

fot. IMBiGS



URZĄD DOZORU
TECHNICZNEGO

99%

WYPADKÓW TO
EFEKT NIEWŁAŚCIWEJ
EKSPLOATACJI



BEZPIECZEŃSTWO
TWÓJ WYBÓR



Bezpieczeństwo przy konserwacji dźwigów

Dźwigi to największa grupa urządzeń do przewozu osób i towarów. Na rynku istnieje wiele rodzajów tych urządzeń. Konstrukcja i wyposażenie dźwigu zależą od różnych oczekiwań użytkowników pod względem parametrów technicznych, jakości, a także walorów estetycznych. Zasady bezpiecznej konserwacji pozostają jednak takie same.

Wypadki związane z konserwacją dźwigów wyraźnie wskazują na zagrożenia wynikające z lekceważenia zasad bezpiecznej pracy oraz z nieprzestrzegania instrukcji konserwacji. Podstawą zasad bezpieczeństwa jest zdrowy rozsądek i rzetelnie wykonywane czynności konserwacyjne.

Konserwacja dźwigów może być prowadzona jedynie przez osoby posiadające stosowne kwalifikacje do wykonywania tych czynności. Urząd Dozoru Technicznego sprawdza kwalifikacje osób w trybie egzaminacyjnym, zgodnie z ustawą z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorze technicznym i rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 18 lipca 2001 r. w sprawie trybu sprawdzania kwalifikacji wymaganych przy obsłudze i konserwacji urządzeń technicznych (Dz. U. Nr 79, poz. 849, z późn. zm.). Na podstawie przepisów odrębnych (prawo energetyczne) do konserwacji dźwigów elektrycznych wymagane są odpowiednie świadectwa kwalifikacyjne. Osoby z takimi kwalifikacjami posiadają wiedzę w zakresie bezpieczeństwa konserwacji dźwigów.

W celu ograniczenia liczby wypadków i zwiększenia świadomości zagrożeń związanych z niewłaściwą eksploatacją urządzeń transportu bliskiego eksperci Urzędu Dozoru Technicznego opracowali materiały szkoleniowo-edukacyjne w zakresie bezpiecznej konserwacji i naprawy dźwigów.

Obejrzyj film! Przeczytaj broszurę! Powieś plakat!



Zamów bezpłatny pakiet szkoleniowy
przygotowany przez ekspertów UDT:



www.udt.gov.pl



Urząd Dozoru Technicznego

eksploatacja@udt.gov.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY:

Redaktor Naczelny – prof. dr hab. inż. Jerzy Łunarski
Z-ca Redaktora Naczelnego – dr inż. Martyna Jachimowicz
tel. 663 311 966

Sekretarz Redakcji – mgr Izabella Gosiewska
tel. 663 311 933

Redaktorzy tematyczni:

Dr inż. Rafał Kluz (technologia, automatyzacja)
Dr inż. Katarzyna Antosz (niezawodność, eksploatacja)
Dr inż. Mirosław Chłosta (inżynieria, produkcja)

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA:

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

WYDAWCA:



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

Adameczek A., Godzimirski J.: Optymalizacja wytrzymałości połączeń klejowo-nitowych	7
Magiera M.: Monolityczna metoda harmonogramowania montażu wielowariantowych produktów w hybrydowych systemach przepływowych	13
Stamirowski J.: Standard STEP w procesach integracji i rozwoju komputerowych systemów inżynierskich. Część I: Charakterystyka standardu	19
Kuczmaszewski J., Zaleski K., Matuszak J., Pałka T., Mądry J.: Badania porównawcze dokładności przedmiotów ze stali 15-5PH oraz 4330 wykonanych frezowaniem	24
Goriełowa A., Kristal M.G.: Zwiększenie dokładności obróbki otworów tulei cylindrowych na podstawie modelowania procesów generowania błędów	28
Peta K., Grochalski K., Wiśniewski M., Żurek J.: Wpływ rozkładu temperatury i odkształceń lutowanych połączeń montażowych na trwałość chłodnic samochodowych	33
Kowalski T., Dubiel G.: Modernizacja tokarki TUG1200 i uwarunkowania montażowe jej nowych elementów konstrukcyjnych	37
Cieślak R., Wysocki I., Piguła A.: Projekt stołu montażowego do rozdzielni napięcia	42
Bakoń A., Barylski A.: Metody lutowania elementów w narzędziach.	47
Rudawska A., Kutek K., Miturska I., Semotiuk L.: Badania skuteczności klejenia i spawania stali konstrukcyjnej S235JR.	52
Kluz R., Kubit A., Wydrzyński D.: Zgrzewanie punktowe blach ze stopu aluminium 7075-T6.	56
Krawczuk A., Domińczuk J.: Analiza właściwości energetycznych kompozycji klejowych dedykowanych do połączeń klejowo-zgrzewanych	61
Z prasy zagranicznej	66
Nowości, informacje	67

Kwartalnik notowany na liście czasopism punktowanych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego – 7 pkt.

Adameczek A., Godzimirski J.: Strength optimization of adhesive-rivet joints	7	Адамечек А., Годзимирски Я.: Оптимизация соединений клеево-заклепочных	7
Magiera M.: A monolithic method of scheduling for assembly of multi-option products in hybrid flow shop systems	13	Магера М.: Монолитный метод составления графиков сборки многоассортиментных изделий в гибридных проточных системах	13
Stamirowski J.: Standard STEP process integration and development of computer systems engineering part I – standard features	19	Стамировски Е.: Стандарт STEP в процессах интегрирования и развития компьютерных инженерских систем	19
Kuczmaszewski J., Zaleski K., Matuszak J., Pałka T., Mądry J.: Comparison of the accuracy of 15-5PH and 4330 steel parts produced by milling	24	Кучмашевски Ю., Залески К., Матушак Е., Палка Т.: Сравнительные исследования точности деталей из сталей 15-5PH и 4330 изготовленных фрезировкой	24
Gorielowa A.JU., Kristal M.G.: Increasing the precision of the hydrocylinder deep hole's machining based on simulations of the errors formation process	28	Горелова А.Ю., Кристаль М.Г.: Повышение точности обработки отверстий гильз гидроцилиндров на основе моделирования процесса образования погрешностей	28
Peta K., Grochalski K., Wiśniewski M., Żurek J.: Impact of temperature and stresses distribution of brazed joints on durability of automotive radiators	33	Пета К., Грохальски К., Висневски М., Журек Я.: Влияние распределения температуры и деформации паянных сборочных соединений на долговечность автомобильных обменников тепла	33
Kowalski T., Dubiel G.: TUG1200 cnc lathe rebuilding. Setup of the new components in the machine	37	Ковальски Т., Дубель Г.: Модернизация токарного станка TUG1200 и особенности сборки новых конструкционных элементов	37
Cieślak R., Wysocki I., Piguła A.: A project of an assembly table for an electric switchboards	42	Цесьляк Р., Высоцки И., Пигула А.: Проект сборочного стола для распределения тока	42
Bakoń A., Barylski A.: Brazing methods for connecting diamonds in tools	47	Баконь А., Барыльски А.: Методы пайки алмазов в инструментах	47
Rudawska A., Kutek K., Miturska I., Semotiuk L.: Testing of effectiveness of bonding and welding of structural steel S235JR	52	Рудауска А., Кутек К., Митурска И., Семотюк Л.: Исследование эффективного склеивания и сварки конструкционной стали S235JR	52
Kluz R., Kubit A., Wydrzyński D.: Spot welding metal sheets of aluminum alloy 7075-T6	56	Клюз Р., Кубит А., Выджински Д.: Точечная сварка жестей из алюминеого сплава 7075-T6	56
Krawczuk A., Domińczuk J.: The analysis of the surface energy properties of adhesive compositions dedicated to the weld-bonded joints	61	Кравчук А., Доминьчук Е.: Анализ энергетических свойств клеевых композиции предназначенных для соединений клеево-точносварочных	61

Wskazówki dotyczące przygotowania artykułów

- Artykuły przeznaczone do opublikowania w kwartalniku „Technologia i Automatyizacja 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 Automatyizacja 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 Automatyizacja Montażu” w 2017 r.

Kwartalnik „Technologia i Automatyizacja 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).

Cena prenumeraty rocznej wynosi: 80 zł (w tym 23% VAT).

Rabaty:

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

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

Prenumeratę można zamówić:

- **telefonicznie:** 22 840 30 86, 22 840 35 89
- **faksem:** 22 891 13 74
- **e-mailem:** prenumerata@sigma-not.pl
- **on-line:** 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 Z KONFERENCJĄ NAUKOWO-TECHNICZNĄ „TECHNIKA I TECHNOLOGIA MONTAŻU MASZYN”

Jerzy ŁUNARSKI

Początki konferencji ściśle wiążą się z początkami powstania i rozwoju Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Podstaw Technologii i Konstrukcji Maszyn TEKOMA Warszawa w 1972 r., który miał służyć jako centrum analityczno-doświadczalne, wspomagające decyzje planistyczne ówczesnego Ministerstwa Przemysłu. Był on systematycznie rozbudowywany, zajmując się zróżnicowaną problematyką technologiczno-rozwojową (oprogramowanie maszyn, automatyzacja prac inżynierskich, technologia spiekania, upowszechnianie innowacji, techniki montażu i in.)

W szczytowym okresie rozwoju w latach 1978–1979 oprócz bazy centralnej w Aninie, Warszawa OBR TEKOMA miał filie w Kielcach (środky montażu), Poznaniu (technika oprogramowań) i Legionowie (zaplecze produkcyjne), zatrudniając blisko 500 osób. Kryzys lat 80. spowodował systematyczną redukcję zakresów działalności i poszukiwanie kierunku specjalizacji umożliwiającej dalsze funkcjonowanie. Szereg zleceń przemysłowych na wykonawstwo specjalistycznych urządzeń montażowych spowodował zainteresowanie tą techniką wytwarzania. Wynikiem tego było przeprowadzenie w 1986 r. obszernych badań technologiczno-kosztowych 153 wyrobów maszynowych w kilkudziesięciu przedsiębiorstwach, które wykazały, że średni udział pracochłonności montażu w ogólnej pracochłonności wyrobów wyniósł 35% (obróbka skrawaniem 34%, odlewanie 5%, przeróbka plastyczna 8,5% i inne techniki 17,5%), zaś średni koszt stanowisk montażowych był 6,5 razy mniejszy jak średni koszt stanowisk w innych technikach wytwarzania.

Wynikiem powyższego były decyzje preferujące zaangażowania w dziedziny technik montażu i likwidujące inne kierunki działania. Szczególne trudności pojawiły się w okresie transformacji gospodarki i rozwoju rynkowych współzależności w latach 1990–1996. Wraz ze specjalizacją montażową ograniczono zatrudnienie i starano się uzyskać status Instytutu Badawczego w zakresie technik i technologii montażu. W tym celu nawiązano ściślejszą współpracę m.in. z Politechniką Warszawską, Rzeszowską oraz starano się o dokładniejsze rozpoznanie stanu wiedzy i potrzeb z zakresu technik i technologii montażu. Wynikiem tego była organizacja szeregu imprez naukowo-technicznych, takich jak:

- Krajowa Konferencja „Technika i Technologia Montażu Maszyn” w dniach 28–29.05.1992 r. w OBR TEKOMA Warszawa, na której zaprezentowano 23 referaty (w tym 9 prezentowanych przez gości zagranicznych

- z Ukrainy i Białorusi), gdzie uczestniczyły 32 osoby, zaś materiały wydano jako Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej nr 97 seria Mechanika z. 33. Uczestnicy konferencji wnioskowali o utworzenie specjalistycznego czasopisma z zakresu technik montażu, częstsze organizowanie podobnych spotkań oraz nawiązanie dostępnej współpracy międzynarodowej. Zasugerowano również szereg ogólnych problemów, wskazanych do omówienia w szerszych zespołach specjalistów. Realizując te wnioski OBR TEKOMA rozpoczął wydawanie kwartalnika naukowo-technicznego *Technologia i Automatyzacja Montażu* (od sierpnia 1993 r.) oraz zorganizował w latach 1993–1996, we współpracy z innymi jednostkami następujące imprezy naukowo-techniczne:
- Międzynarodowe Sympozjum Naukowo-Techniczne „Perspektywy i kierunki rozwoju technik montażu” (29–30.09.1993 r. w Warszawie z udziałem specjalistów ze Słowacji, Rosji, Ukrainy i Białorusi, zaś ważniejsze materiały z tego spotkania zamieszczono w pierwszym numerze nowo utworzonego kwartalnika *Technologia i Automatyzacja Montażu (TiAM)*,
 - Krajowe Seminarium Naukowo-Techniczne „Projektowanie wyrobów ukierunkowane na montaż” (zorganizowane wspólnie z Politechniką Poznańską 15.09.1993 r. w Poznaniu),
 - Ogólnokrajowe Seminarium Naukowe „Problemy technologii i automatyzacji montażu” (2–3.12.1993 r. w Warszawie),
 - Ogólnokrajowe Seminarium Naukowe „Układy automatyzacji w systemach montażowych” (29.03.1994 r. w Warszawie),
 - Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Wysokowytrzymałe połączenia klejowe w budowie maszyn” (21–23.06.1994 r. w Warszawie),
 - Krajowe Sympozjum Naukowo-Techniczne „Połączenia rozłączne w budowie maszyn” (18–19.05.1995 r. w Warszawie),
 - Międzynarodowe Sympozjum Naukowo-Techniczne „Modułowe technologie i konstrukcje w montażu” (24–26.01.1996 r. w Boguchwale k. Rzeszowa),
 - Międzynarodowa Konferencja naukowo-techniczna „Połączenia nierozłączne w montażu wyrobów” (4–5.12.1996 r. w Warszawie).

Realizując wnioski i postulaty powyższych spotkań OBR TEKOMA wspólnie z innymi instytucjami rozpoczął

organizowanie trzech cyklicznych imprez naukowych z przybliżonym 3-letnim cyklem spotkań, tzn.:

- Technika i Technologia Montażu Maszyn (TiTMM, od 1992 r.),
- Modułowe Technologie i Konstrukcje w Budowie Maszyn (MTKwBM od 1995 r.),
- Połączenia Montażowe – Technologia i Konstrukcja (PM, od 2007 r. chociaż jako sygnał można traktować wcześniejsze imprezy dotyczące połączeń rozłącznych i nierozłącznych w 1995 i 1996 r.).

Kolejne cykliczne konferencje „Technika i Technologia Montażu Maszyn” odbywały się w następujących terminach:

- II Konferencja Naukowo-Techniczna, z udziałem zagranicznych gości „Technika i Technologia Montażu Maszyn” odbyła się w dniach 15–17.11.1994 r. w OBR TEKOMA Warszawa. Przedstawiono na niej 50 referatów, z czego 22 zamieszczono w *TiAM* nr 4/94, zaś resztę (autorów z Rosji, Ukrainy, Słowacji) w Zeszytach Naukowym Politechniki Rzeszowskiej nr 97, seria *Mechanika* z. 33,
- III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-97” odbyła się w dniach 6–8.10.1997 r. w Jaworze n. Soliną, na której przedstawiono 65 referatów, z czego 13 zamieszczono w *TiAM* nr 3/97, 22 w *TiAM* nr 4/97, 9 w *TiAM* nr 1/98, zaś 21 w Wydawnictwie Książkowym Politechniki Rzeszowskiej,
- IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-2001” odbyła się w dniach 22–25.05.2001 r. w Bystrem k. Baligrodu, na której przedstawiono 74 referaty, z czego 22 w *TiAM* nr 2/01, 24 w dodatku do *TiAM* nr 2/01, a 27 w ZN PRz s. *Mechanika*,
- V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-2004” odbyła się w dniach 12–15.10.2004 r. w Cedzynie k. Kielc, na której przedstawiono 73 referaty z czego 29 w *TiAM* nr 3–4/04, a 44 w Wydawnictwie Książkowym Politechniki Rzeszowskiej,
- VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-2008” odbyła się w dniach 28–30.05.2008 r. w Kalnicy k. Cisnej, na której przedstawiono 66 referatów z czego 16 w *TiAM* nr 2/08, 8 w *Przeglądzie Mechanicznym* (różne numery), a 42 w ZN PRz seria *Mechanika*,
- VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-2011” odbyła się w dniach 24–27.05.2011 r. w Cisnej/Bieszczady, na której przedstawiono 41 referatów z czego 11 w *TiAM* nr 2/11, a 30 w ZN PRz 279, seria *Mechanika* z. 83,
- VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-2014” odbyła się w dniach 27–30.2014 r. w Berezce k. Hoczewa, na której przedstawiono 46 referatów z czego 12 w *TiAM* nr 2/14, a 34 w ZN PRz s. *Mechanika*,
- IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „TiTMM-2017” odbywa się w Czarnej k. Ustrzyk Górnych zaś przyjęte referaty zostaną opublikowane w kolejnych numerach *TiAM*, *Przeglądzie Mechanicznym* i ewentualnie ZN PRz.

Zasadnicza tematyka tych konferencji obejmowała w przybliżeniu następujące zagadnienia:

- problemy teoretyczne i praktyczne projektowania i wytwarzania wyrobów maszynowych oraz wyposażenia i oprzyrządowania montażowego,
- problemy teoretyczne związane z modelowaniem wyrobów i systemów montażowych oraz środki informatyczne do wykorzystania tych wyników w praktycznych działaniach,
- problemy elastycznej automatyzacji, mechanizacji i modularyzacji w kreowaniu wyrobów i systemów montażowych,
- problemy technologiczności, ekonomiczności, produktywności i bezpieczeństwa w funkcjonowaniu wyrobów i systemów montażowych,
- problemy innowacyjnego rozwoju wyrobów, technologii i systemów montażowych, wraz z możliwymi perspektywami ich rozwoju i in.

Początkowe działania OBR TEKOMA rozwijające specjalizację z zakresu technik montażu były aktywnie wspierane m.in. przez: prof. Jana Kaczmarka, prof. Wiesława Szenajcha, prof. Władysława Rutkowskiego, prof. Seweryna Orzełowskiego, prof. Wiesława Niewczasa i in. Znaczny wkład w rozwój innowacyjnych rozwiązań urządzeń i systemów montażowych wnieśli utalentowani projektanci OBR TEKOMY m.in.: Jerzy Lenczewski, Maciej Łabęda, Aleksander Żurawski, Wiesław Dybała i in. Ich prace były wspomagane działaniami menedżerskimi m.in. przez: Jan Łajkowski, Ryszard Świerkowski, Włodzimierz Rubiński i in.

Uczestnikami poszczególnych konferencji byli wybitni specjaliści z zakresu technologii i montażu z kraju i państw sąsiadujących (Rosji, Ukrainy, Słowacji, Białorusi). Można tu wymienić m.in. prof. L. Wołczkiewicza, z UT im. N.E. Baumana, prof. A. Gusiewa i W. Timiriaziewa z UT STANKIN, prof. M.B. Bazrowa z IM RAN, prof. O.W. Komarow z MAI Moskwa, prof. J. Matkin z UT Tuła, prof. A. Susłow z UT Brańsk, prof. M. Krystal z UT Wołgograd, prof. W. Kopp i G. Taranienko z UT Sewastopol, prof. A. Zenkin z APL Kijów, dr W. Matwijkenko z UKRNIIAT Kijów, prof. M. Kovacz i M. Hajduk z UT Koszyce, prof. W. Szabajkowicz z Politechniki Lwowskiej, i in.

Do specjalistów krajowych aktywnie wspierających kwartalnik *TiAM* oraz imprezy z zakresu montażu należą m.in.: prof. Jan Godzimirski z WAT, prof. Jan Żurek z PP, prof. Franciszek Siemieniako z PB, prof. Józef Kuczmaszewski z PL, prof. Krzysztof Tubielewicz z PCz, prof. Wiesław Szenajch z PW, prof. Michał Styp-Rekowski z UP-T, prof. Jerzy Gawlik z PK, prof. Piotr Łebkowski z AGH Kraków, prof. Adam Barylski z PG, prof. Jerzy Stamirowski z PŚw, prof. Władysław Zielecki z PRz oraz wielu specjalistów z wymienionych i innych ośrodków naukowych, np.: Politechnika Łódzka, Uniwersytet Zielonogórski, Uniwersytet Zachodniopomorski, ITE Radom, IE Warszawa, CBKO Pruszków, IOS (aktualnie IZTW) Kraków, OBK Koprotech Warszawa, WSzO w Poznaniu i Dęblinie, i in.

Starania OBR TEKOMA o uzyskanie statusu Instytutu Badawczego nie udało się spełnić (na początku 2000 r. pracowało tam ok. 80 osób), gdyż przeważała odgórna koncepcja konsolidacji małych jednostek w wyniku czego w 2007 r. OBR TEKOMA Warszawa i OBK Koprotech Warszawa zostały włączone w struktury Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego (IMBIGS) Warszawa. Od tego czasu *TiAM* zyskał nową szatę graficzną (od *TiAM* nr 4/07 do *TiAM* nr 4/14) zaś od nr 1/15 *TiAM* wydawany jest w formie elektronicznej, zaś artykuły w ocenie MNiSW mają 7 pkt.

Konferencje TiTMM od 2008 r. organizowane są wspólnie przez IMBIGS Warszawa oraz Politechnikę Rzeszowską i aktywnie wspierane przez te instytucje. Celem kolejnych konferencji TiTMM jest popularyzowanie nowej wiedzy i osiągnięć z zakresu technik i technologii montażu maszyn, sprzyjanie rozwojowi nauki i kadr z tego zakresu, stwarzanie warunków owocnej współpracy między specjalistami i ośrodkami zajmującymi się problematyką montażową i pośrednio tworzenie warunków sprzyjających innowacyjnym postępom w produkcji montażowej.

W redagowaniu kwartalnika *TiAM* szczególnie znaczącą pomoc udzielali przewodniczący Komitetów Programowych prof. W. Szenajch i prof. J. Żurek oraz członkowie redakcji m.in.: T. Łukaszewicz, W. Rubiński, M. Barańska, K. Rychlik, D. Stadnicka, M. Korzyński, K. Antosz, R. Kluz, M. Chłosta i in.

Trudno wymienić duże grono dotychczasowych Autorów naukowych publikacji w *TiAM* i organizowanych konferencjach z patronatem *TiAM*. Poniżej podano nazwy macierzystych jednostek naukowych i produkcyjnych z których rekrutowali się Autorzy artykułów. Są to: Politechniki – Warszawska, Poznańska, Lubelska, Rzeszowska, Częstochowska, Wrocławska, Krakowska, Świętokrzyska, Śląska, Białostocka, Opolska, Radomska, Gdańska, Łódzka, Turyńska, Uniwersytety – Zielonogórski, Zachodniopomorski Techniczno-Przyrodniczy, Warmińsko-Mazurski Przyrodniczy, AGH Kraków, WAT Warszawa, ITE Radom, CBKO Pruszków, IOS (obecnie ZTW) Kraków, IMBIGS Warszawa, PIAP Warszawa, OBR TEKOMA, CMG Komag, WSzO Poznań i Dęblin, IE Warszawa, IS Gliwice, Koncern MAHLE Krotoszyn i Stuttgart, ZE Zelmer, WSK PZL Rzeszów, PWSzZ w Koninie i Legnicy, CT DELPHI Kraków, OBR SiN Toruń i in.

Jeśli chodzi o ośrodki naukowo-badawcze zagraniczne, z których rekrutowali się Autorzy *TiAM* oraz konferencji TiTMM to były to następujące:

- z Rosji: Uniwersytet Techniczny – STANKIN Moskwa, Budowy Maszyn (MAMI) Moskwa, im. N.E. Baumana Moskwa, Górniczy Moskwa, z Bratska, Samary, Tuły, Briańska, Irkucka, Białogradu, Wołgogradu, Komсомоlska n/Amurem, Dubnej (Przyrody, Społeczeństwa i Człowieka), Instytuty – Lotniczy (MAI) Moskwa, Budowy Maszyn (CNITMASZ) Moskwa, Maszynowy RAN Moskwa, Naukowo-Badawczy Maszyn (ENIMS) Moskwa,
- z Ukrainy: Uniwersytet Techniczny – Politechnika Kijowska, Politechnika Lwowska, Politechnika Doniecka, UT w Łucku, Chmielnicku, Tarnopolu, Sewastopolu, Symferopolu (Krymski Instytut Inżynierjno-Pedagogiczny), Technologii i Projektowania Kijów (wcześniej Akademia Przemysłu Lekkiego), Instytuty – Techniki Lotniczej (UKRNIIAT) w Kijowie, Inżynierjno-Techniczny w Żytomierzu, Technologii Maszyn Charków, Przemysłowy w Łucku, Lwowska Fabryka Autobusów,
- z Białorusi: Uniwersytet Połocki w Nowopołocku, Instytut Standaryzacji i Certyfikacji Mińsk, OBR Awtopromsborka Mińsk, Białorusko-Rosyjski Uniwersytet w Mogilewie, Zakład PROSZ-REMONT Mińsk,
- ze Słowacji: UT Koszyce, Ośrodek Badawczy Mechanizacji i Automatyzacji (VUMA) Nowe Mesto, Ośrodek Badawczy VUKOV Preszow
- z Kazachstanu: UT im. K.I. Satpajewa w Ałmaty.

Kryzys ekonomiczny po 2008 r. oraz zmieniona sytuacja polityczna w Europie Środkowo-Wschodniej spowodowały, że udział gości zagranicznych w organizowanych imprezach znacznie obecnie zmalał.

W imieniu organizatorów Konferencji i Rady Naukowo-Programowej *TiAM* oraz Redakcji pragnę złożyć podziękowania wszystkim dotychczasowym i przyszłym Autorom i uczestnikom konferencji TiTMM za ich twórczy wkład w rozwój nauk i praktyk przemysłowych sprzyjających doskonaleniu wyrobów maszynowych i systemów technologicznych ich wytwarzania i montażu. Intencją organizatorów jest nie tylko wspomaganie technik montażu lecz również promowanie uroczych miejsc i tras turystycznych w Bieszczadach, regionu o unikalnych właściwościach wypoczynkowych, rekreacyjnych i zdrowotnych.

OPTIMALIZACJA WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ KLEJOWO-NITOWYCH

Strength optimization of adhesive-rivet joints

Adrianna ADAMECZEK, Jan GODZIMIRSKI

Streszczenie: Połączenia nitowe dominują w budowie metalowych struktur lotniczych. Klejenie wykorzystywane jest w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych w celu zwiększenia trwałości zmęczeniowej połączeń nitowych lub ich uszczelnienia. Przeprowadzono badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne w celu sprawdzenia w jakim stopniu rozmieszczenie nitów w hybrydowym połączeniu klejowo-nitowym wpływa na wytrzymałość doraźną i trwałość zmęczeniową takich połączeń. Badania wykazały większą trwałość zmęczeniową (niemal pięciokrotną) połączeń hybrydowych z nitami zbliżonymi do krawędzi połączenia w stosunku do próbek hybrydowych, w których nity rozmieszczone były zgodnie z zasadami wykonywania połączeń nitowych. Przeprowadzone badania wskazują na potrzebę takiego rozmieszczenia nitów w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych, aby występowało jednoczesne niszczenie obu połączeń.

Słowa kluczowe: połączenia klejowo-nitowe, wytrzymałość, trwałość zmęczeniowa, obliczenia numeryczne

Abstract: The riveted bonds are mainly used to join aircraft parts. Adhesives are used in hybrid rivet-adhesive joints to increase fatigue life or to seal the bonds. The researches were done to check what rivets layout determine strength and fatigue life of hybrid joints. Experimental tests and numerical calculations were made. The researches proved higher fatigue life (about five times) of hybrid joints with rivets situated close of specimen edges – closer than in typical rivet joints. The rivets should be so situated in hybrid joints to obtain failure both adhesive layer and rivets at the same time.

Key words: adhesive-rivet joints, strength, fatigue life, numerical calculation

Wprowadzenie

W budowie płatowców współczesnych statków powietrznych stosowane są przede wszystkim połączenia: nitowe, spawane i klejowe. Połączenia nitowe dominują przy łączeniu struktur wytwarzanych z wysokowytrzymałych stopów aluminium (durali), które są stopami praktycznie niespawalnymi. Spawanie wykorzystywane jest przy wytwarzaniu stalowych elementów podwozia, elementów instalacji hydraulicznych i pneumatycznych oraz wytwarzaniu części blaszanych ze spawalnych stopów aluminium. Klejenie wykorzystywane jest przy wytwarzaniu struktur przekładkowych oraz w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych, głównie w celu zwiększania trwałości zmęczeniowej połączeń nitowych lub ich uszczelnienia [4]. Z publikacji dotyczących badań połączeń klejowo-mechanicznych [2, 3, 4] wynika, że nie zawsze spoina wzmacnia połączenie mechaniczne, co można tłumaczyć sekwencyjnym niszczeniem połączenia hybrydowego – wcześniejszym niszczeniem spoiny klejowej.

Celem prowadzonych badań było sprawdzenie w jakim stopniu rozmieszczenie nitów w hybrydowym połączeniu klejowo-nitowym wpływa na wytrzymałość doraźną i trwałość zmęczeniową takich połączeń.

Badania wytrzymałościowe

Trwałość doraźna

Badania polegały na zbadaniu wytrzymałości połączeń jednozakładowych przez doświadczalny pomiar wytrzymałości wytworzonych serii próbek wykonanych ze

stopu aluminium AW 2024T3, połączonych za pomocą klejenia, nitowania oraz klejenia i nitowania. Łączonymi elementami próbek były prostopadłościennymi wykroje z blachy o grubości 2 mm i wymiarach 25×110 mm lub 20×75 mm. Nity stosowane w badaniach były nitami zwykłymi, z łbem trapezowym o średnicy trzonu 3,5 mm i długości 8 mm, których wytrzymałość na ścinanie, określona w trakcie badań wytrzymałościowych, wynosiła ok. $R_t = 300$ MPa. Do klejenia stosowano klej Epidian57/Z1, utwardzany dwustopniowo – dobowo w temperaturze ok. 18°C i 5 godz. w temperaturze 80°C. Jedną partię próbek sklejono tworzywem adhezyjnym o małej sztywności – uszczelniaczem Raychem. Powierzchnie blach przygotowywano do klejenia metodą piaskowania i przemywania benzyną ekstrakcyjną. Wypływki kleju usuwano za pomocą brzeszczotu do ciecienia metali i płótna ściernego. Długość zakładki we wszystkich połączeniach była podobna ok. 24,5 mm, a wynikała z zasad rozmieszczania nitów (rys. 1).

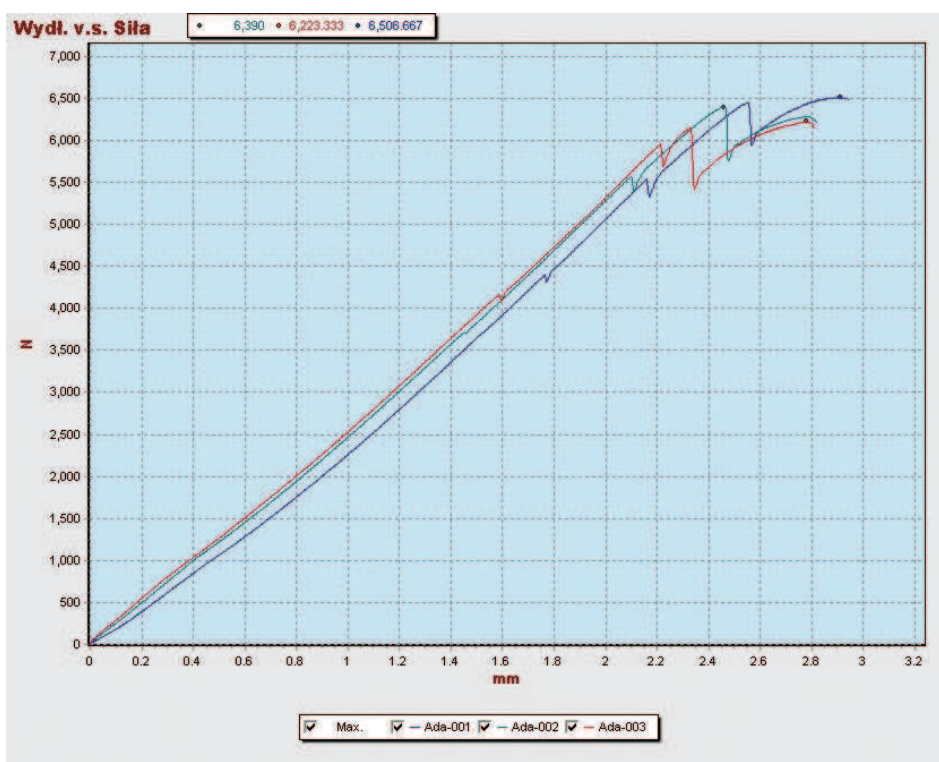


Rys. 1. Rozmieszczenie otworów pod nity $a = 2d = 7$ mm, $b = 3d = 10,5$ mm

Fig. 1. Rivet holes layout $a = 2d = 7$ mm, $b = 3d = 10,5$ mm

Tabela 1. Wartości sił niszczących badane połączenia
Table 1. Failure forces tested joints

Rodzaj połączenia	Wartość siły niszczącej [kN]
Klejowe c = 25 mm	5,77±0,54
Klejowe c = 20 mm	4,90±0,22
Nitowe c = 20 mm	6,20±0,20
Klejowo-nitowe a = 3,5; c=25	9,48±0,78
Klejowo-nitowe a = 4; c=25	8,41±0,91
Klejowo-nitowe a = 4,5; c=25	9,38±0,66
Klejowo-nitowe a = 7; c=25	6,78±0,61
Klejowo-nitowe a = 7; c=20	6,37 (6,39; 6,51; 6,22)
Klejowo-nitowe a = 4; c=20	8,91 (8,69; 9,07; 8,97)
Klejowo-nitowe a = 7; c=20 Raychem	6,69 (6,71; 6,74; 6,62)



Rys. 2. Krzywe rozciągania próbek z połączeniem hybrydowym: a = 7 mm, c = 20 mm
Fig. 2. Load-displacement curves for hybrid bonded specimens a = 7 mm, c = 20 mm

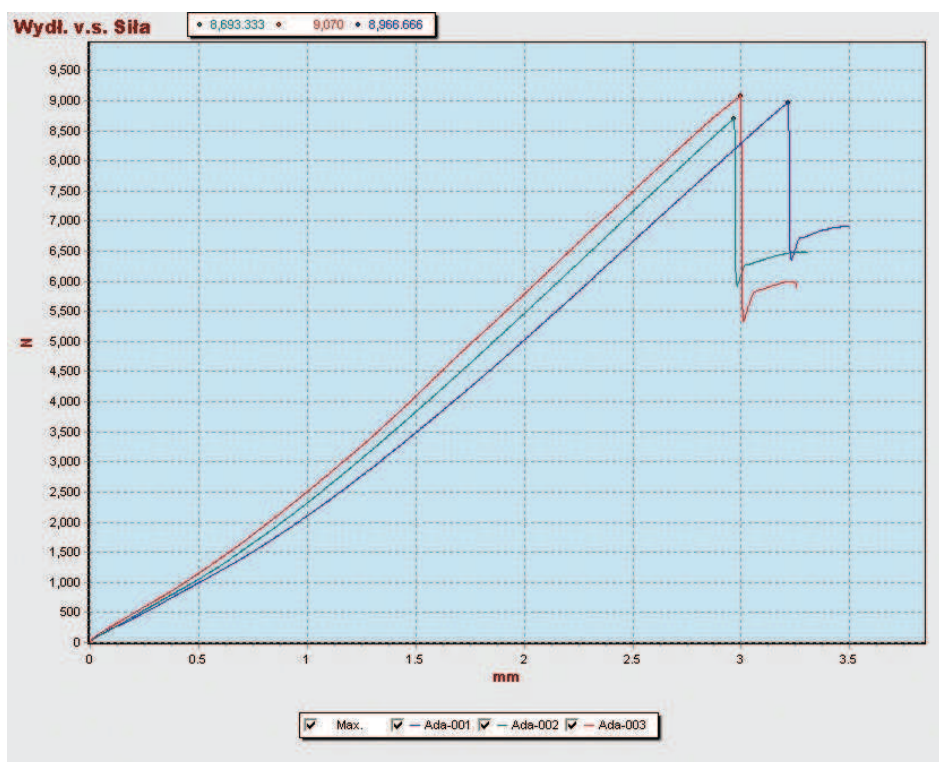
W próbkach hybrydowych zmieniano rozstaw nitów – ich odległość od krawędzi łączonych elementów (a = 7; 4,5; 4 i 3,5 mm), nie zmieniając długości zakładki. Badania wytrzymałościowe polegały na rozciąganiu próbek z prędkością 2 mm/min w maszynie wytrzymałościowej Hung Ta HT-2402. Wyniki badań wytrzymałości doraźnej badanych połączeń zestawiono w tab. 1.

Wytrzymałość połączeń klejowych była proporcjonalna do szerokości klejonych elementów (jeśli uwzględnimy przedziały ufności). Próbki hybrydowe, w których nity rozstawione były zgodnie z wymaganiami dotyczącymi połączeń nitowych, cechowała wytrzymałość porównywalna z wytrzymałością połączeń nitowych. Wynikało to z tego, że najpierw następowało zniszczenie spoiny

klejowej (uskok na krzywej rozciągania – rys. 2) a następnie połączenia nitowego. Zbliżenie nitów do krawędzi łączonych elementów powodowało jednoczesne niszczenie spoin i nitów (rys. 3), co skutkowało wzrostem wytrzymałości doraźnej połączeń hybrydowych w stosunku do nitowych o 40%.

Trwałość zmęczeniowa (w cyklu rozciągania odzerowo-tętniętego)

W pierwszym etapie badań porównano trwałość zmęczeniową próbek o szerokości c = 20 mm: nitowanych i hybrydowych, w których nity umieszczone były w odległości 4 mm od krawędzi łączonych elementów.



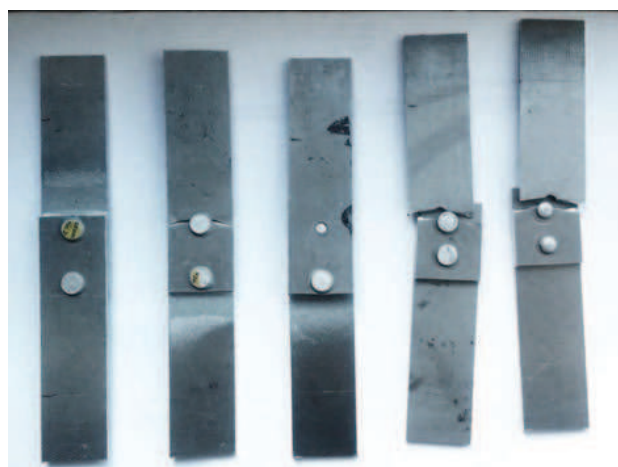
Rys. 3. Krzywe rozciągania próbek z połączeniem hybrydowym: $a = 4$ mm, $c = 20$ mm
 Fig. 3. Load-displacement curves for hybrid bonded specimens $a = 4$ mm, $c = 20$ mm

Próbki obciążano cyklami odzerowotętniającymi, a zasadniczo tętniającymi o małej wartości obciążenia minimalnego równego 200 N. Wyniki badań przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Wyniki badań zmęczeniowych próbek o szerokości $c = 20$ mm
 Table 2. Results of fatigue tests of specimens with width $c = 20$ mm

Próbki nitowane			
Nr próbki	Obciążenie [N]	Liczba cykli	Rodzaj zniszczenia
1	200–3200	135 000	Pęknięcie blachy
	200–4200	30 700	
2	200–4200	82 500	Pęknięcie blachy
3	200–5200	28 356	Pęknięcie blachy
Próbki klejowo-nitowe			
1.	200–4200	160 000	Nie uległa zniszczeniu
2	200–5200	20 420	Pęknięcie blachy
3	200–5200	27 719	Ścięcie jednego nitu, oderwanie zakawki drugiego

Celem wyeliminowania pękania blach podczas badań zmęczeniowych i sprawdzenia czy odległość nitów od krawędzi blachy zwiększa istotnie trwałość zmęczeniową przeprowadzono dodatkowe badania. Badaniom



Rys. 4. Sposób niszczenia próbek o grubości $c = 2$ mm
 Fig. 4. Failure modes of specimens with $c = 2$ mm

poddano dwa rodzaje próbek – z połączeniami hybrydowymi i klejone klejem Epidian 57, w których odległość nitów od krawędzi blachy wynosiła 7 mm lub 4 mm. Blachy użyte do tych badań miały wymiary $110 \times 25 \times 2$ mm. Próbki poddano cyklom odzerowotętniającym o wartości maksymalnej 5200 N. Wyniki badań wraz z opisem zniszczenia umieszczono w tab. 3.

