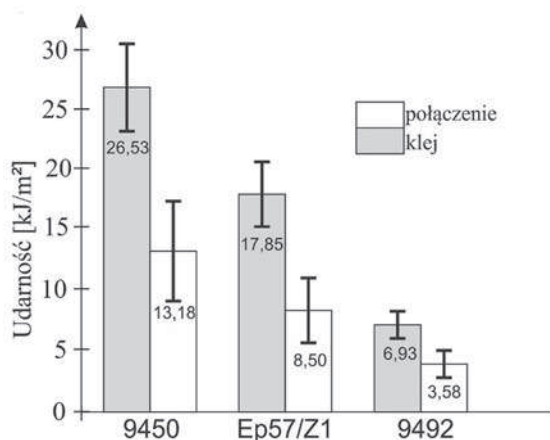
#### Badania zależności pomiędzy udarnością kleju i wykonanym połączeniem

Zarówno w połączeniach jak i w postaci odlewanych próbek, klej w badaniach udarowych był obciążany z dużymi ale różnymi prędkościami (2960 lub 2093 mm/s). Ze względu na różne prędkości oraz inny sposób obciążenia udarność badanych próbek powinna być inna. W badaniach eksperymentalnych sprawdzono czy istnieje zależność pomiędzy udarnością tworzywa adhezyjnego i udarnością wykonanego z jego użyciem połączenia. Badaniom poddano 3 kompozycje klejowe (Epidian 57/ Z1, Loctite EA 9492 i Loctite EA9450), z których wykonano odlewane próbki klejowe i które zostały również wykorzystane do wykonania połączeń klejowych blokowych.



Rys. 8. Przebieg w czasie naprężeń normalnych głównych w spoinach próbek blokowych obciążonych dynamicznie w zależności od materiału, z którego wytworzono próbki i modułu Younga kleju  
 Fig. 8. The time history of normal principal stresses in the joints of dynamically impact loaded block samples in accordance with the material of the samples and Young's modulus of the adhesive

Próbki klejowe o wymiarach 80×10×5 mm wykonano w 10 seriach w specjalnie do tego celu przygotowanych formach silikonowych. Wszystkie kompozycje klejowe utwardzono w temperaturze pokojowej (21°C) przez 7 dni. Badania udarności tworzyw adhezyjnych



Rys. 9. Udarność próbek klejowych i połączeń klejowych blokowych  
 Fig. 9. Impact strength of bulk adhesive samples and block adhesive joints

prowadzono zgodnie z PN-EN ISO 179-1, przykładając obciążenie krawędziowo z wykorzystaniem młota wahadłowego Galdabini Impact 25, przy zastosowaniu wahadła o maksymalnej energii równej 7,5 J. Stalowe próbki blokowe przygotowano metodą opisaną w wcześniejszych badaniach. Wynik badań udarności przedstawiono na rys. 9.

Dla wszystkich badanych klejów występuje wyraźna zależność pomiędzy udarnością kleju a udarnością wykonanego nim połączenia. Dla stosowanych próbek i warunków eksperymentu, wartość udarności połączenia stanowi ok. połowę wartości udarności kleju określonej metodą Charpy'ego przy krawędziowym sposobie przyłożenia obciążenia. Ta informacja jest bardzo istotna, ponieważ pozwala przypuszczać, że dla niektórych klejów, udarność połączeń klejowych blokowych można szacować na podstawie badań udarności odlewanych próbek klejowych.

#### Wnioski

1. Połączenia klejowe wykonane klejami o niższych modułach Younga cechują się udarnością wyższą niż połączenia wykonane klejami o wyższych modułach Younga.

2. Wyniki badań numerycznych wskazują, że zmniejszenie modułu Younga kleju powoduje wydłużenie czasu, w którym w spoinach występuje wzrost naprężeń oraz zmniejszenie wartości naprężeń maksymalnych, co powinno skutkować zwiększeniem udarności.
3. Projektując i wykonując połączenia klejowe, które mogą być obciążane udarowo należy brać pod uwagę sztywność stosowanych klejów, a jeżeli wytrzymałość statyczna takich połączeń nie jest najważniejszym parametrem, to wydaje się, że wartość modułu Younga powinna decydować o wyborze kleju.
4. Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że może występować zależność pomiędzy udarnością klejów, a udarnością wykonanych nimi połączeń. Wniosek ten wymaga jednak potwierdzenia w dalszych badaniach.

## LITERATURA

- [1] Adams R.D., J. Comyn, W.C. Wake. 1997. "Structural Adhesive Joints in Engineering". Springer.
- [2] Adams R.D., J.A. Harris. 1996. "A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (16): 61–71.
- [3] Da Silva L.F.M. et. al. 2012. "Adhesive Joints: Best Practices". Wiley & Sons.
- [4] Komorek A., J. Godzimirski. 2016. "The selected aspects of the research into impact loading of adhesive joints in block samples – comparison of different ways of applying the load". *Problemy Eksploatacji* (4): 77–91.
- [5] Komorek A., P. Przybytek. 2015. "Initial research of impact strength in adhesive joints". *Solid State Phenomena* Vol. 237: 160–165.
- [6] Taylor A. 1996. "Impact Testing of Adhesive Joints". *MTS Adhesive Project 2 AEA Technology* 5 (2).

