

100 000

artykułów fachowych on-line

na Portalu Informacji Technicznej

www.sigma-not.pl

pomocne
ciekawe
rzetelne



Znajdź nas
na Facebooku

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT 

ZESPÓŁ REDAKCYJNY:

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

RADA PROGRAMOWO-NAUKOWA:

Prof. Dario Antonelli (Politecnico di Torino, Włochy), prof. Bronius Baksys (Kaunas University of Technology, Litwa), prof. Marek Balaziński (Ecole Polytechnique Montreal, Kanada), prof. Adam BARYLSKI (Politechnika Gdańska), mgr inż. Magdalena Borek-Daruk (SIGMA-NOT), prof. Józef Gawlik (Politechnika Krakowska) – z-ca przewodniczącego, prof. Jan Godzimirski (WAT), prof. Stefan Góralczyk (IMBiGS), prof. Mikulas Hajduk (Technika Univerzita v Kosiciach, Słowacja), prof. Michael Kheifetz (Polski Gosudarstwiennyj Uniwersytet, Białoruś), doc. dr inż. Radek Knoflicek (FME Brno, Czechy), prof. Mark Kristal (Volgograd State Technical University, Rosja), prof. Józef 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 Stadnicka (Politechnika Rzeszowska), prof. Jerzy Stamirowski (Politechnika Świętokrzyska), prof. Michail W. Wartanow (Moskowskij Gosudarstwiennyj Maszynostroitelnyj Uniwersytet, Rosja), prof. Władimir P. Woronienko (Moskowskij Gosudarstwiennyj Technologicznyj Uniwersytet, Rosja), prof. Jan Żurek (Politechnika Poznańska) – przewodniczący

ADRES REDAKCJI:

Kwartalnik „Technologia i Automatyizacja 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

Peta K., Wiśniewski M., Suszyński M., Cieślak R., Żurek J.: Ocena połączeń klinczowych z uszczelką kształtową nakładaną ręcznie i wylewaną na modułowym zrobotyzowanym stanowisku montażowym	6
Zielecki W., Perłowski R., Tłuczek R.: Mass Customization – typ produkcji dedykowany dla organizacji procesu wytwarzania wyrobów modułowych	11
Fiedorenko A., Styp-Rekowski M., Oborski I.: Badanie kompleksu charakterystyk strukturalnych i masowo zmiennych węglowo-włóknistych materiałów filtracyjnych . . .	16
Kozioł S., Samborski T., Zbrowski A., Lipiński J.: Modułowa struktura robota malarskiego do malowania obrazów	21
Kubit A., Wędrzyński D., Bucior M., Kluz R.: Właściwości przetłoczeń usztywniających kształtowanych w cienkich blachach z lotniczego stopu aluminium 2024-T3 metodą formowania przyrostowego	28
Łunarski J.: Normalizacja w ewolucji systemów	33
Kluz R., Przeszlowski Ł., Bucior M., Zielecki W.: Wpływ parametrów procesu kulowania na chropowatość komponentów drukowanych metodą MEM	38
Godzimirski J., Jagiełło A.: Wpływ obróbki powierzchniowej zgniotem po utwardzeniu spoin na nośność zakładkowych połączeń klejowych	43
Rudawska A., Miturska A.: Wpływ warunków utwardzania i sezonowania na wytrzymałość połączeń klejowych doczołowych	48
Skoczylas L., Skoczylas K.: Katalogowa wydajność węglkowych frezów trzpieniowych do obróbki zgrubnej	53
Vartanov M., Zinina I., Chang Chung Ta: Badania wpływu efektu obrotów części na niezawodność zrobotyzowanego montażu	58

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

Peta K., Wiśniewski M., Suszyński M., Cieślak R., Żurek J.: Evaluation of clinch joints with a seam gasket applied by hand and form on a modular robotic assembly station	6	Пета К., Висьневски М., Сушински М., Цесьляк Р., Журек Я.: Оценка долговечности клинчатых соединений с уплотнением изготовленным в ручную и отливаемой на модульном роботизированном сборочном стенде	6
Zielecki W., Perłowski R., Tłuczek R.: Mass Customization – a production type dedicated to organization of the process of manufacturing modular products	11	Зелецки В., Перловски Р., Тлучек Р.: Mass Customization – тип производства направленный для организации изготовления модульных изделий.	11
Fiedorenko A., Styp-Rekowski M., Oborski I.: The research of the complex of structural and mass transfer characteristics of the carbon-fiber filtration materials	16	Федоренко А., Стып-Рековски М., Оборски И.: Исследование комплекса структурных и массообменных характеристик углеродно-волоконистых фильтрационных материалов	16
Kozioł S., Samborski T., Zbrowski A., Lipiński J.: A modular structure of a painting robot for the painting of images	21	Козел С., Самборски Т., Збровски А., Липински Я.: Модульная структура красильного робота для раскрашивания картин	21
Kubit A., Wędrzyński D., Bucior M., Kluz R.: The properties of the stiffening ribs shaped in thin sheetes with aviation alloy 2024-T3 by incremental forming method	28	Кубит А., Вуджынски Д., Буциор М., Кюз Р.: Свойства вытяжек увеличивающих жесткость в тонких жестях из авиационного алюминиего сплава 2024-T3 методом формирования приращиванием	28
Łunarski J.: Standardization of evolution systems	33	Лунарски Е., Стандаризация в развитии систем	33
Kluz R., Przeszłowski Ł., Bucior M., Zielecki W.: The influence of parameters of the shot peening process on the roughness of components printed by the MEM method	38	Кюз Р., Пшешловски Л., Буциор М., Зелецки В.: Влияние параметров шарикового наклепа на шероховатость элементов печатанных методом МГМ	38
Godzimirski J., Jagiełło A.: Effect of surface treatment cold-work hardening after adhesive curing on strength of adhesive lap joints	43	Годзимирски Я., Ягелло А.: Влияние поверхностного наклепа после упрочнения швов на работоспособность накладных клеевых соединений	43
Rudawska A., Miturska A.: The effect of curing and seasoning conditions on the strength of adhesive butt joints	48	Рудауска А., Митурска А.: Влияние условий упрочнения и старения на прочность стыковых клеевых соединений	48
Skoczylas L., Skoczylas K.: Catalog performance of solid carbide endmills for roughing milling	53	Скочилияс Л., Скочилияс К.: Стандартная работоспособность твердосплавных стержневых фрез для черновой обработки	53
Vartanov M., Zinina I., Chang Chung Ta: Analysis of the effect of the rotation of the part on the reliability the robotics' assembly process	58	Вартанов М., Зинина И., Ханг Хунг Та.: Исследование влияния эффекта вращения детали на безотказность процесса роботизированной сборки	58

Wskazówki dotyczące przygotowania artykułów

- Artykuły przeznaczone do opublikowania w kwartalniku „Technologia i Automatyzacja 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 Automatyzacja 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 Automatyzacja Montażu” w 2018 r.

Kwartalnik „Technologia i Automatyzacja 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: 100 zł (w tym 23% VAT).

Rabaty:

30% – dla członków stowarzyszeń naukowo-technicznych NOT, nauczycieli, studentów i uczniów,

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

Prenumeratę można zamówić:

- **telefonicznie:** 22 840 30 86, 22 840 35 89
- **faksem:** 22 891 13 74
- **e-mailem:** prenumerata@sigma-not.pl
- **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).

PROBLEMY I PROCESY MODERNIZACJI WYROBÓW ELEKTROMASZYNOWYCH

Jerzy ŁUNARSKI

Wzrastająca złożoność systemów technicznych oraz nasilająca się konkurencja we wprowadzaniu ich na rynek stwarza przedsiębiorstwom i wspierającym je organizacjom konieczność ciągłego doskonalenia ofert rynkowych. Odbywa się to wieloma sposobami, z których ważniejsze to:

- Obserwowanie i naśladowanie najlepszych rozwiązań pojawiających się na rynku w obrocie towarowym oraz ich adoptowanie przez zakup praw intelektualnych ich wytwarzania lub wprowadzanie odpowiednich zmian modernizacyjnych, umożliwiających omiwanie praw zastrzeżonych.
- Utrzymywanie ścisłych relacji z klientami i szybkie reagowanie na ich potrzeby, uwagi, propozycje, za pomocą wyspecjalizowanych zespołów projektowych, badawczo-rozwojowych, innowacyjnych i innych.
- Obserwowanie osiągnięć nauk podstawowych i stosowanych, a także uruchamianie badań rozwojowych w celu wczesnego i udanego praktycznego wykorzystania tych osiągnięć w postaci przełomowych innowacji i unowocześnionych wyrobów uruchamiających często nowe rynki.
- Przydatną praktyką w poszukiwaniu kierunków modernizacji wytwarzanych wyrobów jest dokonanie przeglądu historii ich rozwoju (np. na podstawie kolejnych patentów i ich wersji rynkowych) co umożliwia wyjaśnienie zasad i tendencji rozwojowych i na tej podstawie ukierunkowanie poszukiwań potrzebnych rozwiązań.

Logika takich działań wynika z filozofii technicznej zakładającej, że poszczególne obiekty tworzone przez człowieka podlegają rozwojowi podporządkowanemu obiektywnym prawom. Dotychczasowe obserwacje i analizy pozwoliły sformułować następujące zasady kreowania systemów technicznych i poszczególnych obiektów, tzn.:

- obiekt powinien składać się z określonego zestawu kompatybilnych elementów połączonych w odpowiednią strukturę,
- w obiekcie powinien być zapewniony przepływ strumieni energetycznych od ich źródeł do organów wykonawczych,
- w obiekcie powinna być zapewniona synchronizacja współdziałania poszczególnych elementów i parametrów oraz ich dostosowanie do organów wykonawczych lub obiektów na które mają oddziaływać.

Potrzeby doskonalenia konkurencyjności wytwarzanych wyrobów ukierunkowane są przeważnie na wprowadzanie w tych wyrobach następujących zmian (których

potrzeba wynika z przeprowadzonych analiz i potrzeb wyrobu lub jego odbiorcy):

- obniżenie kosztów wytwarzania wyrobu dzięki polepszeniu jego technologiczności oraz redukcję materiałochłonności, energochłonności, pracochłonności, marnotrawstwa itp. w procesach wytwarzania.
- spełnienie wymagań przepisów prawa dotyczących bezpieczeństwa personelu, informacji, środowiska, mienia i ewentualnie innych wymagań przepisów prawa oraz przepisów technicznych.
- polepszenie cech wyrobu pożądaných przez klientów w zakresie doskonalenia funkcjonalności, niezawodności, trwałości, serwisowalności i inne.

Spełnienie tych, często sprzecznych wymagań może być realizowane w różny sposób, lecz zawsze wymaga indywidualnego podejścia, uwzględnienia wielu czynników ograniczających i maksymalne wykorzystanie dysponowanego potencjału intelektualnego i materialnego. Obserwacje historycznych zmian ewolucyjnych różnych wyrobów wskazują na następujące możliwości działań modernizacyjnych, umożliwiające zmiany właściwości i cech modernizowanych wyrobów:

- przez transformację monosystemu w polisystem,
- przez redukcję liczby elementów w systemie,
- przez zmianę rozwiązań elementów stosowanych w obiekcie,
- przez różnicowanie lub dekompozycję obiektu,
- przez zmianę właściwości odpowiednich powierzchni (trących, nośnych, roboczych, bazowych itp.)
- przez zmianę struktury wewnętrznej obiektu,
- przez zmianę kształtu i wymiarów wybranych elementów,
- przez zwiększenie dynamiczności obiektu (zwiększenie ruchliwości wybranych elementów),
- przez zwiększenie sterowalności obiektu (stopnia zautomatyzowania sterowania),
- przez zwiększenie synchronizacji parametrów i charakterystyk w trakcie oddziaływania na obiekty zewnętrzne.