Badania wykazały co najmniej pięciokrotny wzrost trwałości zmęczeniowej próbek klejowo-nitowych ze zmodyfikowanym rozstawem nitów w porównaniu z nitowymi, obciążanymi w zakresie do 4200 N. Zniszczenie połączeń polegało głównie na pękaniu łączonych blach

Tabela 3. Wyniki porównawczych badań zmęczeniowych połączeń hybrydowych z różnym rozstawem nitów (szerokość próbek $c = 25$ mm)

Table 3. Comparative results of fatigue tests of hybrid joints with different rivets layout (specimens width $c = 25$ mm)

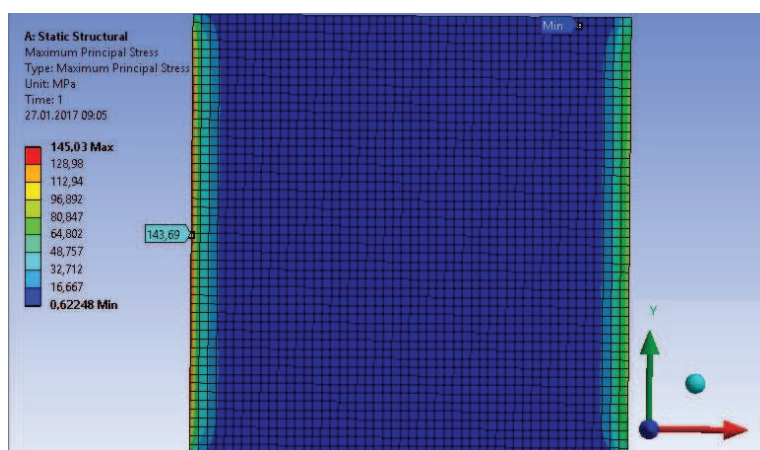
Nr próbki	Obciążenie, N	Liczba cykli	Rodzaj zniszczenia
Próbki klejowo-nitowe $a = 7$ mm			
1	200–5200	10 437	Ścięcie nitów
2	200–5200	25 483	Ścięcie nitów
Próbki klejowo-nitowe $a = 4$ mm			
3	200–5200	92 700	Pęknięcie blach
4	200–5200	147 000	Pęknięcie blach

spowodowanym ich zginaniem. Zwiększenie szerokości próbek wyeliminowało pęknięcie blach w wypadku nitów oddalonych od krawędzi o 7 mm oraz wykazało znacznie większą trwałość zmęczeniową próbek hybrydowych z nitami odległymi o 4 mm od krawędzi połączenia

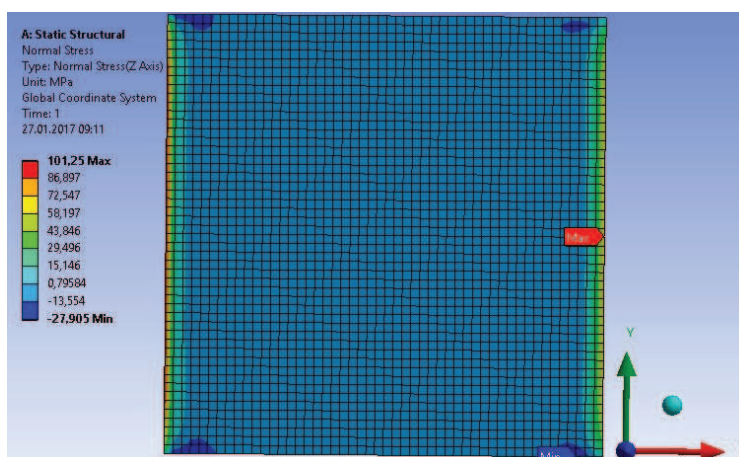
w stosunku do próbek hybrydowych, w których nity rozmieszczone były zgodnie z zasadami wykonywania połączeń nitowych.

Analiza numeryczna

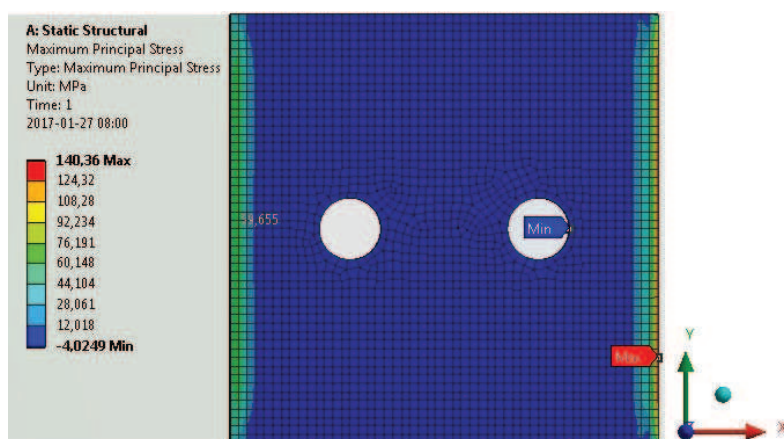
Obliczenia numeryczne wykorzystywane są powszechnie do analizy naprężeń w różnego typu połączeniach, w tym również klejowych i hybrydowych [1, 3, 5, 6]. W programie ANSYS zamodelowano zakładkowe połączenia: klejowe i klejowo-nitowe z dwoma nitami $d = 4$ mm, odsuniętymi od krawędzi połączenia o 8 lub 4 mm. Połączenia składały się z dwóch płytek ze stopu aluminium o grubości 2 mm, szerokości 25 mm i długości zakładki $l = 24,5$ mm (rys. 5). Zadeklarowano moduł sprężystości wzdłużnej kleju $E_k = 2000$ MPa i blach ze stopu aluminium $E_{Al} = 72000$ MPa oraz odpowiednio współczynniki Poissona $\nu_k = 0,35$ i $\nu_{Al} = 0,3$. W modelach obliczeniowych próbek stosowano kontakty: bonded (między spoiną i blachami), no separation (między trzonem nitu i otworem) oraz friction (między łbami nitów i blachami). Połączenia obciążono jednakową siłą 5000 N i obliczono naprężenia w spoinach (rys. 5-8).



Rys. 5. Naprężenia maksymalne główne w spoinie klejowej połączenia zakładkowego
Fig. 5. Distribution of maximum principal stress in adhesive layer of lap joint

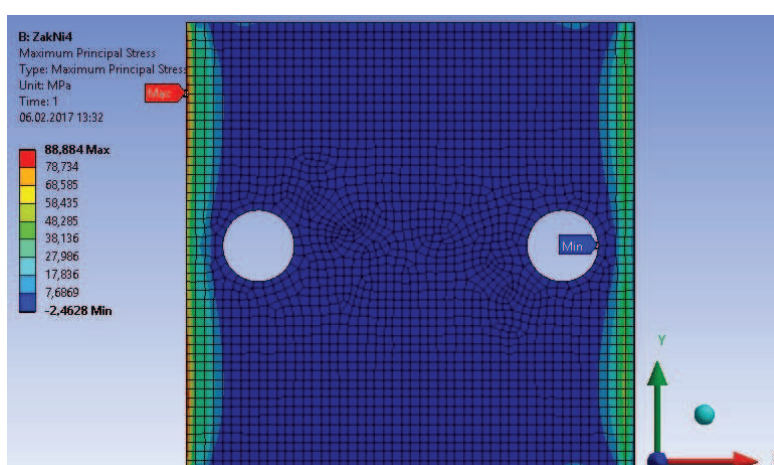


Rys. 6. Naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny połączenia zakładkowego
Fig. 6. Distribution of normal stress perpendicular to adhesive layer in adhesive of lap joint



Rys. 7. Naprężenia maksymalne główne w spoinie klejowej połączenia zakładkowego hybrydowego (nity oddalone od krawędzi blach o 8 mm)

Fig. 7. Distribution of maximum principal stress in adhesive layer of hybrid lap joint (rivets remote 8 mm from specimen edge)



Rys. 8. Naprężenia maksymalne główne w spoinie klejowej połączenia zakładkowego hybrydowego (nity oddalone od krawędzi blach o 4 mm)

Fig. 8. Distribution of maximum principal stress in adhesive layer of hybrid lap joint (rivets remote 4 mm from specimen edge)

Obliczenia wykazały, że w spoinie klejowej o zadeklarowanych wymiarach i właściwościach mechanicznych praktycznie obciążone są tylko krawędzie spoin oraz że naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny są istotnym składnikiem tensora naprężeń (rys. 6). W związku z tym wzmocnienie połączenia klejowego nitami powinno zmniejszyć wartość tych naprężeń i spowodować wzrost wytrzymałości połączenia.

Obliczenia wykazały, że wzmocnianie spoiny nitami odsuniętymi od krawędzi blach o 8 mm praktycznie nie zmniejszało wartości maksymalnych naprężeń w spoinie. Zbliżenie nitów do krawędzi spoiny na odległość 4 mm spowodowało 39% spadek naprężeń maksymalnych, co dobrze koreluje z wynikami badań eksperymentalnych.

Wnioski

- W połączeniu klejowym zakładkowym największe naprężenia występują w spoinach przy krawędziach zakładki.

- Zbliżenie nitów do krawędzi blach na odległość 4 mm spowodowało wzrost wytrzymałości doraźnej połączenia hybrydowego o 40% przez zmniejszenie efektu oddzierania spoin klejowych.
- Badania wykazały znaczny, bo aż pięciokrotny, wzrost trwałości zmęczeniowej próbek klejowo-nitowych ze zmodyfikowanym rozstawem nitów w porównaniu z nitowymi, obciążanymi w zakresie do 4200 N. Zniszczenie połączeń polegało głównie na pękaniu łączonych blach spowodowanym ich zginaniem.
- Badania wykazały również większą trwałość zmęczeniową (ok. pięciokrotną) próbek hybrydowych w stosunku do próbek hybrydowych, w których nity rozmieszczone były zgodnie z zasadami wykonywania połączeń nitowych.
- Przeprowadzone badania wskazują na potrzebę takiego rozmieszczenia nitów w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych, aby występowało jednocześnie niszczenie obu połączeń.

LITERATURA

- [1] Balewender T., T. Sadowski, M. Kneć. 2011. "Technological problems and experimental investigation of hybrid: clinched-adhesively bonded joint". *Archives of Metallurgy and Materials* vol. 56 (2): 439–446.
- [2] Matwijkenko W.A. 1994. „Wpływ czynników konstrukcyjno-technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowo-nitowych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (2): 33–35.
- [3] Pełowski R. 2000. „Analiza teoretyczna rozkładu naprężeń w połączeniu klejowym i klejowo-nitowym”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 35–38.
- [4] Rudawska A., M. Błazian. 2011. „Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopu tytanu”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 40–44.
- [5] Sadowski T., E. Zarzeka-Raczkowska. 2012. "Hybrid Adhesive Bonded and Riveted Joints – Influence of Rivet Geometrical Layout o Strength of Joints". *Archives of Metallurgy and Materials* vol. 57 (4): 1127–1135.
- [6] Sadowski T., M. Kneć, P. Godlewski. 2010. "Experimental investigations and numerical modeling of steel adhesive joints reinforced by rivets". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (30): 338–346.

prof. dr hab. Inż. Jan Godzimirski – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49,
e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

inż. Adrianna Adameczek – studentka studiów magisterskich Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

MONOTOLITYCZNA METODA HARMONOGRAMOWANIA MONTAŻU WIELOWARIANTOWYCH PRODUKTÓW W HYBRYDOWYCH SYSTEMACH PRZEPLYWOWYCH

A monolithic method of scheduling for assembly of multi-option products in hybrid flow shop systems

Marek MAGIERA

S t r e s z c z e n i e: Zaprezentowana metoda służy do budowy najkrótszych harmonogramów montażu produktów wielowariantowych. Uwzględniono specyficzne cechy montowanych produktów, wyróżniające te produkty (różne ich warianty), np. dodatkowe elementy (uchwyt), odmienność parametrów (silniki o różnych mocach), czy inne właściwości określające wygląd produktu (kolor obudowy). Wyznaczane harmonogramy dotyczą hybrydowych systemów przepływowych, które stanowią linie montażowe z równoległymi stanowiskami montażowymi. Pomędzy poszczególnymi stadiami umieszczone są bufory międzyoperacyjne o ograniczonych pojemnościach, w których na wykonanie kolejnych operacji mogą oczekiwać montowane produkty. Przepływ wielowariantowych produktów odbywa się jednokierunkowo z uwzględnieniem sztywnych lub alternatywnych marszrut montażu. Zastosowano monolityczne, czyli jednopoziomowe podejście do budowy harmonogramu montażu. Równocześnie rozwiązane jest zadanie rozdziału operacji montażowych pomiędzy maszyny i rozdział tych operacji w czasie celem zbudowania jak najkrótszego harmonogramu montażu. Zbudowano liniowe modele matematyczne zadań programowania całkowitoliczbowego, przeznaczone do rozwiązywania tych zadań – w przypadku sztywnych lub alternatywnych marszrut montażu. Zastosowanie podejścia monolitycznego oraz programowania całkowitoliczbowego gwarantuje wyznaczenie optymalnego harmonogramu. Zbudowana struktura danych i zmiennych oraz relacje matematyczne uwzględniają produkty wielowariantowe. Wyróżniono operacje podstawowe (jednakowe dla danego typu produktów) oraz dodatkowe (różnicujące produkty określonego typu). Struktura danych i zmiennych oraz ograniczeń dotyczących zbudowanych modeli matematycznych korzystnie wpływają na złożoność obliczeniową.

Zaprezentowano wyniki eksperymentów obliczeniowych, których dokonano nie tylko w celu weryfikacji metody, ale również umożliwiły porównanie długości harmonogramów w przypadku sztywnych oraz alternatywnych marszrut.

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

A b s t r a c t: The presented method is used to construction of the shortest assembly schedules of multi-option products. The specific characteristics of assembled products are regarded, for example additional elements (e.g. a handle), different parameters (e.g. a power of the engine), and other properties that determine appearance of a product (e.g. a color of a casing). Schedules are constructed for hybrid flow shop systems. This systems consist of assembly lines with parallel assembly machines. The intermediate buffers with limited capacity are located between assembly stages. In these buffers products are waiting to perform the next assembly operations. The unidirectional flow of multi-option products is regarded – for a fixed or an alternative assembly routes. The monolithic (an one level) approach to construction of assembly schedule is used. The task of assignment of assembly operations to machines and task of scheduling are simultaneously solved. The shortest schedule is fixed. The mathematical models of integer programming are constructed. A fixed assembly routes and an alternative assembly routes are regarded in the mathematical models. The monolithic approach and the integer programming ensure the construction of an optimal schedule.

The constructed structure of input parameters and variables and formulated mathematical relationships (constraints) regard multi-option products. There are basic operations (the same for the type of product) and additional operations (differentiating products of a specified type). The structure of input parameters and constraints, and structure of constraints formulated for mathematical models favourably affect the complexity of computing.

The results of computational experiments with the proposed method are presented. These experiments have been carried out not only in order to verify the method, but also to make it possible to compare the length of schedules for the fixed and the alternative routes.

K e y w o r d s: assembly systems, assembly scheduling, operating planning, integer programming

Wprowadzenie – produkty wielowariantowe a harmonogramowanie montażu

Konkurencyjność ofert sprzedaży różnych typów produktów wymaga uwzględnienia indywidualnych wymagań klientów. Skutkuje to zróżnicowaniem produktów, ponieważ nadawane są im wyróżniające je cechy.

Dotyczy to m.in. liczby części składowych montowanych produktów (np. dodatkowe uchwyty), parametrów części składowych (np. silniki o różnych mocach), a także zewnętrznego wyglądu (np. obudowy o różnych kształtach i kolorach). Wyroby określonego typu, które są montowane w różnych wariantach, nazywane są produktami wielowariantowymi.

Celem zaprezentowanej w artykule metody jest wyznaczanie harmonogramów montażu scharakteryzowanych powyżej produktów. Budowa harmonogramów montażu wielowariantowych produktów wymaga uwzględnienia specyfiki tych produktów w strukturze danych i zmiennych, która jest wykorzystywana w matematycznym opisie problemu. W takim przypadku uwzględnia się mniej danych i zmiennych niż w alternatywnej koncepcji, w której każdy z wariantów produktu określonego typu opisywany jest oddzielnie (jako odrębny typ produktu). Wzięcie pod uwagę relatywnie mniejszej liczby parametrów i zmiennych, czego dokonano w zbudowanej strukturze danych i zmiennych dotyczących produktów wielowariantowych, korzystnie wpływa na złożoność obliczeniową rozwiązywanego problemu.

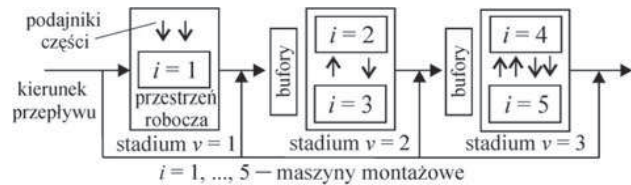
Wyróżnia się metody hierarchiczne oraz monolityczne, dotyczące budowy harmonogramów montażu. W przypadku metod hierarchicznych rozwiązywany problem dzielony jest na zadania cząstkowe, np. najpierw dokonywany jest przydział operacji do maszyn, a następnie operacje rozdzielane są w czasie. Przykład zastosowania takiego podejścia dotyczącego wielowariantowych produktów zawarto w pracy [3]. Zaproponowana w artykule metoda oparta jest na podejściu monolitycznym. Równocześnie dokonywany jest rozdział operacji w czasie i przestrzeni (między maszyny), a także dokonywany jest rozdział podajników części składowych. Wady i zalety obu koncepcji opisano w pracy [8], a także [5]. Problematyka dotycząca harmonogramowania montażu jest szeroko opisana m.in. w pracy [7].

Opis zadania harmonogramowania montażu i koncepcji jego rozwiązania zamieszczono w rozdziale 2, zaś matematyczny opis problemu przedstawiono w rozdziale 3. Informacje dotyczące przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych zawarto w rozdziale 4.

Opis zadania i koncepcji jego rozwiązania

Dana jest jednokierunkowa linia montażowa z maszynami równoległymi. Każde stadium to zbiór maszyn równoległych. Produkt przepływający przez dane stadium obciąża w nim co najwyżej jedną maszynę. Kolejność przepływów produktów przez poszczególne stadia nie musi być zgodna z kolejnością wprowadzania produktów do systemu montażowego – niektóre stadia mogą być pominięte. Uwzględniony jest więc hybrydowy system przepływowy (hybrid flow shop), zwany również elastycznym systemem przepływowym. Ten rodzaj systemów przepływowych szczegółowo opisano m.in. w pracy [6]. Pomiedzy poszczególnymi stadiami znajdują się bufora międzyoperacyjne o ograniczonych pojemnościach. W przypadku braku możliwości wykonywania operacji dotyczącej danego produktu na maszynie (jest ona obciążona przez inny produkt), produkt ten oczekuje w buforze poprzedzającym stadium, w którym ma być wykonana operacja montażowa. W poszczególnych stadiach umieszczone są ponadto podajniki części. Znaczna część operacji montażowych polega na domontowaniu

części składowej do uprzednio zmontowanych części. Części te pobierane są z podajników, umieszczonych w ograniczonej przestrzeni roboczej określonych stadiów. Przykładowa konfiguracja hybrydowego systemu przepływowego, wykorzystywanego do montażu wielowariantowych produktów, zamieszczono na rys. 1.



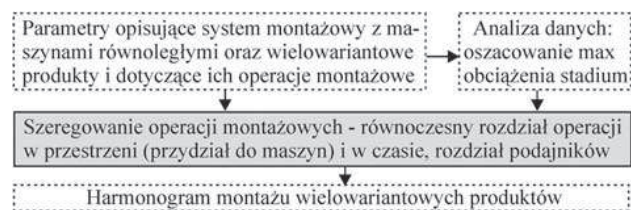
Rys.1. Przykładowa struktura hybrydowego systemu przepływowego z buforami międzyoperacyjnymi

Fig. 1. Example of structure of hybrid flow shop with intermediate buffers

W opisanym systemie przepływowym mogą być równocześnie montowane różne typy wielowariantowych produktów. Uwzględniono dwa rodzaje marszrut montażu:

- sztywne marszrut montażu, w przypadku których każdy typ operacji przydzielany jest do tylko jednego stadium,
- alternatywne marszrut montażu, w przypadku których każdy typ operacji przydzielany jest do co najmniej jednego stadium.

Budowany harmonogram montażu ma być jak najkrótszy. W jego budowie należy uwzględnić planowane przestoje maszyn, do których należą m.in. remonty, przezbrojenia, konserwacje. Schemat blokowy jednopoziomowej koncepcji rozwiązania opisanego zadania zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy monolitycznej metody harmonogramowania montażu

Fig. 2. Block diagram of the monolithic method of assembly scheduling

Do danych wejściowych należą parametry opisujące linię montażową z maszynami równoległymi, a także wielowariantowe produkty. W związku z uwzględnieniem planowanych przestojów maszyn wskazane jest oszacowanie obciążeń stadiów. Można w tym celu zastosować np. procedurę opisaną w pracy [3], zbudowaną przez autora artykułu w celu wyznaczenia liczby uwzględnianych przedziałów czasowych na które podzielona jest długość harmonogramu. W przypadku każdego z przedziałów czasowych określona jest dostępność poszczególnych

maszyn. Dane wejściowe uwzględniane są w rozwiązywanym zadaniu równoczesnego rozdziału operacji w czasie i w przestrzeni – wyznaczany jest harmonogram montażu wielowariantowych produktów. Dokonywany jest również rozdział podajników części pomiędzy poszczególne stadia.

W celu rozwiązania opisanego zadania zbudowane zostały liniowe modele matematyczne zadań programowania całkowitoliczbowego: M1 – w przypadku sztywnych marszrut montażu, M2 – w przypadku alternatywnych

marszrut montażu. Matematycznemu opisowi rozwiązywanego problemu poświęcony jest następny rozdział.

Matematyczny opis zadania harmonogramowania montażu

W celu rozwiązania opisanego w poprzednim rozdziale problemu zbudowane zostały modele matematyczne zadań programowania całkowitoliczbowego. W tab. 1 zestawiono wykaz oznaczeń zbiorów, parametrów i zmiennych, które uwzględniono w tych modelach.

Tabela 1. Tabełacyjne zestawienie oznaczeń zbiorów, parametrów i zmiennych
Table 1. Tabulation summary of sets, parameters and variables

Podstawowe 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 produktów;
V	– zbiór stadiów: $V = \{1, \dots, \vartheta\}$;
Pozostałe zbiory:	
J^C	– zbiór operacji montażowych wymagających wykorzystania podajnika części, $J^C \subset J$;
J^1	– zbiór operacji podstawowych, $J^1 \subset J$;
J^2	– zbiór operacji dodatkowych (różnicujących produkty), $J^2 \subset J$;
O^1	– zbiór par (k, j) , w których operacja podstawowa $j \in J^1$ jest wykonywana dla produktu typu $k \in K$;
O^2	– zbiór par (s, j) , w których operacja dodatkowa $j \in J^2$ jest wykonywana dla 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 , w przypadku których co najmniej jedna operacja należy do zbioru J^2 ;
T	– zbiór uporządkowanych par (s, k) , w których produkt o indeksie s jest typu k ;
V_j	– zbiór stadiów zawierających maszyny zdadne do wykonania operacji $j \in J$;
Z	– zbiór uporządkowanych par (i, v) , takich, że maszyna i należy do stadium v ;
Parametry:	
a_{vj}	– przestrzeń robocza maszyny umieszczonej w stadium v wymagana dla wykonania operacji j ;
b_v	– przestrzeń robocza maszyny umieszczonej w stadium v , w której mogą być umieszczone podajniki;
d_v	– pojemność bufora międzyoperacyjnego umieszczonego przed stadium v ;
g_{ev}	– czas transportu produktu pomiędzy maszynami umieszczonymi w stadiach e oraz v ;
m_v	– liczba maszyn umieszczonych w stadium v ;
p_{jk}^1	– czas wykonywania operacji podstawowej $j \in J^1$ dla produktu typu k ;
p_{js}^2	– czas wykonywania operacji dodatkowej $j \in J^2$ dla produktu s ;
μ_{il}	= 1, jeżeli maszyna i jest dostępna w przedziale czasowym l , inaczej $\mu_{il} = 0$;
ρ_v	– pojemność bufora międzyoperacyjnego umieszczonego przed stadium v ;
Zmienne:	
q_{ijsl}	= 1, jeżeli w przedziale czasowym l operacja j dotycząca produktu s wykonywana jest na maszynie i ; inaczej $q_{ijsl} = 0$;
w_{is}	– czas rozpoczęcia wykonywania operacji dotyczących produktu s na maszynie i ;
x_{vj}	= 1, jeżeli operację j przydzielono do maszyny w stadium v , inaczej $x_{vj} = 0$;
y_{vsl}	= 1, jeżeli w przedziale czasowym l produkt s znajduje się w buforze międzyoperacyjnym umieszczonym przed stadium v , inaczej $y_{vsl} = 0$;
z_{is}	– czas zakończenia wykonywania operacji dotyczących produktu s na maszynie i ;

Tabela 1 umożliwia matematyczny opis relacji dotyczących wielowariantowych produktów. Zbiór T zawierający pary (s, k) określa przyporządkowanie produktów s poszczególnym typom produktów k . Dla przykładu niech będą montowane 3 warianty $(s = 1, 2, 3)$ produktu $k = 1$. W takim przypadku $T = \{(1, 1), (2, 1), (3, 1)\}$. W przypadku wszystkich wariantów produktu $k = 1$ należy wykonać operacje podstawowe należące do zbioru $J^1 = \{1, 2, 3, 4\}$ oraz operacje różnicujące produkty przypisane zbiorowi operacji dodatkowych $J^2 = \{5, 6, 7\}$. Kolejność wykonywania operacji (sekwencja montażowa) jest następująca: w przypadku produktu $s = 1$: 3, 2, 1, 4, 5, w przypadku produktu $s = 2$: 3, 2, 1, 4, 6, 5, a w przypadku produktu $s = 3$: 3, 2, 1, 4, 7, 5. Przypisanie operacji podstawowych

produktowi jest znane dzięki zbiorowi $O^1 = \{(1, 1), (1, 2), (1, 3), (1, 4)\}$, a dodatkowe operacje są uwzględnione w zbiorze $O^2 = \{(1, 5), (2, 5), (2, 6), (3, 7)\}$. Zbiory ograniczeń kolejnościowych mają postać: $R^1 = \{(1, 3, 2), (1, 2, 1), (1, 2, 4)\}$, $R^2 = \{(1, 4, 5), (2, 4, 6), (2, 6, 5), (3, 4, 7), (3, 7, 5)\}$.

Zmienne w_{is} oraz z_{is} , zdefiniowane w tab. 1 to zmienne pomocnicze. Wykorzystywane one są w relacjach matematycznych, dotyczących wykorzystania buforów międzyoperacyjnych. Jeżeli maszyna i nie jest obciążona przez produkt s , to $w_{is} = z_{is} = 0$.

Modele matematyczne M1 (sztywne marszruty) i M2 (alternatywne marszruty):

$$\text{Zminimalizować:} \quad \sum_{l \in L} \sum_{s \in S} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} l q_{ijsl} + \sum_{v \in V} y_{vsl} \right) \quad (1)$$

$$\text{przy ograniczeniach:} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ijsl} \leq 1; \quad l \in L; s \in S \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} q_{ijsl} \leq \mu_{il}; \quad i \in I; l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L: \mu_{il}=1} q_{ijsl} = p_{jk}^1; \quad j \in J^1; (s, k) \in T; (k, j) \in O^1 \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L: \mu_{il}=1} q_{ijsl} = p_{js}^2; \quad j \in J^2; s \in S; (s, j) \in O^2 \quad (5)$$

$$q_{\tau r s f} + q_{i j s l} \leq 1; \quad (\tau, v), (i, v) \in Z; r, j \in J; f, l \in L; s \in S; r \neq j; \tau \neq i \quad (6)$$

$$q_{i j s l} + q_{\tau r s f} \leq 1; \quad \tau, i \in I; j \in J; l, f \in L; s \in S; \tau \neq i \quad (7)$$

$$x_{vj} \geq q_{ijsl}; \quad (i, v) \in Z; j \in J; l \in L; s \in S \quad (8)$$

$$a_{vj} x_{vj} \leq b_v m_v; \quad i \in I; j \in J^c \quad (9)$$

$$x_{vj} = 0; \quad v \notin V_j; j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{v \in V_j} x_{vj} = 1; \quad j \in J \quad \text{– tylko w przypadku modelu M1} \quad (11)$$

$$i q_{ijsl} \geq \tau q_{\tau r s f} - (H + 1)(1 - q_{ijsl}); \quad i, \tau \in I; (s, k) \in T; l, f \in L; (k, r, j) \in R^1 \vee (s, r, j) \in R^2 \quad (12)$$

$$l q_{ijsl} - f q_{\tau r s f} \leq \sum_{\eta \in L: f < \eta < l} (q_{ijs\eta} + q_{irs\eta}) + 1 + (H + 1)(1 - q_{ijsl});$$

$$i, \tau \in I; (s, k) \in T; l, f \in L; (k, r, j) \in R^1 \vee (s, r, j) \in R^2 \quad (13)$$

$$l q_{ijsl} - f q_{\tau r s f} \geq 1 + g_{ev} - (H + 1)(1 - q_{ijsl});$$

$$(i, v), (\tau, e) \in Z; f, l \in L; ((s, k) \in T; (\kappa, r, j) \in R^1; \kappa = k) \vee (s, r, j) \in R^2 \quad (14)$$

$$w_{is} \geq l q_{ijsl} - \sum_{f \in L} \sum_{r \in J} q_{\tau r s f} + 1 - (H + 1)(1 - q_{ijsl}); \quad i \in I; j \in J; l \in L; s \in S \quad (15)$$

$$w_{is} \leq l q_{ijsl} + (H + 1)(1 - q_{ijsl}); \quad i \in I; j \in J; l \in L; s \in S \quad (16)$$

$$z_{is} \geq lq_{ijsl} - (H+1)(1-q_{ijsl}); \quad i \in I; j \in J; l \in L; s \in S \quad (17)$$

$$lq_{ijsl} - fq_{\pi sf} - 1 \leq g_{ev} \sum_{\delta \in L: f < \delta < l} (q_{ijs\delta} + q_{\pi s\delta}) + \sum_{\delta \in L} y_{vs\delta} + (1+H)(1-q_{\pi sf});$$

$$(i, v), (\tau, e) \in Z; e < v; (s, k) \in T; f, l \in L; f < l; (k, r, j) \in R^1 \vee (s, r, j) \in R^2 \quad (18)$$

$$ly_{vsl} \geq z_{\tau s} + 1 + g_{ev} - (H+1)(1-y_{vsl}); \quad (\tau, e) \in Z; v \in V; l \in L; s \in S; e < v \quad (19)$$

$$ly_{vsl} \leq w_{is} - 1 + (H+1)(1-y_{vsl}); \quad (i, v) \in Z; l \in L; s \in S \quad (20)$$

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

$$q_{ijsl}, y_{vsl} \in \{0, 1\}; w_{is}, z_{is} \geq 0; \quad i \in I; j \in J; l \in L; s \in S; v \in V \quad (22)$$

Funkcja celu (1) służy do budowy jak najkrótszych harmonogramów montażu – zapewnia ona wykonywanie operacji montażowych w przedziałach czasowych o jak najmniejszych indeksach. Funkcja ta ma również wpływ na wykorzystanie buforów międzyoperacyjnych. W przypadku możliwości utworzenia kilku harmonogramów o takich samych długościach, wybierany jest ten, który gwarantuje najmniejsze obciążenie buforów. Poszczególne ograniczenia, dotyczące modeli M1 i M2, zapewniają: (2) – wykonywanie w danej chwili co najwyżej jednej operacji montażowej dotyczącej danego produktu wielowariantowego, (3) – wykonywanie przez maszynę co najwyżej jednej operacji w danej chwili – w okresie dostępności maszyny, (4) i (5) – rozdział wszystkich operacji podstawowych (4) oraz dodatkowych (5) pomiędzy maszyny montażowe, (6) – eliminację rozdziału operacji dotyczących danego produktu pomiędzy różne maszyny, należące do tego samego stadium – operacje te wykonywane są na jednej maszynie w określonym stadium, (7) – niepodzielność operacji montażowej pomiędzy maszyny, (8) – wyznaczenie przydziału typów operacji do poszczególnych stadiów, umożliwiającego rozdział podajników części, z których pobierane są części składowe i domontowywane do uprzednio zmontowanych części, (9) – weryfikację ograniczonej przestrzeni roboczej maszyny montażowej – limitowanie rozmieszczanych podajników części, (10) – eliminację przydziałów operacji do niewłaściwych stadiów, (11) – sztywność marszrut montażu – dotyczy wyłącznie modelu M1, (12) – jednokierunkowość przepływu produktów przez linię montażową, (13) – ciągłość każdej operacji montażowej, (14) – wykonywanie operacji zgodnie z danymi sekwencjami montażowymi, (15) i (16) – wyznaczenie czasu rozpoczęcia wykonywania na danej maszynie operacji montażowych dotyczących danego produktu, (17) – wyznaczenie czasu zakończenia wykonywania operacji (przyporządkowanych danemu produktowi) na określonych maszynach, (18) – wyznaczenie liczby przedziałów czasowych, w których produkt ma przebywać w buforze, (19) – umieszczenie produktu w odpowiednim buforze po wykonaniu poprzedniej operacji oraz dzięki (20) – przed

wykonaniem następczej operacji i rezerwację czasu na transport produktu, (21) – weryfikację ograniczonej pojemności buforów międzyoperacyjnych, (22) – odpowiednie typy zmiennych.

Weryfikacja metody

Metoda została zweryfikowana za pomocą eksperymentów obliczeniowych. W tym celu przygotowano 4 grupy testowych zadań. W przypadku każdej z grup rozwiązano 30 zadań. Modele matematyczne zakodowano w języku AMPL (A Modelling Language for Mathematical Programming) [1]. Do obliczeń wykorzystano pakiet optymalizacji dyskretnej GNU *Linear Programming Kit* (GLPK), a także GUROBI [9]. Dane dotyczyły sprzętu wykorzystywanego w gospodarstwie domowym. Produkty montowane były wzdłuż jednej osi (tzw. produkty jednoosiowe). Produkty danego typu różniły się m.in. obudową, mocą silnika, gabarytem uchwytu). Uwzględniono rzeczywiste czasy wykonywania operacji montażowych. Ograniczenia technologiczne były wzięte pod uwagę w zdefiniowanych w tab. 1 zbiorach dotyczących kolejności wykonywania operacji montażowych. Eksperymenty obliczeniowe umożliwiły porównanie długości harmonogramów dotyczących sztywnych oraz alternatywnych marszrut montażu. W tym celu zdefiniowano w równaniu (23) wskaźnik α .

$$\alpha = \frac{C_{\max}^{M1} - C_{\max}^{M2}}{C_{\max}^{M2}} \cdot 100\%, \quad (23)$$

gdzie $C_{\max}^r = \max_{i \in I, j \in J, s \in S, l \in L} lq_{ijsl}; r \in \{M1, M2\}$

Parametry grup zadań testowych oraz wyniki eksperymentów zestawiono w tab. 2.

Eksperymenty obliczeniowe potwierdziły, że trudniej zrównoważyć obciążenia maszyn w przypadku sztywnych marszrut montażu niż uwzględniając marszrut alternatywne. Skutkiem tego było wyznaczenie dłuższych harmonogramów przy zastosowaniu marszrut alternatywnych, w porównaniu do marszrut alternatywnych

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

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

Grupa zadań	Parametry grupy zadań						Średnia wartość α	Liczby: \mathcal{G} – stadiów, M – maszyn, N – typów operacji montażowych, W – typów produktów, S – produktów, H – przedziałów czasowych.
	\mathcal{G}	M	N	W	S	H		
1	2	4	10	3	6	16	4,1	
2	2	6	12	4	8	18	4,9	
3	3	6	14	5	10	20	7,1	
4	3	8	16	5	10	25	7,9	

– nawet o ok. 8%, co potwierdzają średnie wartości wskaźnika α zestawione w tab. 2.

Porównano również opracowaną metodę z metodą hierarchiczną harmonogramowania montażu produktów wielowariantowych, którą zaprezentowano w pracy [3]. Wyznaczano o 6–9% krótsze harmonogramy za pomocą zaprezentowanej metody jednopoziomowej niż w przypadku zastosowania koncepcji dwupoziomowej.

Uwagi końcowe

Najważniejszą zaletą opracowanej metody jest możliwość wyznaczania rozwiązań optymalnych – najkrótszych harmonogramów montażu produktów. Zostało to osiągnięte dzięki zastosowaniu programowania całkowitoliczbowego (PC). Bardzo szybki rozwój mocy obliczeniowych i jej parametrów, zauważony m.in. w pracy [2], sprzyja stosowaniu PC.

Należy również podkreślić uwzględnienie produktów wielowariantowych w przedstawionej metodzie. W tym celu zbudowano strukturę danych i zmiennych dotyczącą tych produktów, która następnie została wykorzystana w zbudowanych modelach matematycznych. Ta struktura, obejmująca m.in. operacje podstawowe i dodatkowe (różnicujące różne warianty produktów), korzystnie wpływa na złożoność obliczeniową rozwiązywanych zadań.

Wzięto pod uwagę planowane przestoje maszyn, dzięki czemu uwzględniono m.in. planowane remonty, przebrojenia, konserwacje. Kolejnym aspektem, potwierdzającym dążenie do jak najlepszego odzwierciedlenia rzeczywistości, jest wyróżnienie zbioru operacji wymagających wykorzystania podajników części. Dzięki temu rozrózono operacje polegające na domontowaniu części pobieranych z podajników od pozostałych operacji (np. spawanie, zgrzewanie, klejenie).

W przypadku mniej złożonej konfiguracji linii montażowej – bez maszyn równoległych – można zastosować modele matematyczne i procedurę oszacowania obciążeń maszyn zaprezentowane w pracy [4], których dotyczy mniejsza liczba parametrów i ograniczeń w porównaniu do modeli zaprezentowanych w niniejszym artykule.

Podjęcie monolityczne do harmonogramowania montażu wymaga równoczesnego uwzględnienia wielu indeksów, parametrów i zmiennych w modelach matematycznych. Skutkuje to znacznymi rozmiarami rozwiązywanych zadań i czasochłonnością obliczeń. Zbudowane modele matematyczne mogą stanowić podstawę do budowy algorytmów przybliżonych, np. heurystyk relaksacyjnych, przeznaczonych do rozwiązywania w krótkim czasie problemów o relatywnie znacznych rozmiarach.

LITERATURA

- [1] Fourer R., D. Gay, B. Kernighan. 2003. "AMPL, A Modelling Language for Mathematical Programming". Duxbury Press, Pacific Grove, CA.
- [2] Łunarski J. 2016. „Znaczenie informacji w procesach produkcyjnych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 4–5.
- [3] Magiera M. 2016. „Hierarchiczna metoda planowania przepływów wielowariantowych produktów przez linie produkcyjne” [w:] „Automatykacja procesów dyskretnych. Teoria i zastosowania”. pod red. Świerniaka A., J. Krystek, Gliwice: Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, tom I: 171–183.
- [4] Magiera M. 2017. „Monolityczna metoda planowania montażu dotyczącego wielowariantowego sprzętu elektrycznego i elektronicznego”. *Przegląd Elektrotechniczny* (w druku).
- [5] Magiera M. 2016. „Wybrane metody planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne i łańcuchy dostaw”. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- [6] Pindeo M.L. 2008. "Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems". New York: Springer.
- [7] Sawik T. 1999. "Production Planning and Scheduling in Flexible Assembly Systems". Berlin: Springer-Verlag.
- [8] Schneeweiss Ch. 1999. "Hierarchies in Distributed Decision Making". Berlin: Springer-Verlag.
- [9] www.gurobi.com (Gurobi Optimizer, dostęp 12.2016 r.).