---

dr hab. inż. Marek Rośkowicz – Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: marek.roskowicz@wat.edu.pl

prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski – Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

dr inż. Andrzej Komorek – Katedra Awioniki i Systemów Sterowania Wydziału Lotnictwa Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie, ul. Dywizjonu 303 nr 35, 08-521 Dęblin, e-mail: komman@op.pl

mgr inż. Jarosław Gąsior – Wojskowe Centrum Normalizacji, Jakości i Kodyfikacji, ul. Nowowiejska 28A, 00-909 Warszawa, e-mail: j.gasior@ron.mil.pl

# WYBRANE ASPEKTY WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ LUTOWANYCH I KLEJOWYCH BLACH MIEDZIANYCH

## *Selected aspects of strength soldered and adhesive joints od copper sheets*

Anna RUDAWSKA, Izabela MITURSKA

**Streszczenie:** Przeprowadzone badania miały na celu porównanie wybranych aspektów wytrzymałości poszczególnych rodzajów grup połączeń: lutowanych oraz klejowych, wykonanych z blachy miedzianej M1E z4. W przypadku połączeń lutowanych czynnikiem zmiennym był rodzaj zastosowanego topnika, który został wybrany z uwzględnieniem właściwości łączącego materiału, natomiast w przypadku połączeń klejowych czynnikiem zmiennym był rodzaj kleju. Wśród różnych dostępnych topników zastosowano: Fosol, pastę Unifix 3 i kalafonię. Do wykonania połączeń klejowych zastosowano 4 kompozycje klejowe, przygotowane z użyciem żywic epoksydowych Epidian 5 i Epidian 53 oraz utwardzaczy PAC i Z1, w odpowiednich stosunkach stechiometrycznych. W obu grupach połączeń zastosowano również różne rodzaje połączeń. W przypadku lutowania próbki zostały połączone doczołowo, w klejeniu natomiast zakładkowo. Przygotowane połączenia poddano badaniom wytrzymałościowym, na podstawie których określono nośność połączeń. Uzyskane wyniki badań poddano również analizie statystycznej, dzięki której określono grupy jednorodne i oceniono istotne różnice pomiędzy poszczególnymi sposobami wykonania połączeń montażowych. Na podstawie uzyskanych wyników badań zauważono, że w przypadku połączeń lutowanych najwyższą wartość nośności uzyskano dla połączeń, gdzie jako topnik zastosowano pastę Unifix, natomiast najniższą dla połączeń w których wykorzystano Fosol. Najwyższą wartość nośności uzyskano w przypadku połączeń klejowych wykonanych przy użyciu kompozycji E53/PAC/100:80, natomiast najniższą dla połączeń klejowych wykonanych przy pomocy kompozycji klejowej E5/Z1/100:12.

**Słowa kluczowe:** połączenia lutowane, połączenia klejowe, lutowanie miękkie, blacha miedziana, nośność

**Abstract:** In the research was the comparison selected aspects of the individual soldered and adhesive joints strength made of M1E z4copper sheet. In the case of soldered joints, the variable was the type of flux used, which was selected taking into account the properties of the adhered, while in the case of adhesive joints, the variable was the type of adhesive. The available fluxes include: fosol, Unifix 3 paste and rosin. Four adhesive compositions was prepared by using Epidian 5 and Epidian 53 epoxy resins as well and PAC and Z1 hardeners were used to make adhesive joints, in appropriate stoichiometric ratios. In both groups of joints, different types of joints were also used. In the case of soldering, the samples were butt-jointed, while the adhesive joints was overlapped. The prepared joints were subjected to strength tests, on the basis of which the load capacity of joints was determined. Obtained results of the research were also subjected to statistical analysis, thanks to which homogeneous groups were determined and it was possible to assess significant differences between particular methods of making assembly joints. Based on the obtained test results, it was noted that the highest load-bearing capacity was obtained for adhesive joints made using E53/PAC/100:80 compositions, while the lowest for adhesive joints made using E5/Z1/100:12 adhesive composition.

**Key words:** soldered joints, adhesive joints, soft soldering, sheet copper, capacity

### Wprowadzenie

Połączenia lutowane i klejowe są jednymi z rodzajów połączeń montażowych nierozłącznych, które występują w różnorodnych konstrukcjach [4]. Przynależą do grupy połączeń spajanych, w związku z czym mają pewne charakterystyczne właściwości. Jedną z zasadniczych zalet połączeń lutowanych i klejowych jest możliwość łączenia różnoimiennych materiałów. We współczesnej technice, mimo powstania i rozwoju wielu nowych technologii łączenia metali, lutowanie jest szeroko wykorzystywane, gdyż umożliwia rozwiązywanie najbardziej złożonych problemów materiałowo-konstrukcyjnych. Stosując tę metodę można łączyć elementy o różnym kształcie, wymiarach i właściwościach, wykonane z nowoczesnych materiałów, a więc metali, ceramiki, szkła, a także kompozytów [2, 8, 9, 10, 12]. Obecnie jednym z ważniejszych czynników decydujących o rozwoju tej technologii jest asortyment materiałów dodatkowych do lutowania. Dobór odpowiedniego lutu i topnika ma wpływ na wielkość zużycia tych

materiałów, pracochłonność i energochłonność procesu lutowania, a przede wszystkim na jakość i własności uzyskanych połączeń.

Klejenie stanowi cenne uzupełnienie innych metod łączenia materiałów konstrukcyjnych. Współcześnie technologia klejenia wykorzystywana jest w wielu gałęziach przemysłu: budownictwie, przemyśle samochodowym, przemyśle lotniczym, w budowie maszyn, produkcji opakowań oraz wielu innych [2, 9]. Łączenie metali za pomocą klejenia jest coraz częściej stosowane ze względu na dużą wytrzymałość połączenia, brak naprężeń w połączeniu oraz niskie koszty jednostkowe wykonania, wynikające głównie z ilości kleju użytego do wykonania pojedynczego połączenia. Zaletami połączeń klejowych są ponadto: zdolność tłumienia drgań, możliwość wykonania połączenia bez stosowania obrabiarek, a także drogich, specjalnych narzędzi i materiałów (choć koszty oprzyrządowania technologicznego mogą być w niektórych przypadkach wysokie), czy też brak zjawisk elektrochemicznych, występujących

zwykle podczas łączenia metali innymi metodami [3, 6].

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia łączenia blachy miedzianej za pomocą lutowania i klejenia. Zastosowano niektóre warunki i parametry wykonywania połączeń, jakie stosowane są w warunkach rzeczywistych. Celem pracy było przeprowadzenie badań doświadczalnych, na podstawie których dokonano analizy wybranych aspektów wytrzymałościowych w poszczególnych grupach wykonanych połączeń montażowych.