Wprowadzane zmiany winny sprzyjać zwiększeniu tzw. idealności obiektu, tzn. polepszeniu jego cech i watorów w stosunku do stanu dotychczasowego. Stopień takiego polepszenia można w przybliżeniu ocenić ilorazem nakładów koniecznych do zrealizowania prac modernizacyjnych do liczby wykonanych prac (zadań). Im uzyskany iloraz będzie mniejszy tym rozpatrywany obiekt będzie bliższy do stanu idealnego (co jest równoznaczne z rozwiązaniami optymalnymi w konkretnych warunkach).

Zgodnie z takimi założeniami rozwój obiektów technicznych (i innych również), podlega prawu położonej litery S – początkowy wzrost idealności jest powolny, potem przyspiesza osiągając swoje graniczne możliwości. Dalsze przyrosty użytecznych cech i właściwości obiektu są możliwe w sytuacji, gdy pojawią się nowe rozwiązania radykalnie odmienne od dotychczasowych.

W praktyce stosowanie powyższego podejścia powoduje, że w obiekcie mogą zachodzić następujące zmiany:

- następuje znacząca miniaturyzacja obiektu i jego elementów składowych,
- lub następuje znaczące powiększenie rozpatrywanych obiektów,
- następuje rozszerzenie i ulepszenie jego funkcjonalności,
- następuje uproszczenie czynności eksploatacyjnych i serwisowych,
- następuje wprowadzenie lub znaczący wzrost udziału w jego funkcjonowaniu różnych pól (elektrycznych, magnetycznych, termicznych, chemicznych, mechanicznych lub ich zestawów np. elektromechanicznych, elektromagnetycznych i in.)

W teorii TRIZ (teoria rozwiązywania innowacyjnych zadań) w celu wspomaganie praktycznych działań modernizacyjnych opracowano szereg standardów ułatwiających poszukiwanie właściwych rozwiązań, takich jak:

- wskazanie zalecanych sposobów usuwania sprzeczności technicznych (50 standardów),
- wskazanie zalecanych efektów fizycznych pomocnych w poszukiwaniu właściwych rozwiązań (10 głównych efektów i 57 szczegółowych),
- wskazanie efektów chemicznych przydatnych do usuwania sprzeczności (8 efektów),
- wskazanie efektów geometrycznych (7 sytuacji i 30 uszczegółowień), i in.

W działaniach analizy i syntezy oraz poszukiwaniu przełomowych rozwiązań wskazane jest posługiwanie się opracowanymi do tych celów specjalnymi metodami, zarówno tradycyjnymi jak i nowo opracowanymi do celów wspomaganie praktycznych działań. Są to m.in. następujące metody:

- sposoby identyfikacji drzewa ewolucji rozpatrywanego obiektu,
- analiza wopolowa (substancja – pole) polegająca na wizualizacji problemów i zadań,
- modelowanie i wizualizacja za pomocą metody „małych ludzików”,
- metoda analizy zasobów koniecznych do rozwiązania zadania,
- metoda analizy przyczynowo-skutkowej w celu identyfikacji nieporządkanych efektów i in.

Złożoność TRIZ spowodowała, że dla ułatwienia jego praktycznego stosowania opracowano szereg praktycznych algorytmów postępowania, wskazujących na sposoby stosowania standardów, metod, zasad i innych wytycznych w rozwiązywaniu innowacyjnych zadań. Algorytmy takie są ukierunkowane na rozwiązywanie określonej klasy zadań i okresowo nowelizowane w miarę

rozszerzania bazy danych i nowych opracowań teoretycznych rozwijających tę teorię oraz ścieżek identyfikacji ewolucji rozwojowej analizowanych obiektów. Prace badawcze z tego zakresu prowadzone są przez duże korporacje międzynarodowe i często nie są publikowane (stanowią podstawę własnych prac rozwojowych).

Obecnie metoda TRIZ w Polsce jest mało popularna i częściej są stosowane tradycyjne metody kreowania innowacji i postępu technicznego (są one opisane w obszernej literaturze przedmiotu). Przeważnie stosowane są następujące podejścia:

- Identyfikowanie problemów i ich uporządkowane rozwiązywanie z pomocą list kontrolnych, metody 5 x dlaczego, analizy ankiet i obserwacji, analizy dokumentacji, metodami zarządzania (np. PDCA, DMAIC, Benchmarking, LM, Kazein i in.)
- Rozwiązywanie zadań za pomocą twórczego myślenia i twórczego zarządzania w powiązaniu z zaistniałymi problemami, które przyczyniają się do rozwoju kapitału intelektualnego i skutecznego zarządzania twórczego (typowe wykorzystywane metody, to: burza mózgów, analiza morfologiczna, metoda delficka, analiza analogii, metoda wyszukiwania, synektyka, analiza funkcjonalno-kosztowa, metoda pola sił i in.)
- Wspomaganie działań kreatywnych z pomocą badań stosowanych i rozwojowych, nowoczesnego projektowania, motywowania personelu, tworzenie odpowiedniej infrastruktury innowacyjnej (warunki pracy, działania zespołowe, konkursy, identyfikacja oczekiwań klientów itp.)
- Wykorzystywanie w procesach modernizacyjnych informacji zawartych w nowoczesnych, międzynarodowych normach technicznych z zakresu zarządzania różnymi aspektami działalności np. jakością, środowiskiem, bezpieczeństwem, informacją, ryzykiem, projektowaniem, dostawami, społeczną odpowiedzialnością, szkoleniem, zmianami, konfliktami i in.

Jak widać z powyższego dostępne instrumentarium wspomaganie działań modernizacyjno – innowacyjnych jest bardzo obszerne, różnorodne i umożliwia wybór sposobów optymalnie przydatnych w różnych organizacjach, o różnym poziomie rozwoju i skali działalności, funkcjonujących w różnych sektorach wytwórczych. Umiejętne i skuteczne wykorzystanie tych metod i narzędzi umożliwia stałe doskonalenie działalności celem zachowania wymaganego poziomu konkurencyjności jak również jej doskonalenia ponad przeciętne tempo w sektorach.

Należy podkreślić, że aby zapewnić skuteczność tych działań konieczne jest kompleksowe traktowanie problematyki wytwarzania i ciągłego doskonalenia wyrobów, personelu, infrastruktury, organizacji, zarządzania, powiązań zewnętrznych, obserwowania postępów nauki i techniki, prowadzenia sukcesywnych analiz osiąganych poziomów rozwojowych w porównaniu z konkurencją. W oparciu o otrzymywane wyniki analiz i obserwacji należy podejmować decyzje eliminujące zidentyfikowane niedociągnięcia i kreujące rozwój postępu technicznego i technologicznego w swoim przedsiębiorstwie.

OCENA POŁĄCZEŃ KLINCZOWYCH Z USZCZELKĄ KSZTAŁTOWĄ NAKLADANĄ RĘCZNIE I WYLEWANĄ NA MODUŁOWYM ZROBOTYZOWANYM STANOWISKU MONTAŻOWYM

Evaluation of clinch joints with a seam gasket applied by hand and form on a modular robotic assembly station

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

Streszczenie: W pracy omówiono dwa sposoby montażu uszczelki zbiorników chłodnic cieczy. Przedstawiono porównanie wyników badań chłodnic cieczy z uszczelnieniem nakładanym ręcznie oraz wylewanym na modułowym zrobotyzowanym stanowisku montażowym. Zastosowano uszczelki z materiału EPDM (etylene propylene diene monomer) oraz dwuskładnikowego kauczuku silikonowego, weryfikując ich twardość, siłę odrywania od zbiornika oraz odporność na starzenie. Po wykonaniu połączeń klinczowych przeprowadzono badania ich wytrzymałości na rozrywanie oraz mikrografię uwzględniającą wartości ugięcia obu uszczelki. W podsumowaniu przedstawiono wady i zalety uszczelnienia w odniesieniu do trwałości chłodnic cieczy, czasu trwania operacji montażu, z ustaleniem kierunków dalszych badań włącznie.

Słowa kluczowe: połączenia montażowe, chłodnice cieczy, robotyzacja

Abstract: The paper presents two ways of assembly of liquid radiator tank gaskets. A comparison of the test results of liquid coolers with a manual and poured gasket on a modular robotic assembly station is presented. Gaskets made of EPDM (ethylene propylene diene monomer) and two-component silicone rubber were used, verifying their hardness, chemical composition, detachment strength and resistance to aging. After the clinch joints were made, they were tested for their burst strength and micrography taking into account the deflection values of both gaskets. The summary presents the advantages and disadvantages of sealing in relation to the durability of liquid coolers, the duration of assembly operations, including directions for further tests.

Key words: assembly joints, liquid coolers, robotization

Wprowadzenie

Technologia klinczowania chłodnic cieczy, polegająca na lokalnym przetłaczaniu łapek płyty sitowej na stopie zbiornika, umożliwia łączenie różnych gatunków materiałów oraz ograniczenie oddziaływania cieplnego na strukturę metalograficzną. W celu zapewnienia szczelności połączeń klinczowych, stosuje się uszczelki, umieszczane pomiędzy powierzchniami łączonych części, spełniające wymagania odporności na: 1) starzenie, 2) szoki cieplne oraz 3) działanie cieczy chłodzącej [1, 5, 7, 8, 9, 12].

Aktualnym kierunkiem rozwoju przedsiębiorstw jest modularyzacja i robotyzacja stanowisk montażowych, zwiększająca wydajność i elastyczność produkcji. Dobór sposobu nakładania uszczelki, ręcznie lub za pomocą robota przemysłowego, wpływa nie tylko na czasochłonność montażu, ale także na jakość połączeń klinczowych. Ich wady powodują wyciek cieczy chłodzącej z układu chłodzenia silnika i wynikają z nieprawidłowości [2, 3, 4, 6, 10, 11]:

- uszczelki (wymiarów i kształtów, przyczepności do podłoża, doboru materiałów),
- łączonych części (wymiarów i kształtów stopy zbiornika, łapek i rowka płyty sitowej, a także doboru stopów aluminium o małej plastyczności),

- operacji klinczowania (wymiarów oraz niewspółosiowości stempla i matrycy, wartości sił docisku i zaciśnięcia łapek płyty sitowej na stopie zbiornika, a także braku stosowania olei podczas przetłaczania łapek płyty sitowej).
- operacji ręcznego montażu uszczelki (wartości siły docisku uszczelki do rowka płyty sitowej),
- operacji zrobotyzowanego montażu uszczelki (doboru trajektorii i parametrów ruchu robota, wartości temperatury wulkanizacji uszczelki).