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

STANDARD STEP W PROCESACH INTEGRACJI I ROZWOJU KOMPUTEROWYCH SYSTEMÓW INŻYNIERSKICH CZĘŚĆ I – CHARAKTERYSTYKA STANDARDU

Standard STEP process integration and development of computer systems engineering Part I – standard features

Jerzy STAMIROWSKI

Streszczenie: Integracja informacyjna jest istotnym elementem automatyzacji procesów projektowania i technicznego przygotowania produkcji. Prowadzone w ISO prace doprowadziły do opracowania standardu ISO 10303 STEP, ujednolicającego model informacyjny wyrobu, tworząc tym samym warunki do integracji informacyjnej procesów projektowania i technicznego przygotowania produkcji. W artykule przedstawiono syntetycznie: zasady integracji, podstawy standardu STEP i języka EXPRESS oraz kierunki rozwoju standardu STEP.

Słowa kluczowe: Integracja, cykl życia wyrobu, automatyzacja, standard STEP, EXPRESS

Abstract: The integration of information is an essential element of the process automation of design and engineering. Conducted in ISO work led to the development of ISO 10303 STEP harmonizing the product information model creates conditions for the integration of information and processes designed technical preparation of production. The article presents synthetically: the principle of integration, the base of the standard STEP and EXPRESS language and directions of development of the standard STEP.

Keywords: integration, product life cycle, automation, standard STEP, EXPRESS

Wprowadzenie

Podstawowym instrumentem zwiększenia konkurencyjności przedsiębiorstwa staje się stosowanie technologii informacyjnych we wszystkich procesach cyklu życia wyrobu. Jednym z podstawowych problemów integracji informacyjnej jest dysponowanie ujednoczonym modelem danych, oferującym dane wymagane przez aplikacje systemów komputerowych, obsługujących różne zadania procesów cyklu życia wyrobu.

Modele o złożonej strukturze, wyczerpująco definiujące własności wyrobu proponuje międzynarodowy standard ISO 10303 STEP.

Wielowątkowość, złożoność i obszerność problematyki integracji w przebiegu procesów cyklu życia wyrobu, nie pozwala na wyczerpujące przedstawienie problemu. Przedstawione zostaną jedynie oferowane przez model możliwości integracji w obszarach projektowania i technicznego przygotowania produkcji.

Podstawowe pojęcia – model wyboru, integracja cyklu życia wyrobu

Komputerowe wspomaganie (automatyzacja) procesów cyklu życia wyrobu

W początkowym okresie komputerowego wspomaganie procesów produkcyjnych, systemy komputerowe stosowano do rozwiązywania pojedynczych, odizolowanych zadań. Były to systemy do zarządzania, a następnie do obliczeń inżynierskich, projektowania i technicznego przygotowania produkcji (CAE/CAD/CAM).

W miarę zwiększania się liczby systemów i ich producentów, pojawił się problem przesyłania danych pomiędzy systemami o różnych zastosowaniach od różnych producentów. Problemem stała się duża ilość informacji o zróżnicowanych formatach, tworząca bariery komunikacyjne pomiędzy uczestnikami cyklu życia wyrobu. Problem ten dotyczył w szczególności dużych międzynarodowych przedsiębiorstw, produkujących złożone wyroby, tj. samoloty, okręty, samochody. W wyniku doświadczeń przemysłowych powstała współczesna koncepcja zintegrowanego wsparcia informacyjnego cyklu życia wyrobu, oparta na wymianie informacji „bez papieru” i standaryzująca model danych opisujący wyrób na każdym etapie cyklu życia wyrobu. Model proponował

utworzenie jednolitej przestrzeni informacyjnej (JPI), obejmującej wszystkich uczestników cyklu życia wyrobu. Charakterystycznymi cechami JPI powinny być: otwarta architektura, wspólne przechowywanie danych (repozytoria) i pracujące na danych modelu oprogramowanie, akceptowane przez wszystkich uczestników cyklu życia wyrobu [5].

Informacyjne wsparcie cyklu życia wyrobu

Technologie reprezentacji danych

Pod pojęciem tym należy rozumieć zbiór metod języków i modeli pozwalających przedstawić informacje o wyrobie dla potrzeb każdego procesu cyklu życia wyrobu.

Obszar przedmiotowy wyrobu to nieustrukturyzowany zbiór obiektów opisanych wartościami ich właściwości (atrybutów) oraz istniejącymi pomiędzy nimi związkami.

Model informacyjny to nazwane zbiory encji (entity, obiekty), mające właściwości (atrybuty), które opisane są nazwami (metadane) np. promień, długość. Wartości atrybutów wyrażone są liczbowo lub opisowo np.: 50, 100, mały, duży. Pomiędzy zbiorami encji istnieją logiczne związki. Model zawiera: zbiór pojęć definiujących obiekty obszaru przedmiotowego, zbiór atrybutów obiektów i związki pomiędzy obiektami obszaru przedmiotowego.

Model służy do opisu wyrobu i wymiany informacji o wyrobie, stając się źródłem pierwotnej informacji dla wszystkich programów użytkowych. Programy te mogą również zbierać i przechowywać wyniki swojej pracy.

Technologie integracji danych

Technologia integracji danych to zbiór metod integrowania zautomatyzowanych procesów cyklu życia wyrobu wraz z ich danymi w ramach jednolitej przestrzeni informacyjnej. Proces integracji polega na zbudowaniu struktury łączącej oddzielne modele cyklu życia wyrobu przez powiązanie zbiorów obiektów, atrybutów i związków.

Integracja przeprowadzana jest na ogół w dwóch etapach: utworzenie w oparciu o istniejące standardy dokumentów elektronicznych dla każdego procesu i każdego uczestnika cyklu życia wyrobu, utworzenie z niezależnych dokumentów zintegrowanej jednolitej przestrzeni informacyjnej (ZJPI) cyklu życia wyrobu. Elementem integrującym jest w pierwszej kolejności ujednoczony model danych.

Standardy technologii informacyjnego wsparcia cyklu życia wyrobu

Podstawowymi, wyróżnianymi grupami standardów są standardy funkcjonalne (opisujące metody rozwiązywania zadań) i techniczne (określające modele, struktury wymiany danych oraz wspólne ich stosowanie).

W procesach informacyjnego wsparcia cyklu życia wyrobu znaczenie ma pięć grup standardów [5], [6],[4], [2]:

- standardy funkcjonalne – opisujące w różnych formach funkcjonowanie procedur systemów np. graficznej. Przykłady: IDFO, Workflow Management Coalition (workflow), UML,
- standardy informacyjne – opisujące i klasyfikujące struktury danych o wyrobie. Za podstawowy standard w budowie maszyn uważany jest międzynarodowy standard wymiany danych o wyrobie ISO 10303 STEP [6], [4],
- standardy architektury – sieciowe architektury obiektowe CORBA (Common Object Request Broker Architecture) i DCOM (Distributed Common Object Model) [2],
- standardy komunikacyjne – fizyczne przesyłania danych pomiędzy systemami komputerowymi. Podstawą są standardy sieci Internet,
- standardy interfejsów użytkownika – dialog z systemem i procedury współpracy systemów [2].

Największe znaczenie z punktu widzenia procesów projektowania i technicznego przygotowania produkcji mają standardy wymiany danych o wyrobie ISO 10303 STEP.

STEP jest powszechnie zalecany i stosowany w wielu poważnych przedsiębiorstwach. Przyczyną jest rozbudowana struktura danych, pozwalająca opisać: geometrię wyrobu, strukturę wyrobu, związki w jakie wchodzi elementy wyrobu oraz wymagania jakościowe wyrobu. Model o tak rozbudowanej strukturze danych, przewidywany jest do użycia w szerokim zakresie aplikacji stosowanych w procesach cyklu życia wyrobu. Dane modelu mogą być używane do generacyjnego projektowania procesów technologicznych obróbki, programowania obrabiarek CNC, projektowania procesów technologicznych montażu (opis struktury) oraz projektowania zautomatyzowanych elastycznych systemów wytwarzania (ZESW). Struktura danych modelu STEP jest dużo bogatsza od struktury standardów IGES, SET czy VDA-FS.

STEP

Podstawowe własności standardu STEP

Zalecany do budowy modeli informacyjnych, danych o wyrobie, międzynarodowy standard ISO 10303 Product data representation and exchange (Przedstawienie danych o wyrobie i ich wymiana) noszący nieformalną nazwę STEP – Standard for the Exchange of Product Data (standard dla wymiany danych o wyrobie), zawiera pięć podstawowych komponentów: metody opisu, metody realizacji, zintegrowane zasoby, metody testowania zgodności, protokoły zastosowań.

Metody opisu

Podstawowym narzędziem opisu wyrobu jest w standardzie STEP język EXPRESS (ISO 10303-11) [6],[4]. Nie jest to język programowania, ale język

reprezentujący struktury danych, używane do opisu własności wyrobu. Współczesne systemy CAD/CAM tj. CATIA, SOLIDWORKS generują na wyjściu pliki wymiany danych standardu STEP w języku EXPRESS. Systemy mogą swobodnie wymieniać dane, jeżeli czytają język EXPRESS i generują na wyjściu pliki w języku EXPRESS. Pliki te mogą być przetwarzane zgodnie z potrzebami procesów cyklu życia wyrobu. Fragment pliku w języku EXPRESS przedstawiono na rys.1.

Metody realizacji (wymiany danych)

STEP proponuje dwie metody wymiany danych: plik wymiany i interfejs SDAI (Standard Data Access Interface – ISO 10303-22), łączący dostęp do bazy danych o wyrobie z systemami CAD.

Protokoły zastosowania

Protokół zastosowania STEP jest specjalnym przedstawieniem informacji o wyrobie dla konkretnego obszaru przedmiotowego i zawiera uzupełnienia specyficzne dla danego obszaru przedmiotowego. Przykładami są protokoły: budowa maszyn ISO 10303-203 (AP 203), budowa samochodów ISO 10303-214 (AP 214), budowa okrętów ISO 10303-215 (AP 215).

Zintegrowane zasoby

Zintegrowane zasoby określone są specyficznymi dla obszaru przedmiotowego protokołami zastosowań STEP. Podstawą zintegrowanych zasobów jest bazowy model wyrobu w języku EXPRESS, wchodzący w zestaw protokołów zastosowań.

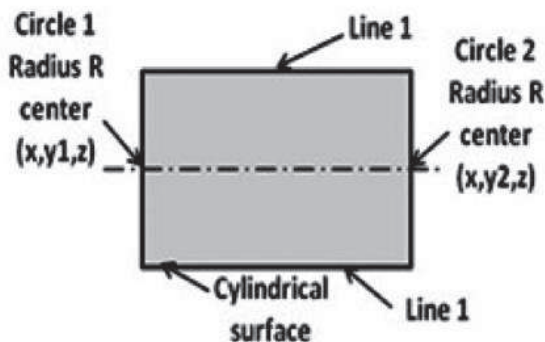
Metody testowania

Metody testowania służą do sprawdzenia zgodności oprogramowania używanego do opisu i przesyłania danych z odpowiednim standardem protokołu zastosowania STEP.

Podstawowe grupy danych tworzące model wyrobu w AP203 (budowa maszyn)

Protokół ISO 10303-203, configuration controlled design (projekt wyrobu z zarządzaniem konfiguracją) – AP 203, jest najpopularniejszym protokołem AP, przeznaczonym do wymiany danych opisujących projektowany wyrób [5], [6], [4]. Dla przybliżenia jego struktury przedstawiono syntetycznie wykaz podstawowych grupy danych AP203 tworzących model.

```
#35=CLOSED_SHELL('Closed shell',(#75,#92,#132,#149,#177,.....#586)); ...
#75=ADVANCED_FACE('PartBody',(#74),#40,.T.);
#40=CYLINDRICAL_SURFACE('generated cylinder',#39,.50.); #74=FACE_OUTER_BOUND(",#69,.T.)
#69=EDGE_LOOP(",(#70,#71,#72,#73));
#70=ORIENTED_EDGE(",*,*,#49,.F.);
#71=ORIENTED_EDGE(",*,*,#56,.T.);
#72=ORIENTED_EDGE(",*,*,#63,.T.);
#73=ORIENTED_EDGE(",*,*,#68,.F.);
#49=EDGE_CURVE(",#46,#48,#44,.T.);
#56=EDGE_CURVE(",#46,#55,#53,.F.);
#63=EDGE_CURVE(",#55,#62,#60,.T.);
#68=EDGE_CURVE(",#48,#62,#67,.F.);
#44=CIRCLE('generated circl',#43,.50.);
#53=LINE('Line',#50,#52);
#60=CIRCLE('generated circle',#59,.50.);
#67=LINE('Line',#64,#66);
#43=AXIS2_PLACEMENT_3D('Circle Axis2P3D',#41,#42,S);
#59=AXIS2_PLACEMENT_3D('Circle Axis2P3D',#57,#58,S);
#41=CARTESIAN_POINT('Axis2P3D Location',(0.,0.,0.));
#57=CARTESIAN_POINT('Axis2P3D Location',(0.,20.,0.));
#39=AXIS2_PLACEMENT_3D('Cylinder Axis2P3D',#93,#94,#95);
#93=CARTESIAN_POINT('Axis2P3D Location',(0.,30.,0.));
```



Rys. 1. Plik w języku EXPRESS dla cylindrycznego obiektu elementarnego. Plik został wygenerowany z systemu SOLIDWORKS (opracowanie własne [8])

Fig. 1. File in EXPRESS for elementary cylindrical object. File was generated from the system SolidWorks (own study [8])

Identyfikacja wyrobu (Part_identification)

Zawiera podstawowe zasady opisu wyrobu, wersji i wewnętrznej klasyfikacji. Bazowym obiektem jest egzemplarz klasy – product. Dla opisu oznaczenia wyrobu, jego wersji i sposobu prezentacji AP 203 wykorzystuje schemat product_definition_schema z tomu ISO 10303-41.

Wyrób (product)

Klasa product określona w ISO 10303-1 podaje zalecenia dotyczące tworzenia nowego obiektu przez proces.

Wersja wyrobu

Obiekt product_definition odpowiada opisowi jednej wersji jednego wyrobu dla jednego aspektu etapu cyklu życia wyrobu.

Klasyfikacja wyrobów

Klasa product_category opisuje klasę wyrobów do której odnosi się opis. Klasa product_category_relationship opisuje zależności pomiędzy dwoma klasami wyrobu. Klasy mogą tworzyć podklasy.

Geometria wyrobu

Shape (kształt) – kształt i gabaryty wyrobu opisane są obiektami geometrycznymi i zależnościami pomiędzy różnymi postaciami wyrobów. Obiekty geometryczne STEP opisujące kształt wyrobu to głównie punkty oraz dwu- i trzywymiarowe parametryczne krzywe i powierzchnie. Schemat geometric_model_schema (ISO 10303-42) zawiera obiekty określające różne rodzaje modeli geometrycznych.

Struktura wyrobu

Dla opisu struktury wyrobu należy podać do jakiej jednostki montażowej wchodzi wyrób i jakie jest jego położenie. W AP 203 te dwie cechy rozpatrywane są niezależnie.

Opis struktury wyrobu

Klasy używane do opisu struktury wyrobu w AP 203 zawarte są w schemacie product_structure_schema z ISO 10303-44. AP 203 używa zdefiniowanych w ISO 10303-44 zależności pomiędzy wyrobami.

Klasa assembly_component_usage opisuje związek pomiędzy elementami konstrukcji przy pomocy przedstawionych niżej czterech podtypów.

Klasa quantified_assembly_component_usage – związek pomiędzy elementami i ich operacjami montażu.

Klasa next_assembly_usage_occurrence – określa zależność pomiędzy elementem i kolejną bezpośrednią operacją montażu.

Klasa specified_higher_usage_occurrence – określa zależność pomiędzy montowanym elementem a węzłem najwyższego poziomu. Można połączyć węzły na różnych poziomach

Klasa promissory_usage_occurrence przerywa związek pomiędzy montowanym elementem a węzłem najwyższego poziomu.

Struktura wyrobu modelowana jest skierowanym analitycznym grafem. W modelach tych węzły reprezentują wyrób a luki charakter połączenia. W schemacie product_structure_schema węzły odpowiadają klasie product_definition a luki assembly_component_usage.

Pełny opis języka EXPRESS znajduje się w normie ISO 10303-11 [6], [4].

Język STEP może być używany nie tylko do wymiany danych, ale również jako samodzielna struktura danych wejściowych, przetwarzana przez aplikacje cyklu życia wyrobu. Dane z plików w języku EXPRESS generowanych z systemów CAD, mogą być używane przez aplikacje stosowane w systemach automatyzujących projektowanie procesów technologicznych i automatyzujących projektowanie zautomatyzowanych elastycznych systemów wytwarzania. Język EXPRESS może być konwertowany na język XML [7].

Rozwój standardu STEP

W 2010 r. ISO wydało nowy produkt SMRL ISO, opisujący moduły STEP i biblioteki zasobów. Zawiera ona opisy wszystkich części zasobów standardu STEP i modułów aplikacji na jednej płycie CD [11]. SMRL będzie regularnie aktualizowane i dostępne po znacznie niższych kosztach niż zakup wszystkich części oddzielnie. W grudniu 2014 r. ISO opublikowała pierwszą edycję nowego protokołu AP 242 [3]. Protokół AP242 STEP rozszerza model o wymagania jakościowe wyrobu, tj. tolerancja i błędy kształtu, tworząc jednocześnie możliwość zwiększenia funkcjonalności systemów automatyzujących projektowanie procesów technologicznych i procesów kontroli [3], [12]. Poniżej przedstawiono fragment pliku AP242 EXPRESS [1].

```
#3014=PRODUCT_DEFINITION_CONTEXT('',#3015,'design');
#3015=APPLICATION_CONTEXT('geometrical dimensioning and
tolerancing representation');
#3016=APPLIED_DOCUMENT_REFERENCE(#4012,'',(#3014));
#3017=PRODUCT('ISO 1101','Geometrical Product Specifications
(GPS)\X2\FFFD\X0\ Geometrical tolerancing',$(#4010));
#3018=PRODUCT_DEFINITION_FORMATION('',,$#3017);
#3019=SHAPE_ASPECT('S4',$#114,.T.);
#3020=SHAPE_ASPECT('S5',$#114,.T.);
#3021=DIMENSIONAL_LOCATION('linear
distance',$#3019,#3020);
#3022=(LENGTH_MEASURE_WITH_UNIT()MEASURE_
REPRESENTATION_ITEM()MEASURE_WITH_UNIT(LENGTH_
MEASURE(140.0),#1587)REPRESENTATION_ITEM('lower
range'));
#3023=(LENGTH_MEASURE_WITH_UNIT()
MEASURE_REPRESENTATION_ITEM()
```


MEASURE_WITH_UNIT(LENGTH_MEASURE(160.0),#1587)
REPRESENTATION_ITEM('upper range'));

Z tak rozwiniętym modelem danych o wyrobie wiązane jest często rozszerzenie PMI (Product Manufacturing Information) – informacja o wytwarzaniu wyrobu. Model zwiększa liczbę własności (atrybuty) [10]. W pracach ISO problem ten znajduje odzwierciedlenie w nowym protokole AP242 PMI [3], [12], [10], [9].

STEP jest rozwijany i utrzymywany przez komitet techniczny ISO TC 184, systemy automatyzacji i integracji, podkomitetu SC4, dane przemysłowe. Objęty jest prawami autorskimi przez ISO. Jest standardem trudnym, wymusza konieczność zapoznania się z szeregiem nowych koncepcji i nie jest łatwo dostępny. Stan ten może zmienić SMRL ISO. Dostępny dla użytkowników jest natomiast język EXPRESS (ISO 10303-11), który jest osią standardu. Przy pomocy języka EXPRESS można definiować struktury danych a wersja G pozwala na graficznie przedstawienie struktur. Pliki w języku EXPRESS generowane są przez większość systemów CAD np. SOLIWORKS, CATIA [10]. Krótki przegląd standardu STEP pokazuje, że nie jest to standard martwy. Jest nadal intensywnie rozwijany i coraz szerzej stosowany, szczególnie przez firmy lotnicze, samochodowe oraz wytwarzające wyroby na najwyższym poziomie technicznym.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono w zarysie historię standardu STEP, strukturę języka EXPRESS oraz kierunki rozwoju standardu. Duża objętość norm STEP, utrudniony dostęp oraz konieczność zapoznania się z szeregiem nowych koncepcji, utrudniają upowszechnianie standardu. Przedstawione w artykule syntetyczne, ale dość szerokie spojrzenie na integrację z zastosowaniem standardu STEP, pokazuje jego możliwości. Rozszerzoną wiedzę o standardzie można uzyskać z obszernej literatury. Mimo wszystkich trudności, duże przedsiębiorstwa produkujące wyroby o najwyższym poziomie technicznym, widzą przewagę dobrych stron standardu STEP i rozwijają jego stosowanie. Standard STEP nie jest standardem martwym. ISO kontynuuje proces jego rozwoju (AP242), a przedsiębiorstwa zwiększają jego stosowanie.

LITERATURA

- [1] Barnard Feeney A., S.P. Frechette, V. Srinivasan. 2014. "A portrait of an ISO STEP tolerancing standard as an enabler of smart manufacturing systems". *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing May, China: Hangzhou, http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=915430, dostęp 02.2017.
- [2] Emmerich W. 2002. „Engineering Distributed Objects”. Wydawnictwo John Wiley & Sons Ltd., 510.
- [3] ISO 10303-242:2014. Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm%3Fcsnumber%3D57620, dostęp 02.2017.
- [4] ISO 10303-11:2004 Subscribe to updates Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?cnumber=38047, dostęp 02.2017.
- [5] Kołczin A.F., W.M. Owsjannikow, A.F. Strjeżałow. 2002. „Zarządzanie cyklem życia produkcji”. M: Ancharsis, 303.
- [6] PN-ISO 10303-11. Systemy integracji i automatyzacji przemysłowej. Reprezentacja i wymiana danych o produktach. Metody opisu. Język EXPRESS.
- [7] Recommended Practices for STEP AP242 Business Object Model XML Product & Assembly Structure. Release 1.1 May 20, 2016: 203.
- [8] Stamirowski J., K. Borkowski. 2014. „Pozyskiwanie danych dla zintegrowanej platformy wspomagającej projektowanie zautomatyzowanych systemów wytwarzania”. Kielce: XII Sympozjum Wydziału Zarządzania i Modelowania Komputerowego Politechniki Świętokrzyskiej: 626–633.
- [9] www.ap242.org/geometry-assembly-pmi-interopability, dostęp 02.2017.
- [10] <https://www.3ds.com> – Dassault Systems, dostęp 02.2017.
- [11] www.en.wikipedia.org/wiki/ISO_10303, dostęp 02.2017.
- [12] <https://www.steptools.com/stds/stepnc>, dostęp 02.2017.

dr hab.inż. Jerzy Stamirowski prof. Politechniki Świętokrzyskiej – Katedra Automatyki i Robotyki Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: j.stamirowski@tu.kielce.pl

BADANIA PORÓWNAWCZE DOKŁADNOŚCI PRZEDMIOTÓW ZE STALI 15-5PH ORAZ 4330 WYKONANYCH FREZOWANIEM

Comparison of the accuracy of 15-5PH and 4330 steel parts produced by milling

Józef KUCZMASZEWSKI, Kazimierz ZALESKI, Jakub MATUSZAK, Tomasz PAŁKA, Janusz MĄDRY

S t r e s z c z e n i e: Na dokładność elementów maszyn wpływa wiele czynników zależnych od: maszyn technologicznych, narzędzi, uchwytów obróbkowych, właściwości materiałów obrabianych, parametrów technologicznych, cieczy obróbkowych itp. W pracy przedstawiono wyniki badań dokładności partii przedmiotów o złożonym kształcie. Proces frezowania realizowano na 3-osiowym centrum obróbkowym Avia VMC-800HS. Pomiary dokładności geometrycznej przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Vista ZEISS. Analiza powtarzalności błędów wymiarów wykonanych przez frezowanie przedmiotów umożliwiła określenie wartości tolerancji możliwej do uzyskania w warunkach produkcyjnych. Szczególną uwagę zwrócono na błędy wykonania ważne ze względów montażowych. Porównano dokładność przedmiotów wykonanych ze stali 15-5PH oraz 4330. Określono klasę dokładności wykonania, podano odchyłki oraz wykazano, że możliwe jest zachowanie porównywalnej dokładności wykonania elementów z dwóch materiałów, różniących się właściwościami przy doborze odpowiednich parametrów technologicznych obróbki.

S ł o w a k l u c z o w e: frezowanie, dokładność, tolerancja

A b s t r a c t: The accuracy of machine parts depend on numerous factors connected with: technological machines, tools, fixture clamps, the properties of workpiece material, cutting parameters, cutting fluids etc. This paper reports the results of a study investigating the accuracy of a series of objects with complex shape. The milling process was performed on a 3-axis machining center, Avia VMC-800HS. The measurements of geometric accuracy were made using the ZEISS Vista coordinate measuring machine. The examination of the repeatability of dimensional errors of the objects produced by milling led to determination of the values of tolerance which can be obtained under production conditions. Particular attention was paid to the errors of part quality as they may affect the assembly process. The accuracy of parts made of 15-5PH and 4330 steel was the compared. Accuracy class and dimensional deviation were determined. The results demonstrate that it is possible to ensure comparable accuracy of parts made of two different materials by selecting appropriate machining parameters.

K e y w o r d s: milling, accuracy, tolerance

Wprowadzenie

Dokładność elementów maszyn wpływa na prawidłowość działania maszyn i urządzeń zmontowanych z tych elementów oraz na przebieg montażu. Precyzyjność wykonania montowanych części ma decydujący wpływ na możliwości zastosowania montażu automatycznego [6]. Duża różnorodność połączeń montażowych [9] związana jest ze zróżnicowanym kształtem łączonych elementów. Złożoność kształtu montowanych części często jest przyczyną występowania licznych problemów w procesie ich obróbki, a także utrudnia zachowanie wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej.

Na dokładność elementów maszyn wpływa wiele czynników zależnych od: maszyn technologicznych, narzędzi, uchwytów obróbkowych, właściwości materiałów obrabianych, parametrów technologicznych, cieczy obróbkowych [1, 10]. Na wartość wymiarów i kształt obrabianych przedmiotów wpływają nie tylko cechy konstrukcyjne maszyny technologicznej, ale również jej stan techniczny, który może być oceniony na podstawie pracy tej maszyny [7]. Dokładność zależy też od kształtu obrabianych elementów, a szczególne trudności powstają podczas obróbki elementów cienkościennych z powodu większej podatności tych elementów na odkształcenia pod wpływem sił skrawania.

Zmniejszenie błędów obróbkowych można uzyskać przez odpowiedni dobór sztywnego narzędzia (jeśli pozwala na to kształt obrabianego przedmiotu), optymalizację parametrów technologicznych oraz zastosowanie odpowiedniej strategii obróbki [2, 4, 12]. W przypadku obróbki rowków i tzw. „kieszeni” o dużej głębokości, konieczne jest użycie frezów o odpowiedniej długości. Stosunek długości frezu do jego średnicy, z czym związana jest jego sztywność, w znacznym stopniu wpływa na dokładność geometryczną i chropowatość powierzchni obrabianych przedmiotów [5, 8].

Do czynników wpływających na błędy wymiarów wytwarzanych przedmiotów zalicza się również ciepło wydzielające się w procesie skrawania, które powoduje wzrost temperatury narzędzia i przedmiotu obrabianego. Zmiany wymiarów narzędzia i przedmiotu wskutek rozszerzalności cieplnej wpływają na wartość błędów obróbkowych [11].

Dokładność obróbki zależy również od właściwości materiału obrabianego. Na ogół trudniej uzyskać wymaganą dokładność w przypadku obróbki materiałów trudnoskrawalnych. Do takich materiałów należy zaliczyć utwardzoną wydzieleniowo stal nierdzewną 15-5PH, stosowaną w przemyśle lotniczym i jądrowym [3].

Celem pracy jest ocena powtarzalności błędów wymiarów przedmiotów ze stali 15-5PH oraz 4330

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne badanych materiałów
Table 1. Chemical composition and mechanical properties of the tested materials

Stal 4330											
Skład chemiczny [%]											
C	Si	Mn	S	P	Cr	V	Ni	Mo	Cu	Fe	
0,32	0,30	0,91	0,001	0,006	0,84	0,08	1,85	0,47	0,07	reszta	
Właściwości mechaniczne											
Rm [MPa]		Rp _{0,2} [MPa]		A [%]		Z [%]		twardość [HRC]			
1613		1385		13		53		47			
Stal 15-5PH											
Skład chemiczny [%]											
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cb	Cu		
0,48	0,37	0,64	0,001	0,18	14,27	5,03	0,19	0,31	3,46		
Właściwości mechaniczne											
Rm [MPa]		Rp _{0,2} [MPa]		A [%]		Z [%]		twardość [HRC]			
1323		1172		17		44		42			

wykonanych frezowaniem, w aspekcie określenia wartości tolerancji możliwej do uzyskania w danych warunkach produkcyjnych.

Metodyka badań

Do badań użyto próbek wykonanych ze stali 15-5PH oraz 4330. Skład chemiczny i właściwości fizyczne badanych stali przedstawiono w tab. 1. Stal 15-5PH ze względu na swoje właściwości należy do grupy materiałów trudnoobrabialnych.

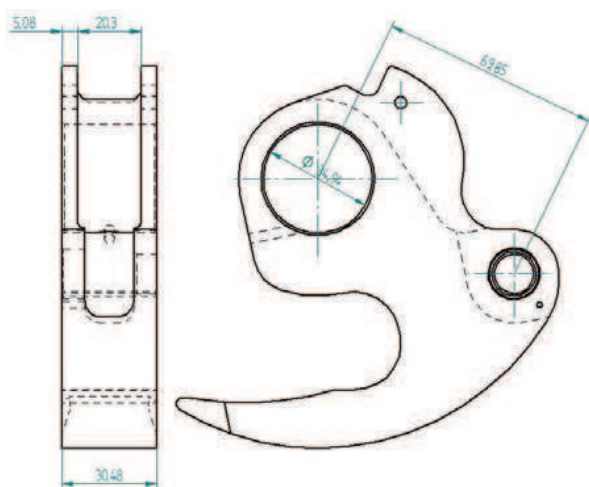
Proces frezowania przeprowadzono na trzyosiowym centrum obróbkowym Avia VMC-800HS, wyposażonym w sterowanie Heidenhain. Maszyna ma wrzeczono o mocy 25 kW i maksymalnej prędkości obrotowej 24 tys. obr./min, dzięki czemu dedykowana jest do realizacji procesów obróbki HSM.

Proces frezowania polegał na wykonaniu serii elementów o złożonym kształcie, a następnie przeprowadzeniu pomiarów charakterystycznych wymiarów na współrzędnościowej maszynie Vista ZEISS. Model CAD wraz z charakterystycznymi wymiarami pokazano na rys. 1. Element typu dźwignia został wykonany w ilości czterech sztuk z dwóch badanych materiałów. Do wykonania elementu na trzyosiowym centrum niezbędna była obróbka w czterech zamocowaniach. Wykorzystano frezy palcowe pełnowęglkowe o średnicach $D = 12$ i $D = 6$ mm oraz frez kulisty do obróbki profilowej o średnicy $D = 6$ mm. Czas obróbki (wg programów CAM) elementu wykonanego ze stali 15-5PH wyniósł $t = 217$ min, w tym ruchy jałowe 11,13 min, a ruchy ustawcze 0,72 min. Całkowita długość ścieżki narzędzia wyniosła 63435 mm. W przypadku obróbki stali 4330, z uwagi na zastosowanie takiej samej strategii obróbki czasy jałowe i ustawcze oraz ścieżka narzędzia były takie same, natomiast lepsza skrawalność pozwoliła na zastosowanie wyższych parametrów i skrócenie czasu obróbki do $t = 166$ min.

Niektóre spośród mierzonych wymiarów, w aspekcie współpracy elementu w złożeniu są szczególnie istotne. Wymiary te zaznaczono na rys. 1 oraz zestawiono w tab. 2.

Tabela 2. Wymiary istotne z uwagi na montaż
Table 2. Important assembly dimensions

Wymiar nominalny (mm)	69,85	34,935	30,48	20,3	5,08
Identyfikacja	rozstaw otworów	średnica otworu	wysokość elementu	rozstaw kołnierzy	grubość kołnierza



Rys. 1. Obrabiany element typu dźwignia
Fig. 1. Workpiece type lever

Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono przykładowy element typu dźwignia po obróbce frezowaniem.



Rys. 2. Element typu dźwignia po obróbce frezowaniem
Fig. 2. The lever element after milling

W tab. 3 i 4 przedstawiono wyniki pomiarów dokładności geometrycznej serii czterech elementów wykonanych ze stali 15-5PH (tab. 3) i 4330 (tab. 4). Określono wymiar maksymalny i minimalny z serii. Ponadto obliczono wielkości pozwalające wyznaczyć tolerancje i odchyłki.

Na podstawie wyników zawartych w tab. 3 i 4 określono klasę dokładności i odchyłki. W tab. 5 przedstawiono w jakiej klasie dokładności zostały wykonane poszczególne składowe elementy typu dźwignia. Ponadto podano odchyłkę w postaci symbolu literowego dla wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych oraz odchyłkę liczbowa dla rozstawu otworów.

Dla obydwu serii elementów wykonanych ze stali 15-5PH oraz 4330, maksymalną odchyłkę odnotowano w przypadku pomiaru grubości kołnierza. Dla serii 4 elementów wykonanych ze stali 15-5PH uzyskano klasę dokładności IT13, natomiast dla stali 4330 klasa dokładności wyniosła IT11. Może to być spowodowane niewystarczającą powtarzalnością zamocowania przedmiotu obrabianego. Wykonywana część, ze względu na skomplikowaną geometrię, wymusza wielokrotne mocowanie do kolejnych zabiegów technologicznych. Powoduje to powielanie błędów mocowania i błędów pomiarów położenia miejsca zerowego przy pomocy sondy przedmiotowej.

Tabela 3. Wyniki badań dokładności geometrycznej demonstratorów wykonanych ze stali 15-5PH
Table 3. Results of geometric accuracy of elements made of 15-5PH steel

Wymiar nominalny N [mm]	wartość zmierzona, mm				analiza z serii elementów				
	dźwignia nr 1	dźwignia nr 2	dźwignia nr 3	dźwignia nr 4	wymiar maksymalny B	wymiar minimalny A	różnica B – A	różnica B – N	różnica A – N
69,85	69,844	69,858	69,850	69,818	69,858	69,818	0,040	0,008	-0,032
34,935	34,910	34,925	34,893	34,9	34,925	34,893	0,032	-0,010	-0,042
30,48	30,507	30,559	30,493	30,503	30,559	30,493	0,066	0,079	0,013
5,08	5,164	5,176	5,342	5,293	5,342	5,164	0,178	0,262	0,084
20,3	20,300	20,305	20,300	20,309	20,309	20,300	0,009	0,009	0

Tabela 4. Wyniki badań dokładności geometrycznej demonstratorów wykonanych ze stali 4330
Table 4. Results of geometric accuracy of elements made of 4330 steel

Wymiar nominalny N [mm]	wartość zmierzona, mm				analiza z serii elementów				
	dźwignia nr 1	dźwignia nr 2	dźwignia nr 3	dźwignia nr 4	wymiar maksymalny B	wymiar minimalny A	różnica B – A	różnica B – N	różnica A – N
69,85	69,851	69,856	69,842	69,827	69,856	69,827	0,029	0,006	-0,023
34,935	34,936	34,936	34,906	34,888	34,936	34,888	0,048	0,001	-0,047
30,48	30,509	30,509	30,559	30,457	30,559	30,457	0,102	0,079	-0,023
5,08	5,280	5,281	5,207	5,280	5,281	5,207	0,074	0,201	0,127
20,3	20,311	20,311	20,264	20,291	20,311	20,264	0,047	0,011	-0,036

Tabela 5. Odchyłki i klasy dokładności wykonania poszczególnych składowych elementu typu dźwignia
Table 5. Deviations and accuracy classes of individual components of the lever type element

Wymiar nominalny N [mm]	Identyfikacja	stal 15-5-PH		stal 4330	
		klasa dokładności	odchyłka	klasa dokładności	odchyłka
69,85	rozstaw otworów	IT8	69,85 ^{+0,008} _{-0,032}	IT7	69,85 ^{+0,006} _{-0,023}
34,935	średnica otworu	IT8	M8	IT9	Js11
30,48	wysokość elementu	IT10	k10	IT11	js11
5,08	grubość kołnierza	IT13	> zc11	IT11	> zc11
20,3	rozstaw kołnierzy	IT5	H6	IT9	Js10

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej obróbki serii elementów typu dźwignia, wykonanych ze stali 15-5PH i 4330, można stwierdzić, że:

- z uwagi na trudnoobrabialność stali 15-5-PH czas wykonania elementu typu dźwignia jest o 51 min dłuższy, co stanowi wzrost o 30,7% w stosunku do elementu wykonanego ze stali 4330,
- niższe parametry obróbki stali trudnoobrabialnej 15-5PH pozwoliły na zachowanie porównywalnej dokładności wykonania elementów w stosunku do stali 4330,
- dla poprawy dokładności wykonania kołnierza (wymiar nominalny 5,08 mm), należałoby dokonać korekty procesu technologicznego i przeprowadzić obróbkę obu stron kołnierza w jednym zamocowaniu.
- dla przedmiotów o skomplikowanej geometrii zaleca się stosowanie przyrządów obróbkowych w celu zachowania powtarzalności wartości wymiarów lub zmniejszenie ilości mocowań, wprowadzenie kontroli międzyoperacyjnej lub zachowanie naddatku dla późniejszego niwelowania błędów.

LITERATURA

- [1] Barylski A., O. Szabo. 1996. „Technologiczne problemy dokładnej i ultraprecyzyjnej obróbki wiórowej i ścierniej. Część II”. *Przegląd Mechaniczny* (7): 26–27.
- [2] Burek J. i in. 2014. „Wpływ strategii obróbki na dokładność kształtową przy pięcioosiowym frezowaniu elementów cienkościennych frezem kulistym”. *Mechanik* (8–9): 273–280/733.
- [3] Chomienne V. et. al. 2016. „Influence of part's stiffness on surface integrity induced by a finish turning operation of 15-5PH stainless steel”. *Procedia CIRP* (45): 19–22.
- [4] Kuczmaszewski J., P. Pieško. 2016. „Analiza wpływu prędkości skrawania na odkształcenia po frezowaniu elementów cienkościennych wykonanych ze stopu EN AW-2024”. *Mechanik* (8–9).
- [5] Kuczmaszewski J., K. Zaleski. 2015. „Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu”. Politechnika Lubelska.
- [6] Łunarski J., W. Szabajkovicz. 1993. „Automatyzacja procesów technologicznych montażu maszyn”. Warszawa: WNT.
- [7] Miko E., A. Przybytniewski. 2015. „Badania dokładności pracą tokarki CTX Alpha 500”. *Mechanik* (8–9): 460–468/727.
- [8] Pieško P., I. Zagórski. 2011. „Analiza dokładności obróbki, frezami trzpieniowymi o zmiennej sztywności, tulei cienkościennych wykonanych ze stopu AlMn1”. [W:] Świć A. (red.) „Innowacyjne procesy technologiczne”. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe.
- [9] Puff T., W. Sołtys. 1980. „Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń”. Warszawa: WNT.
- [10] Skoczyński W. 2002. „Analiza błędów przedmiotu obrabianego spowodowanych czynnikami wynikającymi z własności obrabiarek i procesu skrawania”. *Przegląd Mechaniczny* (11): 13–19.
- [11] Zaleski K., J. Matuszak. 2011. „Odkształcenia cieplne przedmiotów ze stopu aluminium w toczeniu”. [W:] Grzesik W. (red.) „Obróbka skrawaniem. Nauka a przemysł”. Politechnika Opolska.
- [12] Zębala W. 2010. „Minimalizacja błędów obróbki przedmiotów cienkościennych”. *Inżynieria Maszyn* (3): 45–54.