### Metodyka badań

Podczas badań eksperymentalnych wykonano połączenia lutowane i klejowe blachy miedzianej M1E z4 (w stanie umocnienia półtwardym). Wybrane właściwości mechaniczne badanej blachy miedzianej przedstawiono w tab. 1.

Materiał ten charakteryzuje się dużą przewodnością elektryczną i cieplną, a także plastycznością i odpornością na korozję. To właśnie dzięki temu jest bardzo często wykorzystywany w przemyśle. Miedziane pręty, blachy, druty, a także szyny doskonale sprawdzają się jako przewodniki prądu i części urządzeń elektrycznych [6].

Tabela 1. Wybrane właściwości mechaniczne blachy miedzianej M1E z4 [6]

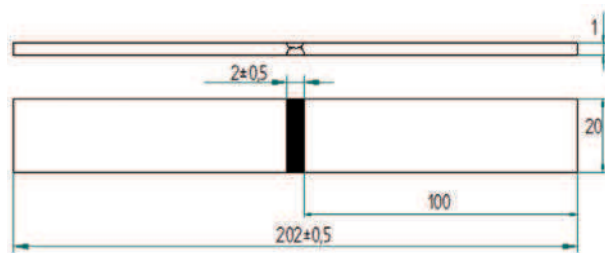
Table 1. Selected mechanical properties of M1E z4 copper sheet [6]

Właściwości	Wartość
$R_e$ [MPa]	24,5–39,3
$R_m$ [MPa]	211,8–235,4
A [%]	40–60
Twardość wg skali Mohsa	3 jednostki
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	8,87–8,91
Współczynnik wydłużenia cieplnego [1/K]	$16,5 \times 10^{-6}$

### Technologia połączeń lutowanych

Do badań wykorzystano połączenia lutowane doczołowe, których schemat przedstawiono na rys. 1.

Połączenia lutowane zostały wykonane metodą lutowania miękkiego, z wykorzystaniem lutownicy elektrycz-



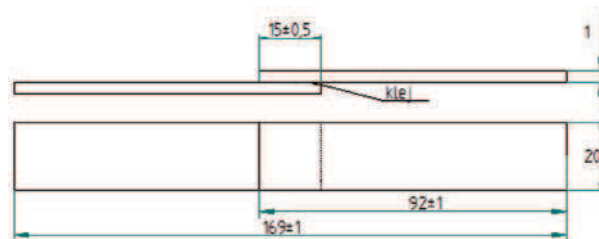
Rys. 1. Schemat połączenia lutowanego  
Fig. 1. Scheme of soldered joint

nej, której temperatura pracy wynosiła ok. 400°C. Wykorzystano 3 rodzaje topników: fosol, pastę Unifix 3 oraz kalafonię. Próbki zostały połączone obustronnie za pomocą lutu w postaci pręta, typu Cyna (LC60). Wykonane połączenia były utwardzane w temperaturze pokojowej, wynoszącej 21,5°C. Wykonano po 8 próbek dla każdego rodzaju topnika. Przed gruntowaniem powierzchni próbek przeznaczonych do łączenia, poddano je zabiegowi mechanicznej obróbki ścierniej z użyciem narzędzia nasypowego o gradacji P100.

Wykonane połączenia lutowane zostały poddane niszczącym badaniom wytrzymałościowym, zgodnie z normą DIN EN 1465 [1], dzięki którym w próbie rozciągania określono nośność.

### Technologia połączeń klejowych

W drugiej części badań wykonano połączenia klejowe jednozakładkowe, gdzie długość zakładki wynosiła  $l_z = 15$  mm. Schemat połączenia oraz jego wymiary przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat połączenia klejowego  
Fig. 2. Scheme of adhesive joint

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano cztery kompozycje klejowe, przygotowane z dwóch rodzajów żywic epoksydowych oraz dwóch rodzajów utwardzaczy, stosując odpowiednie zalecenia dotyczące właściwego stosunku stechiometrycznego określonej żywicy i utwardzacza. Ich zestawienie, a także ilość wykonanych próbek do każdego zestawienia przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Rodzaje kompozycji klejowych zastosowanych w badaniach  
Table 2. Types of adhesive compositions used in the research

Składniki: Żywica/ Utwardzacz	Stosunek stechiometryczny [%]	Oznaczenie kleju	Ilość wykonanych próbek
Epidian 5/PAC	100:80	E5/ PAC/100:80	6
Epidian 5/Z1	100:12	E5/ Z1/100:12	6
Epidian 53/PAC	100:80	E53/ PAC/100:80	6
Epidian 53/Z1	100:10	E53/ Z1/100:10	6

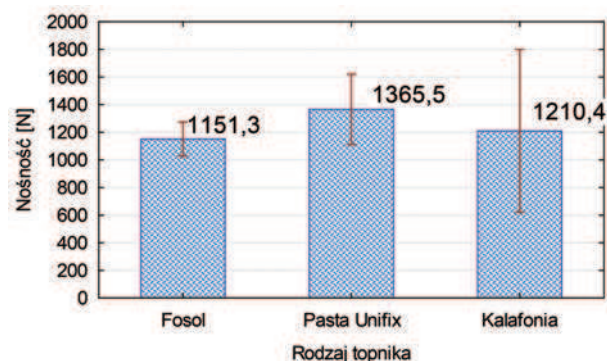
Przed wykonaniem procesu klejenia, powierzchnie próbek blach miedzianych zostały poddane obróbce mechanicznej papierem ściernym o ziarnistości P100, po czym zostały oczyszczone i odtłuszczone środkiem Loc-tite 7061. Przygotowane kompozycje klejowe nanoszone były ręcznie na jedną z łączonych powierzchni. Jednakową grubość spoiny klejowej uzyskano w procesie utwardzania stosując odpowiednie oprzyrządowanie. Badania zostały przeprowadzone w temperaturze 28°C i 29% wilgotności powietrza. Próbki były utwardzane w temperaturze otoczenia przez 8 dni, pod obciążeniem 2 kg. Po upływie tego czasu połączone próbki poddano badaniom wytrzymałościowym zgodnie z normą DIN EN 1465, przeprowadzając statyczną próbę ścinania i określając nośność poszczególnych połączeń.

### Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych określono nośność połączeń lutowanych oraz klejowych, uwzględniając zmienne czynniki technologiczne (rys. 3–4).

### Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń lutowanych

Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych połączeń lutowanych przedstawiono na rys. 3. Dzięki nim zaobserwowano, że najniższą wartość nośności wykazały połączenia lutowe wykonane z użyciem topnika Fosol – 1151,3 N, jednak w tym przypadku połączenia wykazały najlepszą powtarzalność. Największy rozrzut wyników uzyskano w połączeniach w których zastosowano kalafonię. Najwyższą wartość nośności odnotowano w przypadku połączeń wykonanych z użyciem pasty Unifix – 1365,5 N.



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń lutowanych  
Fig. 3. Results of strength tests of soldered joints

Jednak, aby możliwa była kompleksowa ocena i analiza porównawcza uzyskanych rezultatów, konieczne było przeprowadzenie analizy statystycznej uzyskanych wyników. W pierwszym etapie, przy wykorzystaniu testu normalności Shapiro-Wilka S-W, sprawdzono dopasowanie uzyskanych wyników badań empirycznych analizowanych zmiennych do rozkładu normalnego.

rozdzielonych pod względem rodzaju zastosowanego topnika, przy założonym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Wyniki testu normalności zestawione w tab. 3 wskazują, że rozkład uzyskanych wyników jest zgodny z rozkładem normalnym.

Tabela 3. Wyniki testu normalności dla połączeń lutowanych  
Table 3. Results of the normality test for soldered joints

Rodzaj połączenia – Rodzaj topnika	N	Statystyka Shapiro-Wilka W	Poziom prawdopodobieństwa p
Połączenia Lutowane – Fosol	8	0,915358	0,393342
Połączenia Lutowane – Pasta Unifix	8	0,960110	0,811151
Połączenia Lutowane – Kalafonia	8	0,887366	0,221140

Aby możliwe było określenie istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi grupami, przeprowadzono analizę ANOVA. Zastosowano test post-hoc – Tukeya dla różnych liczebności próbek w poszczególnych grupach, w celu określenia istotnych różnic. Wyniki tego testu przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4. Wyniki testu grup jednorodnych Tukeya dla różnych N  
Table 4. Tukey's homogeneous test results for different N

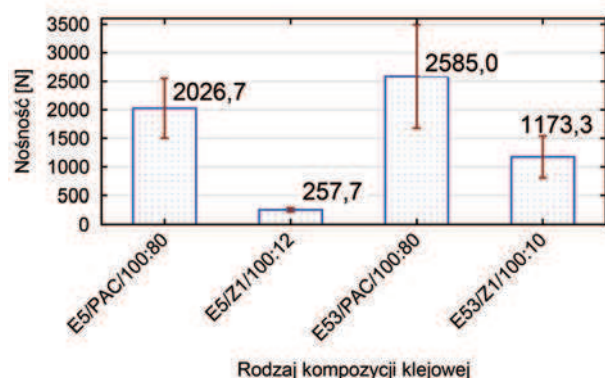
	Rodzaj połączenia	Wartość średnia uzyskanych wyników	Grupa jednorodna
			b
1	Połączenia Lutowane – Fosol	1 151,3 N	*
2	Połączenia Lutowane – Pasta Unifix	1 365,5 N	*
3	Połączenia Lutowane – Kalafonia	1 210,4 N	*

Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że w przypadku połączeń lutowanych, dla każdego rodzaju topnika, nie określono istotnych różnic przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ , a wszystkie grupy mieszczą się w jednej grupie jednorodnej (b). Oznacza to więc, że rodzaj stosowanego topnika nie wpływa istotnie na wytrzymałość wykonanych połączeń lutowanych.

### Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych

Otrzymane wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu wybranych kompozycji klejowych zestawiono na rys. 4. Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że najwyższą wartość nośności uzyskano dla połączeń klejowych wykonanych przy użyciu kompozycji

E53/PAC/100:80 – 2585 N, a jednocześnie w tym przypadku zaobserwowano największy rozrzut wyników, natomiast najniższą dla połączeń klejowych wykonanych przy pomocy kompozycji klejowej E5/Z1/100:12 – 257,7 N.



Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych  
Fig. 4. Results of strength tests of adhesive joints

Podobnie jak w przypadku wyników dotyczących połączeń lutowanych przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników. Sprawdzone normalność rozkładu dla każdej grupy próbek, rozróżnionej pod względem rodzaju zastosowanej kompozycji klejowej, przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyniki testu normalności zestawiono w tab. 5. Wyniki te wskazują, że rozkład uzyskanych wyników jest zgodny z rozkładem normalnym.

Tabela 5. Wyniki testu normalności dla połączeń klejowych  
Table 5. Results of the normality test for adhesive joints

Rodzaj połączenia – Rodzaj kompozycji klejowej	N	Statystyka Shapiro-Wilka W	Poziom prawdopodobieństwa p
Połączenia klejowe – E5/PAC/100:80	6	0,809759	0,071810
Połączenia klejowe – E5/Z1/100:12	6	0,937777	0,518511
Połączenia klejowe – E53/PAC/100:80	6	0,919523	0,501931
Połączenia klejowe – E53/Z1/100:10	6	0,826505	0,158871

Następnie w celu określenia istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi grupami, przeprowadzono analizę ANOVA. Zastosowano test post-hoc – Tukeya dla różnych liczebności próbek w poszczególnych grupach i określono grupy jednorodne, a wyniki tego testu przedstawiono w tab. 6.