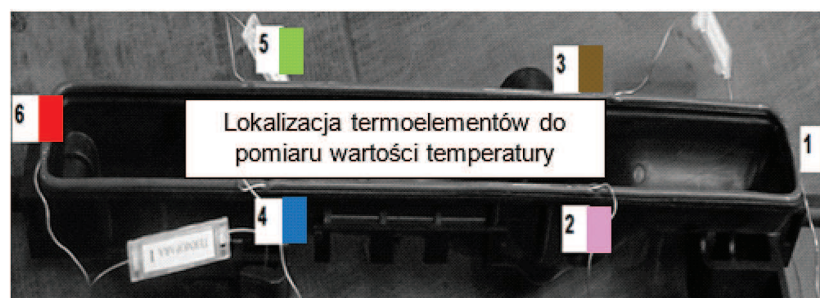
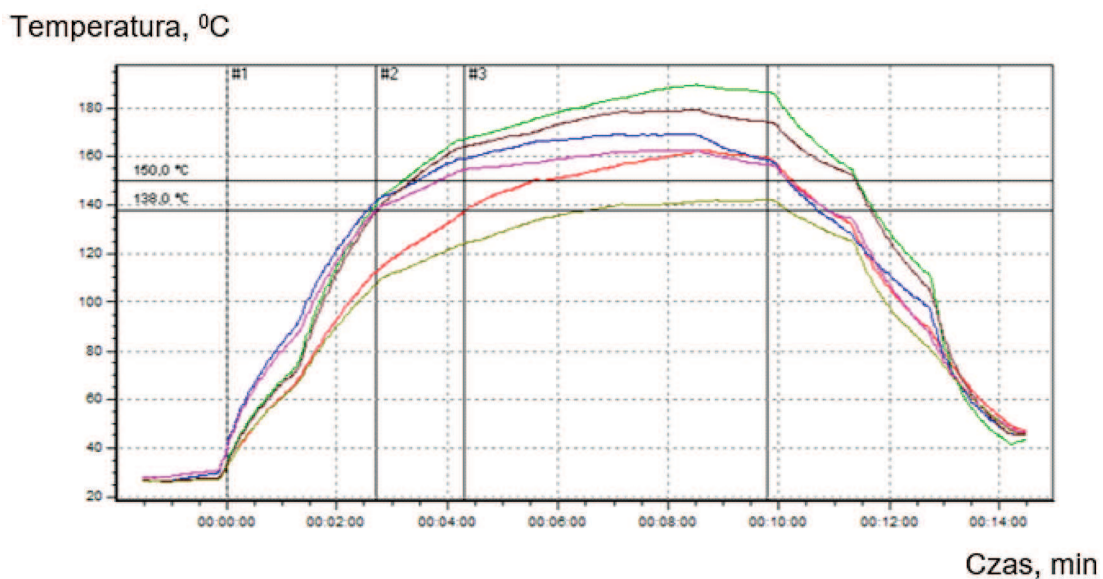
Metodyka badań

Badaniom poddano klinczowe połączenia przetłoczonych łapek płyty sitowej, wykonanych ze stopów aluminium AA3003/AA434, na stopie zbiornika z poliamidu PA6. Na uszczelnienia zastosowano dwa rodzaje materiałów: terpolimer otrzymywany z monomerów etylenowo-propylenowo-dienowych EPDM oraz dwuskładnikowy kauczuk silikonowy. Pierwszy, w postaci wykroju, nakładano ręcznie na rowku płyty sitowej, drugi nalewano w stanie płynnym na stopę zbiornika za pomocą robota przemysłowego, a następnie wulkanizowano w piecu zgodnie z rozkładem temperatury w funkcji czasu przedstawionym na rys. 1.

a)



b)



Rys. 1. Rozkład temperatury wulkanizacji uszczelki w funkcji czasu: a) teoretyczny, b) rzeczywisty (pomiar temperatury na powierzchni uszczelki za pomocą termoelementów)

Fig. 1. Distribution of temperature of gasket vulcanization as a function of time: a) theoretical, b) real (temperature measurement on the surface of the gasket using thermocouples)

Na rys. 2 przedstawiono dwa sposoby montażu uszczelki: ręczny oraz zrobotyzowany.

W celu sprawdzenia zdolności uszczelki do zachowania właściwości mechanicznych po długotrwałym działaniu na ich powierzchnię naprężeń ściskających, wykonano pomiary: ugięcia oraz mikrotwardości. Próbk

ściskano do 50% ich wysokości na powietrzu w temperaturze $120 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 24 h – metoda A, a także w wodnym roztworze glikolu etylenowego w temperaturze $120 \pm 2^\circ\text{C}$ przez 48 h – metoda B. Następnie oceniono połączenia klinkowe: 1) wartość ciśnienia rozrywania oraz 2) ugięcie uszczelki.



Rys. 2. Stánowiska montaży uszczeltek: a) ręczne, b) zrobotyzowane
Fig. 2. Gasket assembly workstations: a) manual, b) robotized

Tabela I. Zestawienie wyników pomiarów mikrotwardości oraz wysokości uszczeltek po badaniu odporności na starzenie
Table I. Comparison of microhardness measurement results and gasket height after an aging resistance test

Rodzaj uszczelki	Lp.	Wysokość uszczelki przed badaniem odporności na starzenie, mm	Mikrotwardość uszczelki przed badaniem odporności na starzenie, HV0,03	Wysokość uszczelki po badaniu odporności na starzenie, mm	Mikrotwardość uszczelki po badaniu odporności na starzenie, HV0,03
Badanie odporności na starzenie – metoda A (na powietrzu)					
Nakładana ręcznie (materiał – EPDM)	1.	3,52	62,70	3,11	63,10
	2.	3,52	62,60	3,16	61,60
	3.	3,52	63,10	3,29	62,70
	4.	3,52	62,80	3,28	63,30
	5.	3,52	63,10	3,18	63,50
	średnia	3,52	62,86	3,20	62,84
Nalewana za pomocą robota przemysłowego (materiał – kauczuk silikonowy)	1.	3,52	61,50	3,03	63,10
	2.	3,51	60,60	2,89	61,60
	3.	3,52	63,70	2,96	63,10
	4.	3,52	62,90	2,88	63,80
	5.	3,50	62,20	3,01	62,70
	średnia	3,51	62,18	2,95	62,86
Badanie odporności na starzenie – metoda B (w wodnym roztworze glikolu etylenowego)					
Nakładana ręcznie (materiał – EPDM)	1.	3,52	62,10	3,25	63,20
	2.	3,52	63,10	3,26	62,90
	3.	3,52	62,40	3,18	62,30
	4.	3,52	62,70	3,28	62,40
	5.	3,52	62,30	3,28	62,10
	średnia	3,52	62,52	3,25	62,58
Nalewana za pomocą robota przemysłowego (materiał – kauczuk silikonowy)	1.	3,49	61,30	3,05	61,50
	2.	3,50	62,40	3,02	62,80
	3.	3,55	62,50	2,80	62,10
	4.	3,55	62,30	3,10	62,70
	5.	3,52	62,90	2,90	63,40
	średnia	3,52	62,28	2,97	62,50

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki pomiarów mikrotwardości uszczelki, a także ich wysokości przed i po badaniu dwoma metodami odparzenia na starzenie przedstawiono w tab. I.

Wyniki pomiarów wysokości uszczelki po montażu mieszczą się w polu tolerancji wymiarów podanych w dokumentacji konstrukcyjnej $T=3,52\pm 0,1$ mm. Wartości wysokości uszczelki z kauczuku silikonowego różnią się od wartości nominalnych od 0 do 0,03 mm, a z materiału EPDM są zgodne z wymiarem nominalnym, świadcząc o większej dokładności ich wykonania.

W celu oceny zdolności powrotu uszczelki do pierwotnego kształtu sprawdzono ich wysokość po odjęciu sił obciążających, a następnie obliczono procentową wartość ugięcia próbek, stosując wzór:

$$C_A = \frac{(t_0 - t_i)}{t_0} \times 100\%,$$

gdzie:

C_A – ugięcie uszczelki, jako procent jej wysokości wyjściowej,

t_0 – wysokość uszczelki przed badaniem odporności na starzenie,

t_i – wysokość uszczelki po badaniu odporności na starzenie.

Maksymalna dopuszczalna wartość ugięcia uszczelki, zgodnie z założeniami dokumentacji technicznej, nie powinna przekraczać 35% wysokości wyjściowej. Próbki poddane badaniom odporności na starzenie spełniły wymienione wymagania. Średnia wysokość starzonych uszczelki z materiału EPDM wyniosła od 3,20 mm do 3,25 mm, a wartość ich ugięcia mieściła się w zakresie od 7,7 do 9,1%, świadcząc o lepszych właściwościach sprężystych od uszczelki z kauczuku silikonowego o wysokości 2,95–2,97 mm oraz ugięciu 15,6–16,0%.

Pomimo zróżnicowania stopnia ugięcia obu rodzajów uszczelki, uzyskano podobne wartości ich mikrotwardości, zarówno przed jak i po badaniu odporności na starzenie – 62 HV0,03.

W celu oceny połączeń klinczowych, wykonano także badania wytrzymałości chłodnic cieczy na rozrywanie. Nieszczelność w strefie analizowanych uszczelki wystąpiła przy ciśnieniu rozrywania 1,05–1,07 MPa.

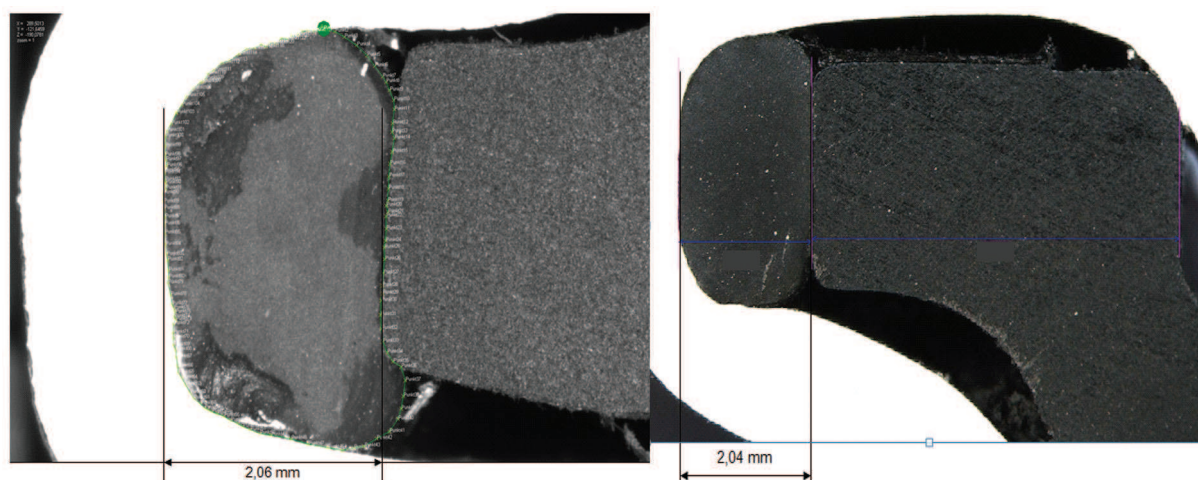
Na rys. 3 przedstawiono makrostrukturę uszczelki: nakładanej ręcznie (EPDM) oraz nalewanej na zrobotyzowanym stanowisku (kauczuk silikonowy). Ich wartość ugięcia po klinczowaniu wyniosła 27–28% (wysokość 2,54–2,56 mm), co świadczy o wynikach zgodnych z wymaganiami technicznymi (20–40% ugięcia).