Badania realizowane w ramach projektu sektorowego INNOLOT (Akronim AMpHOra) pt. „Badania technologii przyrostowych procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej”, koordynowanego przez Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. – PZL Mielec, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w zakresie Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Priorytet I., Działanie 1.5 PO IG., nr umowy INNOLOT //6/NCBR/2013

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

dr hab. inż. Kazimierz Zaleski, prof. PL – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: k.zaleski@pollub.pl

dr inż. Jakub Matuszak – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: j.matuszak@pollub.pl

mgr inż. Tomasz Pałka – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: t.palka@pollub.pl

mgr inż. Janusz Mądry – Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o. – PZL Mielec, ul. Wojska Polskiego 3, 39-300 Mielec

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ГИЛЬЗ ГИДРОЦИЛИНДРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

*Increasing the precision of the hydrocylinder deep hole's machining based
on simulations of the errors formation process*

*Zwiększenie dokładności obróbki otworów tulei cylindrowych na podstawie
modelowania procesów generowania błędów*

Asia GORELOVA, Mark KRISTAL

Аннотация: Авторами предложена математическая модель формирования огранки глубокого отверстия при его растачивании. Обосновано, что огранка проявляется как технологическая наследственность погрешностей заготовки. Теоретические положения подтверждены методом компьютерного моделирования процесса формообразования при чистовом растачивании глубокого отверстия гильзы гидроцилиндра выдвигателя стрелы крана. Предложен метод минимизации погрешностей отверстия.

Ключевые слова: огранка, погрешности растачивания, компьютерное моделирование, математическое моделирование процесса растачивания.

Summary: A new mathematical model is proposed where faceting pattern formation is treated as a consequence of the hole's axis technologically inherited straightness error. The analysis of the model allowed to establish that the straightness error Δ of the hole's axis primarily determines the faceting pattern formation process. Theoretical assumptions are in agreement with the results of computer modeling of the shape formation during the finish boring of the crane boom extension hydrocylinder. An improved method for errors minimization is developed.

Keywords: faceting pattern, boring error, boring process computer modeling, boring process mathematical modeling.

Streszczenie: Autorzy zaproponowali model matematyczny kształtowania graniastości głębokiego otworu w trakcie jego roztaczania. Udowodniono, że graniastość pojawia się jako dziedziczność technologiczna błędów półfabrykatu. Teoretyczne rozważania potwierdzono metodą komputerowego modelowania procesu kształtowania w trakcie wykańczającego roztaczania głębokiego otworu tulei cylindra hydraulicznego, podnoszącego ramię dźwigu. Zaproponowano metodę minimalizacji błędów otworu.

Słowa kluczowe: graniastość, błędy roztaczania, modelowanie komputerowe, modelowanie matematyczne procesu roztaczania

Введение

В качестве силовых элементов оборудования нефтегазового добывающего комплекса зачастую используют гидроцилиндры. Они входят в состав подъемного оборудования (краны, домкраты, подъемные механизмы) и в механизмы горизонтального перемещения сверхтяжелых объектов (верхние строения морских стационарных платформ, кантиливеры самоподъемных плавучих буровых установок, буровые порталы). Большую долю из них составляют гидроцилиндры с длинами из диапазона $l \in [965...7500]$ мм, диаметрами – $d \in [100...250]$ мм, с толщиной стенок 10...14 мм. Они входят в состав опорных колонн для подъема плавучих буровых установок и осуществляют выдвигание стрелы различных видов бортовых кранов. Некоторые из них работают под давлением, достигающим 50 МПа, в условиях

повышенной влажности, воздействия высоких и низких температур.

От качества таких гидроцилиндров напрямую зависят надежность и безопасность эксплуатации оборудования, основной причиной поломок которого является нарушение герметичности гидроцилиндров. Это обуславливает требования к точности обработки деталей, входящих в их состав. Особенно это касается обработки глубоких отверстий длинномерных гильз гидроцилиндров, которые обладают низкой жесткостью. Ввиду того, что обработка описанной группы заготовок сопровождается вибрациями, большинство известных методов повышения точности обработки гильз гидроцилиндров направлены на демпфирование колебаний системы «расточная головка-заготовка» [1, 2, 3]. Этот подход недостаточно эффективен, так как вибрации являются лишь следствием динамических процессов, происходящих при глубоком

расточивании длинномерных нежестких тонкостенных гильз гидроцилиндров, а исследований причин возникновения описанных колебаний и влияющих на это факторов в литературе недостаточно. Известные математические модели образования погрешностей [4, 5] носят частный эмпирический характер и не описывают влияние погрешностей заготовки на точность обработки. Следовательно, разработка математической модели образования погрешностей при глубоком расточивании длинномерных нежестких тонкостенных гильз гидроцилиндров, с учетом погрешностей заготовки и разработка на ее основе методов повышения точности является актуальной научной и технической задачей.

Математическое моделирование процесса глубокого расточивания гильзы гидроцилиндра

Широко распространенной является схема обработки, где заготовку устанавливают в вертлюге и роликовых люнетов (Рис. 1). При этом расточная головка (Рис. 2) имеет движение подачи и содержит следующие конструктивные элементы: корпус 1, окно для установки расточного блока 2, направляющие шпонки 3, сегменты 4, конические элементы 5, кольцо 6, пакеты тарельчатых пружин 7, упорную втулку 8, радиально-подвижные опоры 9, зазор 10. Элементы 4...10 образуют гаситель продольных колебаний системы «расточная головка-заготовка».

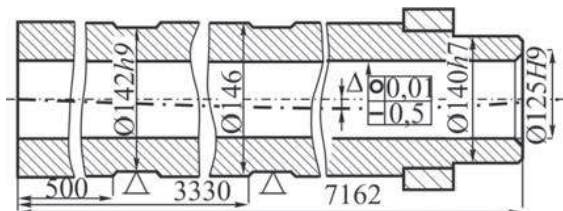


Рис. 1. Закрепление длинномерной заготовки
Fig. 1. The long-axis workpiece's mounting

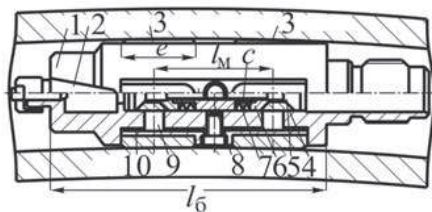


Рис. 2. Расточная головка с виброгасителем
Fig. 2. Boring head

В процессе обработки призматические направляющие шпонки контактируют с поверхностью заготовки точками, находящимися на вершинах призмы. Положение точек контакта изменяется при вращении заготовки, при этом, на расточную головку действуют следующие силы (Рис. 3): P_x, P_y, P_z – составляющие силы резания; S – подача; F – сила поджатия

направляющей шпонки; F_0 – сила начального поджатия пакета пружин виброгасителя; N – сила реакции направляющих шпонок.

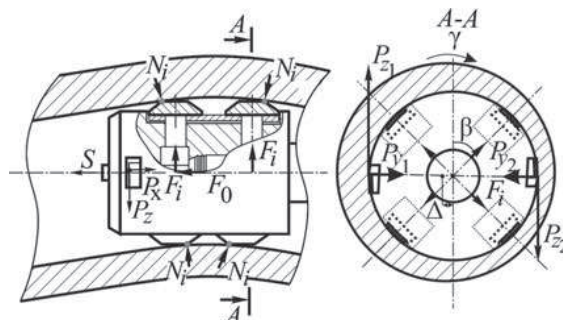


Рис. 3. Схема сил, действующих на расточную головку
Fig. 3. Forces acting on the boring head

Сила поджатия F различна для каждой направляющей шпонки и определяется, как:

$$F = (4Es / (1 - \mu^2) Y D_1^2) [(s_{\max} n - s)(s_{\max} n - 0,5s)t_1 + t_1^3] \quad (1)$$

Здесь E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; Y – коэффициент, зависящий от типоразмера пружины; D_1 – наружный диаметр пружины; s_{\max} – максимальная деформация пружины; $s = \Delta \cos(\gamma + \beta)$ – рабочая деформация пружины; n – количество пружин в пакете; t_1 – толщина пружины. На основе системы сил и моментов, действующих на расточную головку, получены изменения величин результирующей силы F_0 и момента M_0 (Рис. 4), действующих в центре O . Предложено аппроксимировать полученное изменение момента M_0 функцией:

$f(\gamma) = -M_0 \cdot \gamma - \gamma_{кр} / |\gamma - \gamma_{кр}|$, где $\gamma_{кр}$ – угол поворота заготовки, при котором происходит изменение момента M_0 (Рис. 5). Уравнение движения расточной головки с учетом разложения аппроксимирующей функции в ряд Фурье записано в виде:

$$J\ddot{\varphi} + k_d\dot{\varphi} + M_F\varphi = f(\gamma_{кр}), \quad (2)$$

где J_0 – момент инерции расточной головки; φ – угол наклона оси расточной головки; M_F – момент силы упругого подвеса направляющих шпонок относительно центра масс расточной головки; k_d – коэффициент демпфирования.

При этом $f(\gamma_{кр}) = 0,5a_0 + b_1 \sin(\gamma) + b_k \sin(k\gamma) + \dots + b_n \sin(n\gamma)$. Решение (2) с учетом (1) описывает поперечные колебания расточной головки, откуда получено выражение для расчета отклонения H от круглости (огранки) поперечного сечения отверстия в виде:

$$H = \frac{JM_0 \sin(\gamma_{кр} \cdot k) \sin(k)}{\omega^2(k_\omega^2 - k^2)}, \quad (3)$$

где k – номер гармоники разложения в ряд Фурье; $k_\omega = \omega_0 / \omega$ – отношение частоты собственных колебаний расточной головки к удвоенной частоте вращения заготовки.

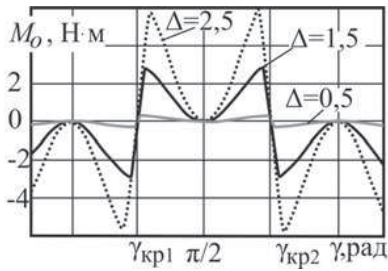


Рис. 4. Изменение момента M_O при различных Δ отклонениях оси заготовки от прямолинейности
 Fig. 4. The straightness error Δ of the hole's axis influence at torque M_O

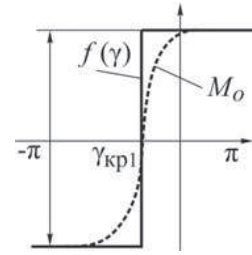


Рис. 5. Аппроксимация функции M_O предложенной функцией $f(\gamma)$
 Fig. 5. The M_O approximation of the proposed function $f(\gamma)$

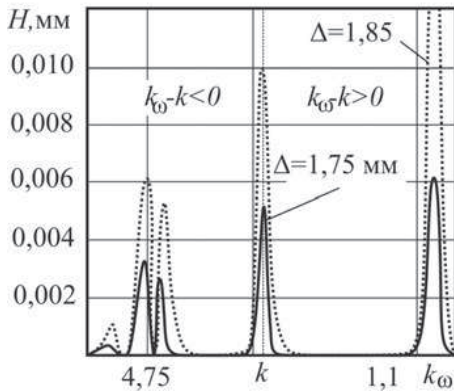


Рис. 6. Зависимость величины H огранки от соотношения частот k_ω
 Fig. 6. The dependence of the faceting pattern H of the frequency ratio k_ω

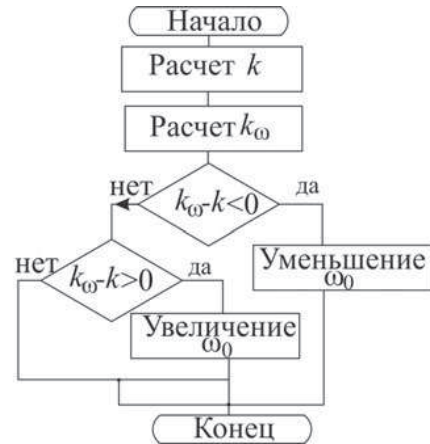


Рис. 7. Алгоритм минимизации огранки глубокого отверстия
 Fig. 7. The algorithm of deep hole's faceting pattern minimization

При равенстве значения $k_\omega = k$ из (3) возникает резонанс, но k -целое число, а отношение k_ω зависит от выбранных технологических параметров, конструкции инструмента и может быть нецелым, тогда параметры колебаний расточной головки будут определяться амплитудой и частотой ближайшей целой к вычисленному k гармонике (Рис. 6). Предложен алгоритм (Рис. 7) определения этого значения и его близости к резонансной гармонике, позволяющий скорректировать параметры технологического процесса для работы динамической системы в зоне, далекой от резонанса. Уменьшение или увеличение ω_0 достигают подбором жесткости подвеса направляющей

шпонки или массы элементов расточной головки. На основании расчетов по предложенной модели установлено, что увеличение Δ отклонения оси заготовки от прямолинейности приводит к росту амплитуды «скачка» результирующего момента сил M_O (Рис. 4) от которого зависит величина H огранки глубокого отверстия, что указывает на наличие технологической наследственности от погрешности отклонения Δ оси заготовки от прямолинейности в виде огранки. Определено, что зависимость величины огранки H от жесткости упругого подвеса носит бифуркационный характер (Рис. 8, б). Снижение величины H огранки глубокого отверстия достигают при

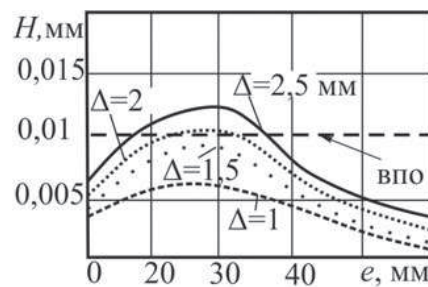
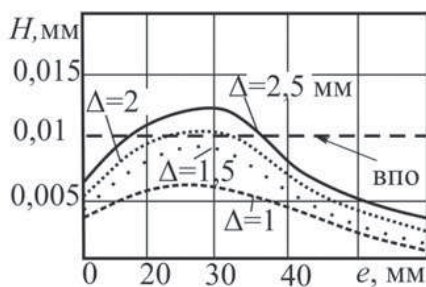


Рис. 8. Зависимость величины H огранки от: а – длины e направляющей шпонки; б – количества n пружин виброгасителя; впо – верхнее предельное отклонение от круглости для гильзы гидроцилиндра телескопирования (Рис. 1)
 Fig. 8. The dependence of the faceting pattern H of: а – the guide pads e length; б – the number of damper springs n ; впо- the upper limit for deviations from roundness (Fig. 1)

длине e направляющей шпонки, превышающей 35 мм (Рис. 8, а).

Предложен метод повышения точности обработки глубокого отверстия, при котором растачивание производят модернизированной расточной головкой с направляющими шпонками с галтелью, что позволяет предотвратить скачкообразное изменение момента M_o и снизить огранку.

Компьютерное моделирование процесса растачивания глубокого отверстия предложенным методом

Для подтверждения теоретических предположений проведено компьютерное моделирование технологического процесса растачивания глубокого отверстия (Рис. 9) длинномерной нежесткой тонкостенной гильзы расточной головкой с призматическими направляющими шпонками (стандартными) и с предложенными автором направляющими шпонками, имеющими галтель радиуса r [6].

Для определения отклонения формы поперечного профиля отверстия контролировалось перемещение точки на вершине резца твердотельной модели расточной головки. Модель расточной головки, борштанги и обрабатываемой заготовки выполнена в программном комплексе SolidWorks. Получены зависимости величины огранки H поперечного профиля глубокого отверстия от формы направляющей шпонки, значения радиуса r , жесткости c_0 подвеса, длины e направляющей шпонки (Рис. 10, б, в, г). Определены диапазоны значений описанных параметров, обеспечивающие минимизацию огранки H для обработки отверстия длиной $l=7000$ мм, диаметром $D=125$ мм с отклонением Δ от прямолинейности оси отверстия заготовки из диапазона $\Delta \in [1...3,5]$ мм. Они составили: $c_0 \in [930...1430]$ Н/мм; $e \in [44...48]$ мм; $r \in [65...75]$ мм. Предложено назначать радиус r по выражению: $r = e_2 / 16\Delta$, где e – длина направляющей шпонки; Δ – отклонение оси заготовки от прямолинейности.

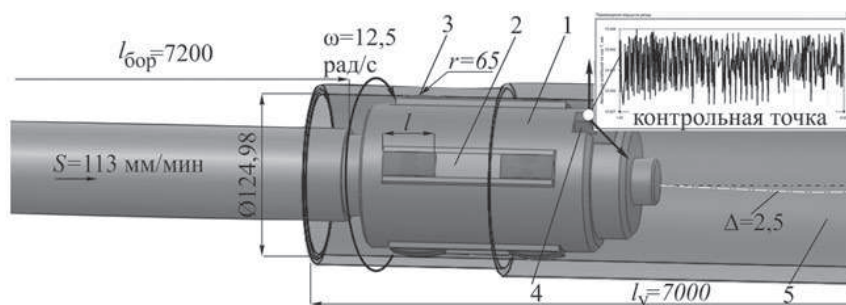


Рис. 9. Компьютерное моделирование процесса образования погрешностей отверстия
Fig. 9. Computer simulation of the errors formation process

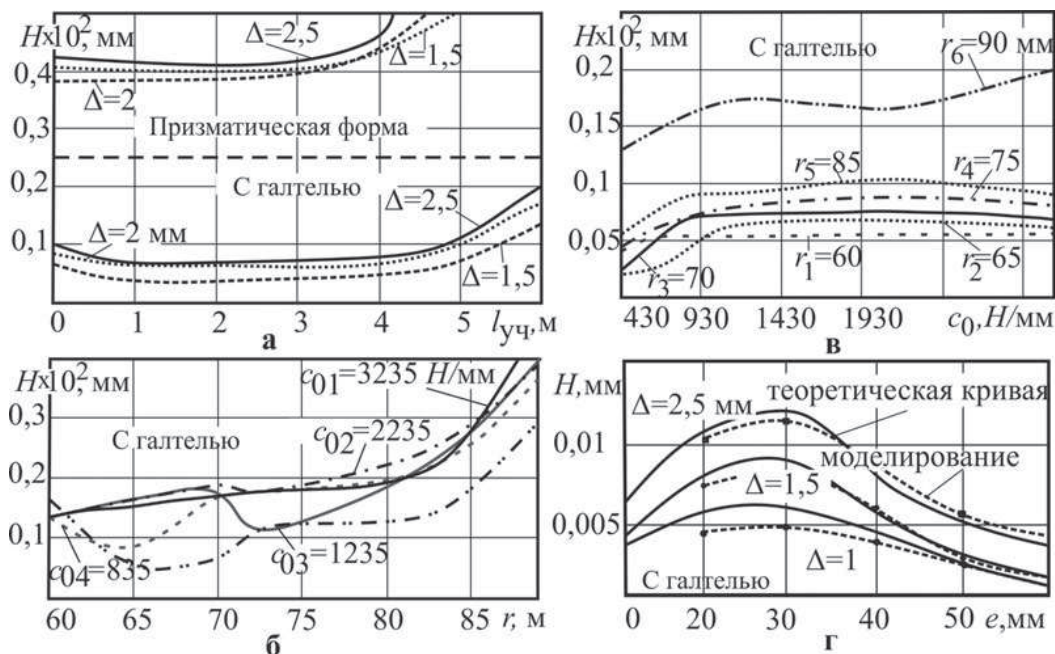


Рис. 10. Результаты компьютерного моделирования растачивания
Fig. 10. The results of computer simulation of the errors formation process

Выводы и результаты

1. Предложенная математическая модель образования погрешностей формы поперечного профиля глубокого отверстия при его растачивании позволила установить, что:
 - 1.1 Огранка проявляется как технологическая наследственность отклонения Δ оси заготовки от прямолинейности.
 - 1.2 Причиной образования огранки глубокого отверстия являются поперечные колебания расточной головки, возникающие вследствие скачкообразного изменения момента M_D , который приводит к резонансу на частоте одной или нескольких гармоник, возникающих при разложении этого «скачка» в ряд Фурье.
 - 1.3 Степень огранки соответствует номеру k гармоники, на частоте которой возникает резонанс, а величина H огранки определяется амплитудой колебаний k -ой гармоники.
2. Минимизация огранки достигается при плавном изменении площадки контакта направляющих шпонок с обработанной поверхностью за счет наличия галтели у последних.
3. Компьютерное моделирование технологического процесса образования огранки при глубоком растачивании позволило подтвердить полученные теоретически оптимальные параметры: жесткости c_0 подвесов, длины e и радиуса r галтели продольного сечения направляющих шпонок, обеспечивающие снижение величины H огранки на порядок при обработке отверстия длиной $l=7000$ мм, диаметром $D=125$ мм с отклонением Δ от прямолинейности оси отверстия

заготовки из диапазона $\Delta \in [1...3,5]$ мм. Они составили: $c_0 \in [930...1430]$ Н/мм; $e \in [44...48]$ мм; $r \in [65...75]$ мм.

Список литературы

- [1] Messaoud A., Weihs C., Hering F. Detection of chatter vibration in drilling process using multivariate control charts // Computational Statistics & Data Analysis. 2008. P. 3208–3219.
- [2] Chin D., Yoon M., Sim S. Roundness modeling in BTA deep hole drilling // Precision Engineering. 2005. P. 176–188.
- [3] Пат. US 20050258580 МПК F16M 1/00. Damping apparatus for the damping of vibrations / Anders Digernes. 14.04.2003.
- [4] Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.Н., Плужников С.К. Обработка глубоких отверстий. Л.: Машиностроение, 1988. 269 с.
- [5] Ушаков А.И. Динамические процессы при обработке глубоких отверстий: дис. канд. техн. наук. Москва, 1974. 177с.
- [6] Горелова А. Ю., Кристаль М. Г. Совершенствование конструкции инструмента на основе моделирования процесса растачивания гильзы гидроцилиндра // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2016. Вып. 11 (ч. 2). С. 105–115. (1,27 п. л.).

Горелова Ася Юрьевна, аспирант каф. АПП, forasyoo@gmail.com, Россия, 400005 Волгоград пр. им. Ленина 28, Волгоградский государственный технический университет,

Кристаль Марк Григорьевич, д-р техн. наук, проф. каф. АПП, crysma@mail.ru, Россия, 400005 Волгоград пр. им. Ленина 28 Волгоград, Волгоградский государственный технический университет.

WPŁYW ROZKŁADU TEMPERATURY I ODKSZTAŁCEŃ Lutowanych POŁĄCZEŃ MONTAŻOWYCH NA TRWAŁOŚĆ CHŁODNIC SAMOCHODOWYCH

Impact of temperature and stresses distribution of brazed joints on durability of automotive radiators

Katarzyna PETA, Karol GROCHALSKI, Marcin WIŚNIEWSKI, Jan ŻUREK

S t r e s z c z e n i e: W pracy omówiono ważniejsze czynniki determinujące trwałość połączeń lutowanych w chłodnicach samochodowych. Szczególną uwagę zwrócono na powstające (podczas ich eksploatacji) naprężenia cieplne, wynikające z nierównomiernego rozkładu temperatury w materiale. W tym celu przedstawiono wyniki tensometrycznych pomiarów ich odkształceń, uzupełnione pomiarami temperatury za pomocą termoelementów. Badania realizowano w różnych warunkach eksploatacyjnych, zmieniając głównie temperaturę cieczy chłodzącej, przepływającej w układzie chłodzenia silnika oraz powietrza opływającego kabinę samochodu. Porównano wyniki pomiarów temperatury i odkształceń połączeń lutowanych, uzupełniając je obserwacjami mikroskopowymi pęknięć zmęczeniowych. Podsumowanie zawiera uzasadnienie celowości badań lutowanych połączeń montażowych.

S ł o w a k l u c z o w e: pomiary temperatury, pomiary odkształceń, chłodnice samochodowe

A b s t r a c t: The paper contains the major factors determining the durability of brazed joints used in automotive radiators. Particular attention was paid to the thermal stresses which are caused by uneven temperature distribution in the material during their exploitation. For this, the results of measurements of stresses in radiators, supplemented by temperature measurements by the thermocouples, were presented. The research was conducted in different exploitation conditions, mainly by changing the temperature of the air flowed over the car cabin. Moreover, was compared the obtained results of measurements of brazed joints, complemented by observations and measurements of tightness. The summary contained a justification of expediency analysis of assembly brazed joints.

K e y w o r d s: temperature measurements, stresses measurements, automotive radiators

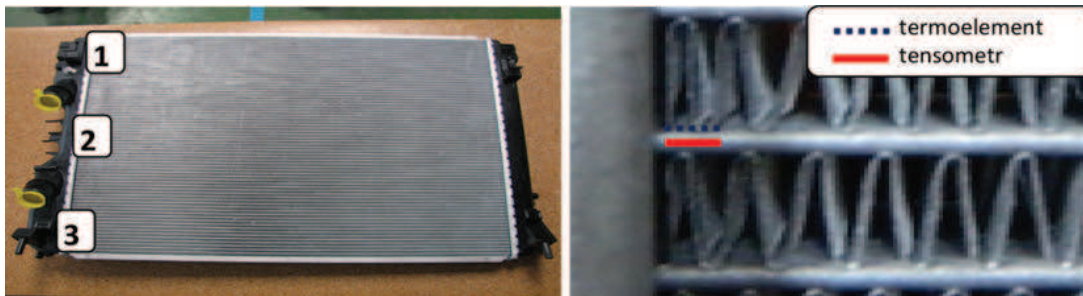
Wprowadzenie

Chłodnice cieczy stosowane w układzie chłodzenia silnika muszą spełniać liczne wymagania eksploatacyjne, związane z warunkami ich pracy. Narażone są one na działanie szoków cieplnych, związanych z przepływem cieczy chłodzącej o gwałtownie zmieniającej się temperaturze z zakresu -20°C – 100°C [6]. Podczas ich eksploatacji powstają nie tylko lokalne odkształcenia plastyczne w strefie połączeń lutowanych, ale również pęknięcia, których konsekwencją jest zmiana właściwości mechanicznych łączonych materiałów. Obciążenia cieplne występujące podczas użytkowania chłodnic samochodowych, ze względu na intensywność działania i wywoływane skutki, uznaje się za podstawowe podczas weryfikacji ich jakości. Efektem odbierania i oddawania ciepła przez połączenia lutowane jest zwiększanie lub zmniejszanie temperatury, a to z kolei powoduje zmianę ich wymiarów liniowych. W przypadku ograniczonej możliwości odkształcania się konstrukcji powstają lokalne naprężenia cieplne, których równomierny rozkład ściśle zależy od gradientów temperatury, jednorodności właściwości mechanicznych i struktury metalograficznej stosowanych materiałów. Konsekwencją ciągłego działania obciążeń cieplnych na połączenia lutowane jest ich zmęczenie cieplne, widoczne w postaci pęknięć [2, 4, 5, 8].

Odporność na szoki cieplne stanowi podstawowe kryterium trwałości chłodnic samochodowych, które determinują: konstrukcja, technologia produkcji, dokładność wykonania części i jakość ich montażu. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń chłodnic samochodowych w warunkach działania obciążeń cieplnych, wynikających ze zmian temperatury cieczy chłodzącej i powietrza opływającego kabinę pojazdu. Na ich podstawie zlokalizowano najbardziej narażone na uszkodzenia obszary połączeń lutowanych, których identyfikacja pozwala na minimalizowanie prawdopodobieństwa wycieku cieczy chłodzącej z układu chłodzenia silnika [1, 3, 7]. W dostępnych pracach naukowych, zdaniem autorów, niewystarczająco omówiono wpływ warunków klimatycznych na trwałość chłodnic samochodowych, dlatego przeprowadzono badania zmierzające do określenia zależności odkształcenia ich konstrukcji od temperatury powietrza opływającego pojazd.

Metodyka badań

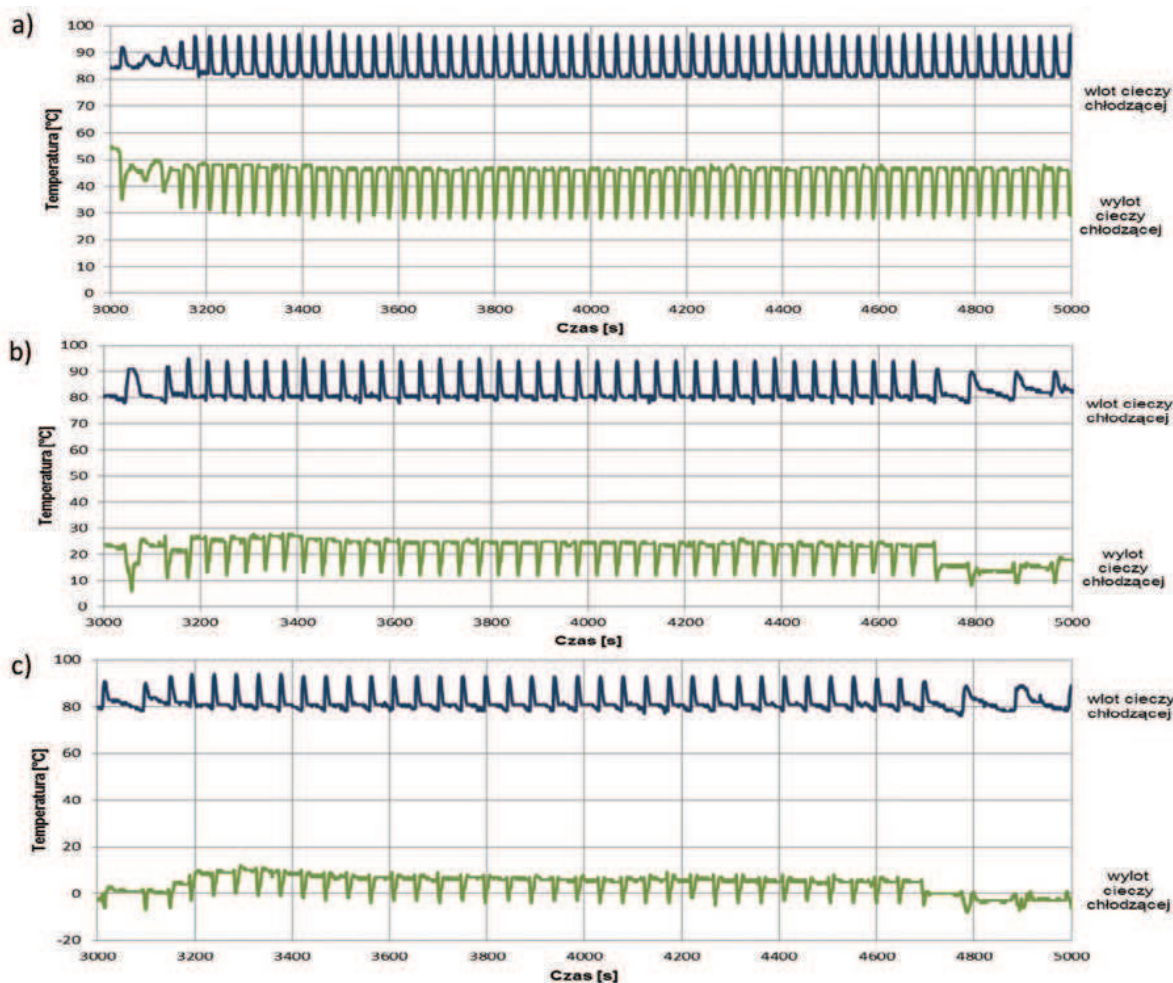
Pomiarom temperatury i odkształceń poddano samochodowe chłodnice cieczy wykonane z aluminiowych taśm platerowanych, zbudowanych z materiału rdzenia (stopu aluminium-mangan AA3003) oraz lutu (stopu aluminium-krzem AA4343). Ten drugi rozpoczyna topnienie



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia tensometrów i termoelementów w analizowanej konstrukcji
 Fig. 1. The scheme of location of strain gauges and thermocouples in analyzed construction

w temperaturze 582°C i po krystalizacji tworzy połączenia lutowane w wymienniku ciepła. Realizowane w trakcie użytkowania samochodu badania obejmowały tensometryczne pomiary odkształceń oraz temperatury za pomocą termoelementów. Te pierwsze pozwalają określić wartości odkształceń w strefie łączonych materiałów powodowanych przez działające na nią siły zewnętrzne. W tym celu zastosowano trzy liniowe tensometry rezystancyjne o właściwościach samokompensujących o nominalnej oporności $120\Omega \pm 0,35\%$ i współczynnika

kompensacji temperatury dla aluminium $\alpha = 23 \times 10^{-6}/K$. Każdy z nich pracował w układzie ćwierćmostka Wheatstone'a z jednym tensometrem czynnym i trzema rezystorami. Tensometry naklejono na rury cieczy chłodzącej o szerokości 1,65 mm i grubości 0,25 mm. Pomiary temperatury wykonano za pomocą trzech termoelementów wykonanych ze stopu NiCr-NiAl o średnicy 0,5 mm i długości 200 mm. Schemat rozmieszczenia tensometrów i termoelementów na powierzchni chłodnicy samochodowej przedstawiono na rys. 1. Czujniki te zlokalizowano



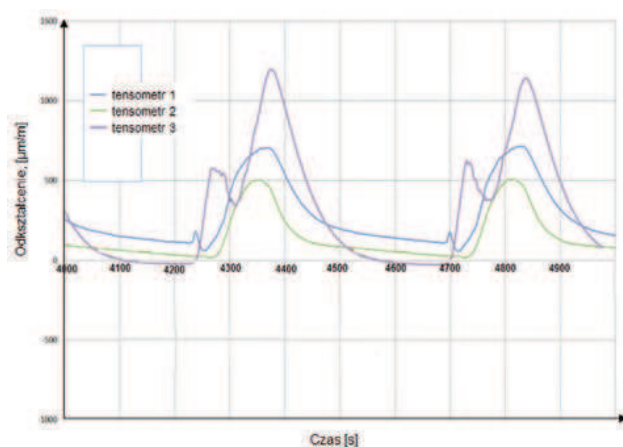
Rys. 2. Rozkład temperatury chłodnicy samochodowej w funkcji czasu w temperaturze powietrza opływającego pojazd: a) 20°C, b) 5°C, c) -10°C
 Fig. 2. The temperature distribution in radiator as a function of time, depending on the temperature of air flowing over the car cabin: a) 20°C, b) 5°C, c) -10°C

w obszarach najbardziej narażonych na powstawanie lokalnych pęknięć, których konsekwencją jest wyciek cieczy chłodzącej z układu chłodzenia silnika. Pomiaru odkształceń i temperatury chłodnic realizowano podczas testowania pojazdu w tunelu klimatyczno-aerodynamicznym, w którym zmieniano temperaturę strumienia powietrza opływającego kabinę samochodu (20°C, 5°C i -10°C). Przepływ powietrza wymuszano za pomocą wentylatorów napędzanych silnikiem prądu stałego.

Wyniki badań

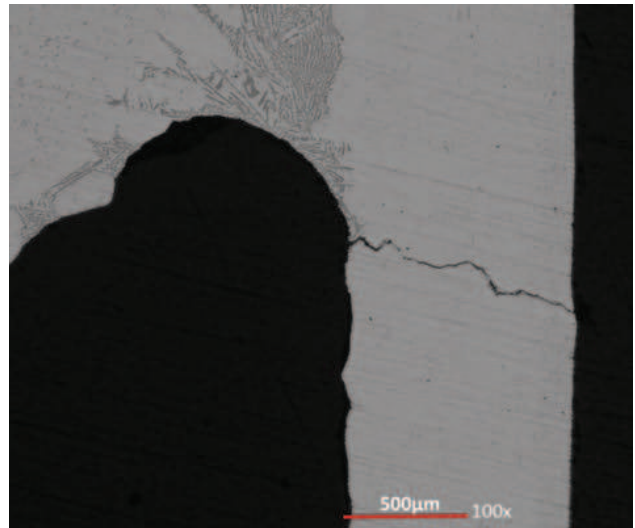
Na podstawie wyników przeprowadzonych badań porównano wartości temperatur rur cieczy chłodzącej, umiejscowionych na wlocie i wylocie chłodnicy samochodowej w powietrzu opływającym kabinę pojazdu 20°C, 5°C i -10°C (rys. 2), a następnie określono odkształcenia analizowanych obszarów (rys. 3).

Wraz ze zmniejszaniem temperatury powietrza otaczającego kabinę samochodu zwiększa się gradient temperatury między dwoma obszarami chłodnicy – jej wlotu i wylotu. Skutkiem intensywniejszego oddziaływania szoków cieplnych na konstrukcję jest zwiększone ryzyko powstania pęknięć zmęczeniowych. Na rys. 3 przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń w temperaturze otoczenia -10°C, przy której obserwowano największe różnice temperatur między wlotem i wylotem cieczy z chłodnicy samochodowej. Największą amplitudą wartości odkształceń charakteryzuje się strefa wylotu cieczy chłodzącej z chłodnicy. Zatem połączenia lutowane znajdujące się w tym obszarze szczególnie narażone są na działanie obciążeń cieplnych, a w efekcie powstawanie ewentualnych pęknięć i poważnych uszkodzeń. Lokalna koncentracja naprężeń, a w konsekwencji największych zmian wymiarów liniowych chłodnicy występuje w chwili otwarcia zaworów termostatu oraz zmiany obiegu cieczy chłodzącej, co zauważalne jest w postaci charakterystycznego pików na wykresie.



Rys. 3. Rozkład odkształceń w funkcji czasu w temperaturze -10°C powietrza opływającego kabinę samochodu
Fig. 3. The strains distribution as a function of time, depending on the temperature -10°C of air flowing over the car cabin

Na rys. 4 przedstawiono widok pęknięcia zmęczeniowego w obszarze połączenia lutowanego po badaniu eksploatacyjnym chłodnicy samochodowej do czasu, w którym nastąpi jej uszkodzenie. Rozpoczyna się ono od pęknięć rur cieczy chłodzącej w strefie łączonych materiałów, a ich skutkiem jest wyciek medium przepływającego w układzie chłodzenia silnika.



Rys. 4. Widok pęknięcia zmęczeniowego w obszarze łączonych materiałów po badaniu trwałości chłodnicy samochodowej
Fig. 4. The view of fatigue crack after the endurance examination of automotive radiator

Wnioski

Na trwałość połączeń lutowanych w chłodnicach samochodowych wpływa zmienność obciążeń termicznych. Wytrzymałość zmęczeniowa tych wyrobów zależy głównie od gradientu i zmienności naprężeń cieplnych, związanych z przepływem medium przepływającego w układzie chłodzenia silnika.

W pracy określono wpływ temperatury powietrza opływającego kabinę pojazdu na powstawanie potencjalnych pęknięć w obszarze łączonych materiałów. Ustalono, że im mniejsza jego temperatura (strefy klimatu chłodnego) tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń chłodnicy samochodowej, których krytyczną konsekwencją jest awaria układu chłodzenia silnika.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań wskazano na podstawowe zależności między wartościami temperatury chłodnic i opływającego je strumienia powietrza w powiązaniu z wartościami odkształceń ich konstrukcji. W dalszych badaniach planowane jest wykonanie pomiarów temperatury i odkształceń wymienników ciepła podczas ich testowania w tunelu klimatyczno-aerodynamicznym, symulując najczęściej spotykane sposoby jazdy samochodem: normalny, autostradowy, górski i miejski.