Na podstawie uzyskanych wyników analiz statystycznych można zaobserwować, że połączenia klejowe, które wykazały najwyższą wartość nośności (E53/PAC/100:80), znajdują się w jednej grupie jednorodnej (c) z połączeniami klejowymi E5/PAC/100:80 oraz nie zaobserwowano

Tabela 6. Wyniki testu grup jednorodnych Tukeya dla różnych N  
Table 6. Test results of Tukey's homogeneous groups for different N

	Rodzaj połączenia	Wartość średnia uzyskanych wyników	Grupa jednorodna		
			a	b	c
1	Połączenia klejowe – E5/PAC/100:80	2 026,7 N		*	*
2	Połączenia klejowe – E5/Z1/100:12	257,7 N	*		
3	Połączenia klejowe – E53/PAC/100:80	2 585,0 N			*
4	Połączenia klejowe – E53/Z1/100:10	1 173,3 N		*	

pomiędzy nimi istotnych różnic. Najniższą wartość nośności uzyskano dla połączeń klejowych wykonanych klejem E5/Z1/100:12, które znajdują się w odrębnej grupie jednorodnej (a), przy czym wynik ten znacznie różni się od pozostałych. W przypadku dwóch grup połączeń klejowych – E53/PAC/100:80 oraz E53/Z1/100:10, nie określono istotnych różnic przy przyjętym poziomie istotności.

#### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań połączeń lutowanych można zaobserwować, że poprzez zastosowanie różnych topników, takich jak: Fosol, pasta Uni-fix 3 i kalafonia można stwierdzić, że na właściwości wytrzymałościowe połączeń lutowanych przygotowanych w wyżej wymienionych warunkach i temperaturze, nie ma wpływu rodzaj zastosowanego topnika. Minimalnie różniące się wyniki poszczególnych grup mieszczą się w jednej grupie jednorodnej.

W przypadku połączeń klejowych, w oparciu o uzyskane wyniki można postawić następujące wnioski:

1. W grupie połączeń klejowych najwyższą wartość nośności uzyskały połączenia wykonane z użyciem kleju E53/PAC/100:80.
2. Ze względu na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych można stwierdzić, że dużo korzystniejszym wyborem do łączenia elementów miedzianych jest wybór kleju zawierającego utwardzacz PAC, niezależnie od rodzaju zastosowanej żywicy. Dzięki zastosowaniu utwardzacza PAC możliwe jest uzyskanie spoiny elastycznej, co jest bardzo ważne w przypadku materiałów, jakim jest miedź. Powyższe sformułowanie zostało potwierdzone poprzez analizę statystyczną uzyskanych wyników badań, która wskazuje na brak istotnych różnic pomiędzy grupami połączeń klejowych E5/PAC/100:80, a E53/PAC/100:80.
3. Najniższą wartość nośności odnotowano w przypadku połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu kleju E5/Z1/100:12, a spoina klejowa charakteryzowała się znaczną sztywnością.



Podsumowując, należy stwierdzić, że w obu przypadkach wykonywanych połączeń ważne jest właściwe przygotowanie powierzchni, które jest jednym z podstawowych warunków prawidłowego wykonania połączenia, a dodatkowo w przypadku klejenia – wybór kleju zapewniającego lepsze właściwości wytrzymałościowe. Przedstawione informacje mogą mieć istotny wpływ na projektowanie technologii połączeń lutowanych i klejowych analizowanego materiału konstrukcyjnego. Można wnioskować, że zmiana sposobu przygotowania powierzchni w przypadku połączeń lutowanych, a w odniesieniu do połączeń klejowych wybór innego rodzaju kompozycji klejowych, pozwoliłaby uzyskać korzystniejsze wyniki.

## LITERATURA

- [1] DIN EN 1465: 2009 – Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
- [2] Godzimirski J., A. Komorek. 2008. „Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych”. *Przegląd Mechaniczny* (12): 40–44.
- [3] Godzimirski J. i in. 1997. „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [4] Guth K. et. al. 2010. “New assembly and interconnects beyond sintering methods”. *Proceedings of PCIM* (5): 232–237.
- [5] Kuczmaszewski J. 1995. „Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [6] Kurski K. 1967. „Miedź i jej stopy techniczne”. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.
- [7] Maciołka P. 2010. „Wykorzystanie nośności powierzchni do uzyskania charakterystyki styku pomiędzy przedmiotem i ustalaczem położenia”. *Inżynieria Maszyn* (15): 53–66.
- [8] Mirski Z. i in. 2009. „Lutowanie miękkie aluminium z miedzią”. *Przegląd Spawalnictwa* (11): 15–19.
- [9] Pocica A., A. Nowak. 2004. „Lutowanie miękkie aluminium z miedzią”. *Zeszyty Naukowe. Mechanika. Politechnika Opolska* (78): 279–282.
- [10] Rendler L. et. al. 2017. “Ultra-soft wires for direct soldering on finger grids of solar cells”. *Energy Procedia* (124): 478–483.
- [11] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [12] Rudawska A., J. Cisek, L. Semotiuk. 2012. „Wybrane aspekty wytrzymałości połączeń klejowych oraz lutowanych stosowanych w konstrukcjach lotniczych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (2): 61–66.
- [13] Siwek B. 2002. „Połączenia spawane, zgrzewane, lutowane i klejone”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

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

mgr inż. Izabela Miturska – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lubli, e-mail: i.miturska@pollub.pl

## Z PRASY ZAGRANICZNEJ

Tytuły artykułów zamieszczonych w miesięczniku naukowo-technicznym „**Sborka w maszynostrojenii i priborostro-enii**” (Wydawnictwo Maszynostrojenije, Moskwa, Rosja)