Wnioski

Robotyzacja produkcji zmniejsza czasochłonność montażu i prawdopodobieństwo wystąpienia wad wyrobów. Uszczelki chłodnic cieczy, nakładane na stanowiskach: ręcznym i zrobotyzowanym charakteryzują się podobną wartością wysokości po montażu, mikrotwardością, a połączenia klinczowe – wartością ugięcia uszczelki oraz wytrzymałością na rozrywanie.

Badania odporności uszczelki na starzenie imitują warunki ich pracy i pozwalają na ocenę właściwości sprężystych materiałów poddawanych działaniu zwiększonej wartości temperatury w pewnym okresie czasu. Sprężystość uszczelki zapobiega powstawaniu pęknięć, wpływając na niezawodność klinczowych połączeń. Materiałem o większej zdolności powrotu do wyjściowego kształtu jest EPDM.

Wyniki badań wskazały na konieczność kontynuacji prac związanych z robotyzacją montażu chłodnic cieczy. Obejmą one wykonanie badań symulacyjnych nakładania uszczelki z materiału EPDM, posiadającego lepsze właściwości sprężyste, za pomocą robota przemysłowego. Przewiduje się także przeprowadzenie analiz ekonomicznych proponowanego rozwiązania.



Rys. 3. Makrostruktura uszczelki: a) nalewanej na zrobotyzowanym stanowisku, b) nakładanej ręcznie
Fig. 3. Macrostructure of the gasket: a) filled on a robotic station, b) applied manually

LITERATURA

- [1] Balawender T. 2010. „Klinczowanie jako sposób łączenia cienkościennych blach”. *Technologia i Automatyzaacja Montażu* (1): 33–36.
- [2] Gronostajski Z., S. Polak. 2009. “The application of clinching techniques to join impact energy absorbing thin-walled aluminium sections”. *Archives of Metallurgy and Materials* vol. 54(3): 695–70.
- [3] Koch T. 2006. „Systemy zrobotyzowanego montażu”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- [4] Lambiase F. et. al. 2015. “Joining aluminium alloys with reduced ductility by mechanical clinching”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 77(5–8):1295–130.
- [5] Lee Ch.-J. et. al. 2010. “Parametric study on mechanical clinching process for joining aluminum alloy and high strength steel sheets”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, No. 1: 123–126.
- [6] Meschut G., V. Janzen, T. Olfermann . 2014. “Innovative and highly productive joining technologies for multi-material lightweight car body structures”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23(5): 1515–15.
- [7] Mucha J. 2017. “Clinching technology in the automotive industry”. The archives of Automotive Engineering – Archiwum motoryzacji, vol. 76(2): 75–94.
- [8] Mucha J., L. Kaščák. 2010. „Wybrane aspekty kształtowania okrągłych połączeń przetłoczeniowych”. *Problemy eksploatacji – Maintenance problems* (4): 29–38.
- [9] Nong N. et. al. 2003. “Research on press joining technology for automotive metallic sheets”. *Journal of Materials Processing Technology* no. 137(1–3): 159–163.
- [10] Trespaderne F.M., E. López. 2009. “Visually guided robot for radiator sealing”. *Emerging Technologies & Factory Automation*, 22–25 Sept. 2009 Mallorca-Spain, IEEE Conference.
- [11] Yang Z. et. al. “Research on Intelligent Glue-coating Robot Based on Visual Servo”. *Physics Procedia*, vol. 24: 2165–2171.
- [12] Żurek J., K. Peta. 2014. „Ocena wytrzymałości połączeń nierozłącznych w skraplaczach samochodowych za pomocą analizy sygnałów wibroakustycznych”. *Inżynieria Maszyn* t. 19(1): 115–124.

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

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

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

dr inż. Robert Cieślak – Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Koninie, Katedra Inżynierii i Technologii, ul. Kard. S. Wyszyńskiego 35, 62-510 Konin, e-mail: robert.cieslak@konin.edu.pl

MASS CUSTOMIZATION – TYP PRODUKCJI DEDYKOWANY DLA ORGANIZACJI PROCESU WYTWARZANIA WYROBÓW MODUŁOWYCH

Mass Customization – a production type dedicated to organization of the process of manufacturing modular products

Władysław ZIELECKI, Ryszard PERŁOWSKI, Ryszard TŁUCZEK

Streszczenie: W początkowej fazie rozwoju produkcji przemysłowej wytwórcy wyrobów, dążąc do uzyskania przewagi konkurencyjnej, starali się zmniejszyć koszty produkcji dzięki stosowaniu tanich, specjalnych maszyn, dostosowanych konstrukcyjnie do realizacji prostych zadań technologicznych. Tak powstała produkcja masowa pozwalająca wytwarzać tanie, jednakowe wyroby w bardzo dużej ilości przez długi czas, które nie zaspokajały zróżnicowanych potrzeb klientów. Współczesny rynek konsumentów zmusił producentów do stosowania nowych typów produkcji: produkcji wariantowej oraz Mass Customization (masowej kustomizacji). Produkcja wariantowa polega na wytwarzaniu wyrobów w kilku wariantach, które zaspokajają częściowo potrzeby wybranych grup konsumentów, natomiast Mass Customization (produkcja masowa zindywidualizowanych wyrobów) polega na wytwarzaniu na masową skalę wyrobów dopasowanych do indywidualnych potrzeb klienta po standardowych kosztach. Zastosowanie Mass Customization wymaga zaprojektowania wyrobów o strukturze modułowej oraz stworzenia systemów informatycznych umożliwiających klientom konfigurowanie i zamawianie wyrobów, złożonych z oferowanych modułów, które zaspokoją ich indywidualne potrzeby. Mass Customization stosowane jest w przemyśle samochodowym, komputerowym i umożliwia uzyskanie producentom przewagi konkurencyjnej.

Słowa kluczowe: typ produkcji, wyrób modułowy, Mass Customization

Abstract: In the initial phase of development of industrial production, the manufacturers of products, seeking to gain a competitive advantage, tried to reduce production costs by using cheap, special machines adapted to the implementation of simple technological tasks. This is how mass production was created that allowed producing cheap, uniform products in a very large amount over a long period of time, which did not satisfy the diverse needs of customers. The modern consumer market has forced producers to use new types of production: variant production and Mass Customization. Variant production consists in manufacturing products in several variants, which partially meet the needs of selected consumer groups, whereas Mass Customization (mass production of individualized products) consists in mass-scale production of products tailored to individual customer needs at standard costs. The use of Mass Customization requires the design of products with a modular structure and the creation of information systems enabling customers to configure and order products, consisting of modules offered, that will meet their individual needs. Mass Customization is used in the automotive and computer industries and enables manufacturers to gain a competitive advantage.

Keywords: type of production, modular product, Mass Customization

Wprowadzenie

Wraz z rozwojem gospodarczym w systemach produkcyjnych pojawiały się nowe koncepcje zarządzania produkcją. Przykładem usprawnień organizacyjnych może być wdrażanie typów i form organizacji produkcji. Typ produkcji charakteryzuje stopień specjalizacji stanowisk roboczych, natomiast forma organizacji produkcji charakteryzuje powiązania kooperacyjne występujące między stanowiskami roboczymi lub modułami produkcyjnymi.

W gospodarce zdominowanej przez producenta typ produkcji można określić dzięki wyznaczeniu wskaźnika średniej liczby detalooperacji K wykonywanych na stanowisku roboczym lub wskaźnika obciążenia stanowiska roboczego detalooperacją η :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (1)$$

gdzie: d_i – liczba detalooperacji wykonywanych na stanowisku i ,

n – liczba stanowisk roboczych,

$$\eta = \frac{1}{K} \cdot 100\% = \frac{t_j \cdot P}{F} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie: t_j – czas jednostkowy,

P – program produkcji,

F – fundusz czasu pracy stanowiska roboczego.

W zależności od wartości obliczonych współczynników w systemie produkcyjnym można zastosować odpowiedni typ organizacji produkcji (tab. 1) oraz wypożyczyć go w odpowiednie maszyny: specjalne, specjalizowane lub uniwersalne, różniące się konstrukcją oraz ceną. Stosowanie maszyn specjalnych, zaprojektowanych do realizacji jednej lub kilku podobnych operacji technologicznych, a tym samym mających prostą konstrukcję, pozwala znacznie ograniczyć koszty produkcji. Zatem:

- produkcja jednostkowa polega na jednorazowym lub nieregularnym wytwarzaniu pojedynczych lub niewielkiej ilości wyrobów na uniwersalnych stanowiskach roboczych. Produkcja realizowana jest na zlecenie indywidualnego i określonego odbiorcy.
- produkcja seryjna polega na jednoczesnej i bezpośrednio następującej po sobie produkcji określonej liczby (serii, partii) jednakowych wyrobów na specjalizowanych i specjalnych stanowiskach roboczych.
- produkcja masowa polega na długotrwałym lub stałym wytwarzaniu jednakowych wyrobów (części) na specjalnych stanowiskach roboczych.

jednego wyrobu, który nie zaspokaja różnorodnych klientów i wdrażają nowe typy produkcji (rys. 1):

- produkcję wariantową polegającą na wytwarzaniu wyrobów w kilku wariantach, które zaspokajają częściowo potrzeby wybranych grup konsumentów lub
- produkcję masową zindywidualizowanych wyrobów (Mass Customization), polegającą na wytwarzaniu na masową skalę wyrobów, dopasowanych do indywidualnych potrzeb klienta o standardowych kosztach.

Istota i cechy Mass Customization

Strategia Mass Customization stawia sobie za cele: dostosowanie produktu do indywidualnych wymagań konkretnego klienta (cel osiągnięty dotychczas w produkcji rzemieślniczej – jednostkowej), oraz wytwarzanie go po niskich cenach z zachowaniem krótkich cykli dostawy (cele osiągnięte dotychczas w produkcji masowej).

Współcześnie koncepcja masowej kustomizacji definiowana jest jako system wykorzystujący technologie informatyczne, elastyczne systemy produkcyjne, umożliwiające dostarczanie szerokiej gamy produktów, spełniających indywidualne wymagania klienta (często przez wybór z określonego zestawu opcji) po kosztach nieprzekraczających więcej niż 10–15% ceny wyrobów standardowych wytwarzanych w produkcji masowej [2].