LITERATURA

- [1] Borrego L. et. al. 2010. "Fatigue crack growth in heat-treated aluminium alloys". *Engineering Failure Analysis* (17): 1–8.
- [2] Kahl S. et. al. 2014. "Fatigue and Creep Properties of Aluminum Heat Exchanger Tube Alloys for Temperatures from 293 K to 573 K (20°C to 300°C)". *Metallurgical and Materials Transactions. A*, vol. 45A, (2): 663–681.
- [3] Kim H., S. Lee. 2012. "Effect of a brazing process on mechanical and fatigue behavior of alclad aluminium 3005". *Journal of Mechanical Science and Technology* (7): 2111–2115.
- [4] Nowacki J., M. Kawiak. 2009. „Naprężenia i odkształcenia własne w złączach lutowanych”. *Przeгляд Spawalnictwa* (7–8): 61–66.
- [5] Prakash R. et. al. 2016. "Design and Modification of Radiator in I.C. Engine Cooling System for Maximizing Efficiency and Life". *Indian Journal of Science and Technology* (2): 1–7.
- [6] Prudhvi G., G. Vinay, G. Babu. 2013. "Cooling Systems in Automobiles & Cars". *International Journal of Engineering and Advanced Technology* (4): 688–695.
- [7] Saigal A., E. Fuller. 2001. "Analysis of stresses in aluminium-silicon alloys". *Computational Materials Science* (21): 149–158.
- [8] Siemińska-Jankowska B., S. Pietrowski. 2003. "The effects of temperature on strength of the new piston aluminium materials". *Journal of KONES Internal Combustion Engines* (3-4): 237–250.

mgr inż. Katarzyna Peta – Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Projektowania Technologii Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: katarzyna.p.peta@doctorate.put.poznan.pl

mgr inż. Karol Grochalski – Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: karol.grochalski@wp.pl

dr inż. Marcin Wiśniewski – Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Projektowania Technologii Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: marcin.wisniewski@put.poznan.pl

prof. dr hab. inż. Jan Żurek – Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Projektowania Technologii Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: jan.zurek@put.poznan.pl

MODERNIZACJA TOKARKI TUG1200 I UWARUNKOWANIA MONTAŻOWE JEJ NOWYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

TUG1200 cnc lathe rebuilding. Setup of the new components in the machine

Tadeusz KOWALSKI, Grzegorz DUBIEL

S t r e s z c z e n i e: W pracy przedstawiono możliwości modyfikowania konstrukcji znanych maszyn technologicznych budowanych modułowo. Przedstawiono kierunek modyfikacji obrabiarek, których komponenty są już wykonane, a dołożenie nowych modułów konstrukcyjnych rozszerza zakres zastosowania. Przedstawiono problemy jakie powstaną na skutek zwiększenia maksymalnej średnicy toczenia i zwiększenia długości toczenia. Będzie to wymagało rozszerzenia standardowego oprzyrządowania tokarki o podtrzymki stałe i ruchome oraz o podtrzymkę śruby tocznej. Przedstawiono problemy montażowe wynikające z wprowadzenia zestawu podtrzymek detalu i śruby tocznej dla istniejącej konstrukcji obrabiarki.

S ł o w a k l u c z o w e: montaż, modyfikacja konstrukcji, tokarka

A b s t r a c t: Article covers topics dealing with possibility of rebuilding of the module-based machines. Modification methods are presented in this paper. Moreover, increased functionality of rebuilt machines are described together with problems due to increased turning diameter and turning length, which requires modification in lathe components. In addition, mounting issues of the new machine components are presented with additional accessories and components.

K e y w o r d s: setup, construction rebuildin, lathe

Wstęp

Modułowa konstrukcja maszyn i urządzeń [1-3] – w tym obrabiarek – jest powszechnie stosowana, co pozwala na budowanie maszyn na miarę aktualnych wymagań oraz modyfikację konstrukcji w zależności od potrzeb. Modyfikacja ta może dotyczyć nowej poprawionej konstrukcji, dzięki dołożeniu nowych modułów lub ich zastąpieniu. Niezwykle korzystne jest zastosowanie skonstruowanego korpusu i obudowy, jak również kupno wymaganych komponentów napędu i mechanizmu. Istnieje jeszcze inna droga postępowania, w której dla podstawowych (ze względu na funkcje) obrabiarek, można rozbudować już istniejącą obrabiarkę. Te obrabiarki nazywamy obrabiarkami rekonfigurowalnymi lub przestawialnymi.

W pracy zanalizowano pierwszy przypadek, gdy obrabiarka jest znana, a zwiększony zostaje zakres jej zastosowania z wykorzystaniem już skonstruowanych modułów.

Zakres modyfikacji tokarki TUG1200/1400

Przystępując do prac modyfikujących tokarkę TUG założono:

Uniknięcie kosztownej zmiany odlewu wrzeciennika. Wymagane podniesienie osi tokarki uzyska się przez zastosowanie podkładki pod wrzeciennik.

1. Uniknięcie kosztownej zmiany odlewu łoża przez zastosowanie kilkuelementowej, modułowej budowy łoża o zwiększonej długości toczenia.
2. Zwiększenie długości toczenia wymaga wydłużenia śruby tocznej w osi „Z”. Wówczas konieczne staje się zmniejszenie prędkości szybkiego przesuwu suportu ze względu na powstające drgania śruby, aby

zachować dotychczasowe wartości szybkiego przesuwu należy zastosować podparcie śruby tocznej odpowiednią podtrzymką.

3. Ze względu na wydłużoną długość toczenia do ponad 4 m, konieczne staje się zastosowanie podtrzymki detalu, w celu zniwelowania drgań przedmiotu obrabianego.

Rozpatrzono zatem dwa warianty:

- a) podtrzymka stała, która nie przemieszcza się w trakcie obróbki. Ma regulację położenia na łożu wzdłuż osi „Z” oraz regulację średnicy przez rozsuwanie trzpieni podporowych. Na powierzchni styku podtrzymka-detalu stosuje się łożyskowane, dociskane rolki. Mocowanie do łoża obrabiarki odbywa się za pomocą podchwytu. Przesuw wzdłuż osi „Z” umożliwia wózek toczny. Podtrzymka ma konstrukcję zamkniętą ze stykiem 3-punktowym, co pozwala na obróbkę cięższych detali,
- a) podtrzymka ruchoma, która montowana jest na podporcie i przesuwa się wraz z narzędziem podczas obróbki. Obróbka następuje zawsze w miejscu podparcia detalu. Konstrukcja tej podtrzymki jest dużo lżejsza. Cechuje się budową otwartą i dwoma punktami podporu. Podobnie jak w przypadku podtrzymki stałej występuje regulacja średnicy detalu w postaci trzpieni z łożyskowanymi rolkami.

Wymagania dokładnościowe tokarek

Stwierdza się, że parametrami dokładności maszyny lub jej zespołów jest:

- dokładność ruchu względnego powierzchni roboczych,
- dokładność położenia tych powierzchni względem siebie,
- dokładność połączenia.

Parametry te uzyskuje maszyna lub jej zespół w czasie montażu, co nazywa się dokładnością montażu. Stwierdza się, że niezawodność i trwałość maszyny zależy w równym stopniu od rozwiązania konstrukcyjnego i warunków eksploatacji oraz od dokładności części i ich montażu. W przypadku montażu rozpatruje się dodatkowe korzystne naprężenia w połączeniach oraz wynikające z nieprawidłowego montażu powstające odkształcenia. W montażu ujawniają się błędy konstrukcyjne np. zbyt mała sztywność zespołu.

Odchyłki wpływające na dokładność montażu można podzielić na [5]:

- odchyłki przypadkowe – powstałe z przyczyn nieokreślonych,
- odchyłki nieprzypadkowe – przewidziane lub określone,
- odchyłki położenia – niewspółosiowość, nierównoległość itp.,
- odchyłki połączeń, np. tolerancja pasowania,
- odchyłki odkształceń zamierzonych (dociąganie połączeń gwintowych) i niezamierzonych (powstałe w połączeniach wciskanych odkształcenia plastyczne, w połączeniach o małej sztywności odkształcenia sprężyste),
- odchyłki niewyrównoważenia.

W przypadku montażu łoża długich tokarek prowadnice po obróbce powinny być wypukłe, a po obciążeniu suportem powinny się wyprostować w granicach dopuszczalnych odchyłek. Podobne efekty można uzyskać przez skrobanie odkształconych powierzchni bazowych części bazującej. Odchyłki uzyskane w wyniku obciążenia kompensuje się lub usuwa przez skrobanie.

Obrabiarki CNC wyróżniają się dużą sztywnością statyczną i dynamiczną oraz dobrym tłumieniem drgań. Cechy te są szczególnie przydatne w przypadku wysokich

parametrów kinematycznych i dużych mocy skrawania. Wymaga to wielokierunkowych działań konstrukcyjnych, takich jak: zastosowanie bezłuzowych łożyskowań wrzecion, wyrównoważenie silników napędowych, stosowanie stabilnych przewodnic z materiałów o minimalnej różnicy współczynników tarcia, stosowanie śrub tocnych charakteryzujących się podwyższoną nośnością i sztywnością.

Badania dokładności obrabiarek [4] przeprowadza się już w trakcie montażu obrabiarki, następnie podczas instalowania obrabiarek u klienta oraz w czasie eksploatacji. Badania dokładności obrabiarek są opisane w normie ISO 230 „Acceptance code for machine tools”. Przedmiotem normy są wymagania i wytyczne dotyczące sprawdzania dokładności geometrycznej obrabiarki oraz wymagania i wytyczne dotyczące sposobów badań i środków mierniczych. Polskie normy określają ogólne przepisy badania obrabiarek i szczegółowe metody wyznaczania poszczególnych odchyłek oraz tolerancje ograniczające ich dopuszczalne wartości. Norma składa się z:

- PN-ISO 230-1:1998 – Przepisy badania obrabiarek. Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykończeniowej,
- PN-ISO 230-2:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie,
- PN-ISO 230-3 – Wyznaczanie efektów cieplnych,
- PN-ISO 230-4:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie,
- PN-ISO 230-5:2002 – Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie emisji hałasu.

Prace konstrukcyjne zmodyfikowanej tokarki TUG



Rys. 1. Tokarka TUG1200/1400 – widok ogólny
Fig. 1. CNC Lathe TUG1200/1400 – overall view

Tab. 1. Porównanie przestrzeni roboczej tokarki TUG1200/1400
 Tab. 1. Working area comparsion TUG1200/TUG1400

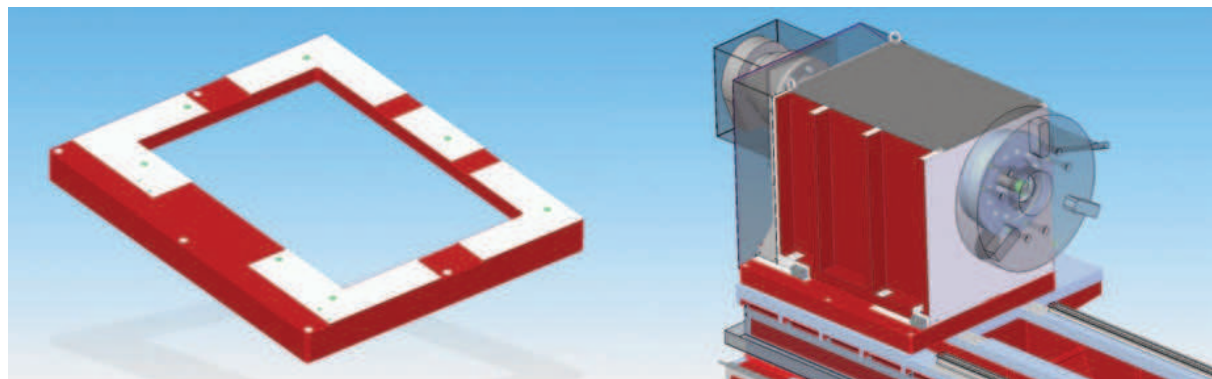
Parametr	TUG1200 (mm)	TUG1400 (mm)
Przelot nad łożem	1200	1400
Przelot nad suportem	800	1000
Maksymalna długość toczenia w kołach	2000	4400
Przesuw w osi „X”	680	780
Przesuw w osi „Z”	2000	4400

Modyfikacja średnicy toczenia

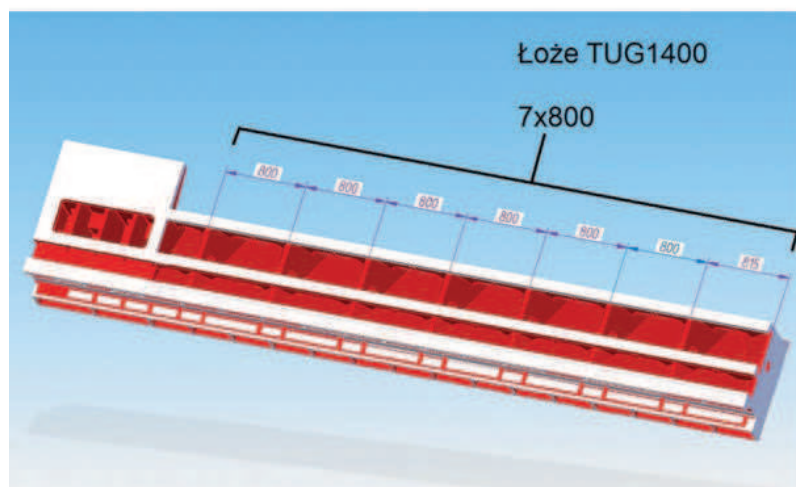
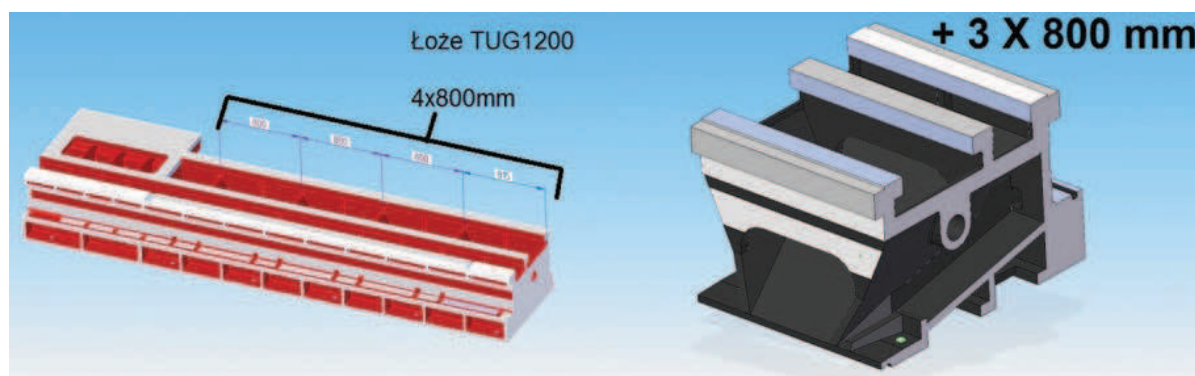
Zaproponowano modyfikację maksymalnej średnicy toczenia na drodze podwyższenia osi wrzeciennika o 100 mm. Aby uniknąć kosztownej zmiany odlewu zastosowano podkładkę pod istniejący już wrzeciennik (rys. 2).

Modyfikacja długości toczenia

W celu modyfikacji długości toczenia przedłużono łożo o dalsze długości 3 modułów po 800 mm. Do 4 zastosowanych już modułów dołączono trzy następne (rys. 3).



Rys. 2. Podkładka pod wrzeciennik (a), widok wrzeciennika z zamontowaną podkładką (b)
 Fig. 2. Headstock raiser (a), headstock with mounted raiser (b)



Rys. 3. Łoże tokarki TUG: 4 moduły (a), widok modułu (b), 7 modułów (c)
 Fig. 3. CNC lathe TUG: 4 modules (a), module view (b), 7 modules (c)

Zastosowanie podtrzymki śruby tocznej

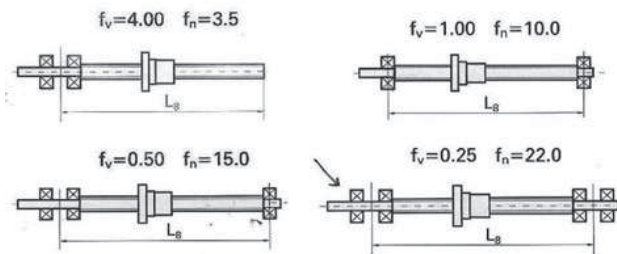
Przy powiększeniu długości toczenia wydłużeniu uległa śruba toczna w osi „Z”. Problemem była ograniczona prędkość szybkiego przesuwu suportu ze względu na możliwość powstawania drgań śruby. Aby zachować dotychczasowe wartości szybkiego przesuwu należało zastosować podparcie śruby tocznej odpowiednią podtrzymką.



Rys. 4. Śruba bez podparcia
Fig. 4. Ballscrew with no support

Rozważono następujący przypadek:

$L_8 = 4844$ – długość śruby między podpartymi końcami,
 $d_0 = 50$ mm – średnica śruby,
 $f_n = 22$ – współczynnik dla danego sposobu podparcia końców śruby.



Rys. 5. Rodzaje podparcia śrub
Fig. 5. Ballscrew supporting methods

$p = 10$ mm – skok śruby

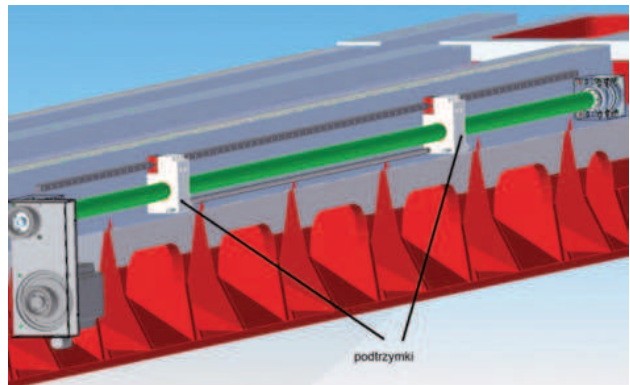
$$n_{kr} = \frac{1 \cdot 10^7 \cdot f_n \cdot d_0}{L_8^2} = 468 \text{ obr./min} - \text{prędkość krytyczna śruby}$$

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_{kr} = 375 \text{ obr./min} - \text{prędkość maksymalna śruby}$$

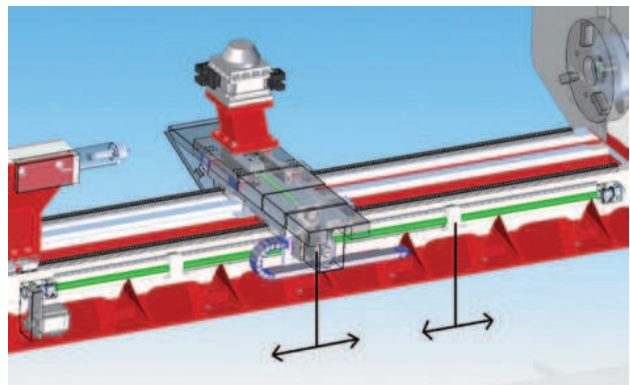
$$ff = n_{max} \cdot p = 3,75 \text{ m/min}$$

I tu pojawia się uwaga konstrukcyjna: *Wartość szybkiego przesuwu za mała dla tej obrabiarki!*

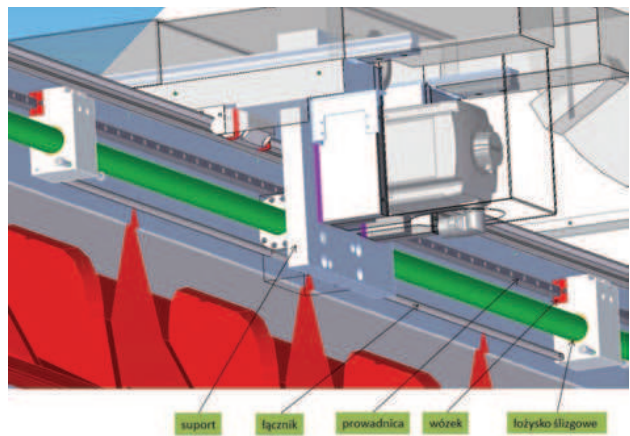
Zaproponowano podparcie w dwóch punktach podtrzymką (rys. 6) oraz takie rozwiązanie, że suport swym ruchem przesuwają układ podtrzymek (rys. 7). Dzięki temu śruba jest zawsze podparta we właściwym miejscu.



Rys. 6. Śruba z podparciem w dwóch punktach podtrzymką śruby tocznej
Fig. 6. Supported ballscrew



Rys. 7. Śruba z podparciem przesuwającym się wraz z suportem
Fig. 7. Moving ballscrew support

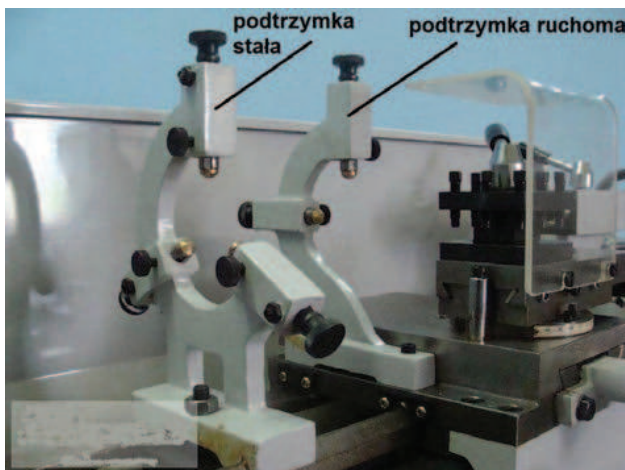


Rys. 8. Śruba widok od spodu
Fig. 8. Ballscrew bottom view

Rodzaje i sposoby montażu podtrzymki detalu

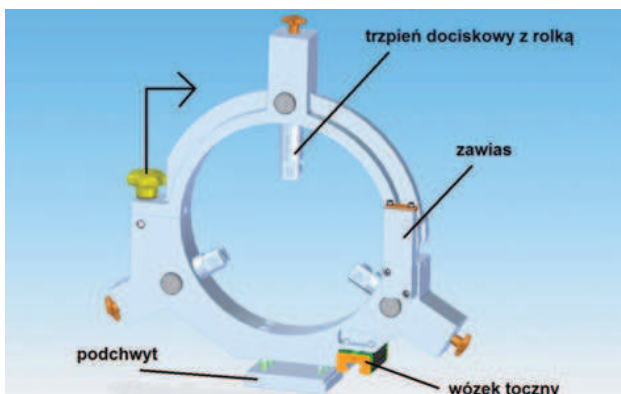
Zmodernizowana obrabiarka TUG ze względu na długość toczenia wynoszącą ponad 4 m została wyposażona w tzw. podtrzymki detalu, niwelujące drgania przedmiotu obrabianego.

Podtrzymka stała nieprzemieszczająca się w trakcie obróbki (rys. 9) ma regulację położenia na łożu wzdłuż osi „Z” oraz regulację średnicy przez rozsuwanie trzpieni

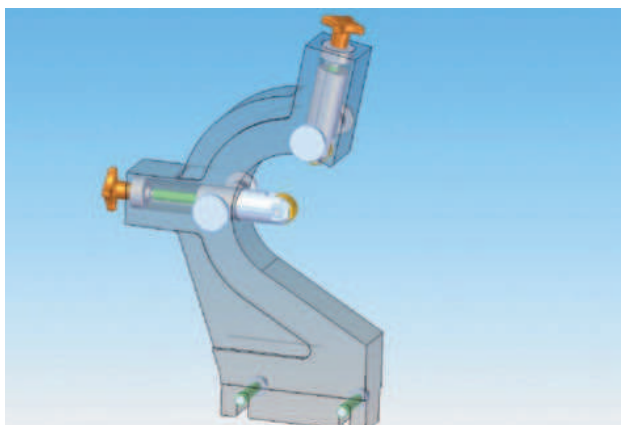


Rys. 9. Podtrzymki stała i ruchoma
Fig. 9. Steady rests: stationary and movable

podporowych. Na powierzchni styku podtrzymka -detal znajdują się łożyskowane i dociskane rolki. Mocowanie do łoża obrabiarki odbywa się za pomocą podchwytu. Przesuw wzdłuż osi „Z” umożliwia wózek toczny. Podtrzymka stała ma również konstrukcję zamkniętą ze stykiem 3-punktowym (rys. 10), co pozwala na obróbkę cięższych detali.



Rys. 10. Podtrzymka stała zamknięta ze stykiem 3-punktowym
Fig. 10. Stationary steady rest with 3-point contact



Rys. 11. Podtrzymka ruchoma montowana na suporcie
Fig. 11. Movable steady rest mounded on a lathe support

Podtrzymka ruchoma montowana jest na suporcie i przesuwa się wraz z narzędziem podczas obróbki (rys. 11). Powoduje to, że obróbka następuje zawsze obok miejsca podparcia detalu. Konstrukcja tej podtrzymki odznacza się mniejszą masą niż poprzednia konstrukcja. Cechuje się budową otwartą i dwoma punktami podporu. Podobnie jak w przypadku podtrzymki stałej występuje regulacja średnicy detalu przez trzpienie z łożyskowanymi rolkami.

Wnioski

Modyfikacja polegająca na wydłużeniu łoża istniejącej obrabiarki TUG1200 jest możliwa, zaś z rozważań konstrukcyjnych wynika, że mogą występować drgania śruby tocznej i należy zastosować podtrzymki detalu, aby zapobiec drganiom. Modułowość obrabiarki sprzyja możliwościom modyfikacji i doboru elementów, a takie postępowanie zmniejsza koszty produkcji obrabiarek. Powtórne wykorzystanie istniejących łoż żeliwnych jest zawsze korzystne ze względów wytrzymałościowych, a dodatkowo przy prawidłowo przeprowadzonej analizie wytrzymałościowej maszyny i jej elementów oraz odpowiednio dobranych modułach konstrukcyjnych montaż nie wymaga zastosowania specjalnych prac dopasowujących. Zaletą jest fakt ponownego użycia modułów maszyny kolejnych konstrukcji. Moduły rozszerzające zakres możliwości maszyny są uniwersalne, dzięki czemu mają zastosowanie w różnych konstrukcjach obrabiarek.

LITERATURA

- [1] Groover M.P. 2000. "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing". Prentice-Hall International.
- [2] Honczarenko J. 2000. „Elastyczna automatyzacja wytwarzania”. Warszawa: WNT.
- [3] Kosmol J. 2000. „Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem”. Warszawa: WNT.
- [4] Projekt badawczy N N503 18 1737: Kompleksowa metoda oceny dokładności technologicznej precyzyjnych tokarek CNC. Warszawa 2010.
- [5] Puff T., W. Sołtys. 1980. „Podstawy technologii montażu maszyn i urządzeń”. Warszawa: WNT.

dr inż. Tadeusz Kowalski – Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: t.kowalski@wip.pw.edu.pl

mgr inż. Grzegorz Dubiel: Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Sp. z o.o., ul. Staszica 1, 05-800 Pruszków, e-mail: grzegorz.dubiel@cbko.pl

PROJEKT STOŁU MONTAŻOWEGO DO ROZDZIELNI NAPIĘCIA

A project of an assembly table for an electric switchboards

Robert CIEŚLAK, Ireneusz WYSOCKI, Albert PIGUŁA

Streszczenie: W pracy został przedstawiony projekt stołu montażowego dla firmy ELEKTROBUDOWA SA. Jest to kolejny z etapów wdrażania platformy montażowej w tym przedsiębiorstwie. Praca koncentruje się na wskazaniu dostosowania platformy montażowej dla produktu końcowego, jakim są rozdzielnie niskich, średnich i wysokich napięć w firmie ELEKTROBUDOWA SA. Jest to ważny punkt procesu opracowania platformy montażowej oraz podejścia do wzorca rodziny produktów.

Słowa kluczowe: obszary montażowe

Abstract: The paper presents a project of an assembly table designed for the ELEKTROBUDOWA S.A. company. The project constitutes one of the stages of implementing an assembly platform in this firm. The publication shows the ways of adjusting the platform to the final product, which is low, medium and high voltage switchboards produced in the ELEKTROBUDOWA S.A. The adjustment in turn is a vital point in the process of designing an assembly platform and approaching the pattern for a family of products.

Key words: assembly areas

Wprowadzenie

Celem artykułu jest opracowanie kolejnego etapu utworzenia platformy montażowej w firmie ELEKTROBUDOWA SA jakim jest wykonanie struktury jej elementów. Jednym z elementów tej struktury jest zaprojektowanie stołu montażowego do podnoszenia rozdzielnic średniego i niskiego napięcia, które firma ma w swojej ofercie sprzedażowej. Projekt ten umożliwi minimalizację kosztów przez własną produkcję podnośnika, a w przyszłości może pomóc we wprowadzeniu do sprzedaży urządzenia z nowej kategorii.

Opracowanie platformy montażowej ma duże znaczenie dla samego wyrobu końcowego, jako że wyrób odpowiada potrzebom rynku, będąc jednocześnie wyprodukowanym przy jak najmniejszych kosztach produkcji [5]. W artykule zawarty jest proces projektowania stołu montażowego, wzbogacony o badania wytrzymałościowe, pozwalające sprawdzić wytrzymałość na obciążenia oraz możliwe odkształcenia.

Definicja platformy montażowej

Według założeń podejścia odgórnego do kwestii zaprojektowania danej rodziny produktów najpierw należy zaprojektować tzw. platformę montażową, którą można łatwo zmodyfikować i dostosować do potrzeb produkcji [7].

Jedna z definicji określa platformę montażową jako stosunkowo duży zbiór komponentu produktu, którego składniki są ze sobą połączone w stabilny podzespół i są wspólne dla różnych modeli produktu końcowego [5].

Istota powstania platformy montażowej tkwi w uzyskaniu jak największej liczby produktów końcowych, wykorzystując do tego standaryzowane składniki i różne procesy produkcyjne. Dlatego też dostosowanie

platformy montażowej to proces polegający na odkryciu wspólnych elementów w danej rodzinie produktów (np. wspólne funkcje czy działanie, parametry, cechy, składniki, podsystemy czy odpowiednia ilość informacji związanej z produkcją danej rodziny produktów) oraz późniejsze dopasowanie i standaryzacja ww. wspólnych elementów bądź parametrów [9].

Charakterystyka procesu projektowo-konstrukcyjnego

Proces projektowo-konstrukcyjny polega na opracowaniu przedmiotu lub urządzenia w programie komputerowym bądź w formie papierowej. W przypadku tego projektu wykorzystany został program komputerowy SolidWorks, który swoimi funkcjami i prostym interfejsem usprawnił pracę nad podnośnikiem nożycowym. Projekt powinien uwzględniać model konstrukcyjny, materiał z którego będzie wykonane urządzenie i najważniejsze badania wytrzymałościowe. W kolejnym etapie powstaje dokumentacja projektowo-konstrukcyjna, która jest podstawą rozpoczęcia procesu wytwarzania.

Badania wytrzymałościowe są konieczne, ponieważ odnoszą się do bezpieczeństwa człowieka podczas wykonywania pracy przy urządzeniu, mającym styczność z dużą ładownością.

Teodor Winkler, autor publikacji „Komputerowy zapis konstrukcji”, uświadamia jak wyraźną ewolucję przeszedł sposób pracy nad projektowaniem, opisuje również przebieg zmian zachodzących w możliwościach programów komputerowych, które stają się coraz potężniejszymi narzędziami do projektowania. W niedalekiej przeszłości projektowaniem zajmowały się całe biura, a wraz z biegiem lat zapotrzebowanie na większą liczbę pracowników malało z powodu rozwijania się programów CAD/CAM. Ewolucja ta pozwoliła wykonywać projekty znacznie

szybciej, a także przyjmować większą ilość zleceń, dzięki czemu biura konstrukcyjne przestały istnieć i zostały zastąpione przez działy konstrukcyjne [8].

Systemy CAD wspomagają projektowanie w pierwszych etapach rozwoju produktu. Są to narzędzia służące nie tylko do rysowania czy modernizowania, ale również do projektowania zrozumiałych zadań inżynierskich. Ich zadaniem jest nadanie postaci geometrycznej oraz oceny cech wytrzymałościowych i funkcjonalnych konstrukcji [2].

Proces projektowania maszyn i urządzeń wymaga dokładności, dlatego trzeba dokładnie zastanowić się nad zaplanowaniem pracy przez konstruktora. Wykonanie planu umożliwi skrócenie czasu jego wykonywania [4].

Etapy:

- propozycja do projektowania,
- projekt szkicowy,
- projekt techniczny,
- wykonawcze i złożeniowe rysunki urządzenia.

Na podstawie zamówienia oraz rozmowy z klientem opracowuje się propozycje do projektowania. Zawierają one komplet dokumentacji, który przedstawia wybranie konkretnego opracowania urządzenia [4].

Projekt szkicowy ma komplet dokumentacji technicznej, pozwalający zrozumieć zasadę działania urządzenia oraz jego budowę, ukazując rozwiązanie wszystkich najbardziej skomplikowanych węzłów i części oraz jest podstawą do dalszego projektowania urządzenia [4].

Dokumentacja techniczna, która jest opracowana na etapie projektu konstrukcyjnego, powinna zawierać konstrukcyjne rozwiązanie wszystkich węzłów urządzenia i jest podstawą do opracowania jego rysunków wykonawczych [4].

Wykonanie złożenia umożliwia stworzenie pełnej dokumentacji technicznej, ukazującej pełen schemat urządzenia oraz wszystkich połączeń wraz z węzłami [4].

Założenia i model stołu montażowego

Badania nad platformą montażową wykonano w firmie ELEKTROBUDOWA SA, która jest liderem wśród polskich firm elektroenergetycznych. Jest ona wiodącym wykonawcą i dostawcą aparatury rozdzielczej średnich i niskich napięć, jak również stacji i systemów elektroenergetycznych. Firma brała udział w budowie niemal wszystkich polskich elektrowni i elektrociepłowni oraz wielu na świecie (rys. 1). Na rynku międzynarodowym osiąga znaczącą pozycję w produkcji i montażu przewodów silnopiędowych [3].

Znaczenie platformy montażowej jest coraz istotniejsze w różnych dziedzinach przemysłu i wiele firm musi podejmować szereg decyzji w tej sprawie. Prace zmierzają w kierunku zdefiniowania podstawowej struktury platformy montażowej.

Etap utworzenia platformy montażowej został przedstawiony w publikacji [1]. Pierwszy etap polegał na utworzeniu platformy montażowej jako fizycznej struktury wyrobu. Należało odpowiedzieć na dwa pytania. Po pierwsze – jak należy zdefiniować platformę montażową z technicznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę złożoność wyrobu, a po drugie – w jaki sposób platforma montażowa wiąże się z innymi pojęciami związanymi z procesem planowania wyrobu końcowego, takimi jak konstrukcja wyrobu czy modularyzacja. Drugi etap polegał na grupowaniu operacji, aby określić podobieństwo technologiczne wykonywanych produktów. Trzeci etap to dokonanie analizy kosztowej platformy montażowej. Należy w tym momencie odpowiedzieć na pytania: jakie czynniki należy wziąć pod uwagę ustalając koszt platformy montażowej i jaka będzie wielkość współczynnika do analizy kosztowej.

Czwarty etap to opracowanie struktury elementów platformy montażowej. Jednym z kolejnych elementów

a)



b)



Rys. 1. Rozdzielnice a) niskiego napięcia, b) stacje kontenerowe produkowane w firmie ELEKTROBUDOWA SA (opracowanie na podstawie katalogów firmy)

Fig. 1. Switchboards produced in the ELEKTROBUDOWA SA company: a) low voltage switchboards b) mobile container substations (pictures from the company's catalogue)

struktury platformy montażowej jest stół montażowy, który służy do podnoszenia rozdzielni niskiego oraz średniego napięcia. Jest on zaliczany do stołów specjalistycznych. Projekt został wykonany na potrzeby firmy ELEKTROBUDOWA SA. Zadaniem tego typu urządzenia jest unoszenie rozdzielnic napięciowych oraz unoszenie pracownika. Planowana waga najcięższej rozdzielnic napięciowej i udźwig podnośnika wynosi ok. 1500 kg. Materiał wykorzystany do produkcji urządzenia to niestopowa stal konstrukcyjna ST52-3N.

W firmie ELEKTROBUDOWA SA dokonano analizy wydajności kilku stołów montażowych obecnych na halach. Z przeprowadzonej analizy wynika, że brakuje stołu na którym można bezpiecznie dokonać montażu końcowego wyrobu (w przyszłości do tworzonej platformy montażowej). Zamiarem autorów jest opracowanie uniwersalnego stołu montażowego, który ułatwi pracę. Proces projektowania nowego wózka transportowego podzielono na trzy etapy, tj. przygotowanie, wykonanie modelu w programie SolidWorks oraz opracowanie wyników wytrzymałościowych. Postępowanie projektowe obejmowało:

1. zapoznanie się z pracownikami wykonującymi montaż rozdzielni, a także organizacją i obsługą stanowiska roboczego, na którym będzie ona wykonywana (tab. 1),
2. poznanie budowy obecnych na hali stołów montażowych,
3. analiza oceny efektywności stołów montażowych przez pracowników,
4. ustalenie z technologiem wymogów jakie powinien spełniać nowy stół montażowy,
5. opracowanie modelu stołu montażowego w programie SolidWorks (rys. 2),
6. przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych, dokonanie symulacji w programie SolidWorks,
7. opracowanie całego procesu wytworzenia na kartach technologicznych i instrukcyjnych [6].

Tab. 1. Informacje dotyczące pracy brygady mechaników i energetyków (opracowanie własne)

Sig. 1. Information concerning the work of the teams of mechanics and power engineers (self study)

Pracownik firmy odpowiedzialny za prowadzenie badań do platformy montażowej	Czas przeprowadzenia analizy stanowisk montażowych	Badane stanowisko pracy
technolog	6 ⁰⁰ – 14 ⁰⁰	brygada mechaników i elektryków, którzy wykonywali montaż wyrobu w hali produkcyjnej

Model 3D stołu montażowego (rys. 2) przedstawia podnośnik nożycowy, służący do podnoszenia rozdzielnic napięciowych. Urządzenie zostało wyposażone w siłownik

elektryczny o mocy 1520 kg. Siłownik elektryczny pełni kluczową funkcję w konstrukcji. Jego sprawność sięgająca 90% i udźwig 1520 kg w zupełności wystarczy do prac modernizacyjnych nad rozdzielnicami napięciowymi. W budowie stołu montażowego zastosowano łożyska CUS200 firmy SNR. Podpora wyposażona została w koła Brickle LS-GTH 127K-ST o wytrzymałości równej 600 kg, zabezpieczone hamulcem uniemożliwiającym przesunięcie się podnośnika wraz z rozdzielnicą napięciową. Materiał wykorzystany do produkcji urządzenia to stal niestopowa konstrukcyjna ST52-3N.



Rys. 2. Projekt stołu montażowego w firmie ELEKTROBUDOWA SA (opracowanie własne)

Fig. 2. The project of an assembly table in the ELEKTROBUDOWA SA company (self study)

Badania stołu montażowego

Do badań przyjęto obciążenie najcięższej rozdzielnic napięciowej, której waga wynosi ok. 1500 kg. Siła rozkłada się równomiernie na całej powierzchni blatu roboczego (różowy kolor strzałek). Wyniki (rys. 3) pomogły w poprawieniu niedociągnięć i pomyłek, które wystąpiły podczas procesu projektowania. Naprężenia wynikające z obciążenia rozdzielnic napięciowej występują głównie w przęsłach zamontowanych na stałe w podporach tylnych-dolnych (zielony kolor). W niewielkim stopniu naprężenia występowały pod blatem na kołach oraz mocowaniu stałym tylnym. Z badań przeprowadzonych pod kierunkiem naprężeń wynika, że urządzenie spełnia warunki jakie zostały założone w trakcie projektowania urządzenia jakim jest podnośnik nożycowy, a jej wynik mieści się w granicach normy.