### Sborka nr 7/2017 (204)

1. Zapewnienie jakości łożysk tocznych z pomocą zastosowania technologii wielocyklowego obciążania
2. Monitorowanie wymagań dokładności uszczelniania rozłącznych hermetycznych połączeń w systemach bezpieczeństwa chłodzenia reaktora
3. Montaż urządzenia do oczyszczania powietrza
4. Model prognozowania fizyko-mechanicznych parametrów nanokompozycyjnych materiałów w warunkach kontaktu tribologicznego
5. Badanie mechanicznych charakterystyk warstwy wierzchniej części elektropomp umocnionych wygładzaniem diamentowym
6. Ocena nośności par tarciovych z twardym pokryciem smarowym w warunkach próżni w oparciu o termokorelacyjne zależności
7. Dobór smaru z uwzględnieniem współczynnika tarcia dla operacji ciągnięcia części z wysokowytrzymałej stali
8. Projektowanie regresyjnego modelu kontaktowego termicznego oporu w płaskich połączeniach walcowych zespołów
9. Uzasadnienie błędów względnego przemieszczenia osi połączonych części w zrobotyzowanym montażu
10. Wytrzymałość metalowo-kompozytowych zespołów w trakcie magnetyczno-impulsowego montażu.

### Sborka nr 8/2017 (205)

1. Uogólnione kryterium oceny kompletujących radiowych części do montażu selektora pełnofalowego SKB-301
2. Zastosowanie sprężonego gazu do napędu hydraulicznego narzędzia
3. Oryginalna technologia montażu regulowanych cylindrycznych połączeń klejowych
4. Polepszenie jakości i ekonomiczności w montażu lamp luminescencyjnych
5. Celowość wykorzystywania metalowo-ceramicznych klocków hamulcowych
6. Technologiczne metody zwiększania działania smarującego nanodispersyjnych magnetycznych olejów
7. Ocena jakości technologicznego smaru do przeciągania okrągłego pełnego profilu
8. Zastosowania mechaniki kwantowej. Attosekundowe procesy w mikro-, nano-, piko- i femtotrybologii
9. Zwiększenie niezawodności pędnej przekładni zębatej towarowej lokomotywy elektrycznej

### Sborka nr 9/2017 (206)

1. Doskonalenie procesu wykonywania nierozłącznych zespołów z różnorodnych materiałów
2. Dokładność zautomatyzowanej nieniszczącej kontroli porowatości materiałów
3. Prognozowanie eksploatacyjnych właściwości sprężystych tribologicznych kompozytów z mikrokapsułkami wypełnionymi ciekłym smarem
4. Aktywacja i dezaktywacja tarciami fizykochemicznych procesów w strefie tarciovego kontaktu
5. Wpływ stanu modyfikatora na tribologiczne i techniczne charakterystyki plastycznego smaru w różnych temperaturowo-siłowych warunkach tarcia
6. Kształtowanie warstwy przeniesionej przy suchym tarcu stopu Al.-Sn po stali
7. Przekształcanie drgań harmonicznych w stan uspokojony
8. Zastosowanie wzorników obliczeń przy projektowaniu mechanizmów struktury równoległej

## ABSTRACTS:

### 1. Research and design of a multi-fingered hand made of hyperelastic material

Author: Junhui Zhang, Xiufeng Zhang, Yang Li

The purpose of this study is to provide a novel multi-fingered hand made of hyperelastic material. This kind of hand has the advantage of less mechanical parts, simpler control system. It can greatly cut down the complexity and cost of the hands under conditions of ensuring enough flexibility of grasping.

Based on the principle of virtual work, the equations of pulling force and grasping force are derived. To get the max grasping force, the optimal structural dimensions of the hand are obtained by finite element simulations. Hand's grasping experiment is conducted.

The factors influencing grasping force and grasping stability are identified, and they are the length between short poles around the knuckles and the height of short poles. Experimental results show that the max strain of knuckles is less than the elastic limit of hyperelastic material, and the presented hand is practicable. The adaptive ability and grasping stability of the presented hand are demonstrated.

A novel multi-fingered hand made of hyperelastic material is presented in this paper. By designing the thickness of every section of a hyperelastic plate, the knuckle sections will bend and other sections of the plate will remain straight, and thus, the multi-fingered hand will grasp.

### 2. Adaptive robust sliding mode trajectory tracking control for 6 degree-of-freedom industrial assembly robot with disturbances

Authors: Li Pan, Guanjun Bao, Fang Xu, Libin Zhang

This paper aims to present an adaptive robust sliding mode tracking controller for a 6 degree-of-freedom industrial assembly robot with parametric uncertainties and external disturbances. The controller is used to achieve both stringent trajectory tracking, accurate parameter estimations and robustness against external disturbances.

The controller is designed based on the combination of sliding mode control, adaptive and robust controls and hence has good adaptation and robustness abilities to parametric variations and uncertainties. The unknown parameter estimates are updated online based

on a discontinuous projection adaptation law. The robotic dynamics is first formulated in both joint spaces and workspace of the robot's end-effector. Then, the design procedure of the adaptive robust sliding mode tracking controller and the parameter update law is detailed.

Comparative tests are also conducted to verify the effectiveness of the proposed controller, which show that the proposed controller achieves significantly better dynamic trajectory tracking performances as compared with conventional proportional derivative controller and sliding mode controller under the same conditions.

This is a new innovation for industrial assembly robot to improve assembly automation.

### 3. Self-classification of assembly database using evolutionary method

Authors: Remigiusz Romuald Iwańkiewicz, Michał Taraska

The purpose of the paper is to develop a method of automatic classification of the components of the assembly units. The method is crucial for developing an automatic ship assembly planning tools. The proposed method takes into account the assumptions specific for shipbuilding technology processes: high complexity of structures, difficult expert-based classification of components, fixed priority relations between connections resulting from geometrical constraints and demands of welding processes.

The set of ex post determined liaisons and assembly sequences constitutes the database of structures which have been made-up earlier. The components classification problem is solved using matrix coding of graphs. Information in such form is stored in the database. The minimization of number of cycles in the graph of classes sequence and minimization of diversity of classes within all constructions has been proposed as criteria of optimization. The genetic algorithm has been proposed as a solution method.