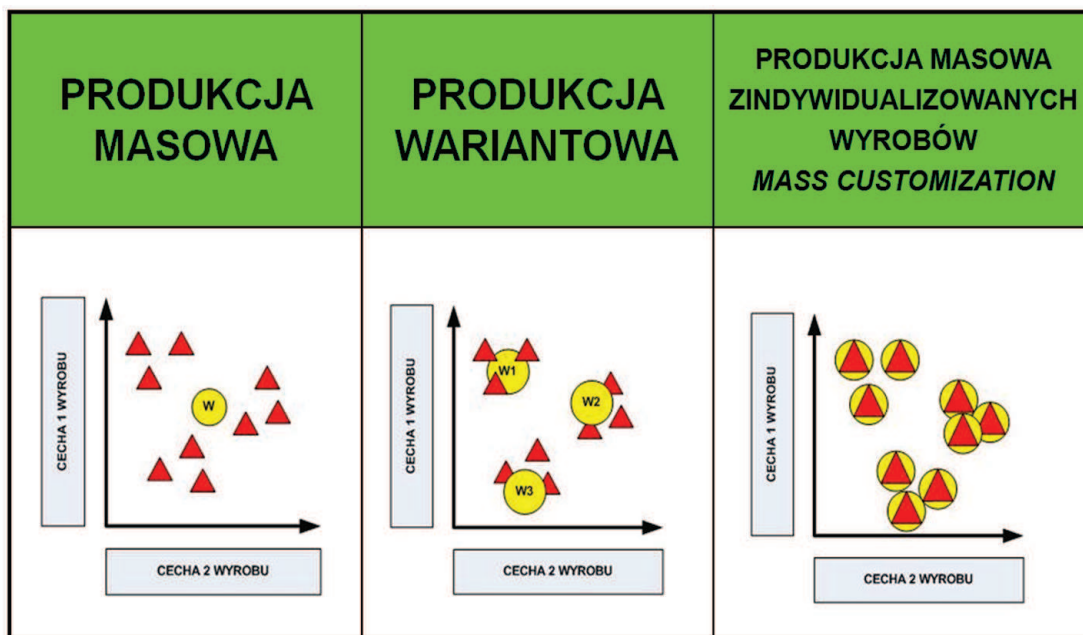
Zastosowanie Mass Customization wymaga zaprojektowania wyrobów o strukturze modułowej oraz stworzenia systemów informatycznych umożliwiających klientom konfigurowanie i zamawianie wyrobów, złożonych z oferowanych modułów, które zaspokoja ich indywidualne potrzeby.

Tabela 1. Typy produkcji stosowane w gospodarce zdominowanej przez producentów

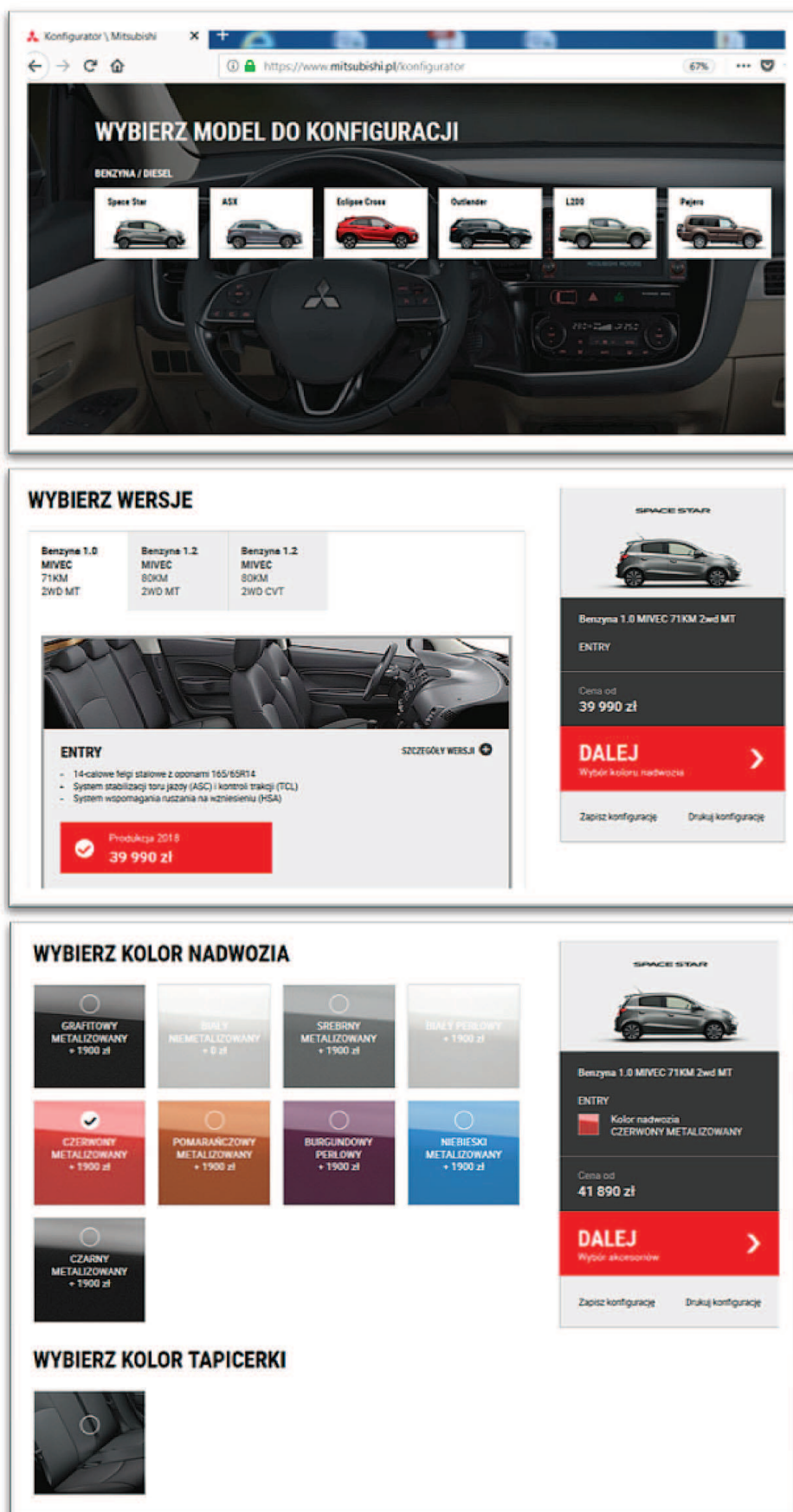
Table 1. Production types used in a producer-dominated economy

Typ produkcji	K	η	Wyposażenie technologiczne
Produkcja masowa	$K \leq 1$	$\eta \geq 100\%$	specjalne
Produkcja wielkoseryjna	$1 < K \leq 10$	$10\% \leq \eta < 100\%$	specjalne i specjalizowane
Produkcja średnioseryjna	$10 < K \leq 20$	$5\% \leq \eta < 10\%$	specjalizowane
Produkcja małoseryjna	$20 < K \leq 30$	$3\% \leq \eta < 5\%$	uniwersalne i specjalizowane
Produkcja jednostkowa	$30 < K$	$\eta < 3\%$	uniwersalne

Wytwarzane na masową skalę tanie wyroby tracą na atrakcyjności gdy są w posiadaniu wielu klientów. W gospodarce rynkowej klienci pragną posiadać wyroby, pełniące określoną funkcję, inne niż posiadają sąsiedzi. Aby sprostać temu wyzwaniu producenci odchodzą od produkcji masowej polegającej na wytwarzaniu



Rys. 1. Typy organizacji produkcji stosowane w gospodarce rynkowej
Fig. 1. Types of production organization used in a market economy



Rys. 2. Przykład kolejnych faz konfiguracji samochodu Mitsubishi [6]
 Fig. 2. Example of the next stages of the Mitsubishi car configuration [6]

Z punktu widzenia wprowadzania zmian w produkcji oraz w sposobie postrzegania produktu przez klienta można wyróżnić następujące odmiany Mass Customization (MC) [1, 3, 4]:

- **MC kolaboracyjne** – klient po nabyciu produktu ma możliwość samodzielnego dostosowania go, zgodnie ze swoimi indywidualnymi preferencjami,
- **MC kosmetyczne** – w standardowym produkcie zmienia się jedynie cechy decydujące o jego postrzeganiu przez poszczególnych klientów,
- **MC transparentne** – producent sam wprowadza zamiany w produkcie w oparciu o obserwacje zachowań i preferencji klienta,
- **MC adaptacyjne** – zmiany w produkcie wprowadzane są w porozumieniu z klientem.

Najczęściej stosowane odmiany Mass Customization zakładają zatem wprowadzanie zmian w wyrobie w fazie projektowania i wstępnych fazach wytwarzania lub w trakcie montażu i użytkowania wyrobu. W fazie projektowania i wstępnych fazach wytwarzania istnieje możliwość nie tylko dowolnego dobierania modułów wspólnych, ale także projektowania i wytwarzania składników specyficznych, zgodnie z wymaganiami klienta. W trakcie montażu i użytkowania produktu istnieje jedynie możliwość dodania lub zamiany pewnych modułów standardowych, zgodnie ze specyfikacją klienta.

Przejęcie od produkcji masowej do Mass Customization nie może się jednak odbyć bez wprowadzenia specjalistycznych narzędzi informatycznych, ułatwiających przełożenie wymagań klientów na konkretne cechy produktu finalnego. Służą temu konfiguratory produktu.

Konfiguratorem produktu jest aplikacja WEB, zazwyczaj o budowie warstwowej, umożliwiająca integrację z już wdrożonymi systemami, której główna funkcjonalność polega na umożliwieniu skonfigurowania produktu wedle wytycznych klienta. W konfiguratorze odbiorca produktu projektuje, spersonalizowany produkt z oferowanych przez producenta gotowych modułów lub części [5].

W pracy [5] zasadę działania konfiguratora produktu opisano jako zbiór czynności wykonywanych przez klienta w kolejnych etapach:

- Etap 1: Wybierz modułu/podzespołu do konfiguracji.
- Etap 2: Jeżeli żaden z dostępnych modułów nie spełnia twoich oczekiwań idź do etapu 4, w przeciwnym razie wybierz jedną z dostępnych opcji.
- Etap 3: Dopóki zbiór modułów produktu jest niepusty, powtarzaj etap 1 i 2, w przeciwnym razie idź do etapu 5.
- Etap 4: Jeśli chcesz to dodaj swoją konfigurację do bazy zestawów, w przeciwnym razie przejdź do etapu 5
- Etap 5: Jeżeli zakończyłeś proces konfiguracji określ rodzaj dostawy i przejdź do płatności, w przeciwnym razie idź do etapu 1.

Konfiguratory powszechnie występują na stronach internetowych producentów samochodów. Pozwalają one skonfigurować klientowi wymarzony samochód w następujących krokach:

Krok 1. Wybór modelu.

Krok 2. Wybór karoserii (3, 4, 5-drzwiowa).

Krok 3. Określenie rodzaju i pojemności silnika.

Krok 4. Wybór wyposażenia (np. lusterka elektrycznie sterowane i podgrzewane, system antypoślizgowy ABS z elektronicznym rozkładem siły hamowania EBD).

Krok 5. Wybór koloru nadwozia.

Krok 6. Dobór akcesoriów (np. światła LED do jazdy dziennej, uchwyt na rower, zestaw MMCS + kamera cofania)

Krok 7. Podsumowanie (zapis konfiguracji do pdf, bądź wysłanie opracowanej konfiguracji do dealera).

Producenci komputerów umożliwiają konfigurowanie wyrobów z następujących modułów: procesor, pamięć RAM, dyski i napędy, karty graficzne, karta sieciowa, karta sieci bezprzewodowej, zarządzanie systemami, system operacyjny, dodatkowe oprogramowanie, zasilanie, klawiatura, mysz, gwarancja, zachowanie dysków twardej, ochrona przed uszkodzeniami.

Konfiguratory rekomendowane są jako narzędzia informatyczne wspomagające obsługę klienta, wszędzie tam, gdzie finalny produkt ma budowę modułową.