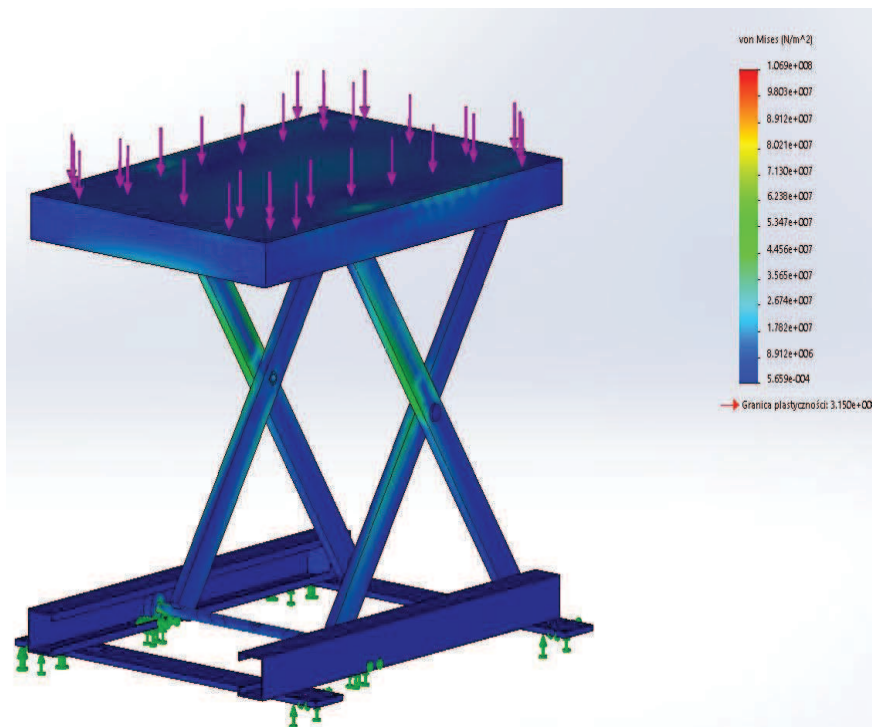
Wyniki przeprowadzonych badań pod kątem odkształceń modelu podnośnika nożycowego udowadniają, iż projekt wytrzyma obciążenia sięgające nawet zakładanej granicy 1500 kg. Występujące odkształcenia są niewielkie i tak jak w wypadku naprężeń występują głównie

na przęsłach oraz mocowaniach stałych blatu roboczego oraz podpory (kolor zielony).

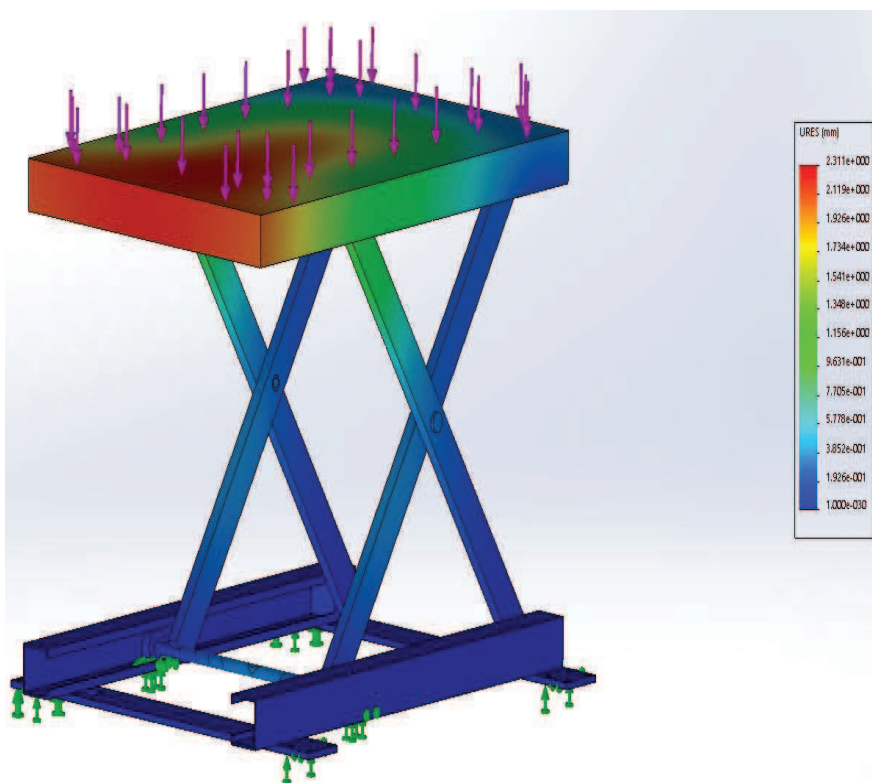
Z badań przeprowadzonych pod kierunkiem odkształceń wynika, że urządzenie spełnia warunki jakie zostały założone w trakcie projektowania urządzenia jakim jest

podnośnik nożycowy, a jej wynik mieści się w granicach normy.

Największe zmiany materiału wynikają z badań przemieszczeń materiału (rys. 4). Wartości, które wykazał SolidWorks sięgają granic maksymalnych na powierzchni



Rys. 3. Symulacja rozkładu naprężeń stołu montażowego w firmie ELEKTROBUDOWA SA (opracowanie własne)
Fig. 3. Stress distribution simulation for an assembly table in the ELEKTROBUDOWA SA company (self study)



Rys. 4. Symulacja przemieszczenia modelu w firmie ELEKTROBUDOWA SA (opracowanie własne)
Fig. 4. A model displacement simulation in the ELEKTROBUDOWA SA company (self study)

blatu roboczego, a dokładnie w jego przedniej części. Mniejsze, ale pojawiające się przemieszczenia ukazują się na środkowej części blatu, ale również w przęsłach przyłączeniowych z belką i kołami.

Ze względu na występujące przemieszczenia zalecane jest umiejscowienie materiału na środkowej części blatu. Zastosowanie to pozwoli zmniejszyć przemieszczenia występujące w urządzeniu.

Głównymi celami projektowanego stołu montażowego w strukturze platformy montażowej jest przede wszystkim:

- zwiększenie wydajności przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji,
- efektywniejsze wykorzystanie dysponowanego czasu pracy,
- stabilizacja i rytmiczność procesu produkcji pozwalająca na dokładne planowanie wydajności,
- poprawa organizacji i warunków pracy na wydziale montażowym,
- możliwość łatwego przemieszczania się pracownika i rozdzielni dzięki sterowaniu,
- zmniejszenie liczby wadliwych wyrobów.

Po analizie danych projektowych firma ELEKTROBUDOWA SA planuje produkcję dwóch stołów montażowych w celu analiz na rzeczywistym modelu.

Podsumowanie

Inżynierowie z różnych przedsiębiorstw produkcyjnych (krajowych i zagranicznych) opracowują warianty stołów montażowych do elastycznych linii montażowych i platform montażowych.

Głównym celem artykułu jest opracowanie uniwersalnego stołu montażowego do montażu rozdzielni niskich, średnich i wysokich napięć w firmie ELEKTROBUDOWA SA. Jest to kluczowy punkt opracowania struktury platformy montażowej oraz podejścia do wzorca rodziny produktów. Przedstawione wyniki analiz projektowych sugerują poprawę wskaźników niezawodności i efektywności produkcji, co powinno przynieść oczekiwane efekty ekonomiczne i jakościowe oraz przyczynić się do podniesienia konkurencyjności przedsiębiorstwa.

Analiza platformy montażowej wykazała celowość opracowania uniwersalnego stołu montażowego, dzięki któremu nastąpi poprawa organizacji i warunków pracy.

Zastosowanie sterowania w uniwersalnym stole montażowym umożliwi łatwe przemieszczanie się pracownika i rozdzielni. Badania modelowe wykazały poprawność założeń projektowych.

Autorzy w kolejnych artykułach zamierzają dokonać złożenia całej struktury platformy montażowej w firmie ELEKTROBUDOWA SA oraz rozpocząć testy na rzeczywistych modelach.

LITERATURA

- [1] Cieślak R., I. Wysocki. 2013. „Badania i zastosowanie platform montażowych”. *Inżynieria Maszyn* (4): 117–123. Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT.
- [2] Chlebus E. 2000. „Techniki CAx w inżynierii produkcji”. Warszawa: WNT. 103–105.
- [3] ELEKTROBUDOWA SA – katalogi firmy.
- [4] Kurmaz L., O. Kurmaz. 2007. „Projektowanie węzłów i części maszyn”. Kielce: WPS.
- [5] Muffatto M. 1999. “Introducing a platform strategy in product development”. *International Journal of Production Economics* (60-61): 145–146.
- [6] REFA 1984. „Metody badania prac cz. 1 i cz. 2”. Cieszyńska Drukarnia Wydawnicza.
- [7] Simpson T.W. et. al. 2001. “Product platform design: method and application”. *Research in Engineering Design* (13): 2–22.
- [8] Tarnowski W. 1997. „Wspomaganie komputerowe CAD CAM. Podstawy projektowania technicznego”. Warszawa: WNT.
- [9] Qin H. et. al. 2005. “Product platform commonization: platform construction and platform elements capture”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (25): 1071–1077.

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

inż. Ireneusz Wysocki – ELEKTROBUDOWA SA w Katowicach, Oddział Spółki Rynek Dystrybucji Energii, ul. Przemysłowa 156, 62-505 Konin, e-mail: ireneusz.wysocki@elbudowa.com.pl

Albert Piguła – student Mechaniki i Budowy Maszyn w Katedrze Mechaniki i Energetyki, Wydział Techniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Koninie, ul. Przyjaźni 1, 62-510 Konin

METODY Lutowania DIAMENTÓW W NARZĘDZIACH

Brazing methods for connecting diamonds in tools

Andrzej BAKOŃ, Adam BARYLSKI

Streszczenie: Lutowanie jest jedną z technik wytwarzania narzędzi zawierających diamentowe kryształy, ziarna ściernie i polikrystaliczne spieki jako elementy robocze. Omówiono różne sposoby lutowania diamentów oraz przedstawiono obszary ich zastosowania.

Słowa kluczowe: narzędzia diamentowe, lutowanie, diamenty techniczne

Abstract: Brazing is one of the techniques for manufacturing of tools comprising diamond crystals, polycrystalline materials and abrasive grits as working elements. Discusses various ways brazing of diamonds and presents their application areas.

Keywords: diamond tools, brazing, technical diamonds

Wprowadzenie

Obecnie stosuje się kilka sposobów łączenia diamentów w narzędziach. Szacuje się [11, 9], że 24% to wyroby z diamentami mocowanymi za pomocą spoiw żywicznych, 6% ze spoiw ceramicznych, a 70% różnego rodzaju spoiwami metalowymi. Narzędzia diamentowe do obróbki plastycznej, skrawaniem i ścierno-polerskiej zbudowane są z elementu diamentowego trwale zamocowanego w oprawce lub na korpusie narzędzia. Jedną z technik wykonywania tego typu połączeń jest lutowanie, które w przypadku diamentów bardziej jest kojarzone z produkcją wyrobów jubilerskich niż narzędzi.

Diamenty stosowane w narzędziach skrawających i ścierno-polerskich oraz do obróbki plastycznej można podzielić na (rys. 1):

- kryształy,
- supertwarde spieki diamentowe w postaci kształtek warstwowych (popularnie tzw. materiały PCD – polycrystalline diamonds) lub monolitycznych,
- ziarna i mikroziarna ściernie.

Każda z tych grup charakteryzuje się odmiennymi właściwościami fizykochemicznymi, a tym samym ich mocowanie w narzędziu każdorazowo wymaga zastosowania innych warunków procesu łączenia i właściwej technologii [2, 24, 12].

Jednocześnie można wyodrębnić liniowe, monowarstwowe i przestrzenne rozmieszczenia diamentów, a także szczególny przypadek w postaci narzędzi zawierających jeden kryształ (kształtkę, ziarno) diamentu. W każdej z tych grup jest wiele różnych narzędzi o odmiennych konstrukcjach i właściwościach użytkowych, a także o szerokim zastosowaniu.

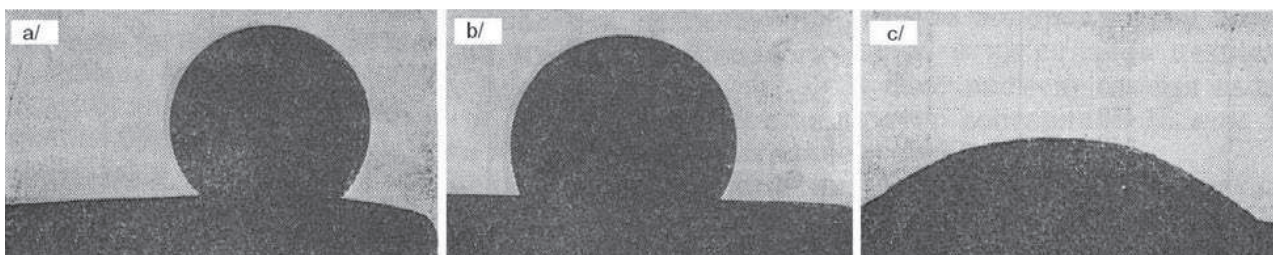
Narzędzia z pojedynczymi kryształami diamentowymi

Przykładami narzędzi z punktowym ułożeniem kryształów i kształtek z materiałów PCD są: narzędzia skrawające (płytki skrawające), obciągacze jednoziarniste, narzędzia chirurgiczne (np. do chirurgii oka), narzędzia grawerskie, narzędzia do cięcia szkła, ciągadła, itd. W tych przypadkach najbardziej popularnymi sposobami



Rys. 1. Przykłady surowca diamentowego stosowanego w narzędziach do obróbki skrawaniem, kontrolno-pomiarowych i ścierno-polerskich: a) kryształy, b) materiały PCD, c) ziarna ściernie [12]

Fig. 1. Examples of diamonds used in cutting tools, measurement and control instruments and abrasive wheels: a) crystals, b) PCD materials, c) abrasive grits [12]



Rys. 2. Obrazy zachowania się różnych lutów na powierzchni diamentu zarejestrowane w mikroskopie wysokotemperaturowym. Zwilżalność przez: a) miedź – temperatura 1150°C, b) srebro – temperatura 1000°C, c) stop 28% Cu i 72% Ag z dodatkiem tytanu – temperatura 900°C [19]

Fig. 2. Images of the different behavior of the brazing alloys on the surface of the diamond recorded in the high-temperature microscope. Wettability by: a) copper – 1150°C temperature, b) silver – temperature of 1000°C, c) an alloy of 28% Cu and 72% of Ag added tytanu- temperature of 900°C [19]

zamocowania diamentu w roboczych uchwytach narzędzia jest lutowanie lub spiekanie.

Lutowanie jest bardzo starą technologią łączenia diamentów, zwłaszcza w jubilerstwie [2, 24, 3, 6]. Podobnie w produkcji narzędzi z dobrze wykształconymi kryształami lub kryształami i okruchami kryształów o pokroju igłowym. Najbardziej popularnymi lutami są luty srebrne, zwłaszcza lut LS45 zawierający do ok. 45% (wag.) srebra oraz miedź i cynk. Lut ten topi się w temp. 675–735°C. Szeroko stosowany jest także tańszy lut LS25 o wyższej temperaturze topnienia, zawierający wagowo do ok. 25% srebra. Wiązanie ma charakter mechanicznego „zakleszczenia”. Powierzchnie kryształów diamentowych są źle zwilżane przez ciekłe metale, szczególnie te, które z węglem nie tworzą węglików w warunkach lutowania (rys. 2). W celu polepszenia zwilżalności zmienia się składy lutów, stosuje się topniki (np. boraks), a w szczególności nakłada się powłoki (np. tytan), poprawiające adhezję lutu do diamentu [19, 23, 4, 21, 12]. Dodatkowo powłoka lub roztopiony topnik chroni kryształ przed utlenianiem.

Gęstość lutów, w tym srebrnych, jest wyższa od gęstości diamentu, dlatego kryształy diamentowe mają tendencję „wypływania” na powierzchni ciekłego metalu. Podczas operacji kryształ musi być trzymany i „wciśnięty” w ciekły lut, aż do momentu jego zastygnięcia. Za zasadę przyjmuje się, że kryształ powinien wystawać ponad poziom lutu maksymalnie do 1/3 swojej wysokości.

Kryształy diamentu charakteryzują się anizotropią pod względem właściwości mechanicznych i każdorazowo muszą być ustawiane w narzędziu pod względem optymalnej ich twardości i odporności na ścieranie. Przed skierowaniem kryształów do produkcji narzędzi są one wnikliwie analizowane pod względem ich pokroju i budowy wewnętrznej. W zależności od rodzaju surowca są także łupane lub cięte w celu nadania im kształtu, w którym widoczne są charakterystyczne kierunki symetrii i ściany diamentu, a tym samym kierunki maksymalnych ich odporności na ścieranie, jak i twardości. Podczas operacji przygotowania kryształów oraz ich orientacji w narzędziu pod względem położenia wykorzystuje się często metody rentgenowskie.

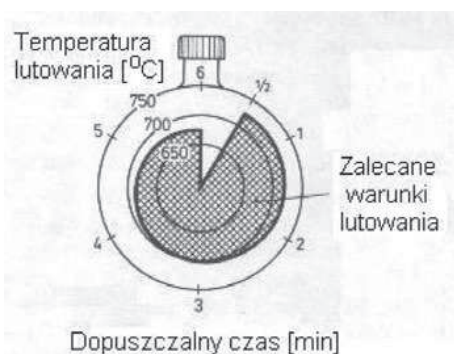
Narzędzia z pojedynczymi kształtkami ze spieków diamentowych

Kształtki z supertwardych spieków diamentów lutuje się inaczej, gdyż charakteryzują się izotropowymi właściwościami fizykochemicznymi oraz dokładnie sprecyzowanym kształtem i wymiarami. Niestety wadą warstwowych materiałów PCD jest względnie niska ich odporność na podwyższoną temperaturę [21]. Konieczne jest stosowanie specjalnych lutów o niższych temperaturach topnienia (tab.1) i krótszych czasów lutowania (rys. 3). Jeżeli lutowanie kryształów diamentu można wykonywać ogrzewając indukcyjnie lub przy pomocy palnika, to w przypadku materiałów PCD o budowie warstwowej zaleca się tylko grzanie indukcyjne. Jeżeli kształt diamentu lub elementu z PCD i jego umiejscowienie w oprawce umożliwiają, stosuje się luty postaci pasków przyciętych do wielkości i kształtu złącza. W ten sposób wytwarza się narzędzia skrawające i ciągnące, a także świdry i koronki wiertnicze.

Tabela 1. Luty twarde zalecane do łączenia materiałów PCD ze stalowymi korpusami narzędzi do obróbki skrawaniem [12]
Table 1. Brazing materials recommended for joining the steel bodies with PCD materials in cutting tools [12]

Producent	Nazwa handlowa lutu	Charakterystyczne temperatury [°C]	
		solidus	liquidus
Jahson Matthey Metals	Easy-Flo No. 3	620	630
Degussa	5009	645	690
Handy & Harmann	Easy-flo No. 45	632	688

Rozwój inżynierii materiałowej sprawił, że dostępne są także supertwarde spieki diamentowe, charakteryzujące się opornością termiczną porównywalną z parametrami monokryształów diamentu [20, 10, 12]. Są to materiały uzyskane w warunkach wysokich ciśnień o monolitycznej budowie z nano- i mikroziaren diamentowych spojonych substancją o współczynniku rozszerzalności zbliżonym do rozszerzalności diamentu (np. węgiel krzemu, krzem).



Rys. 3. Zalecanie warunki lutowania materiału SYNDITE™ (materiał PCD produkowany przez firmę Element Six) w stalowych korpusach narzędzi do obróbki skrawaniem [21]

Fig. 3. Prescribing conditions for brazing alloys for SYNDITE™ (PDC materials manufactured by Element Six) on steel bodies cutting tools [21]

Są to kształtki o budowie monolitycznej, a ich główne obszary zastosowań to narzędzia wiertnicze, frezy do obróbki kamienia i obciążacze.

Narzędzia z diamentami lutowanymi w próżni

Łączenie diamentów w próżni (tzw. vacuum brazing) znalazło też szerokie zastosowanie zwłaszcza w przypadku narzędzi z ziarnami ściernymi rozmieszczonymi w postaci monowarstwy (np. różnego rodzaju ściernice, frezy). Technika ta jest stosowana także w przypadku pojedynczych i wielu kryształów, kształtek oraz ziaren [20, 22, 7, 17, 13, 1]. Próżnia zabezpiecza metalowe spoiwo przed utlenianiem, a także sprzyja usuwaniu porów na stykach lutu z ziarnami i korpusem. Proces wiązania przebiega we względnie wysokich temperaturach, które umożliwiają zwilżenie i „oblanie” całego ziarna diamentowego przez lut i mocnego związania z korpusem (rys. 4).

Dobre zwilżenie uzyskuje się stosując diamenty powlekane pierwiastkami tworzącymi węgliki oraz tzw. luty aktywne, w szczególności luty na bazie Ag – Cu z dodatkiem tytanu lub luty na bazie brązów niklowych, które umożliwiają uzyskanie mocniejszego spoiwa i są bardziej odporne na korozję. Względnie wysokie temperatury topnienia lutów pociągają za sobą konieczność stosowania diamentów o wytrzymałości termicznej dostatecznie wysokiej i dopasowanej do warunków realizacji operacji łączenia.

Pod względem budowy, narzędzia lutowane w próżni są podobne do popularnych diamentowych narzędzi ściernych ze spoiwami galwanicznymi i konkurencyjne [1]. Ich praktyczne zastosowania szczególnie szybko się poszerzają [18, 20, 22, 7, 16, 17, 13, 10, 14]. Jak dotychczas są one przeznaczone do obróbek mniej precyzyjnych (zgrubne szlifowanie, frezowanie, cięcie i wiercenie) – rys. 5. Złącze wykonane w próżni jest znacząco mocniejsze od spajania galwanicznego lub za pomocą żywicy i klejów.



Rys. 4. Urządzenie HLA do wytwarzania narzędzi diamentowych metodą lutowania w próżni produkcji firmy Trenker Diamant-Anlagen-Technik [16]

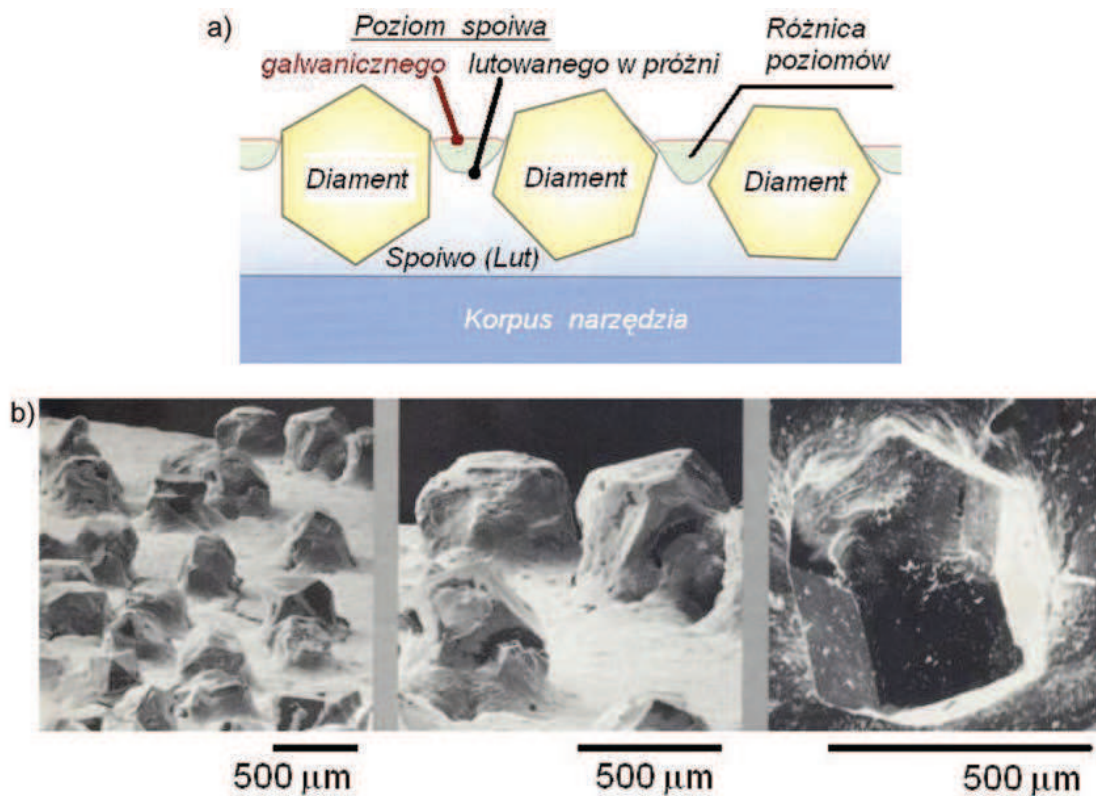
Fig. 4. The device HLA for manufacturing of diamond tools by brazing in a vacuum, produced by Trenker Diamant-Anlagen-Technik [16]



Rys. 5. Narzędzia diamentowe wytworzone metodą lutowania w próżni [14]

Fig. 5. Diamond tools made by brazing in a vacuum [14]

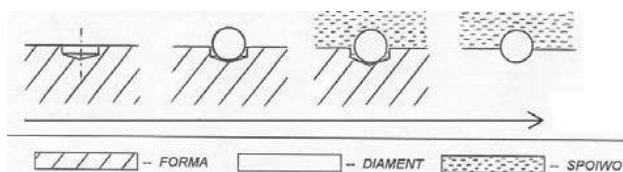
Połączenie ziarna z korpusem jest praktycznie bez porów, a lut może otaczać diamenty tylko powierzchniowo, dzięki czemu ziarna bardziej wystają ponad powierzchnię korpusu, a tym samym powierzchnia czynna narzędzia jest bardziej ostra (rys. 6). Lutowane monowarstwy diamentowe są bardziej odporne na drgania i przypadkowe uderzenia. Narzędzia z diamentami lutowanymi w próżni są droższe od narzędzi galwanicznych, ale umożliwiają bardziej wydajną pracę, w tym ręczną na sucho, z większymi naciskami. Ich podstawowy obszar zastosowań to kompozyty (np. stosowane w produkcji lotniczej i jachtów), czy kamień i ceramika – trudne do obróbek za pomocą innych narzędzi. Ich wydajność w tych operacjach jest do kilku do kilkunastu razy większa niż narzędzi galwanicznych.



Rys.6. a) Porównanie budowy wiązania ziaren ściernych lutowanych próżniowo i wiązanych galwanicznie, b) widok powierzchni narzędzia z diamentami lutowanymi próżniowo [22]
 Fig. 6. a) Comparison of construction bonds abrasive grains bonded by vacuum brazing and electroplating, b) view of the tool surface with a vacuum brazed diamonds [22]

Narzędzia z diamentami łączonymi metodą infiltracji metalu

Specyficznym sposobem łączenia diamentów i monolitycznych spieków za pomocą lutów jest metoda infiltracji [2, 9]. Polega ona na wprowadzeniu ciekłego lutu w porowaty szkielet, który po nasyceniu metalem będzie stanowił częściowo gotowy wyrób diamentowy. Proces produkcyjny jest kilkuetapowy, w którym pierwszy polega na wykonaniu „negatywu” przyszłej czynnej powierzchni narzędzia (rys. 7) – jest to ułożenie diamentów w gniazdach. W precyzyjnie wykonanej formie tworzy się gniazda, w które wkłada się diamentu lub kształtki z monolitycznych spieków. Na tym etapie produkcji istnieje możliwość krystalograficznej orientacji poszczególnych ziaren pod względem ich optymalnych właściwości na ścieranie i twardości. Anizotropię diamentu uwzględnia się formując odpowiednio kształt i ukierunkowanie gniazda [18, 5].



Rys. 7. Etapy powstawania narzędzia diamentowego metodą infiltracji [2]
 Fig. 7. Stages of the diamond tool manufacturing by infiltration [2]

Operację układania zorientowanych diamentów można zautomatyzować i czynnościami sterować ze wspomaganie komputerowym. Dodatkowo można też wspomagać się tu aparaturą do badań dyfrakcji rentgenowskiej i na podstawie sygnału z analizy odpowiednio ustawić przestrzennie kryształ diamentu, zgodnie z jego osiami krystalograficznymi.

Formy wykonuje się ze stali (wkładki z diamentu do obciążaczy) lub z materiałów bardziej odpornych na temperaturę jak grafit lub ceramika (np. narzędzia wiertnicze). Kolejnym etapem jest zasypanie formy wypełniaczem i kawałkami lutu (tab. 2). Do zadań wypełniacza należy „utrzymanie” diamentów w ich gniazdach w formie. Gęstości diamentu i metalu infiltrującego są bardzo różne i po stopieniu metalu diamenty wypływałyby na jego powierzchnię. Wypełniacz musi mieć większą gęstość także od metalu infiltrującego, jednocześnie jego obecność nadaje spoiwu założoną twardość i odporność na ścieranie. Jako wypełniacze używa się proszki metali, w tym ciężkich – jak wolframu lub molibden, a także węgiel wolframu w postaci proszku. W trakcie wygrzewania lub bezpośrednio po wyjęciu formy z pieca dociska się gorącą masę. Jeżeli mamy do czynienia z narzędziem z korpusem, do którego ma być przytwierdzony diamentowy element ścierny (np. koronki wiertnicze), na tym etapie wygrzewa i prasuje się całość, tj. element diamentowy łącznie z korpusem. Produkt wygrzewania wyjmuje się z formy po jej ostudzeniu i obrabia

w celu nadania monowarstwie diamentowej wymiarów w zakresie wymaganych tolerancji do określonej operacji.

Tabela 2. Charakterystyka lutów oferowanych przez firmę Kennametal Inc. przeznaczonych do wytwarzania narzędzi diamentowych metodą infiltracji [15]

Table 2. Characteristics brazing materials offered by Kennametal Inc. for the manufacture of diamond tools by infiltration [15]

Oznaczenie firmy Kennametal Inc.	Macrofil 49™	Macrofil 53™	Macrofil 56™	Macrofil 65™
Skład chemiczny:	% (wag.)			
miedź	49	53	56	65
nikiel	10	15	43	15
cynk	4	8	–	20
mangan	–	24	–	–
cyna	–	–	1	–
Gęstość [g/cm ³]	8,15	8,20	8,20	8,70
Temperatura topnienia [°C]	930	1090	870	1095

Metody infiltracji metalu stosuje się w produkcji narzędzi, w których kryształ diamentu kruszy obrabiany materiał na zasadzie zgniotu (obróbka kruchych materiałów o budowie wieloskładnikowej, wiercenie geologiczne, obciążanie ściernic) lub w przypadkach kiedy zależy nam na bardzo dokładnym zachowaniu kształtu przedmiotu obrabianego i potrzebna jest powierzchnia narzędzia bardzo odporna na ścieranie. Główne obszary zastosowań takich narzędzi to obciążacze (w tym rolkowe) oraz wiertła i frezy do obróbki kamienia, betonów i kompozytów ceramicznych.

Podsumowanie

Techniki lutowania mają szerokie zastosowanie w produkcji narzędzi diamentowych. Jednocześnie są one ciągle rozwijane, zwłaszcza przez opracowywanie nowych niżej topliwych lutów, czy lepiej zwilżających i wiążących diamenty. Wprowadzanie do przemysłu lutowania w próżni spowodowało wzrost ilości zastosowań narzędzi lutowanych z ziarnem ściernym w operacjach cięcia, wiercenia, frezowania i zgrubnego szlifowania.

LITERATURA

[1] Bakoń A., A. Barylski. 2016. „Monowarstwowe narzędzia diamentowe w produkcji nowoczesnych środków transportu”. *TTS – Technika Transportu Szybnego* (12): 386–390.

[2] Bakoń A., A. Szymański. 1992. „Practical Uses of Diamond”. Warszawa: PWN – Ellis Horwood.

[3] Dobrzański L.A. 2006. „Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo”. Warszawa: WNT.

[4] Egan D., J.A. Engels. 2014. “The use of coated diamonds in diamond impregnated tools”. *Industrial Diamond Review* (4): 34–38.

[5] Huang S. F., H.I. Tsai, S.T. Lin. 2002. “Laser brazing of diamond grits using a Cu-15Ti-10Sn brazing alloy”. *Materials Transactions* (43): 2604–2608.

[6] Jacobson D.M., G. Humpston. 2005. “Principles of Brazing”. ASM International, Materials Park.

[7] Jennings M. 2008. “Brazed single layer tools made their mark”. *Industrial Diamond Review* (1): 17–19.

[8] Jiang Y.D., G.S. Li, G.F. Li. 2001. “Manufacture and performance of electroplated diamond tools made with nanocrystalline nickel”. *Industrial Diamond Review* (2): 43–45.

[9] Konstany J. 2005. “Powder Metallurgy – Diamond Tools”. Elsevier.

[10] Materiały firmy China Grinding Wheel Corporation (Tajwan).

[11] Materiały firmy Dr. Fritsch AG (Niemcy).

[12] Materiały firmy Element Six.

[13] Materiały firmy Empire Scientific AG (Szwajcaria).

[14] Materiały firmy Ijin Diamond (Chiny).

[15] Materiały firmy Kennametal Inc. (Kanada).

[16] Materiały firmy Trenker Diamant-Anlagen-Technik.

[17] Materiały firmy Trigon Technology (USA).

[18] Meng D. et. al. 2012. “Based on the brazing of abrasive orderity arranged diamond tool the new preparation technology research”. *Machine Manufacturing & Automation* (4): 10–11.

[19] Najdicz J.W. 1982. “Pajka i metalizacja swierchtwiordych instrumentalnych materialow”. Kijów: Naukowa Dumka.

[20] Sung C.M. 1999. “Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond saws”. *Diamond and Related Materials* (8): 1540–1543.

[21] SYNDITE – Polykristalline Diamat (PKD) – Einsatz fuer den Besatz von Schneidwerkzeugen und Verschleissenteilen. Materiały firmy De Beers.

[22] Trenker A., H. Seidemann. 2002. “High-vacuum brazing of diamond tools”. *Industrial Diamond Review* (1): 49–61.

[23] Wang Y.H. et. al. 2002. “Properties and applications of Ti – Coated diamond grits”. *Journal of Materials Processing Technology* (129): 369–372.

[24] Wilks J., E. Wilks. 1992. “Properties and Applications of Diamond.” Butterworth-Heinemann.

dr Andrzej Bakoń – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: a.bakon@stegny.2a.pl

prof. dr hab. inż. Adam Barylski, prof. zw. PG – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska. 80-233 Gdańsk, ul. G. Narutowicza 11/12, e-mail: abarylsk@pg.gda.pl

BADANIA SKUTECZNOŚCI KLEJENIA I SPAWANIA STALI KONSTRUKCYJNEJ S235JR

Testing of effectiveness of bonding and welding of structural steel S235JR

Anna RUDAWSKA, Kamil KUTEK, Izabela MITURSKA, Leszek SEMOTIUK

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia wytrzymałości połączeń spawanych i klejowych stali konstrukcyjnej S235JR. Wykonane połączenia porównano pod względem skuteczności, gdzie kryterium określającym była wytrzymałość na ścinanie. Przedmiotem badań były trzy rodzaje połączeń spawanych: doczołowych, zakładkowych z jednym spawem, zakładkowych z dwoma spawami, jak i dwa rodzaje połączeń klejowych: doczołowych i zakładkowych. Łączone próbki wykonano z blachy stalowej konstrukcyjnej S235JR o grubości 4 mm. Do wykonania połączeń spawanych wykorzystano spawarkę inwertorową ADLER MMA-200. Połączenia spawane przygotowano z zastosowaniem spawania łukowego elektrodą otuloną klasyfikowaną wg PN-EN ISO 2560:2006-E38 A RC 12. Do wykonania połączeń klejowych zastosowano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/Z1/100:10. Przygotowanie powierzchni wszystkich próbek przeznaczonych do łączenia polegało na usunięciu nierówności krawędzi blach za pomocą szlifierki kątovej, usunięciu zanieczyszczeń przy użyciu środka do czyszczenia i odrdzewiania powierzchni Fosol, a następnie odtuszczeniu powierzchni preparatem Loctite 7063. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono zgodnie z normą EN DIN 1465. Uzyskane wyniki badań wskazały na różnice w otrzymanych wartościach wytrzymałości w zależności od zastosowanej metody łączenia, a także geometrii wykonanych połączeń. Na podstawie wyników badań zauważono, że lepsze wyniki wykazały połączenia spawane, co wskazuje na ich większą skuteczność, jednak w połączeniach spawanych w większości próbek zauważono wyraźną korozję w miejscu złączenia, czego nie zaobserwowano w przypadku połączeń klejowych.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, połączenia spawane, wytrzymałość, stal konstrukcyjna

Abstract: The article presents selected issues of welded joints and adhesive joints strength of structural steel S235JR. Joints were compared in terms of effectiveness, where criterion for determining was shear strength and value of destructive force. The subject of the study were three types of welded joints: butt, single-lap with single weld, single-lap with double welds, as well as two types of adhesive joints: butt and single-lap. Joined samples were made of S235JR steel sheet with a thickness of 4 mm. Welded joints were made by used inverter welder ADLER MMA-200. Welded joints were prepared by the arc welding with coated electrode classifiable according to PN-EN ISO 2560:2006-E38 A RC 12. In the case of adhesive joints, two-component epoxy adhesive consisting of epoxy resin Epidian 57 and hardener Z1 connected in a weight ratio of 100:10. Surface of all samples were preparation by removing uneven from edges of sheets with angle grinder, to remove impurities using cleaner and rust removal surface Fosol and then degreased with Loctite 7063. Strength test were carried out according to EN DIN 1465. Obtained test results pointed out the differences in the strength values obtained depending on the method of joining, as well as geometry of the made joints. Based on results observed that better results were achieved for welded joints and thus their effectiveness was higher, but in most of welded joints was observed corrosion at the joint, which was not observed in the case of adhesive joints.

Keywords: adhesive joints, welded joints, strength, structural steel

Wstęp

W technologii montażu w niemal wszystkich dziedzinach przemysłu bardzo ważną rolę odgrywa rodzaj połączeń montażowych. Aktualny postęp technologiczny pozwala na łączenie materiałów o różnych właściwościach fizykochemicznych i mechanicznych. Przedsiębiorstwa produkcyjne dążą do jak najlepszej jakości wykonywanych wyrobów, co powoduje wzrastające zapotrzebowanie na modyfikację technologii łączenia materiałów.

Pośród połączeń montażowych wyróżnia się połączenia rozłączne i nierozłączne. Wśród połączeń nierozłącznych wymienia się następujące rodzaje spajania materiałów: spawanie, zgrzewanie, lutowanie i klejenie [9, 5, 2]. Spajanie należy do najczęściej spotykanych procesów technologicznych w przemyśle maszynowym. Procesy te różnią się między sobą stanem skupienia

materiałów podstawowych i spoiwa w miejscu spajania, charakterem wiązań, jakie tworzą się w połączeniach oraz rodzajem doprowadzonej energii cieplnej i/lub mechanicznej w celu utworzenia połączenia [1]. Dla porównania wybranych właściwości poszczególnych metod łączenia, w trakcie badań przedstawionych w pracy wykonano połączenia zakładkowe i doczołowe metodą spawania i klejenia.

Spawanie znalazło największe zastosowanie spośród wymienionych metod, dlatego też na przestrzeni lat taki sposób montażu bardzo się rozwinął. Do dziś metody spawania i ich parametry poddawane są ciągłym badaniom w celu poprawienia jakości wykonywanych połączeń. Drugim analizowanym sposobem łączenia jest klejenie, które należy do intensywnie rozwijanych technologii łączenia materiałów w różnych dziedzinach przemysłu [4, 10, 7, 8] oraz stanowi cenne uzupełnienie

stosowanych dotychczasowo metod łączenia, w dużej mierze dzięki swojej uniwersalności. Klejenie umożliwia łączenie praktycznie wszystkich materiałów o znaczeniu przemysłowym.

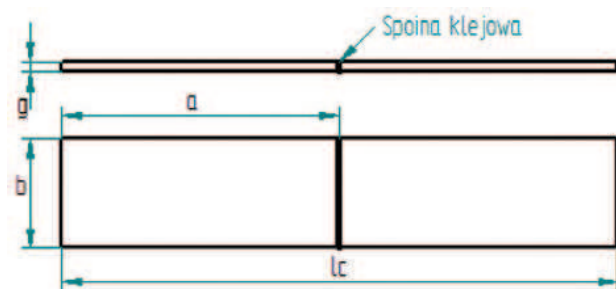
W pracy skoncentrowano się na badaniach skuteczności połączeń klejowych i spawanych blach ze stali S235JR, przy założonych rodzajach połączeń, gdzie kryterium porównawczym była wytrzymałość połączeń na ścinanie.