The proposed method solves the problem of components' classifications. It allows setting the pattern of priorities between classes of various connections. This gives a chance to determine the relationship constraints between the connections of new structures for which assembly sequences are not established.

#### **4. C2-continuous orientation trajectory planning for robot based on spline quaternion curve**

Authors: Xuejuan Niu, Tian Wang

To realize the smooth interpolation of orientation on robot end-effector, this paper aims to propose a novel algorithm based on the unit quaternion spline curve.

This algorithm combines the spherical linear quaternion interpolation and the cubic B-spline quaternion curve. With this method, a C2-continuous smooth trajectory of multiple teaching orientations is obtained. To achieve the visualization of quaternion curves on a unit sphere, a mapping algorithm between a unit quaternion and a point on the spherical surface is given based on the physical meaning of the unit quaternion.

Finally, the curvature analysis of a practical case shows that the orientation trajectory (OT) constructed by this algorithm satisfied the C2-continuity.

This OT satisfies the requirement of smooth interpolation among multiple orientations on robots in industrial applications.

#### **5. A semi-automatic approach to implement rapid non-immersive virtual maintenance simulation**

Authors: Jie Geng, Xu Peng, Ying Li, Chuan Lv, Zili Wang, Dong Zhou

Current virtual simulation platforms provide various tools to generate non-immersive simulation processes purposefully in different domains. The generated simulation processes are adopted for analysis, presentation, demonstration and verification. In the virtual maintenance domain, this intuitive and visual method has benefitted product maintainability design and improvement. Generating an ideal and reasonable non-immersive virtual maintenance simulation is always time-consuming because of the complicated human operations and logical relationships involved. This study aims to propose a semiautomatic approach to increase efficiency in non-immersive virtual maintenance simulation implementation.

The methodology analyzes the general catalogs of common maintenance tasks and explores the corresponding secondary development approaches of simulation tools that can achieve motion simulation in virtual environments, by focusing on the diversity, complexity and uncertainty in non-immersive virtual simulation process generation. Afterward, a single virtual human motion can be generated by controlling the parameters and indices of the simulation tools. Subsequently, all of the generated single motions are connected logically to simulate the entire maintenance process.

Instead of selecting various tools, such as that in a traditional method, the proposed methodology analyzes and integrates the necessary basic parameters considering the characteristics of virtual maintenance simulation for a target maintenance activity.

#### **6. Inclusive estimations of ball screw-based CNC feed drive system over positioning and pre-loading factor**

Authors: Kuldeep Verma, R.M. Belokar

This paper aims to investigate the performance and positioning accuracy of computer numerical controlled (CNC) feed drive system using a ball screw-based pre-loading impact factor.

Initially, axial displacement of support bearings has been computed in relation to the different preload values. Among the computed values, a basic rule equation has been developed for the calculation of elongation in the bearings. The value of displacements computed from the developed equation has been considered as a pre-loading value, and its behavior on the feed drive system has been analyzed.

The elongation of bearings impacts the positioning accuracy and repeatability of the feed drive system and of CNC machines. Next, an analytical model for the rigorous assessment of CNC feed drive system has been designed and developed. The positioning accuracy of CNC machine in relation with different pre-loading values has been analyzed.

The results obtained from these investigations enhance the positioning accuracy of CNC machining centers. The optimum pre-loading value has been analyzed among the available ranges, and it has been proposed that optimal results have been achieved at 5 per cent of dynamic load rating.

This paper proposes improved explorations toward the performance of the CNC machines by optimizing the positioning accuracy through pre-loading. Finally, analytical estimations have been carried out to prove the validity of the proposal.

#### **7. Ergonomic layout optimization of a smart assembly workbench**

Authors: Shi-qing Wu, Bin Shen, Yun-zhe Tang, Jia-hai Wang, Da-teng Zheng

The purpose of this paper is to study a method to optimize the arrangement of the devices on a smart assembly workbench, which help to reduce fatigue and improve efficiency for the worker.

The optimization priority is studied based on the users' decisions, a mathematical model of the layout optimization is established from ergonomic perspective and an improved algorithm is adopted to solve the built the mathematical model.

Ergonomic software Jack is chosen to simulate the four layout schemes obtained. Through comparative analysis of the simulation results, it is proven that the optimal solution can be obtained using the improved algorithm.

The mathematical model built on observation comfort, operation comfort and device accessibility, as well

as the improved algorithm in this paper, has some reference values for the layout design of smart assembly workbench.

#### **8. A series-parallel inventory-redundancy green allocation system using a max-min approach via the interior point method**

Authors: Amir Hossein Niknamfar, Seyed Armin Akhavan Niaki, Marziyeh Karimi

The purpose of this study is to develop a novel and practical series-parallel inventory-redundancy allocation system in a green supply chain including a single manufacturer and multiple retailers operating in several positions without any conflict of interests. The manufacturer first produces multi-product and then dispatches them to the retailers at different wholesale prices based on a common replenishment cycle policy. In contrast, the retailers sell the purchased products to customers at different retail prices. In this way, the manufacturer encounters a redundancy allocation problem (RAP), in which the solution subsequently enhances system production reliability. Furthermore, to emphasize on global warming and human health concerns, this paper pays attention both the tax cost of industrial greenhouse gas (GHG) emissions of all produced products and the limitation for total GHG emissions.

The manufacturer intends not only to maximize the total net profit but also to minimize the mean time to failure of his production system using a RAP. To achieve these objectives, the max-min approach associated with the solution method known as the interior point method is utilized to maximize the minimum (the worst) value of the objective functions. Finally, numerical experiments are presented to further demonstrate the applicability of the proposed methodology. Sensitivity analysis on the green supply chain approach is also performed to obtain more insight.

#### **9. Design and simulations of non-uniform velocity motion curves for a slider-crank servo press**

Authors: Juxin Qu

The purpose of this paper is to develop and test a new design approach for stamping process curves based on the main transmission structure of a slider-crank servo press.