Podsumowanie

Wdrożenie Mass Customization pozwala przedsiębiorstwom uzyskanie przewagi konkurencyjnej, utworzenie grupy lojalnych klientów, dla których istnieje możliwość lepsza identyfikacja potrzeb ponieważ klienci kreując produkt ujawniają swoje preferencje, tym samym producent jest mniej narażony na zmiany popytu i turbulencje występujące na rynku. Dodatkowo masowa kastomizacja umożliwia redukcję części kosztów produkcji, w szczególności kosztów magazynowania oraz niesprzedanych produktów, pozwala również zwiększyć przychody ze sprzedaży poprzez eliminację marż dotychczasowych pośredników oraz sprzedaż wyrobów po wyższej cenie, ponieważ klienci są skłonni zapłacić więcej za zindywidualizowany produkt.

Należy jednak pamiętać, że zastosowanie masowej kastomizacji stawia duże wymagania odnośnie organizacji systemu zarządzania produkcją, wymaga poniesienia niezbędnych i kosztownych inwestycji w technologie informacyjne, zautomatyzowane systemy produkcyjne i szkolenia. Wdrażanie Mass Customization narażone jest również na ryzyko związane z tym obok przedsiębiorstw, które skutecznie wdrożyły strategię mass customization, mogą pojawić się producenci wytwarzający wyroby w warunkach produkcji masowej lub wariantowej, które spełniają aktualne wymagania i potrzeby klientów.

LITERATURA

- [1] Bednarz L. 2010. "Operacjonalizacja strategii masowej kastomizacji." "Komputerowo zintegrowane zarządzanie" pod red. Ryszarda Knosali. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole: 102–111.
- [2] Blecker T. et. al. 2005. "Information and Management System for Product Customization". *Springer Science + Business Media*, Inc. Boston.
- [3] Da Silveira G., D. Borenstein, S. Fogliatto. 2001. "Mass customization: Literature review and reserch directions". *International Journal Production Economics* 72: 1–13.
- [4] Gilmore J.H., B.J. Pine II. 1997. "The four faces customization". *Harvard Business Review*, January-February: 21–30.
- [5] Gryko-Nikitin A. 2011. „Konfigurator produktu/sprzedaży jako narzędzie wspomagające masową indywidualizację”. *Economy and Management* (4): 135–143.
- [6] Konfigurator Mitsubishi, <https://www.mitsubishi.pl/konfigurator>, dostęp 22.06.2018.

dr hab. inż. Władysław Zielecki prof. Prz – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: wzktmiop@prz.edu.pl

dr inż. Ryszard Pełowski – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: rpzktmiop@prz.edu.pl

dr inż. Ryszard Tłuczek – Wydział Mechaniczno-Technologiczny Politechniki Rzeszowskiej w Stalowej Woli, Zakład Konstrukcji i Wytwarzania Maszyn, ul. Kwiatkowskiego 4, 37-450 Stalowa Wola, e-mail: ryszardt@prz.edu.pl

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА СТРУКТУРНЫХ И МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНО-ВОЛОКНИСТЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

The research of the complex of structural and mass transfer characteristics of the carbon-fiber filtration materials

Badanie kompleksu charakterystyk strukturalnych i masowo zmiennych węglowo-włóknistych materiałów filtracyjnych

Александр ФЕДОРЕНКО, Михал СТЫП – РЕКОВСКИ, Иван ОБОРСКИЙ

Резюме: двумя независимыми методами – термогравикалориметрическим (ТГК) и изотерм сорбции-десорбции исследованы макро- и микропористая структура массообменных характеристик углеродно-волоконных материалов при увлажнении их водой и бензолом.

Ключевые слова: фильтрационные углеродно-волоконные материалы, методы исследования массообменных характеристик, макро- и микропористая структура

Abstract: It was investigated macro- and micro-pore structure and mass transfer characteristics of carbon fiber materials when wet with water and benzene in two independent methods – thermal printheadcalorimetric and sorption-desorption isotherms.

Keywords: filtration of carbon-fibrous materials, research methods of mass transfer characteristics, macro-and mikroporovaja structure

Streszczenie: Dwoma niezależnymi metodami tzn. termo-grawitacyjno-kalorymiczeskim (TGK) i metodą izoterm sorpcji-desorpcji zbadano strukturę makro i mikroporowatą masowo zmiennych charakterystyk węglowo-włóknistych materiałów w sytuacji nawilgocenia ich wodą i benzolem.

Słowa kluczowe: filtracyjne materiały węglowo-włókniste, metody badania masowo zmiennych charakterystyk, makro- i mikroporowata struktura

В последнее время в Украине обострилась и вызывает большую опасность проблема защиты воздушного бассейна от различных выбросов производства. Особенно это относится к вентиляционным выбросам углеводородов в производствах легкой промышленности. Одним из путей решения этой проблемы является использование для очистки воздуха новейших фильтрационных материалов [1].

При разработке экологически чистых, безотходных технологий большую роль играют адсорбционные процессы, первоочередная функция которых заключается в очистке различных газовых потоков и выделении из них компонентов для дальнейшего их использования. В последние годы большое распространение получил углеродно-адсорбционный метод рекуперации паров растворителей.

Постановка задачи. Углеродно-волоконные фильтрационные материалы, полученные карбонизацией гидратцеллюлозных тканей, отличаются между собой волокнистым составом и структурой (переплетением, плотностью и т.д.). Эти характеристики имеют существенное влияние на массообменные,

сорбционные и механические свойства материалов. Поэтому исследования изменений комплекса свойств углеродно-волоконных материалов в зависимости от изменения их сырьевого состава и структуры важно, что позволит прогнозировать фильтрационные свойства материала в зависимости от изменения вышеуказанных показателей.

Таким образом, **целью исследования** является определение массообменных и сорбционных свойств углеродно-волоконных материалов, а также макро- и микропористой структуры этих материалов.

Объекты и методы исследования. Для определения количественных характеристик **макро- и микропористой** структуры материалов необходимо знать общую пористость, диаметра (радиуса) пор, дифференциальный объем макро и микропор, удельную поверхность [2]. Общая пористость или просто пористость определяется как суммарное количество всех пор материала и определяется различными методами. Понятие диаметра (радиуса) пор носит условный характер, так как во времени моделируются системой цилиндрических капилляров. Удельная

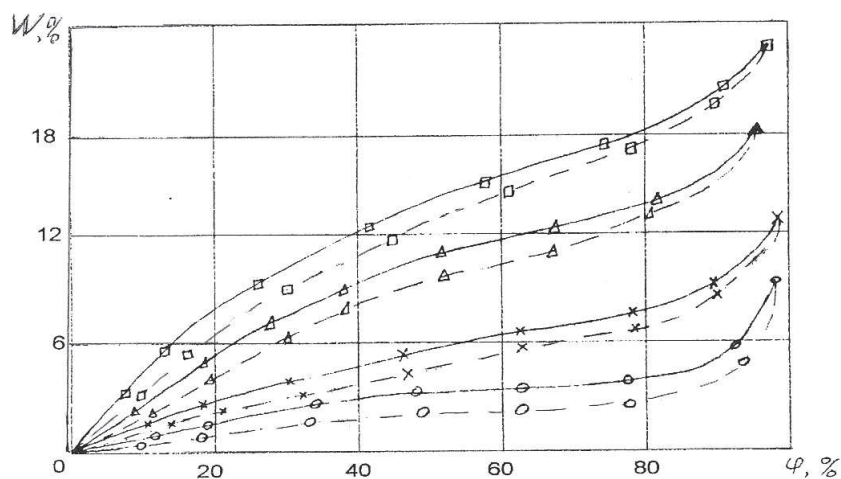


Рис. 1. Изотермы сорбции-десорбции углеродно-волоконистых материалов (сплошная линия – десорбция, пунктирная – сорбция): □ -АУВ-М Днепр, -Бусофит Т 1, X-АУТ-М, ○ –Карбопон
 Fig. 1. sorption-desorption isotherms of carbon-fiber materials (Solid line – desorption, dashed – sorption): □ -АУВ-М Днепр, -Бусофит Т 1, X-АУТ-М, ○ –Карбопон

поверхность является суммарной поверхностью стенок пор (m^2/kg).

Методы исследования макропористой структуры текстильных материалов можно разделить на: аналитические методы, примененные на фильтрационных явлениях, статистические термогравикалориметрические (ТГК) [3].

ТГК метод основан на закономерностях кинетики испарения с дисперсного тела жидкости различных форм связи и по сравнению с другими методами имеет ряд преимуществ, среди которых особенно нужно указать на его комплексность и скорость. Кроме того ТГК метод позволяет проводить опыты в условиях максимально приближенных к реальным технологическим процессам с учетом специфических особенностей материалов [3]. В качестве жидкости которая испаряется, как правило, используется вода. В работе [4] показано, что ТГК метод при использовании жидкостей с различным диаметром молекул и различным дипольным моментом позволяет в совершенстве исследовать сорбционные свойства и структуру микропор дисперсных тел. Молекулярно-ситовой эффект, используемый при этом, особенно эффективен при исследовании капиллярно-пористых тел (хрупких гелей и эластичных), к которым относятся углеродно-волоконные материалы. Порой структура таких дисперсных тел неизменная и не зависит от природы жидкости, которой увлажняют, а сорбционные свойства, в основном, определяются размерами молекул жидкости и проникают только в поры соответствующих размеров этих тел. Поэтому в работе в качестве «молекулярных щупов» использовались молекулы воды и бензола, которые значительно отличаются размерами и физико-химическими свойствами. Кроме того, бензол относится к ароматическим углеводородам, которые широко

используются в производствах легкой промышленности.

Кроме ТГК метода, исследования сорбционных свойств проводилось еще одним независимым классическим методом изотерм сорбции-десорбции [2]. Сорбентом в этом методе были пары воды. Методы проведения опытов и расчетов соответствующих характеристик сорбционным и ТГК методами подробно приведены в [2] и [3] соответственно.

Для термограммных и сорбционных исследований были выбраны углеродно-волоконные материалы различной структуры:

АУВ-М «Днепр» – углеволоконный материал саржевого переплетения;

Бусофит Т 1 – материал углеволоконный, сорбционно-фильтрующий;

АУТ-М – активно углеродистая ткань, используется в фармакологии для производства энтеросорбентов;

Карбопон – нетканое активное полотно, используется в фильтрах для очистки вентиляционного воздуха.

Обсуждение результатов исследований. Термограммы сушки (рис. 1, 2) материалов, увлажненных водой, выглядели, что характерно для поликапиллярно-пористых тел, с развитой пористой структурой.

На термограммах можно выделить два прямолинейных отрезка и пять критических точек, соответствующих различным формам и видам связи влаги с материалом [3].

На термограммах сушки образцов, увлажненных бензолом, выделялся только один прямолинейный отрезок, соответствующий полимолекулярной адсорбции. Это свидетельствует об отсутствии микропор, размеры которых соответствуют 2–4 диаметрам молекул бензола.