Badania doświadczalne

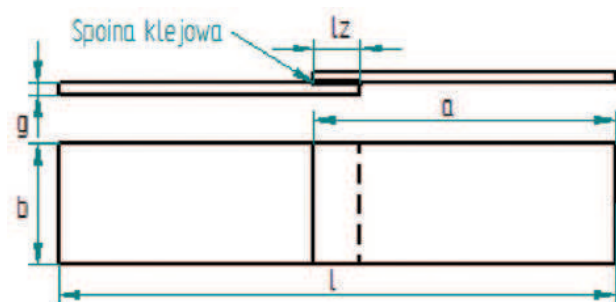
Badania doświadczalne polegały na wykonaniu połączeń klejowych i spawanych, które zostały przygotowane z prostokątnych próbek wyciętych z blachy stali konstrukcyjnej S235JR, których wymiary geometryczne przedstawiono w tab. 1. Wykonano po 10 próbek dla każdego rodzaju połączeń.

Charakterystyka połączeń klejowych

Do badań wykorzystano połączenia klejowe doczołowe (rys. 1) oraz jednozakładkowe (rys. 2) obciążone na ścinanie, których schemat oraz wymiary przedstawiono na rysunkach i w tab. 1.



Rys. 1. Schemat doczołowego połączenia klejowego
Fig. 1. The butt adhesive joint geometry



Rys. 2. Schemat zakładkowego połączenia klejowego
Fig. 2. The single-lap adhesive joint geometry

Tabela 1. Wymiary połączeń klejowych
Table 1. The adhesive joints dimension

Oznaczenie wymiaru	a [mm]	b [mm]	g [mm]	l_z [mm]	l [mm]	l_z [mm]
Wymiar	100 ± 1	20 ± 0,5	4 ± 0,1	200 ± 0,1	185 ± 1	15 ± 1

Do wykonania połączeń klejowych zastosowano kompozycję klejową, sporządzoną z żywicy epoksydowej Epidian 57 i utwardzacza Z1 w stosunku wagowym 100:10 (Epidian 57/Z1/100:10). Kompozycję klejową odważono i wymieszano ręcznie, a następnie usunięto pęcherze gazowe na specjalnym stanowisku wyposażonym w pompę próżniową, bezpośrednio przed procesem klejenia.

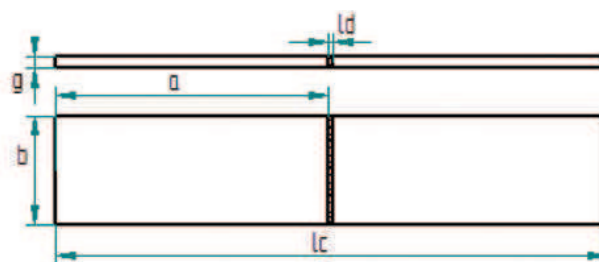
Klej nanoszono na jedną z łączonych powierzchni. Połączenia klejowe przygotowano w warunkach laboratoryjnych, w których temperatura wynosiła 25°C ± 1°C, zaś wilgotność sięgała poziomu ok. 31% ± 1%. Czas utwardzania kleju wynosił 10 dni.

Charakterystyka połączeń spawanych

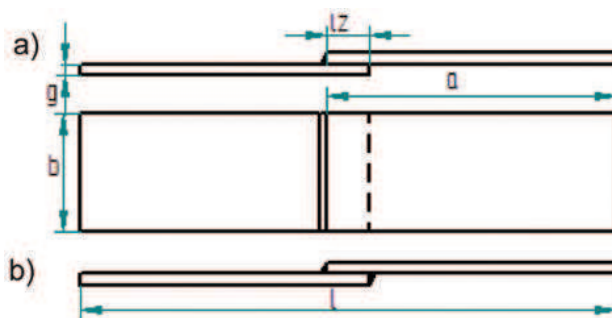
W badaniach użyto również połączenia spawane doczołowe i na zakładkę blach ze stali S235JR (tab. 2). Schemat oraz wymiary wykonanych połączeń przedstawiono na rys. 3, 4a i 4b i w tab. 3.

Tabela 2. Rodzaje zastosowanych połączeń spawanych
Table 2. The types of welded joints

Połączenia spawane		
Połączenie doczołowe	Połączenie zakładkowe	
	Spaw pojedynczy	Spaw podwójny



Rys. 3. Schemat doczołowego połączenia spawanego
Fig. 3. The butt welded joint



Rys. 4. Schemat zakładkowego połączenia spawanego: a) z jednym spawem, b) z podwójnym spawem
Fig. 4. The single-lap welded joint geometry: a) with single weld, b) with double weld

Tabela 3. Wymiary połączeń spawanych
Table 3. The welded joints dimension

Oznaczenie wymiaru	a [mm]	b [mm]	g [mm]	l_z [mm]	l [mm]	l_d [mm]	l_z [mm]
Wymiar	100±1	20±0,5	4±0,1	202±1	185±1	2±0,5	15±1

Połączenia spawane przygotowano z zastosowaniem spawania łukowego elektrodą otuloną klasyfikowaną wg PN-EN ISO 2560:2006-E38 A RC 12 z wykorzystaniem spawarki inwertorowej ADLER MMA-200, w temperaturze 25°C. Połączenia spawane, podobnie jak połączenia klejowe, zostały poddane niszczącym badaniom wytrzymałościowym.

Sposób przygotowania powierzchni łączonych elementów

Przygotowanie powierzchni elementów przeznaczonych do wykonania obu rodzajów analizowanych połączeń polegało na usunięciu nierówności krawędzi blach za pomocą szlifierki kątovej BOSCH GWS 850CE, wyposażonej w ściernicę listkową talerzową, zbudowaną z listków (lamelek) z płótna ściernego z ziarnem korundowym, nałożonych równomiernie, wachlarzowo na podstawie z włókna szklanego. Kolejnym etapem przygotowania powierzchni łączonych elementów było usunięcie zanieczyszczeń przy użyciu preparatu do czyszczenia i odrdzewiania powierzchni Fosol firmy Libella, a następnie odłuszczenie powierzchni preparatem Loctite 7063.

Badania wytrzymałościowe

Po upływie czasu utwardzania spoiny klejowej (10 dni), połączenia poddano badaniom wytrzymałościowym na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150 zgodnie z normą ISO 4587. Badania wytrzymałościowe wykonano przy zachowaniu osiowego zamocowania próbek i równomierności obciążenia statycznego oraz zachowaniu stałej prędkości trawersy 5 mm/min. Dla

połączeń doczołowych otrzymano wyniki wytrzymałości na rozciąganie, natomiast dla połączeń zakładkowych – wytrzymałość na ścinanie.

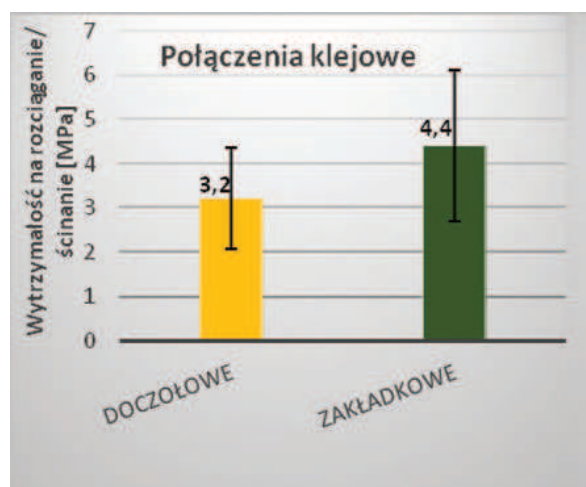
Wyniki badań

Otrzymane wyniki badań niszczących połączeń klejowych i spawanych przedstawiono na rys. 5 i 6.

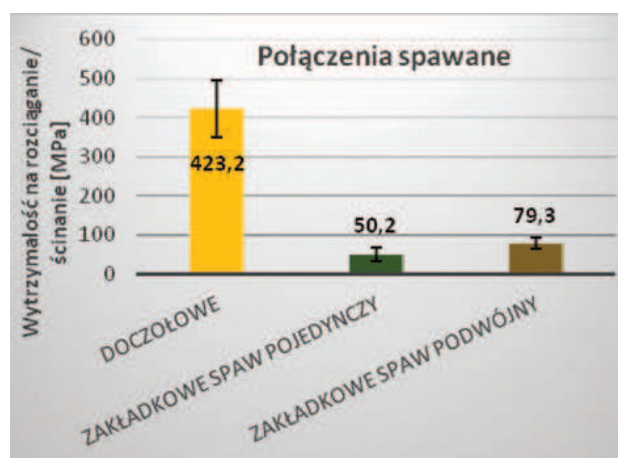
Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że największą wytrzymałość uzyskano dla połączeń spawanych doczołowo. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie dla tych połączeń jest ponad czterokrotnie większa niż połączeń spawanych zakładkowych i wynosi 423,2 MPa. Połączenia spawane doczołowe mają największą wartość odchylenia standardowego. Wyniki dla tego rodzaju połączeń są najbardziej powtarzalne, ponieważ w większości próbek zniszczeniu uległ materiał rodzimy. W przypadku połączeń klejowych analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że połączenia klejowe zakładkowe są korzystniejszym rozwiązaniem niż połączenia doczołowe. Dla połączeń klejowych doczołowych średnia wytrzymałość na ścinanie wynosi 3,2 MPa, natomiast dla połączeń klejowych zakładkowych jest o 37% większa i wynosi 4,4 MPa. Biorąc pod uwagę pozostałe analizowane czynniki można stwierdzić, że w przypadku próbek klejonych połączenia zakładkowe okazują się bardziej korzystne niż połączenia doczołowe.

Podsumowanie i wnioski

Połączenia spawane i klejowe należą do grupy połączeń nierozłącznych i znajdują szerokie zastosowanie



Rys. 5. Wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali S235JR
Fig. 5. The results of tensile strength of the joints S235JR steel sheets



Rys. 6. Wytrzymałość połączeń spawanych blach ze stali S235JR
Fig. 6. The results of the strength of welded joints S235JR steel sheets

w przemyśle oraz technologii montażu. Cechują się możliwością łączenia materiałów o skomplikowanych kształtach, a połączenia klejowe także możliwością łączenia materiałów o różnych właściwościach.

Do przeprowadzonych badań wykorzystano spawanie elektrodą topliwą, otuloną. Metoda ta została wybrana ze względu na powszechność zastosowania, dużą popularność w procesie technologii montażu oraz możliwość spawania stali konstrukcyjnej S235JR [6]. Zastosowano trzy rodzaje połączeń: doczołowe, zakładkowe z jednym spawem oraz zakładkowe z podwójnym spawem.

Do wykonania połączeń klejowych zastosowano dwa rodzaje połączeń: zakładkowe oraz doczołowe, a także wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/Z1/100:10.

Na podstawie wytrzymałościowych badań niszczących oraz ich analizy można sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie połączeń spawanych doczołowych przyniosło korzystny wpływ na wytrzymałość na ścinanie w przypadku spawania. Wytrzymałość na rozciąganie połączeń spawanych doczołowo wynosi 423,2 MPa. Wytrzymałość połączeń spawanych zakładkowych z jednym spawem stanowi 11,86% wytrzymałości połączeń spawanych doczołowo, natomiast wytrzymałość połączeń spawanych zakładkowych z podwójnym spawem stanowi 18,73% wytrzymałości połączeń spawanych doczołowo,
- średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie połączeń spawanych doczołowo była ponad czterokrotnie większa niż połączeń spawanych zakładkowych, jednak wartość odchylenia standardowego była największa, co wskazuje na dużą precyzję i wysokie umiejętności spawacza,
- największe średnie wydłużenie próbek uzyskały połączenia spawane zakładkowe z podwójnym spawem i w tych połączeniach złom wystąpił w rodzimym materiale, nie w miejscu spoiny. W tym przypadku należy również zwrócić uwagę, że zniszczenie materiału świadczy o wyższej wytrzymałości samej spoiny, niż materiału łączonego, którego wytrzymałość wg EN 10025 wynosi $R_m = 360\text{--}510$ MPa. Wytrzymałość w przypadku tych połączeń wyniosła 79,3 MPa, czyli można sądzić, że zastosowanie dwóch spawów spowodowało obniżenie właściwości wytrzymałościowych materiału rodzimego,
- połączenia spawane zakładkowe z jednym spawem uzyskały najslabsze wyniki wytrzymałościowe wśród połączeń spawanych, a zniszczenie wystąpiło w miejscu wykonania spoiny,
- w połączeniach spawanych w większości próbek zauważono wyraźną korozję w miejscu złączenia,
- wśród połączeń klejowych korzystny wpływ na cechy wytrzymałościowe przyniosło zastosowanie połączeń zakładkowych,
- połączenia klejowe doczołowe osiągnęły niskie wyniki wytrzymałościowe, co może wynikać ze zbyt małej powierzchni przylegania łączonych materiałów.

Podsumowując, zarówno połączenia spawane, jak i klejowe wymagają przeprowadzenia odpowiednich czynności wstępnych, aby wykonać takie połączenia. Podczas procesu klejenia oraz spawania istotną rolę odgrywa odpowiedni dobór geometrii i sposób ich wykonania. Wniosekować można, że w przypadku łączenia elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnej S235JR skutecznym sposobem łączenia ze względów wytrzymałościowych są połączenia spawane, jednak w przypadku połączeń klejowych nie wystąpiło zjawisko korozji w miejscu łączenia ze sobą materiałów. Prowadzenie dalszych badań analizowanych połączeń, uwzględniając zarówno czynniki konstrukcyjne, jak i technologiczne, wpływające na skuteczność połączeń spawanych i klejowych, mogłoby pozwolić na poprawę uzyskiwanych wyników wytrzymałościowych.

LITERATURA

- [1] Ferenc K. 2007. „Spawalnictwo”. Warszawa: WNT.
- [2] Godzimirski J., A. Komorek. 2008. „Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych”. *Przegląd Mechaniczny* (12): 40–44.
- [3] ISO 4587:2003 – Adhesives – Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies.
- [4] Majda P. 2007. „Wybrane problemy analizy połączeń klejowych komponentów stalowych”. *Przegląd Spawalnictwa* (7): 40–45.
- [5] Mistur L., J. Czuchraj. 2005. „Metody spawania oraz sposoby oceny jakości złączy spawanych”. Krosno: KaBe.
- [6] Rudawska A., Ł. Sosnowski. 2013. „Wybrane zagadnienia wytrzymałości połączeń spawanych i klejowych stali konstrukcyjnej S235JR”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* (1): 49–56.
- [7] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Politechnika Lubelska.
- [8] Rudawska, A. i in. 2016. „Wytrzymałość połączeń klejowych po różnym czasie sezonowania”. *Przeźródło Tworzyw* (3): 126–131.
- [9] Siwek B. 2002. „Połączenia spawane, zgrzewane, lutowane i klejone”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [10] Vedula S. 2010. “Infrared thermography and ultrasonic inspection of adhesive bonded structures”. Overview and validity, Clemson University.

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

inż. Kamil Kutek – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, e-mail: kutek.kamil93@gmail.com

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

dr inż. Leszek Semotiuk – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: l.semotiuk@pollub.pl

Spot welding metal sheets of aluminum alloy 7075-T6

Rafał KLUZ, Andrzej KUBIT, Dawid WYDRZYŃSKI

S t r e s z c z e n i e: Punktowe zgrzewanie tarciove z przemieszczaniem jest jedną z najnowocześniejszych metod łączenia metali i ich stopów w stanie stałym. Możliwość łączenia elementów wykonanych ze stopów aluminium pozwala na stosowanie tej metody przy produkcji struktur lotniczych, przy jednoczesnym obniżeniu pracochłonności, kosztów i ich ciężaru, zachowując porównywalne lub wyższe parametry wytrzymałościowe w porównaniu do klasycznych metod łączenia elementów. Zapewnienie stałości parametrów użytkowych połączeń wymaga jednak doboru parametrów procesu zgrzewania, tj.: prędkości obrotowej narzędzia, zagłębienia narzędzia oraz czasu zgrzewania. W pracy zaprezentowano wyniki badań procesu zgrzewania blach aluminiowych 7075-T6 o grubości 1,8 i 0,8 mm. Testy zgrzewania przeprowadzono na dedykowanej maszynie do zgrzewania punktowego, natomiast badania wytrzymałościowe obejmowały statyczną próbę ścinania. W końcowej części artykułu dokonano analizy porównawczej nośności połączenia i budowy spoiny uzyskanej metodą RFSSW przy najkorzystniejszych parametrach ze zgrzeiną wykonaną metodą zgrzewania oporowego.

S ł o w a k l u c z o w e: zgrzewanie tarciove punktowe z przemieszczaniem, aluminium 7075-T6, parametry procesu

A b s t r a c t: Friction Stir Spot Welding is one of the most contemporary methods of joining metals and alloys in their solid state. The ability to join elements made of aluminum alloys allows for utilizing this method in the manufacturing of aircraft structures while lowering the work load, costs, and weight, without sacrificing or even having better strength parameters than classic methods of joining elements. It ensures constant joint parameters, however it requires the use of optimal welding parameters such as: the rotational speed of the tool, tool delve depth, and welding time. The work presents the results of experiments conducted on 7075-T6 aluminum sheet metal that was 1.8 and 0.8 mm thick. The welding tests were done on a dedicated spot welding machine, while the strength tests consisted of static tensile strength tests. In the final part of the article comparative analysis was made of strength of joint made by RFSSW method and obtained from the resistance welding.

K e y w o r d s: friction stir spot welding, aluminium 7075-T6, process parameters

Wprowadzenie

Konstrukcje lotnicze ze względu na wyjątkową odpowiedzialność muszą spełniać najwyższe wymagania w zakresie bezpieczeństwa technicznego. Jest to zadanie niezmiernie złożone, ponieważ muszą łączyć w sobie najmniejszą możliwą masę, akceptowalny koszt wytworzenia, trwałość i odpowiednią wytrzymałość [4].

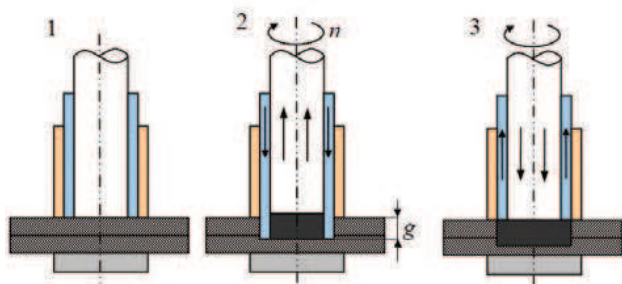
Ze względu na dużą wytrzymałość przy małej gęstości stopy aluminium należą do intensywnie badanej i szeroko stosowanej grupy materiałów. Znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie potrzebna jest duża wytrzymałość konstrukcji przy możliwie najmniejszej masie. Bardzo ważnym czynnikiem, który decyduje o zastosowaniu stopu aluminium na elementy konstrukcyjne samolotów jest możliwość wykonania połączenia o wysokiej wytrzymałości [12, 10, 3]. Stopy aluminium można łączyć za pomocą spawania, zgrzewania, lutowania i klejenia oraz połączeń mechanicznych (nitowanie, łączenie śrubami). Metody tradycyjne jak nitowanie czy klejenie zapewniają możliwość uzyskania wymaganych właściwości funkcjonalnych, jednak przy dużej pracochłonności wykonania. Powszechne zastosowanie w łączeniu cienkich blach znajduje metoda zgrzewania rezystancyjnego punktowego. Proces ten polega na wydzielaniu ciepła w wyniku ograniczonego przepływu prądu elektrycznego, wywołanego opornością

elektryczną elementów ułożonych na zakładkę [3]. Wydzielanie ciepła powoduje miejscowe stopienie materiału w miejscu styku i utworzenie jądra ciekłego metalu, które krzepnąc pod dociskiem elektrod tworzy zgrzeinę. W procesie zgrzewania rezystancyjnego punktowego ważne jest zapewnienie podparcia i osiowego docisku elementów w miejscu wykonywania połączenia z obu stron złącza. Dla uzyskania odpowiedniej jakości zgrzein konieczne jest zastosowanie odpowiednio dużej siły docisku łączonych elementów [7]. Stopy aluminium mają skłonność do pokrywania warstwą trudnoopłowego tlenku, co sprawia trudności podczas procesu zgrzewania. Ponadto dobra przewodność cieplna i elektryczna aluminium powoduje konieczność stosowania urządzeń o dużej mocy. Dodatkowym problemem w tym procesie jest zmiana objętości w czasie krzepnięcia oraz wynikające z tego odkształcenia cieplne, powodujące deformację zgrzewanych konstrukcji. Jednocześnie na powierzchni złącza z obu stron pozostają wgłębienia obniżające wytrzymałość zmęczeniową połączenia [3].

Krytycznym wymaganiem stojącym przed przemysłem lotniczym jest opracowanie taniej metody łączenia stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo, która zapewni dużą wytrzymałość połączeń przy zmniejszonej pracochłonności procesu w porównaniu do metod tradycyjnych.

W przemyśle motoryzacyjnym trudności w wykonywaniu wysokiej jakości spoin klasycznymi metodami zostały częściowo przezwyciężone w nowej technice łączenia – punktowym zgrzewaniu tarciovym z przemieszaniem RFSSW (RFSSW – Refill Friction Stir Spot Welding). Metoda ta polega na miejscowym (punktowym) nagrzeniu tarciami obszaru złącza przez obrotowe narzędzie. Proces zgrzewania blach metodą RFSSW składa się z trzech zasadniczych faz [5, 9] (rys. 1). W pierwszej fazie następuje pozycjonowanie trzpienia mieszającego i tulei na płaszczyźnie górnej blachy złącza. Tuleja zewnętrzna wywiera ciągły docisk, zabezpieczając materiały łączone przed niekontrolowanym przesunięciem. Następnie sworzeń i tuleja są przyspieszane do swojej nominalnej prędkości obrotowej. Jednoczesny obrót i docisk trzpienia i tulei wewnętrznej generuje ciepło tarcia, które nagrzewa i uplastycznia metal w strefie łączenia.

Faza druga obejmuje penetrację złącza przez tuleję, która zagłębiając się w materiał powoduje jego uplastycznienie. W tym samym czasie trzpień jest wycofany, zapewniając przestrzeń dla przemieszczanego materiału. W dalszej fazie następuje przeciwny ruch trzpienia i tulei, który wyciska uplastyczniony metal w kierunku złącza. W końcowej części procesu tuleja i trzpień ustawiane są w pierwotnej pozycji, po czym następuje odsunięcie narzędzia od spoiny.



Rys. 1 Etapy zgrzewania metodą RFSSW
Fig. 1. Steps of Refill Friction Stir Spot Welding [5]

Zgrzewanie punktowe obecnie wypiera nitowanie i klejenie stopów lekkich ze względu na to, że [5]:

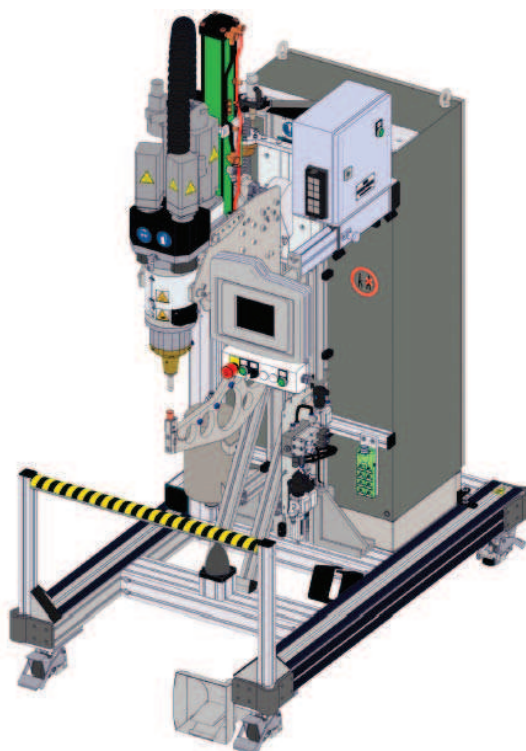
- nie wymaga nawiercania elementów i stosowania nitów jako dodatkowych elementów łącznikowych,
- nośność zgrzein może osiągać wartości wyższe od połączenia nitowego,
- złącza zgrzewane zachowują wysoką odporność korozyjną ze względu na nieobecność elementów o innym od materiałów rodzimych potencjale elektrochemicznym,
- istnieje możliwość prostej naprawy złącza,
- żaden element zgrzeiny nie wystaje ponad powierzchnie łączonych elementów,
- zostaje wyeliminowana możliwość utraty szczelności przez złącze.

Stan wiedzy dotyczący zjawisk zachodzących podczas procesu zgrzewania nie jest jednak do końca zadowalający, co skutkuje trudnościami w doborze

optymalnych warunków prowadzenia procesu dla konkretnych stopów lotniczych [11, 6, 8, 1, 2]. Dlatego celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu parametrów ustawczych procesu zgrzewania metodą RFSSW na nośność połączeń zakładkowych wykonanych ze stopu aluminium 7075-T6 powszechnie wykorzystywanego w konstrukcjach lotniczych.

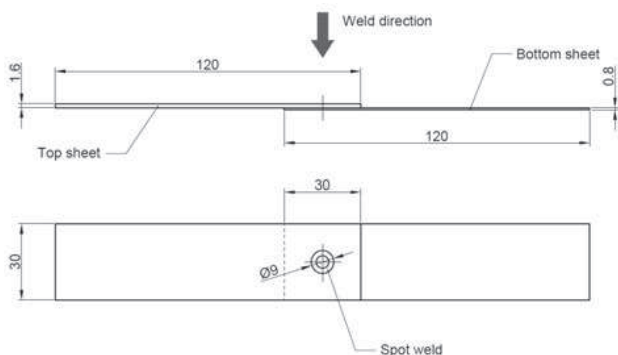
Metodyka badań

Badania procesu zgrzewania blach przeprowadzono na maszynie do punkowego zgrzewania tarciovego z przemieszaniem RPS 100 VA11 (rys. 2). Przedmiotem badań były złącza zakładkowe blach ze stopu aluminium 7075-T6 o grubości 1,8 i 0,8 mm. Stop ten ma wysoką wytrzymałość mechaniczną – porównywalną do stali konstrukcyjnych oraz bardzo wysoką wytrzymałość zmęczenia. Jest bardzo dobrym materiałem do obróbki skrawaniem, także głębokich wybrań, ma średnią odporność na korozję, bardzo dobrze nadaje się do szlifowania, polerowania oraz obróbki elektroerozyjnej. Stosowany jest na formy rozdmuchowe, formy na tworzywa piankowe, elementy tłoczników i wykrojników oraz w przemyśle lotniczym na obciążone elementy konstrukcyjne.



Rys. 2. Stanowisko do zgrzewania tarciovego z przemieszaniem RPS 100 VA11
Fig. 2. Refill friction stir spot welding workstation RPS 100 VA11

Próby zgrzewania prowadzono na arkuszach blachy 7075-T6 z których wykonywano próbki do statycznej próby ścinania o długości i szerokości zakładki wynoszącej 30 mm (rys. 3).



Rys.3. Parametry próbek do statycznej próby ścinania
Fig. 3. Parameters of samples for static strength test

W trakcie prób zgrzewania dokonywano zmian:

- prędkości obrotowej narzędzia n (2000–3000 obr./min),
- wartości zagłębienia narzędzia g (1,3–1,7 mm),
- czasu zgrzewania t (1–1,5 s).

Badania nośności połączenia w próbie statycznego ścinania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z-100 przy prędkości posuwu szczęk 5 mm/min.

Wyniki badań i analiza

Podczas badań zgrzewania punktowego tarcowego z ruchomym trzpieniem RFSSW uzyskano zgrzeiny punktowe bezkraterowe o powierzchni charakteryzującej się dwoma koncentrycznymi obszarami wymieszanego tarcowo metalu (rys. 4). Nośność uzyskanych spoin zawierała się w przedziale do 2221 kN do 4,09 kN.

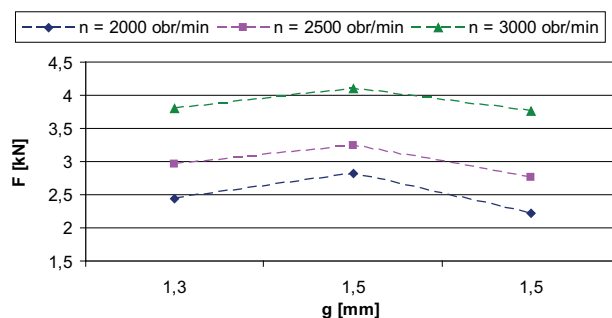


Rys. 4. Powierzchnia typowej spoiny wykonanej metoda RFSSW
Fig. 4. The surface of the weld made method RFSSW

W pierwszym etapie badań skoncentrowano się na analizie wpływu zagłębienia narzędzia na nośność połączenia. W tym celu wykonano spoiny przy zagłębieniu narzędzia równym 1,3; 1,5 i 1,7 mm, z trzema różnymi prędkościami obrotowymi narzędzia (2000, 2500 i 3000 obr./min) (rys. 5).

W trakcie analizy wykresu przedstawiającego zależność maksymalnej siły przenoszonej przez złącze od wartości zagłębienia narzędzia (rys. 5) można zauważyć, że krzywe przyporządkowane odpowiednim prędkościom obrotowym wykazują tę samą tendencję. Niezależnie od przyjętej prędkości obrotowej największą wytrzymałość połączenia zaobserwowano dla zagłębienia narzędzia wynoszącego 1,5 mm. Po przekroczeniu tej wartości wszystkie charakterystyki wykazują trend obniżania się

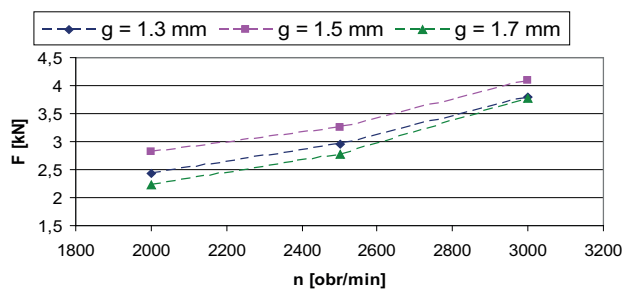
wytrzymałości złącza wraz ze wzrostem zagłębienia narzędzia. W przypadku krzywej odpowiadającej prędkości obrotowej 3000 obr./min odnotowano początkowy znaczący wzrost wytrzymałości zgrzeiny, osiągający wartość maksymalną wynoszącą 4,09 kN dla zagłębienia 1,5 mm, po czym wraz ze wzrostem zagłębienia narzędzia trend się odwraca i wytrzymałość połączenia maleje. Największy spadek wytrzymałości zgrzeiny zanotowano dla próbek wykonanych z prędkością obrotową wynoszącą 2000 obr./min (21,35%). Zmniejszenie wytrzymałości połączenia wraz ze wzrostem zagłębienia narzędzia spowodowane jest wynikiem osłabienia dolnej części połączenia przez tuleję pracującą w drugim etapie wytwarzania złącza, prowadzącego do całkowitego wyrywania fragmentu cieńszej z blach w trakcie statycznej próby ścinania.



Rys. 5. Zależność siły przenoszonej przez złącze od wartości zagłębienia narzędzia

Fig. 5. The dependence of the force transmitted through the joint versus the tool cavity

W dalszej części badań skupiono na określeniu wpływu prędkości obrotowej narzędzia na nośność uzyskanych spoin. Wyniki badań przedstawiono na rys. 6.



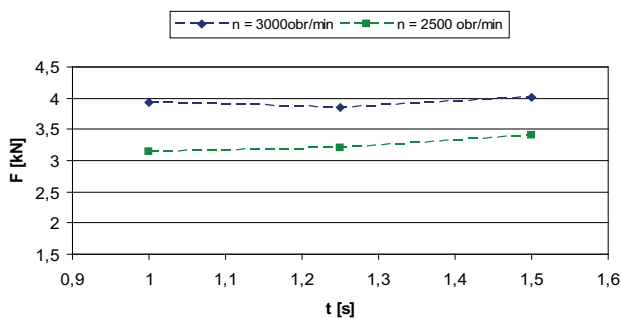
Rys. 6. Zależność siły przenoszonej przez złącze od prędkości obrotowej narzędzia

Fig. 6. The dependence of the force transmitted through the joint versus the tool rotational speed

Analiza rys. 6 wskazuje, że niezależnie od przyjętej wartości zagłębienia narzędzia wzrost prędkości obrotowej prowadzi do wzrostu nośności połączenia. Największy jednak wzrost odnotowano dla połączeń wykonywanych przy zagłębieniu wynoszącym 1,7 mm. W rozpatrywanym przypadku wzrost prędkości obrotowej narzędzia umożliwił zwiększenie nośności połączenia z 2,23 kN do 3,76 kN, a więc o 70,13%. Wzrost prędkości obrotowej narzędzia powodował również wzrost temperatury

w obrębie złącza, prowadząc do lepszego uplastycznienia materiału i wzrostu wytrzymałości połączenia. Jednocześnie zauważono zwiększenie podatności narzędzia do zabrudzenia. W trakcie prób ze zwiększonymi prędkościami obrotowymi uplastyczniony materiał należał się na elementy robocze narzędzia, powodując konieczność jego częstego czyszczenia, zwiększając pracochłonność procesu. Nalepiony materiał utrudniał również uzyskanie założonej głębokości pracy narzędzia, w wyniku czego uzyskiwano znacznie większy rozrzut wyników badań niż w przypadku złączy wykonywanych przy niższej prędkości obrotowej.

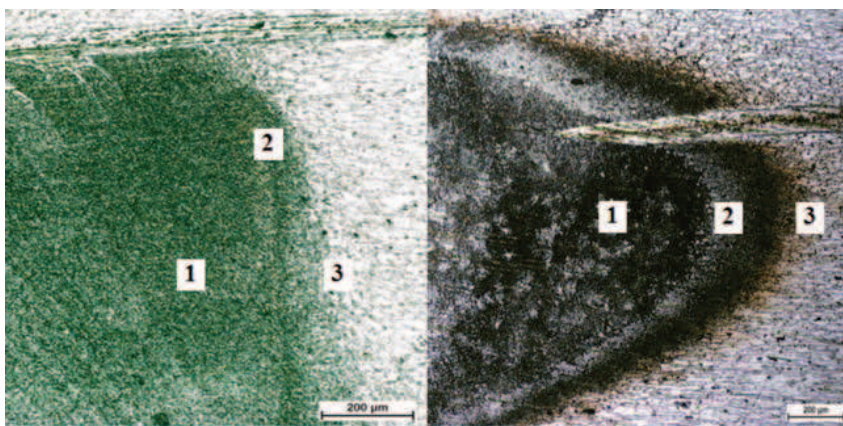
W trakcie badań wykonano również spoiny przy trzech różnych czasach zgrzewania (1, 1,25 i 1,5 s) (rys. 7). W przypadku spoin wykonywanych z prędkością 3000 obr./min nie zauważono istotnego wpływu zmian czasu zgrzewania na nośność połączenia. Nieznaczny wpływ zauważono jednak przy próbach wykonywanych z prędkością obrotową równą 2500 obr./min. W rozpatrywanym przypadku po zwiększeniu czasu zgrzewania z 1 s do 1,5 s odnotowano wzrost nośności połączenia o 7,86%.



Rys. 7. Zależność siły przenoszonej przez złącze od czasu wykonywania zgrzeiny

Fig 7. The dependence of the force transmitted through the joint versus the run-time weld

W trakcie badań największą nośność połączenia uzyskano przy prędkości obrotowej narzędzia wynoszącej 3000 obr./min, zagłębieniu 1,5 mm i czasie zgrzewania 1,5 s. Wartość siły potrzebnej do zerwania próbki wyniosła 4,09 kN. Po zastosowaniu specjalnego uchwytu



Rys. 8. Budowa spoiny wykonana metodą: a) RFSSW, b) zgrzewania oporowego

Fig. 8. Construction of the weld formed by: a) RFSSW, b) resistance welding

zabezpieczającego próbkę przed wyginaniem, zapewniającego zniszczenie próbki jedynie pod działaniem siły ścinającej, nośność połączenia wykonanego przy tych samych parametrach wzrosła do 7,2 kN. Nośność połączenia wykonanego metodą zgrzewania oporowego o porównywalnym polu powierzchni spoiny, zerwanego w tych samych warunkach była o 43,33% mniejsza. Powodu takiego stanu rzeczy należy upatrywać przede wszystkim w budowie spoiny. Spoina wykonana metodą RFSSW składa się z trzech zasadniczych części: jądra spoiny (1), strefy rozdziału (2) – będącej następstwem pracy tulei narzędzia oraz strefy wpływu ciepła (3) (rys. 8a). Jądro spoiny ma strukturę drobnoziarnistą o lepszych właściwościach mechanicznych w porównaniu do materiału rodzimego.

W spoinie wykonanej metodą zgrzewania oporowego (rys. 8b) również można wyodrębnić trzy zasadnicze części: jądro spoiny (1) mające budowę dendrytyczną, obszar przetopu (2) oraz strefę wpływu ciepła (3). Nierównomierne odprowadzanie ciepła podczas procesu krzepnięcia materiału powoduje, że zarodki krystalizacji w obrębie jądra spoiny rozrastają się nierównomiernie i rosną w jednych kierunkach szybciej, a w innych wolniej. Powstająca w ten sposób struktura dendrytyczna charakteryzuje się znacznie gorszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu do struktury uzyskiwanej metodą zgrzewania tarcowego. Świadczy to o wysokim potencjale metody zgrzewania tarcowego z przemieszczeniem RFSSW w stosunku do metody zgrzewania oporowego.

Podsumowanie

Punktowe zgrzewanie tarcowe z przemieszczeniem stanowi jedną z nowocześniejszych metod łączenia stopów aluminium. Przeprowadzone badania wykazały, że metodę tę można z powodzeniem wykorzystać w przemyśle lotniczym ze względu na możliwość zapewnienia dużej wytrzymałości połączeń przy jednoczesnym zmniejszeniu pracochłonności procesu montażu. Wymaga to jednak dokładnego doboru parametrów ustawczych procesu, tj. prędkości obrotowej, zagłębienia narzędzia oraz czasu wykonywania zgrzeiny. Badania przeprowadzone w pracy wykazały, że największą nośność połączenia można uzyskać przy prędkości obrotowej wynoszącej 3000 obr./min i zagłębieniu narzędzia wynoszącym 1,5 mm przy czasie zgrzewania 1,5 s. Uzyskana w ten sposób zgrzeina ma korzystniejsze właściwości mechaniczne od zgrzein wykonanych metodą zgrzewania oporowego. W badanym przypadku nośność spoiny wykonywanych metodą RFSSW była większa od wykonywanych metodą zgrzewania oporowego o ok. 43%.

LITERATURA

- [1] Badarinarayan H., Q. Yang, S. Zhu. 2009. "Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* (49): 142–148.
- [2] Buffa G., L. Fratini, M. Piacentini. 2008. "On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys". *Journal of Materials Processing Technology* (208): 309–317.
- [3] Han L. et. al. 2010. "Effect of aluminium sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, (8): 1076–1082.
- [4] Kuczmaszewski J. 2011. „Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu”. Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie red. R. Knosala, Opole Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją (7–18).
- [5] Kudła K., K. Wojsyk, K. Adamus. 2013. "The properties of spot-welded joints produced by the FSSW and RFSSW methods". *Obróbka Plastyczna Metali* Vol. XXIV (3): 193–203.
- [6] Montag T. et. al. 2014. "Influence of Tool Wear on Quality Criteria for Refill Friction Stir Spot Welding (RFSSW) Process". *Procedia CIRP* (24): 108–113.
- [7] Rudawska A., A. Góra, T. Warda. 2014. „Wybrane zagadnienia wytrzymałości połączeń zgrzewanych blach aluminiowych i tytanowych”. *Technologia i Automatyżacja Montażu* (2): 61–65.
- [8] Tutar M. et. al. 2014. "The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array". *Materials and Design* (63): 789–797.
- [9] Yang H.G., H.J. Yang. 2013. "Experimental Investigation on Refill Friction Stir Spot Welding Process of Aluminum Alloys". *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 345, 243–246.
- [10] Yang X.W., T. Fu, W.Y. Li. 2014. "Friction Stir Spot Welding: A Review on Joint Macro and Microstructure, Property and Process Modelling". *Advances in Materials Science and Engineering Volume*, Article ID 697170.
- [11] Yanga Q. et. al. 2010. "Material flow during friction stir spot welding". *Materials Science and Engineering* (527): 4389–4398.
- [12] Zhang Z. et. al. 2011. "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy". *Materials and Design* (32): 4461–4470.