A numerical simulation approach for the slider and crank motion curve shape is developed on the basis of the forward and inverse kinematics models. A general method of curve segment connection is analyzed and discussed. Examples and experiments are also given to verify the feasibility of this work.

By properly connecting the basic curve segments, such as the constant velocity and cycloid trajectory segments, the designed curve can be incorporated into the output motion. The basic curve segments can be

used as backups and stored in a curve repository. Different requirements of stamping process curves can be obtained by connecting the newly designed curve segments and selected existing curve segments. That the design approach has transferability to similar problems is encouraging.

This study provides a new method of designing curves for non-uniform velocity motion by connecting commonly used basic curve segments. It is characterized by simple operation and small calculating amount. Different curves can be obtained by connecting the newly designed segments and selected existing segments. Choosing simple curve segments freely can maintain minimum power dissipation in non-working intervals. The method can obtain minimum peak values of acceleration and jerk in the connection interval. Basic curve segments can also be used as backups and stored in a curve repository to improve the efficiency of design.

#### **10. Scheduling multiple servers to facilitate just-in-time part-supply in automobile assembly lines**

Authors: Tao Peng, Binghai Zhou

With regard to product variety and cost competition, just-in-time (JIT) part-supply has become a critical issue in automobile assembly lines (AALs). This paper aims to investigate a multiple server scheduling problem (MSSP) encountered in the JIT part-supply process of AALs. Parts are stored in boxes and allotted from the JIT-supermarket to consumptive stations with a multiple server system. The schedule is to dispatch and sequence material boxes on each server for minimizing line-side inventory levels.

A mixed integer linear programming (MILP) model is established to formulate the proposed MSSP to pave the way for CPLEX procedure. Considering the high complexity of MSSP, a hybrid ant colony optimization (HACO) approach is developed by integrating basic ant colony optimization (ACO) with local optimizers that comprise of a fast local search and a tailored breadth-first tree search method.

Both CPLEX and HACO approach are capable of solving small-scale instances to optimality within reasonable computation time. The proposed HACO has been well enhanced with the embedded fast local search and tailored breadth-first tree search, and it performs robustly in a statistically significant manner when applied to real-world scale instances.

No stock-outs constraints and weighted line-side inventory level are considered in this paper, and the MSSP is solved satisfactorily to facilitate an efficient JIT part-supply of the AAL. In terms of the algorithm design, a tree search-based local optimizer is embedded into ACO to combine the mechanisms of ACO and problem-specific optimization.

**11. General inverse solution of six-degrees-of-freedom serial robots based on the product of exponentials model**

Authors: Haixia Wang, Xiao Lu, Wei Cui, Zhiguo Zhang, Yuxia Li, Chunyang Sheng

Developing general closed-form solutions for six-degrees-of-freedom (DOF) serial robots is a significant challenge. This paper thus aims to present a general solution for six-DOF robots based on the product of exponentials model, which adapts to a class of robots satisfying the Pieper criterion with two parallel or intersecting axes among its first three axes.

The proposed solution can be represented as uniform expressions by using geometrical properties and a modified Paden–Kahan sub-problem, which mainly adopts the screw theory.

A simulation and experiments validated the correctness and effectiveness of the proposed method (general resolution for six-DOF robots based on the product of exponentials model).

The Rodrigues rotation formula is additionally used to turn the complex problem into a solvable trigonometric function and uniformly express six solutions using two formulas.

# NIE CZEKAJ DO OSTATNIEJ CHWILI!

# 10% rabatu na Prenumeratę 2019. Promocja tylko do końca września!

Cennik prenumeraty na 2019 r. (ceny brutto rocznej prenumeraty papierowej)

 miesięcznik 312,00 zł	 miesięcznik 300,00 zł	 dwumiesięcznik 210,00 zł	 miesięcznik 348,00 zł	 dwumiesięcznik 198,00 zł	 dziesięć wydań 180,00 zł
 miesięcznik 420,00 zł	 miesięcznik 348,00 zł	 miesięcznik 312,00 zł	 miesięcznik 378,00 zł	 miesięcznik 384,00 zł	 dwumiesięcznik 378,00 zł
 miesięcznik 300,00 zł	 miesięcznik 480,00 zł	 miesięcznik 372,00 zł	 miesięcznik 612,00 zł	 miesięcznik 312,00 zł	 miesięcznik 330,00 zł
 dwutygodnik 299,00 zł	 miesięcznik 330,00 zł	 miesięcznik 366,00 zł	 miesięcznik 330,00 zł	 miesięcznik 258,00 zł	 miesięcznik 366,00 zł
 dwumiesięcznik 240,00 zł	 miesięcznik 636,00 zł	 miesięcznik 330,00 zł	 miesięcznik 330,00 zł	 miesięcznik 384,00 zł	 miesięcznik 396,00 zł
 kwartalnik 100,00 zł					

Czasopisma dostępne tylko w prenumeracie w wariantach:

wersja papierowa (dolicza się roczną opłatę za dostarczenie czasopism),

wersja **PLUS** z dostępem do e-publikacji (bezpłatne dostarczenie czasopism),

wersja **ciągła PLUS** z dodatkowym rabatem **10%** (automatycznie odnawiająca się co roku, bezpłatne dostarczenie czasopism)



więcej informacji: 22 840 30 86,  
prenumerata@sigma-not.pl

70 lat  
WYDAWNICTWO SIGMA-NOT

# Urządzenia

# do montażu elementów złącznych dla budownictwa

- montaż wkrętów farmerskich
- montaż kołków rozporowych
- montaż gwoźdź z podkładką



**IMBiGS** – Oddział Anin

Pracownia Automatykacji i Technologii Montażu  
ul. Mrówcza 243, 04-697 Warszawa  
e-mail: [bz@imbigs.pl](mailto:bz@imbigs.pl), tel.: 22 815 83 15

Posiadamy  
wieloletnie doświadczenie  
w projektowaniu  
i budowie urządzeń

Realizujemy zamówienia  
zgodnie z wymaganiami  
naszych klientów