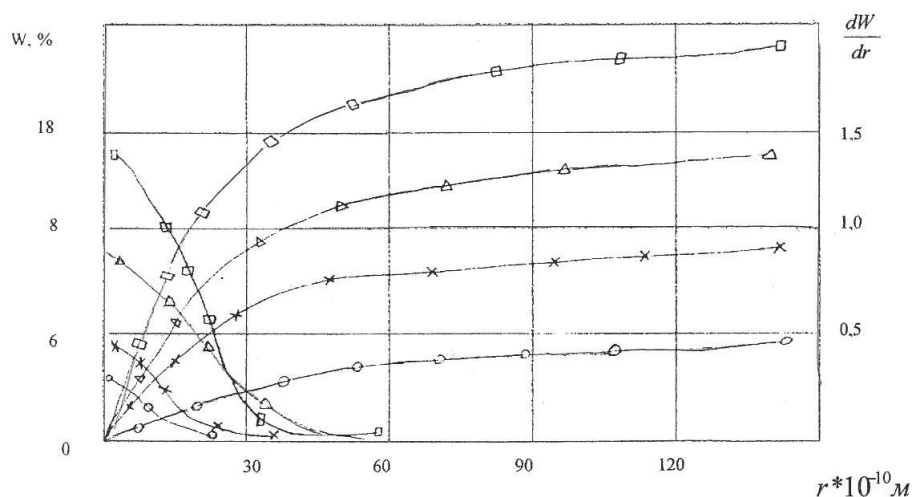


Рис. 2. Интегральные и дифференциальные кривые распределения пор по размерам углеродно-волоконистых материалов: □ -АУВ-М Днепр, -Бусофит Т I, Х-АУТ-М, ○ -Карбопон

Fig. 2. Integral and differential curves pore size distribution carbon fibers: □ -АУВ-М Днепр, -Бусофит Т I, Х-АУТ-М, ○ -Карбопон

Таблица 1. Дифференциальная массоемкость пористой структуры образцов при увлажнении бензолом
Table 1. Differential characteristics of weight capacity of pore structure designs when wet by benzene

Образец		Полная массо-емкость	Дифференциальная массоемкость, %			
			Влага в макропорах	Равновесная влага при $\phi \rightarrow 1$	Абсорбированная влага	
					Полислой $\tau < 10^{-8} \text{ м}$	Монослой $\tau < 10^{-9} \text{ м}$
1	АУВ-М „Днепр”	203	121	92,4	92,4	72,2
2	Бусофит Т-1	64,4	9,5	7	7	6,2
3	АУТ-М	157,5	53,2	37,1	37,1	34,3
4	Карбопон	143	11	6,8	6,8	5,5

Таблица 2. Характеристика паровой структуры образцов
Table 2. Characteristics of pore structure samples

Пример		Объем пор, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{г}$					Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{г}$
		Общий	Макропор $r > 10^{-7} \text{ м}$	Микропор $r < 10^{-7} \text{ м}$	Ультрамикропоры		
						Полислой $r < 10^{-8} \text{ м}$	Монослой $r < 10^{-9} \text{ м}$
1	АУВ-М „Днепр”	20,3	9,4	3,3	2,3	2,3	S4
2	Бусофит Т-1	7,4	6,4	0,3	0,11	0,7	107
3	АУТ-М	18,4	12,1	2,4	0,33	4	562
4	Карбопон	16,6	15,3	0,5	0,13	0,6	101

Массообменные свойства и характеристики пористой структуры образцов углеродно-волоконных материалов при увлажнении бензолом и водой приведены в таблицах 1–4.

Проведем анализ результатов таблиц 1, 2, 3, 4 и рисунков 1 и 2 по исследованным образцам:

1. Углеродно-волоконистый материал АУВ-М «Днепр» наибольшую полную массоемкость и объем

макро- и микропор по сравнению с другими образцами. Имея развитую ультрамикропористую структуру этот материал имеет большие значения удельной поверхности, рассчитанной как по механизму поли- (S4), так и мономолекулярной (S5) адсорбции. Этот материал имеет большое количество микропор размером $(5 \dots 30) \cdot 10^{-10} \text{ м}$ (рис. 2), что объясняет большие значения

Таблица 3. Дифференциальная массоемкость поровой структуры образцов при увлажнении водой
Table 3. Differential characteristic of weight capacity of pore structure samples of water when wet

Образец	Полная (ТГК)	Дифференциальное содержание, %							
		Влага в микропорах (ТГК)	Равновесная влага при $\varphi \rightarrow 1$		Адсорбированная влага				
			ТГК	Изот	Полислой $r < 10^{-8} \text{м}$		Монослой $r < 10^{-9} \text{м}$		
					ТГК	Изот	ТГК	Изот	
1	АУВ-М „Днепр”	169,6	89,9	59,9	23,8	14,6	12	6,9	6,1
2	Бусофит Т1	109,8	60	22,6	19	13,3	9	6,2	5,2
3	АУТ-М	132,1	82,6	45,1	13,2	18,1	6,2	3,5	3
4	Карбопон	97,2	-	18,8	9,4	5,5	3,1	12,2	2,1

Таблица 4. Характеристика поровой структуры образцов при увлажнении водой
Table 4. Characteristics of pore structure of samples when wet with water

Образец	Общий	Объем пор, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{г}$					Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{г}$
		Макропор $r > 10^{-7} \text{ м}$	Микропор $r < 10^{-7} \text{ м}$	Ультрамикропоры			
				Полислой $r < 10^{-8} \text{ м}$	Монослой $r < 10^{-9} \text{ м}$		
						ТГК	
1	АУВ-М „Днепр”	16,9	3,0	4,7	1,50	0,77	S4
2	Бусофит Т-1	11,0	3,7	1,7	1,31	0,62	S5
3	АУТ-М	13,2	2,8	3,7	0,81	0,35	S4
4	Карбопон	9,7	7,8	0,3	0,55	0,22	S5

удельных поверхностей S4 и S5. Отмеченные особенности имеют место как при увлажнении водой, так и бензолом. Материал АУВ-М «Днепр»: гигроскопичность (при $\varphi \rightarrow 1$), которая превышает гигроскопичность хлопка [3]. Развитая ультрамикропористая структура (и большие значения удельной поверхности) обеспечивает повышенную сорбционную емкость по отношению к низко-, средне- и высокомолекулярным веществам, в том числе токсинам, микробным телам, газам, алкалоидам тому подобное.

- Материал Бусофит Т-1 имеет пористую структуру, характеристики которой зависят от жидкости, которая увлажняет образец. При увлажнении водой значение общего объема пор и объема макропор мало отличаются от подобных характеристик АУВ-М, а объем микропор меньше примерно в 3 раза (табл. 3). Но при увлажнении образца бензолом общий объем пор «Бусофита» почти в 3 раза меньше чем в АУВ-М «Днепр», а объем микропор меньше в 10 раз. То есть материал «Бусофит Т-1» имеет большое количество так называемых мезопор, размеры которых лежат между размерами молекул бензола и воды. Гигроскопичность и удельная поверхность «Бусофита Т-1» также меньше чем у образца АУВ-М. Но если при

увлажнении этих образцов бензолом значения этих показателей отличаются в 10–12 раз, а при увлажнении водой в 1,2–1,4 раза (табл. 3). Таким образом, материал «Бусофит Т-1» имеет менее развитую микро- и макропористую структуру (как по воде, так и по бензолу). Наличие в этом материале большого количества пор по размерам близких к диаметру молекул бензола, позволяет рекомендовать этот материал в качестве фильтра для задержания опасных органических растворителей, (толуол, бензин, ацетон и т.п.).

- Материал АУТ-М имеет объем макро- и микропор по величинам близким к подобным характеристикам материалов АУВ-М и Бусофит. Но объемы ультрамикропор, соответственно, значения удельных поверхностей S4 и S5 в образцах АУТ-М в два раза меньше, чем в АУВ-М как по воде, так и по бензола. Уменьшение сорбционных свойств АУТ-М (по сравнению с АУВ-М) подтверждается не только данными, полученными ТГК методом (табл. 1-4), но и данными, полученными другим независимым методом изотерм сорбции-десорбции (рис. 1,2). Таким образом, материал АУТ-М, как и материал «Бусофт Т-1», который приближается по характеристикам пористой структуры, можно рекомендовать к использованию

в качестве фильтров для средних и высокомолекулярных веществ в технологиях легкой, пищевой и фармацевтической промышленности.

4. Материал «Карбопон» по сравнению с другими образцами углеродно-волоконных материалов, которые исследовались, имеет наименьший общий объем пор (по воде) за счет незначительного объема микропор, который в 15 раз меньше, чем в материала АУВ-М (табл. 2). Материал «Карбопон» имеет наименьшие сорбционные свойства (рис.1) и наименьшие значения S4 и S5 как по бензолу (табл. 1,2), так и по воде (табл. 3,4).

Поскольку материал «Карбопон» имеет достаточно большой объем макропор как по бензолу, так и по воде, его можно применять в качестве фильтров для очистки воды и воздуха от паров органических растворителей

Выводы

Исследования комплекса структурных массообменных характеристик углеродно-волоконных материалов двумя независимыми методами (ТГК и изотерм сорбции-десорбции) позволило определить дифференциальные массообменные свойства этих материалов, рассчитать полный объем пор и объемы макро- и микропор, определить удельную поверхность поли- и монослоя, рассчитать объемы пор, заполняемых увлажненной жидкостью по механизму поли- и мономолекулярной адсорбции, определить сорбционные свойства материалов, величину пористости твердой фазы.

Исследование влаго-обменных свойств, проведенных по группам углеродно-волоконных материалов, доказали, что такие характеристики как гигроскопичность, количество адсорбционной влаги поли- и монослоя, объем микропор, удельная

поверхность зависит от свойств волокнистого состава исследуемых образцов.

Анализ характеристик макро- и микропоровой структуры ткани позволил прогнозировать их фильтрационные свойства, область применения, а также определять изменения этих характеристик в зависимости от сырьевого состава и технологии изготовления нитей из текстильных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Писарев В.Е. Федоренко А.А. Адсорбционная установка для воздушно-газовых смесей. Пат. Украины №39520 ВО1 D53 / 74 Публ.15.06.2001, Бюл.№5, 2001.
- [2] Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984, 555с.
- [3] Луцык Р. В. Малкин Е. С., Абаржы И. И. Тепло-массообмен при обработке текстильных материалов. Киев.: Научная мысль, 1993.- 344с.
- [4] Казанский В. М. Луцык Р. В. Мельникова А. Ф. термограммы сушки хрупких гелей. Инженерно-физ. Журнал.-1972.- 22 N2. -с.259–266.
- [5] Alexander Fedorenko, Ivan Oborski, Michał Styp-Rekowski, Maciej Matuszewski. On air permeability and absorption of carbon fibrous materials for ventilation filter for cleaning up emissions. Materiały seminaryjne Twórczość inżynierska dla współczesnej Europy – Bydgoszcz, Listopad, 2015. S 8–13.
- [6] Ivan Oborski, Alexander Fedorenko, Michał Styp-Rekowski, Maciej Matuszewski. Production of clothknited materials for medicine and technology in a knitted manner. Materiały seminaryjne Twórczość inżynierska dla współczesnej Europy – Bydgoszcz, Listopad, 2015. S 27–33.