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

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

dr inż. Dawid Wydrzyński – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI ENERGETYCZNYCH KOMPOZYCJI KLEJOWYCH DEDYKOWANYCH DO POŁĄCZEŃ KLEJOWO-ZGRZEWANYCH

The analysis of the surface energy properties of adhesive compositions dedicated to the weld-bonded joints

Anna KRAWCZUK, Jacek DOMIŃCZUK

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań swobodnej energii powierzchniowej kompozycji klejowych, utworzonych w celu zapewnienia właściwych warunków wypełniania szczelin w połączeniach hybrydowych, takich jak połączenie klejowo-zgrzewane. Przedstawiona w pracy analiza wartości składowych polarnej i niepolarniej dla badanych klejów posłużyła do określenia zdolności kleju do zwilżania powierzchni. Podstawą do określenia wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej były pomiary kąta zwilżania przez wybrane substancje adhezyjne na materiale o znanym stanie energetycznym warstwy wierzchniej. W oparciu o przeprowadzoną analizę możliwe było sklasyfikowanie kompozycji wg ich właściwości energetycznych, sprzyjających procesowi zwilżania powierzchni łączonych materiałów.

Słowa kluczowe: swobodna energia powierzchniowa, kąt zwilżania, kleje epoksydowe, połączenia hybrydowe

Abstract: The paper presents the results of measurements of surface free energy for adhesive compositions created in order to provide the appropriate conditions for filling gaps in the hybrid joints, such as weld-bonded joints. Presented in the paper analysis of polar and non-polar components of surface free energy for the studied adhesives was used to determine the ability of the adhesive to wet the surface. The basis for determining the value of surface free energy were measurements of the contact angle by selected adhesive substances on the material with a specific energy state of the surface layer. Based on this analysis, it was possible to classify the composition according to the energy properties conducive to the process of wetting the surface of the joined materials.

Keywords: surface free energy, contact angel, epoxy adhesives, hybrid joints

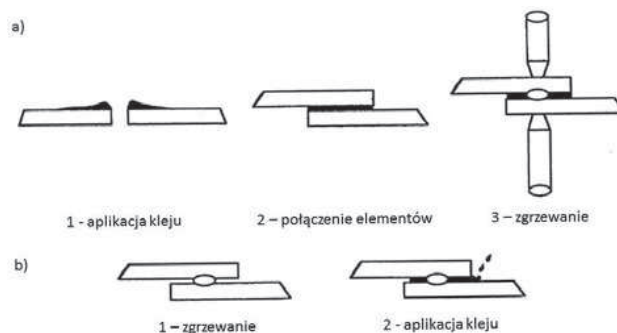
Wprowadzenie

W przemyśle lotniczym czy samochodowym wyrób gotowy powstaje przez łączenie elementów wykonanych często z różnych materiałów, w tym materiałów kompozytowych. W ramach danej struktury wykorzystywane są materiały znacznie różniące się właściwościami, które muszą zostać połączone ze sobą, aby stworzyć gotowy element. Jednocześnie producenci poszukują materiałów oraz rozwiązań, które zmniejszą masę konstrukcji oraz obniżą koszty produkcji przy niezmięnionej lub większej trwałości i niezawodności elementów [10, 1, 6].

Zwiększenie trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji może nastąpić dzięki ulepszeniu technologii łączenia elementów. Zamiast stosowania pojedynczej techniki łączenia, np. nitowania, zgrzewania punktowego czy klejenia, można wykorzystać połączenie hybrydowe, stanowiące kombinację różnych technologii łączenia. Wykorzystanie dwóch różnych technologii łączenia umożliwia otrzymywanie konstrukcji hermetycznych, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością, sztywnością, zwiększoną absorpcją energii przy uderzeniu oraz innymi cechami, które wynikają z synergii cech każdego z rodzajów połączeń oddzielnie [9, 8, 7].

Jedną z innowacyjnych i obiecujących hybrydowych metod łączenia elementów konstrukcyjnych (znajdującą zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu) jest połączenie klejowo-zgrzewane. W ostatnich latach proces

ten zyskał na znaczeniu szczególnie w przemyśle lotniczym i samochodowym ze względu na szereg korzyści otrzymywanych w wyniku zastosowania dwóch metod łączenia (zmniejszenie kosztów produkcji, zwiększenie wytrzymałości statycznej, zmęczenia, poprawa odporności na korozję, wyeliminowanie operacji uszczelniania) [1, 4, 5]. Połączenie klejowo-zgrzewane może być wykonane dwoma sposobami. Pierwszy (zaprezentowany na rys. 1a) polega na połączeniu elementów za pomocą kleju, a następnie wykonaniu punktowego połączenia zgrzewanego. Wykorzystując drugą metodę (rys. 1b) elementy najpierw są zgrzane, a szczelina



Rys. 1. Sposoby wykonania połączenia klejowo-zgrzewanego: a) technika flow-in, b) technika weld-through [1, 5]
Fig. 1. Methods of weld-bonding: a) the flow-in technique, b) the weld-through technique [1, 5]

powstała pomiędzy zgrzanyymi elementami wypełniana jest środkiem adhezyjnym.

Korzystniejszym wariantem wykonania połączeń klejowo-zgrzewanych jest zgrzewanie, a następnie wypełnianie szczeliny pomiędzy zgrzanyymi elementami środkiem adhezyjnym, dzięki czemu wyeliminowany zostaje negatywny wpływ ciepła na klej. Warunkiem skutecznego kształtowania takich połączeń jest odpowiednie przygotowanie powierzchni łączonych elementów, wspomaganie procesu wypełnienia siłami grawitacji oraz dobór odpowiednich właściwości kleju lub uszczelnacza, zwłaszcza lepkości. Istotny jest również tzw. „czas życia” kleju oraz zapewnienie dobrej zwilżalności materiału przez nanoszoną kompozycję łączącą [3, 6, 2].

Uzyskanie silnej więzi adhezyjnej w połączeniu klejowym związane jest z zapewnieniem odpowiedniej zwilżalności oraz uzyskaniem optymalnych proporcji pomiędzy składowymi swobodnej energii powierzchniowej materiału i kleju. Określenie właściwości energetycznych kleju i materiału na który będzie nanoszona kompozycja klejowa może okazać się szczególnie pomocne podczas analizy prawidłowości doboru kleju, w aspekcie zdolności zwilżania i wypełniania szczeliny powstałej w połączeniu zgrzewanym.

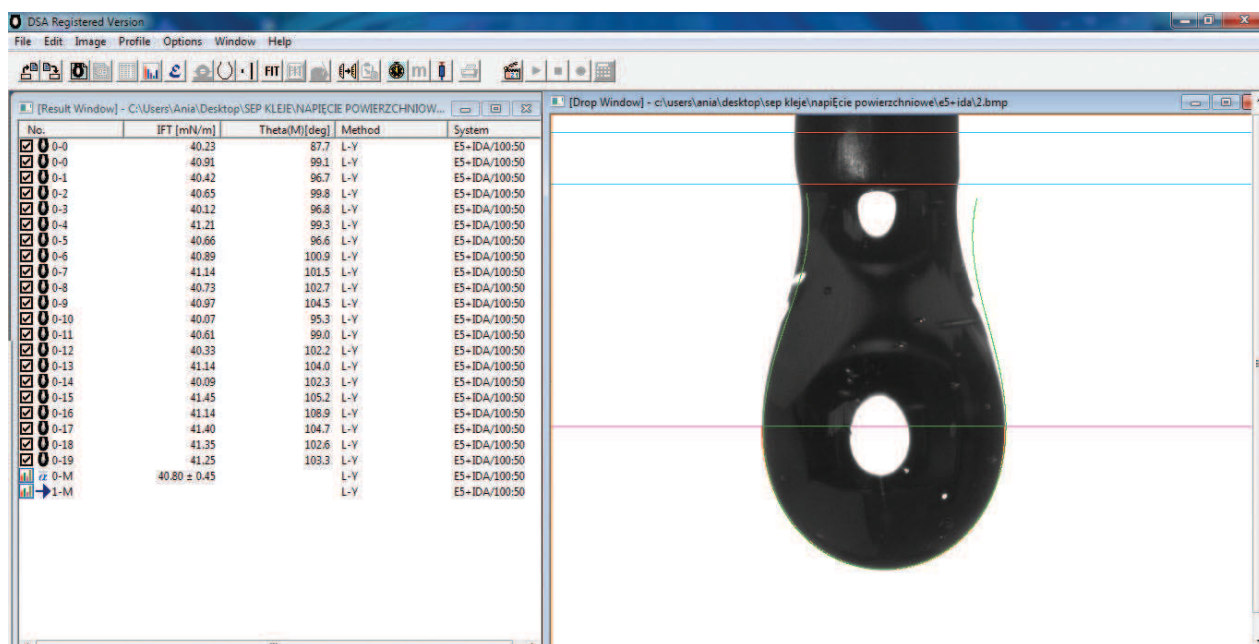
Metodyka badań

W celu przeprowadzenia analizy właściwości energetycznych kompozycji klejowych dedykowanych do połączeń klejowo-zgrzewanych wyznaczono wartości swobodnej energii powierzchniowej badanych kompozycji klejowych w stanie ciekłym (tab. 1). Wartości swobodnej energii powierzchniowej zostały wyznaczone na podstawie pomiarów napięcia powierzchniowego mieszanek klejowych stosując metodę wiszącej kropli. Bezpośrednio po połączeniu i wymieszaniu składników kleju za pomocą strzykawki dozowano kroplę o objętości 15 µl i wykonywano pomiary napięcia powierzchniowego. Ze względu na ograniczony czas przydatności mieszanek klejowych wykonano po 20 pomiarów napięcia powierzchniowego dla wszystkich analizowanych klejów epoksydowych.

Określenia wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej wybranych klejów epoksydowych dokonano na podstawie przecięcia krzywych zwilżania, wyznaczonych na podstawie pomiarów kąta zwilżania analizowanych klejów epoksydowych na materiale o znanych właściwościach energetycznych z prostą swobodnej energii powierzchniowej odpowiedniego kleju. W tym celu przeprowadzono pomiary kąta zwilżania, podczas

Tabela 1. Rodzaje stosowanych w badaniach klejów epoksydowych
Table 1. The kind of epoxy adhesives used in tests

Lp.	Oznaczenie	Rodzaj żywicy	Rodzaj utwardzacza	Udział wagowy utwardzacza na 100 cz. wag. żywicy
1	E5/IDA/10:5	epoksydowa Epidian 5	IDA	50 cz. wag.
2	E5/Z1/100:12	epoksydowa Epidian 5	Z1	12 cz. wag.
3	E6/IDA/10:4	epoksydowa Epidian 6	IDA	40 cz. wag.
4	E6/Z1/100:13	epoksydowa Epidian 6	Z1	13 cz. wag.



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

których na próbkach stopu aluminium EN AW-2017A, poddanych obróbce wykańczającej przez polerowanie pastą polerską o granulacji 1000, aplikowano krople wybranych klejów epoksydowych. Za pomocą pipety automatycznej NICHIRYO Le-20 na powierzchni stopu aluminium umieszczano krople kleju epoksydowego. Ustalono objętość nanoszonej kropli na $6 \pm 0,02 \mu\text{l}$. Bezpośrednio po naniesieniu kropli przeprowadzono pomiary kąta zwilżania. Uwzględniając krótki czas życia mieszanek klejowych dla każdej z nich wykonano po 20 pomiarów kąta zwilżania.

Wartość swobodnej energii powierzchniowej materiału na którym aplikowano wybrane kleje epoksydowe została wyznaczona wykorzystując metodę Owens-Wendta. Na próbkach stopu aluminium EN AW-2017A dozowano krople wody oraz diiodometanu o pojemności 4 μl . Dla każdej z cieczy pomiarowych wykonano po 30 pomiarów kąta zwilżania. Warstwa wierzchnia stopu aluminium EN AE-2017A poddanego polerowaniu wykazuje całkowitą swobodną energię powierzchniową o wartości 22,3 mJ/m^2 przy składowej niepolarnej 21,8 mJ/m^2 .

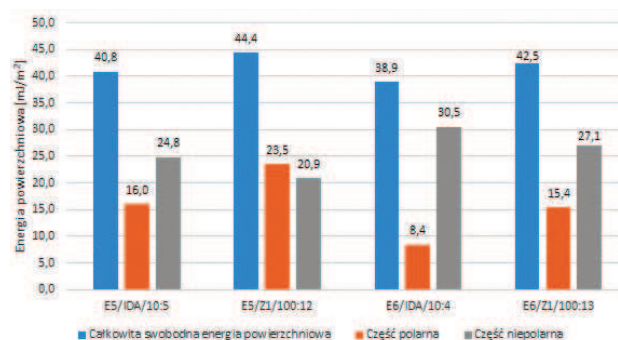
Pomiary napięcia powierzchniowego kąta zwilżania kropeł kleju na próbkach stopu aluminium oraz kąta zwilżania dwiema cieczami dla materiału bazowego wykonano na urządzeniu DSA30 firmy KRÜSS z wykorzystaniem automatycznego modułu pozyskiwania i analizy wyników.

Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów napięcia powierzchniowego pozwoliły określić wartości swobodnej energii powierzchniowej wybranych klejów epoksydowych. Na rys. 2 przedstawiono przykładową tabelę pomiarów napięcia powierzchniowego.

Przeprowadzenie pomiarów kąta zwilżania dla wybranych kompozycji klejowych posłużyło do wyznaczenia krzywej zwilżania. Składowe swobodnej energii powierzchniowej określono na podstawie punktu przecięcia krzywej zwilżania, wytyczonej na podstawie wyznaczonego kąta zwilżania podczas aplikacji wybranego kleju epoksydowego na powierzchni materiału bazowego z prostą reprezentującą wartość swobodnej energii powierzchniowej danego kleju. W tab. 2 oraz na wykresie rys. 3 przedstawiono otrzymane uśrednione wartości kąta zwilżania

oraz odpowiadające im wartości swobodnej energii powierzchniowej i przybliżone wartości składowych dla analizowanych mieszanek klejowych.



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

Z przedstawionego wykresu (rys. 3) wynika, że żywica epoksydowa Epidian 5 wymieszana z utwardzaczem Z1 charakteryzuje się (w porównaniu do innych analizowanych mieszanek klejowych) większą całkowitą swobodną energią powierzchniową. Jej składowa polarna przewyższa składową niepolarną i jest największa spośród analizowanych klejów. Całkowita swobodna energia powierzchniowa tego kleju wynosi 44,4 mJ/m^2 , a składowa polarna przyjmuje wartość 23,5 mJ/m^2 . Najwyższą wartością składowej niepolarnej charakteryzuje się kompozycja żywicy epoksydowej Epidian 6 z utwardzaczem IDA. Wartość składowej niepolarnej tej kompozycji wynosi 30,5 mJ/m^2 przy składowej polarnej wynoszącej 8,4 mJ/m^2 .

Analizę zdolności zwilżania przez klej, o znanych właściwościach energetycznych, warstwy wierzchniej materiału (o określonym stanie energetycznym) przeprowadzono dla próbek stopu aluminium EN AW-2017A, obrobionej włókniną o granulacji 180. Zmierzone wartości parametrów chropowatości powierzchni dla obrobionych próbek wynoszą: $R_a = 0,44 \mu\text{m}$, $R_{sm} = 0,04 \mu\text{m}$, $R_z = 3,87 \mu\text{m}$, $R_q = 0,56 \mu\text{m}$, $R_{max} = 4,35 \mu\text{m}$. Warstwa wierzchnia tego materiału wykazuje całkowitą swobodną energię powierzchniową o wartości 25,3 mJ/m^2 , w tym wartość składowej polarnej wynosi 1,9 mJ/m^2 . W oparciu o posiadaną wiedzę wyznaczono krzywe zwilżania

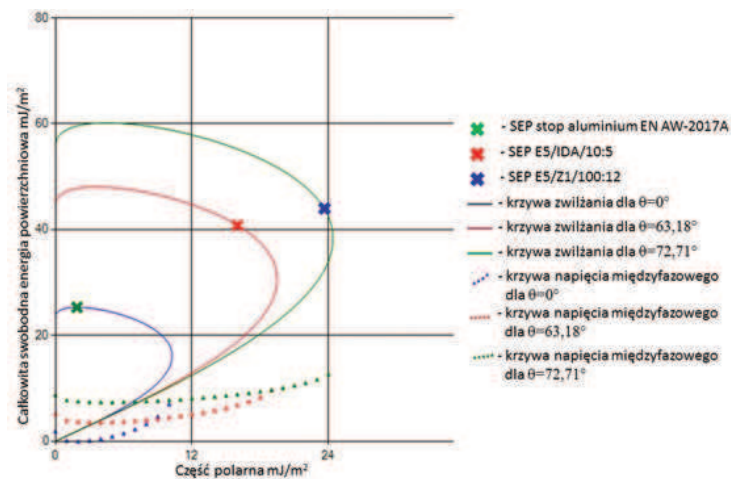
Tabela 2. Uśrednione wartości pomiarów kąta zwilżania oraz wyznaczona wartość swobodnej energii powierzchniowej i jej składowe dla wybranych klejów epoksydowych

Table 2. The average values of contact angle measurements and determined values of the surface free energy and its components for the chosen epoxy adhesives

Kompozycja klejowa	Średni kąt zwilżania [°]	Całkowita swobodna energia powierzchniowa [mJ/m²]	Część polarna [mJ/m²]	Część niepolarna [mJ/m²]
E5/IDA/10:5	73,8	40,8	16,0	24,8
E5/Z1/100:12	83,3	44,4	23,5	20,9
E6/IDA/10:4	64,5	38,9	8,4	30,5
E6/Z1/100:13	74,1	42,5	15,4	27,1

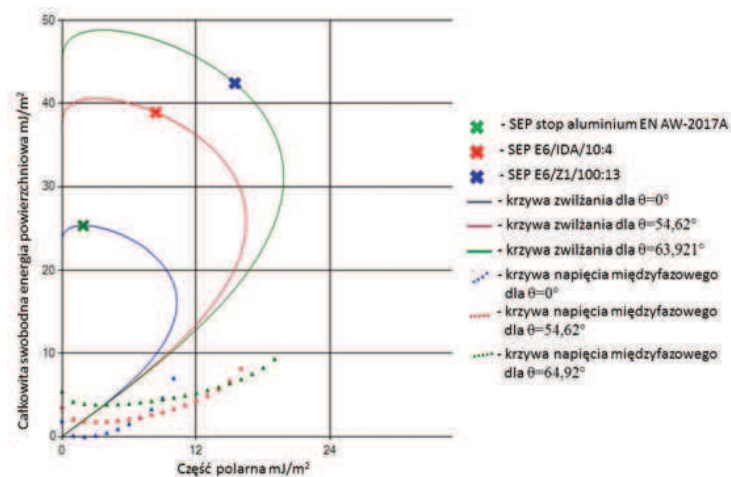
odpowiadające badanym materiałom. Prezentowane na rys. 4 oraz rys. 5 krzywe zwilżania przedstawiają graniczne odwzorowanie składowych swobodnej energii powierzchniowej cieczy, zapewniającej uzyskanie dobrego zwilżania oraz krzywe zwilżania użytych w badaniach klejów epoksydowych.

W wyniku analizy krzywych zwilżania oraz krzywych napięcia międzyfazowego, wyznaczonych dla materiału na którym przeprowadzano pomiary, możliwe jest określenie składowych swobodnej energii powierzchniowej cieczy zwilżającej, która zapewnia najkorzystniejsze warunki zwilżania. Możliwe jest również określenie wymaganych składowych energii powierzchniowej przy których



Rys. 4. Krzywe zwilżania oraz krzywe napięcia międzyfazowego, wyznaczone dla stopu aluminium EN AW-2017A, obrobionego włókniną o granulacji 180 z zaznaczonymi wartościami swobodnej energii powierzchniowej wybranych klejów epoksydowych

Fig. 4. The wetting envelopes and interfacial tension curves determined for EN AW-2017A aluminum alloy after machining by unwoven of 180 granulation with marked values of surface free energy of the selected epoxy adhesives



Rys. 5. Krzywe zwilżania oraz krzywe napięcia międzyfazowego, wyznaczone dla stopu aluminium EN AW-2017A, obrobionego włókniną o granulacji 180 z zaznaczonymi wartościami swobodnej energii powierzchniowej wybranych klejów epoksydowych

Fig. 5. The wetting envelopes and interfacial tension curves determined for EN AW-2017A aluminum alloy after machining by unwoven of 180 granulation with marked values of surface free energy of the selected epoxy adhesives

zostanie zachowany określony kąt zwilżania, a napięcie międzyfazowe osiągnie minimalną wartość.

Z prezentowanych na rysunkach wykresów wynika, że dla stopu aluminium EN AW-2017A, obrabionego włókniną o granulacji 180 najlepsze warunki zwilżania uzyskano dla kompozycji mieszanki żywicy epoksydowej Epidian 6 z utwardzaczem IDA. Punkt wyznaczony przez wartość swobodnej energii powierzchniowej i składową polarną tego kleju znajduje się bliżej krzywej obrazującej bardzo dobre zwilżanie niż punkty wyznaczone dla innych kompozycji klejowych. Krzywa napięcia międzyfazowego dla kąta wynoszącego $\theta = 54,62^\circ$ osiąga wartość minimalną równą 1,8 mN/m. Wartość napięcia międzyfazowego, w miejscu odnoszącym się do punktu wyznaczonego przez swobodną energię powierzchniową i składową polarną dla kleju epoksydowego, na chemicznej podstawie żywicy epoksydowej Epidian 6 z utwardzaczem IDA, wynosi 2,78 mN/m.

Zbliżone warunki zwilżania wykazuje klej epoksydowy na bazie żywicy Epidian 6 z utwardzaczem Z1 oraz kompozycja mieszanki żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem IDA. W przypadku tych mieszanek kąty zwilżania przyjmują wartości ok. 63° . Spośród analizowanych klejów najgorsze zwilżanie wykazuje kompozycja żywicy Epidian 5 z utwardzaczem Z1. Klej ten na powierzchni stopu aluminium EN AW-2017A tworzy kąt zwilżania o wartości $72,71^\circ$. Krzywa napięcia międzyfazowego wyznaczona dla kąta zwilżania $\theta = 72,17^\circ$ osiąga minimalną wartość równą 7,42 mN/m. Natomiast wartość napięcia międzyfazowego dla punktu wyznaczonego przez swobodną energię powierzchniową i składową polarną dla kompozycji żywicy Epidian 5 z utwardzaczem Z1 wynosi 12,11 mN/m. Osiągnięcie najlepszych właściwości adhezyjnych podczas klejenia mieszanką żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem Z1 można otrzymać zmniejszając wartości całkowitej swobodnej energii powierzchniowej kleju epoksydowego, w szczególności składowej polarnej, aż do osiągnięcia minimalnego napięcia międzyfazowego.

Podsumowanie

Podczas wykonywania połączeń klejowo-zgrzewanych, gdzie elementy najpierw łączone są za pomocą zgrzewania, a następnie powstała między zgrzanymi elementami szczelina wypełniana jest środkiem adhezyjnym, ważne jest zapewnienie dobrej zwilżalności materiału przez kompozycję klejową. Dobranie kleju, który charakteryzuje się odpowiednimi składowymi swobodnej energii powierzchniowej, umożliwi uzyskanie silnej więzi adhezyjnej oraz prawidłowe wypełnienie powstałej szczeliny.

Przeprowadzone pomiary napięcia powierzchniowego oraz pomiary kąta zwilżania wybranych klejów epoksydowych na materiale o znanych właściwościach energetycznych pozwoliły na określenie wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowych. Znając charakterystyki energetyczne klejów epoksydowych przeprowadzono badania zdolności zwilżania przez analizowane mieszanki klejowe próbek stopu aluminium EN AW-2017A, poddanych obróbce włókniną o granulacji 180, podczas których określono kąty zwilżania, jakie byłyby wyznaczone po naniesieniu kropelek wybranych klejów na analizowaną powierzchnię. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że z punktu widzenia zwilżalności do łączenia stopu aluminium EN AW-2017A, obrobionego włókniną o granulacji 180, należy stosować klej epoksydowy na bazie żywicy Epidian 6 z utwardzaczem IDA. Punkt charakteryzujący ten klej leży najbliższej krzywej zwilżania odpowiadającej kątowi dobrego zwilżania. Można również zauważyć, że w przypadku tego kleju różnica między minimalną wartością napięcia międzyfazowego wyznaczonego dla kąta $\theta=54,62^\circ$ a wartością napięcia międzyfazowego, wyznaczoną dla punktu odnoszącego się do wartości swobodnej energii powierzchniowej i składowej polarnej tego kleju jest najmniejsza. Najgorsze warunki zwilżania wykazuje klej na chemicznej podstawie żywicy epoksydowej Epidian 5 połączony z utwardzaczem Z1. Klej ten charakteryzuje się, w porównaniu do innych analizowanych mieszanek, najwyższą wartością swobodnej energii powierzchniowej wynoszącą $44,4 \text{ MJ/m}^2$ oraz najwyższą wartością składowej polarnej, która osiąga wartość $23,5 \text{ MJ/m}^2$. W przypadku kleju epoksydowego na bazie żywicy Epidian 6 z utwardzaczem Z1 oraz kompozycji mieszanki żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem IDA osiągnięto podobne warunki zwilżania.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że zapewnienie najlepszych właściwości adhezyjnych związane jest z zachowaniem jak najmniejszej różnicy między wartością swobodnej energii powierzchniowej kleju i ciała stałego oraz zachowaniem odpowiednich proporcji pomiędzy składowymi. Ważne jest również, aby osiągnąć minimalne napięcie międzyfazowe między cieczą a ciałem stałym dla określonego kąta zwilżania. W celu zapewnienia bardzo dobrej zwilżalności należy dążyć do zmniejszenia całkowitej swobodnej energii powierzchniowej kompozycji klejowych do wartości zbliżonych wartościom swobodnej energii powierzchniowej materiałów łączonych lub zastosować inny proces przygotowania powierzchni, który spowoduje zwiększenie wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium.

Określenie właściwości energetycznych wybranych kompozycji klejowych pozwoliło na przeprowadzenie szybkiej analizy zdolności kleju do zwilżania powierzchni materiału. Umożliwi to w dalszym kroku weryfikację prawidłowego doboru kleju, biorąc pod uwagę jego zdolność zwilżania oraz wypełniania szczeliny powstałej w połączeniu zgrzewanym.

LITERATURA

- [1] Darwish S.M.H. 2011. "Science of Weld: Adhesive Joints" [W]: "Hybrid Adhesive Joint", pod red. Lucas Filipe Martins de Silva, *Springer*: 1–36.
- [2] Domińczuk J., A. Krawczuk, J. Kuczmaszewski. 2016. „Energia powierzchniowa wybranych klejów epoksydowych”. *Technologia i Automatyza Montażu* (2): 47–52.
- [3] Domińczuk J., A. Krawczuk. 2016. „Analiza zdolności kleju do zwilżania powierzchni o określonych właściwościach energetycznych”. *Technologia i Automatyza Montażu* (2): 60–64.
- [4] Gaul H., G. Weber. 2011. "Technology of Weld-Adhesive Joints", [W]: "Hybrid Adhesive Joint", pod red. Lucas Filipe Martins de Silva, *Springer*: 37–77.
- [5] Gonçalves V.M., P.A.F. Martins. 2006. "Joining stainless steel parts by means of weld bonding". *International Journal of Mechanics and Materials in Design* (2): 91–101.
- [6] Krawczuk A., J. Kuczmaszewski. 2015. „Analiza warunków grawitacyjnego wypełniania szczelin w połączeniach klejowo-nitowych”. *Technologia i Automatyza Montażu* (2): 50–55.
- [7] Rams B. 2009. „Zastosowanie klejenia w połączeniach zgrzewanych metodą FSW”. *Przegląd Spawalnictwa* (3): 33–38.
- [8] Rośkowicz M., M. Rożek. 2013. „Analiza trwałości zmęczeniowej połączeń mechanicznych i klejowo-mechanicznych”. *Technologia i Automatyza Montażu* (2): 16–19.
- [9] Sadowski T. et. al. 2013. "Modern Hybrid Joints in Aerospace: Modeling and Testing". *Archives of Metallurgy and Materials* (58): 163–169.
- [10] Sadowski T., P. Golewski, M. Kneć. 2014. "Experimental investigation and numerical modeling of spot welding-adhesive joints response". *Composite Structures* (112): 66–77.

mgr inż. Anna Krawczuk – Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi, Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Głębocka 28, 20-612 Lublin, e-mail: anna.krawczuk@up.lublin.pl

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

Sborka nr 4/2016 (189)

1. Charakterystyka metody montażu cyfrowego ekranu prototypu w CAD Inventor Autodesk
2. Technologiczne cechy wytwarzania gwintowanych rotorów dla wykańczająco-umacniającej obróbki części
3. Połączenia typu Press-fit (przegląd analityczny)
4. Aparaturowo-programowy kompleks zautomatyzowanej nieniszczącej kontroli fizyko-mechanicznych właściwości wyrobów
5. Metoda syntezy projektowania komputerowego procesów technologicznych i struktur zrobotyzowanych kompleksów montażowych
6. Modelowanie montażu w CAD
7. Eksperymentalne badania własności tłumiących magnetoelastycznych elastomerów
8. Wytrzymałość i zużywanie elementów połączeń śrubowych w warunkach frettingu
9. Wpływ ośrodka naftowego na charakterystyki tribologiczne ślizgowych styków w armaturze zamykającej

Sborka nr 5/2016 (190)

1. Montaż selektywny – problemy i perspektywy
2. Połączenia typu press-fit (przegląd analityczny, c.d.)
3. Lutowanie systemów rurowych
4. Teoretyczna ocena funkcji przekaźnikowej i błędów pomiarowych zautomatyzowanego urządzenia pneumatyczno-elektronicznego
5. Montaż urządzeń korpusowych z lampami amalgamatowymi typu UDW-A do odkażania wody z pomocą promieni ultrafioletowych
6. Analiza dokładności funkcjonowania adaptacyjnego sprzęgła ciernego drugiej generacji
7. Strumienie podobnych cząstek bez dyssypacji energii

Sborka nr 6/2016 (191)

1. Nowe rozwiązania techniczne dla konstituowania super wysokoobrotowych elektromechanicznych przetworników energii
2. Wpływ ruchu obrotowego wału na proces automatycznego montażu cylindrycznych elementów
3. Lutowanie systemów rurowych (c.d.)
4. Strumienie podobnych cząstek bez dyssypacji energii (c.d.)
5. Niskotemperaturowa termiczna kompensacja zrostania miedzi w technologii wytwarzania zagęszczonych mikrosystemów
6. Przygotowanie wspomaganie programowego do zautomatyzowanego projektowania chwytaków robota – manipulatora

Eco- i elektromobilność maszyn roboczych i pojazdów – XXX Konferencja PRMR



Prawie 70 uczestników, 47 referatów – tak można podsumować konferencję „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, która odbyła się pod koniec stycznia br., tradycyjnie w hotelu Hyrny w Zakopanem. Była to XXX, jubileuszowa konferencja, co świadczy o jej randze i znaczeniu nie tylko dla środowiska tej branży, ale dla całej polskiej gospodarki.

Od 1994 r. konferencja nosi nazwę „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, a miejscem corocznych spotkań stało się Zakopane. Od początku konferencja PRMR miała na celu pogłębienie współpracy nauki i przemysłu oraz transfer rozwiązań naukowych do wykorzystania w gospodarce.

Głównymi tematami tegorocznej, XXX Konferencji były „Eco i elektromobilność maszyn roboczych i pojazdów”. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, który od 2016 r. jest organizatorem konferencji, zaprosił do współpracy Politechnikę Wrocławską, Politechnikę Warszawską oraz Wojskową Akademię Techniczną. Wybór partnerów nie był przypadkowy, bo to oni byli inicjatorami i pierwszymi organizatorami konferencji. Jubileuszowa konferencja była okazją do złożenia podziękowań osobom, które wniosły szczególnie wkład w jej rozwój, w nowatorskie, wartościowe działania środowiska. Osoby te

zostały uhonorowane okolicznościowymi medalami.

Na konferencji „Eco i elektromobilność maszyn roboczych i pojazdów”, podczas 9 sesji tematycznych poruszano między innymi zagadnienia związane z modelowaniem, logistyką, eksploatacją, diagnostyką, mechatroniką, robotyką i bezpieczeństwem na placu budowy. Referaty wzbogacały dyskusje panelowe. Wśród niemal 70 uczestników wydarzenia byli nie tylko naukowcy – uznane autorytety w branży maszyn roboczych – ale także doktoranci i przedstawiciele biznesu. Konferencja była platformą integracji tych środowisk, co sprzyja poprawie efektywności nauki i zwiększeniu innowacyjności naszej gospodarki.

Wkrótce w IMBiGS rozpoczną się przygotowania do konferencji PRMR 2018 r., na którą już dzisiaj serdecznie zapraszamy. Jej współorganizowanie zaproponowano Wojskowej Akademii Technicznej.

*Zdjęcia:
Zbigniew Wilczak, IMBiGS*



Referaty wygłaszane podczas konferencji zostały uzupełnione przez prezentacje wybranych konstrukcji – efektów współpracy nauki i przemysłu



Wśród niemal 70 uczestników wydarzenia byli nie tylko naukowcy – uznane autorytety w branży maszyn roboczych – ale także doktoranci i przedstawiciele biznesu

Dźwigi osobowe, osobowo-towarowe i towarowe podlegają dozorowi technicznemu zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 7 grudnia 2012 r. w sprawie *rozdajów urzędzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu* (Dz. U. z 2012 r. poz. 1468). Każdy dźwig, aby mógł być eksploatowany, musi posiadać aktualną decyzję zezwalającą na eksploatację, wydaną przez właściwą jednostkę dozoru technicznego. Większość dźwigów w Polsce podlega dozorowi sprawowanemu przez Urząd Dozoru Technicznego, w którym jest obecnie zarejestrowanych około 110 tysięcy tych urzędzeń.

Konserwacja tylko przez osoby uprawnione

Do obowiązków eksploatującego dźwig należy zapewnienie na co dzień właściwego stanu technicznego urządzenia oraz właściwej jego konserwacji, zgodnej z instrukcją producenta (instalatora), jak również dopilnowanie, aby wszystkie przeprowadzone przez konserwatora czynności przy urządzeniu były odnotowane w dzienniku konserwacji.

Konserwacja dźwigów może być prowadzona jedynie przez osoby posiadające stosowne kwalifikacje do wykonywania tych czynności. UDT sprawdza kwalifikacje osób w trybie egzaminacyjnym, zgodnie z ustawą z dnia 21 grudnia 2000 r. o *dozorze technicznym* i rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 18 lipca 2001 r. w sprawie *trybu sprawdzania kwalifikacji wymaganych przy obsłudze i konserwacji urzędzeń technicznych* (Dz. U. Nr 79, poz. 849, z późn. zm.).

Osoby z takimi kwalifikacjami posiadają wiedzę w zakresie bezpieczeństwa konserwacji dźwigów.

Na podstawie przepisów odrębnych (prawo energetyczne) do konserwacji dźwigów elektrycznych wymagane są odpowiednie świadectwa kwalifikacyjne.

Instrukcja producenta – podstawowy dokument

Nieprzestrzeganie instrukcji konserwacji opracowanej przez producenta (instalatora) jest jednym z najpoważniejszych wykroczeń przeciw bezpieczeństwu pracy. Konserwacja dźwigu powinna być zawsze wykonywana zgodnie z tą instrukcją, poszerzoną o przepisy bhp i zasady bezpiecznej pracy na danym terenie, a zalecenia producenta (instalatora) powinny być przestrzegane. Wymaga się, aby instrukcja znajdowała się w książce rewizyjnej dźwigu oraz w maszynie.

Ochrona osób postronnych

Przystępując do konserwacji dźwigu należy przede wszystkim wyznaczyć strefę niebezpieczną poprzez

zabezpieczenie miejsca pracy przed wejściem osób nieuprawnionych, zwłaszcza kiedy pracuje się przy otwartych drzwiach przystankowych, a kabiny nie ma na przystanku. Na wszystkich drzwiach przystankowych powinno się umieścić powiadomienie o konserwacji dźwigu. To zdecydowanie zminimalizuje ryzyko wypadnięcia do szybu przypadkowych osób. Po zakończonej pracy należy koniecznie sprawdzić, czy drzwi są zaryglowane.

Bezpieczeństwo pracy konserwatora

Tylko bezwzględne przestrzeganie zasad bezpiecznej pracy zapewni konserwatorowi dostateczną ochronę przed wypadkiem. Konserwator powinien być wyposażony w środki ochrony osobistej, takie jak kask chroniący głowę przed uderzeniem o elementy szybu czy okulary zabezpieczające oczy np. w czasie wiercenia. Jeżeli wykonuje się prace na wysokości, należy korzystać ze specjalnej uprząży zabezpieczającej przed upadkiem. Bardzo groźne w skutkach mogą być poślizgnięcia, dlatego należy używać obuwia antypoślizgowego.

Także drabina, o ile jest wykorzystywana, powinna mieć antypoślizgową podstawę. Powinna być dobrze zamocowana i mieć odpowiednią wytrzymałość. Jeżeli w czasie prac remontowych czy modernizacyjnych trzeba będzie korzystać z rusztowania, należy sprawdzić jego stan techniczny.

Przy pracy w maszynie należy uważać na otwarty właz – niezabezpieczony specjalną barierką właz to poważne ryzyko spadnięcia z wysokości.

Najpoważniejszym zagrożeniem w pracy konserwatora jest – obok upadku z wysokości – ryzyko zgniecenia podczas jazdy na kabinie, przez elementy wystające w szybie lub ruchomą przeciwwagę.

Praca w podszybiu jest związana ze szczególnym ryzykiem i jest możliwa tylko wówczas, gdy istnieje całkowita pewność wyeliminowania ruchu kabiny i przeciwwagi. Ryzyko zgniecenia występuje także przy niewłaściwym zabezpieczeniu podnoszonego w szybie sprzętu, błędnej metodzie podnoszenia lub niesprawnym urządzeniu podnoszącym.

Na koniec należy wspomnieć o stosowaniu przez konserwatorów mostkowania obwodów bezpieczeństwa. Nie jest to zalecane i może być stosowane wyłącznie przy zachowaniu szczególnych rygorów bezpieczeństwa.

Wojciech Piłatowicz, Główny Specjalista w zakresie urzędzeń dźwigowych, UDT
Ewa Dorobińska, Zespół Prasowy, UDT

Czytaj **POLSKĄ** prasę fachową

Cennik prenumeraty na 2017 r. (ceny brutto rocznej prenumeraty papierowej)

Czasopisma dostępne tylko w prenumeracie w wariantach:

- wersja papierowa,
- wersja **PLUS** z dostępem do e-publicacji,
- wersja **ciągła PLUS** z **10%** rabatem (automatycznie odnawiająca się co roku)

PRASA FACHOWA

SIGMA-NOT

www.sigma-not.pl



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

www.sigma-not.pl
Zaprenumeruj przez

Urządzenia

do montażu elementów złącznych dla budownictwa

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



IMBiGS – Oddział Anin

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

Posiadamy
wieloletnie doświadczenie
w projektowaniu
i budowie urządzeń

Realizujemy zamówienia
zgodnie z wymaganiami
naszych klientów