Doc.dr in. Aleksander Fiedorenko i prof. Iwan Oborski – Wydział Mechatroniki i Technologii Komputerowych Kijowskiego Narodowego Uniwersytetu Technologii i Projektowania (KNUITD), ul. B. Lipińskiego 11, bl.4, Kijów, e-mail: ivan.oborskiy@mail.ru

A modular structure of a painting robot for the painting of images

Stanisław KOZIOŁ, Tomasz SAMBORSKI, Andrzej ZBROWSKI, Jerzy LIPIŃSKI

S t r e s z c z e n i e: W artykule przedstawiono modułową strukturę maszyny malującej, umożliwiającej malowanie obrazów za pomocą zestawu pędzli w sposób zbliżony do klasycznych technik malarskich, stosowanych przez artystów plastyków. Zadaniem robota jest malowanie obrazów na podstawie kopii oryginału, utrwalonej w formie cyfrowej w pliku graficznym. Malowanie jest wykonywane przy użyciu farb olejnych lub akrylowych na płaskiej powierzchni (płótno, terakota, glazura, tapeta, papier). Dzięki opracowanym algorytmom oraz złożonej strukturze kinematycznej robot ma możliwość poruszania pędzlem w sposób imitujący ruchy ręki ludzkiej (różne w zależności od zadanego efektu czy stylu tworzonej grafiki), a także dobierania i mieszania farby w celu uzyskania dowolnej barwy. Robot umożliwia automatyczną reprodukcję obrazów i grafik na płótnie w sposób imitujący pracę żywego artysty – kopisty.

S ł o w a k l u c z o w e: robot, malowanie, pędzel, kopia

A b s t r a c t: The article presents a modular structure of a painting machine that allows the painting of images using a set of brushes in a manner similar to classical painting techniques used by visual artists. The robot's task is to paint images based on a copy of the original recorded in a digital form in a graphic file. Painting is done using oil or acrylic paints on a flat surface (canvas, terracotta, tiles, wallpaper, paper). Thanks to developed algorithms and a complex kinematic structure, the robot has the ability to move the brush in a way that imitates human hand movements, which are different depending on the given effect or style of created graphics, as well as selecting and mixing paint to obtain any colour. The robot enables the automatic reproduction of paintings and graphics on canvas imitating the work of a live artist – a copyist.

K e y w o r d s: robot, painting, brush, copy

Wstęp

Kopiowanie obrazów znanych mistrzów stanowi stale rozwijający się sektor rynku sztuki. W przypadku kopii dzieł malarskich rozróżnia się reprodukcje i imitacje. Reprodukcje to kopie mechaniczne, powstałe za pomocą technik fotochemicznych bez zachowania materiałów oryginału. W przypadku imitacji celem jest naśladowanie oryginału dzięki zestawieniu podobnej grupy cech środkami technicznymi imitującymi oryginalne. Wzrost zamożności społeczeństwa sprawia, że rynek imitacji znanych obrazów, wykonywanych technikami malarskimi, stanowi szczególnie atrakcyjny finansowo obszar działalności biznesowej. Wraz ze wzrostem dobrobytu pojawia się potrzeba ozdobienia własnego domu, hotelu, galerii handlowych oraz biur malarskimi dziełami sztuki lub ich imitacjami.

Kopiowanie w celu imitacji obrazów na masową skalę rozwinęło się w południowych Chinach. W Dafen, najbardziej znanej „wiosce malarskiej”, wytwarzanych jest rocznie pięć milionów obrazów, z których większość to kopie znanych arcydzieł. Dzienna norma kopisty to dwa do trzech obrazów, ale najszybsi kopiści w zależności od jakości i rozmiarów kopii malują nawet do czterdziestu obrazów dziennie. W Dafen powstaje około 60% światowej podaży tanich imitacji. Roczne obroty wioski sięgają ok. 37 mln euro. Jest to efekt pracy 8–10 tys. rzemieślników, zatrudnionych w 75 wielkich manufakturach malarskich [9]. Najbardziej zaawansowane pracownie wprowadzają taśmowy sposób tworzenia obrazów, gdzie każdy

z artystów odpowiada tylko za jeden fragment (drzewo, chmura, zwierzę itp.). W innych manufakturach każdy zatrudniony odpowiedzialny jest za wybrany kolor (rys. 1). Tym samym ruchem nakłada swoją porcję farby na płótno, po czym przekazuje niedokończony obraz następnemu malarzowi [10]. Wykonanie dobrej kopii Rembrandta przez jednego artystę trwa dziesięć dni i kosztuje 80 euro. Najczęściej kopiowana Mona Lisa jest wyceniana na 14 euro. Kopia „Słoneczników” Van Gogha, wykonana przez artystę z wykształceniem plastycznym, w Dafen kosztuje ok. 40 euro. Z reguły jednak płaci się jak w przypadku malarzy pokojowych – od metra. Metr kwadratowy obrazu kosztuje w przeliczeniu ok. trzech euro [11].

Średnio za kopię olejnego obrazu płaci się w Chinach 25 do 30 dolarów, zaś w detalu cena w Europie wynosi 100 do 125 dolarów. Ze względu na rosnący popyt i stały wzrost kosztów robocizny malujących rzemieślników, roboty i maszyny malujące umożliwiające automatyczne kopiowanie obrazów mogą stanowić alternatywę dla rozwijającego się rynku reprodukcji znanych dzieł malarskich. Ponadto robotyzacja malowania kopii obrazów stanowi obecnie jedyną możliwość sprostania wymogom konkurencyjnym na rynku zdominowanym przez tanią chińską ręczną produkcję rzemieślniczą.

Robotyzacja prac malarskich

Prace nad zrobotyzowaniem prac malarskich prowadzone są od lat 70. XX w. Pierwsze aplikacje dotyczyły przemysłowych zastosowań lakierniczych do



Rys. 1. Ręczne kopiowanie obrazów w chińskich manufakturach na skalę masową: a) malowanie wyspecjalizowanego szczegółu [12], b) malowanie obrazu w manufakturze [13]
 Fig. 1. Manually copying images in Chinese manufactories on a mass scale: a) painting a detail [12], b) painting a picture in the manufactory [13]



Rys. 2. Robotyzacja malowania natryskowego: a) przemysł samochodowy [14], b) przemysł meblarski [15]
 Fig. 2. Robotization of spray painting: a) car industry [14], b) furniture industry [15]

namalowania natryskowego. Szczególny rozwój i szerokie wykorzystanie robotów malarskich nastąpiło w motoryzacji i produkcji mebli. Roboty przemysłowe, uzbrojone w pneumatyczne pistolety natryskowe, realizują zadania polegające na nakładaniu powłok lakierniczych na elementy blach karoseryjnych, ramy nadwozia, panele meblowe lub całe meble. Celem tych prac jest uzyskanie jednolitej, powtarzalnej warstwy lakierniczej na wszystkich produkowanych elementach oraz wyeliminowanie czynnika ludzkiego z operacji stwarzających zagrożenie zdrowia ze względu na stosowane szkodliwe chemikalia. Roboty wykonują ruch po zaprogramowanej trajektorii, która odwzorowuje manewry pistoletem malarskim wykonywane przez człowieka podczas lakierowania ręcznego (rys. 2).

Przemysłowy sukces robotyzacji procesów lakierniczych sprawił, że pojawiło się komercyjne zainteresowanie zastosowaniem robotów malujących w pracach malarskich związanych z kopiowaniem i wykonywaniem imitacji obrazów będących dziełami sztuki [4, 5]. W tej

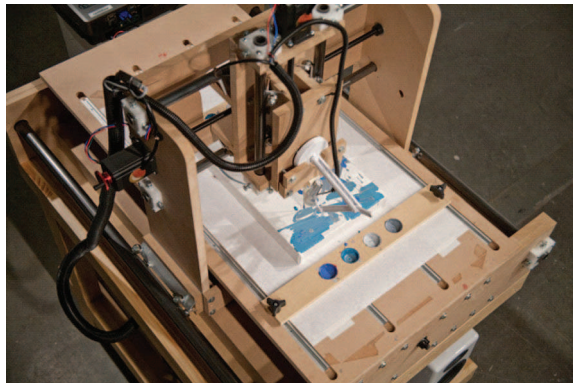
technice kopia obrazu jest wykonywana za pomocą manipulatora pozycjonującego pędzel po trajektorii odwzorowującej ruchy ręki artysty malarza [2, 3]. Obraz powstaje na podstawie cyfrowej fotokopii oryginału, a odpowiednie algorytmy programowe przeprowadzają automatyczną dekompozycję zapisu cyfrowego dzieła sztuki na ruchy elementarne i barwy potrzebne do reprodukcji oryginału [1, 6].

Konstrukcje robotów malarskich do zastosowań artystycznych bazują na układach portalowych lub na strukturach przegubowych typowych robotów przemysłowych (rys. 3). Przygotowanie właściwego koloru odbywa się przez pobranie porcji farby na włosie pędzla i zmieszanie pędzlem na podstawce barwnej kompozycji farb z palety kolorów znajdujących się w zasobnikach. W alternatywnej wersji gotowe kolory przygotowane są poza maszyną, a robot korzysta wyłącznie z gotowych barw dostępnych na palecie z pojemnikami, bez potrzeby dodatkowego mieszania. Kolorystyka obrazu, w zależności od zastosowanej palety, może wynosić od

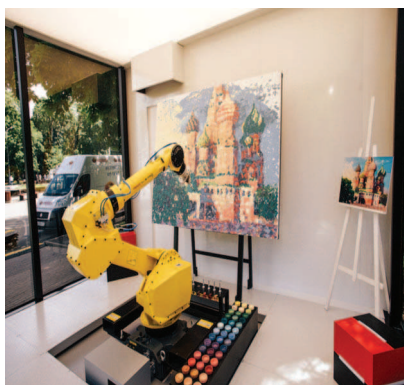
a)



b)



c)



d)



Rys. 3. Roboty malarskie do zastosowań artystycznych: a) maszyna portalowa AARON [17], b) maszyna portalowa Interactive Robotic Painting Machine [18], c) robot przegubowy bitPainter [19], d) robot przegubowy Fanuc [20]

Fig. 3. Painting works for artistic applications: a) AARON portal machine [17], b) Interactive Robotic Painting Machine portal machine [18], c) articulated robot bitPainter [19], d) Fanuc articulated robot [20]

kilku do kilkudziesięciu barw (Interactive Robotic Painting Machine – 4, e-David – 24, Rosbank's interactive urban art project – 42). Malowanie wykonywane jest z zastosowaniem kilku rodzajów pędzli o różnym kształcie i rozmiarach. W robocie e-David istnieje możliwość korzystania z pięciu rodzajów pędzli zainstalowanych w magazynku. Podczas pracy pędzel jest czyszczony w strumieniu wody. W czasie malowania robot wykonuje zdjęcie tworzonej przez siebie kopii i porównuje je z oryginałem [16]. Na tej podstawie system analizy obrazu wprowadza stosowne poprawki. Malowanie odbywa się w pozycji pionowej, poziomej lub ukośnej blejtramu (ramy z płótnem malarskim). W zależności od wielkości obrazu, stylu malowania i złożoności ilustracji czas nieprzerwanej pracy robota wynosi do 40 godz. Obraz może składać się z 20000 pociągnięć pędzla, które zużywają ogółem ok. 2 litrów farby. Ze względu na ograniczoną precyzję pozycjonowania końcówki pędzla oraz limitowaną liczbę stosowanych kolorów, maszyny i roboty malujące nie zapewniają jakości porównywalnej z oryginałem. Wstępujące ograniczenie sprawia, że nie są naruszane prawa autorskie, ponieważ namalowane imitacje ze względu na ograniczenia technologiczne nie są wiernymi kopiami fotograficznymi

i różnią się detalami od oryginału. Cechy tej nie można jednak uznać za zaletę w przypadku wykonywania portretów ze zdjęć osób pragnących w ten sposób utrwalić swój wizerunek.

Przedstawienie problemu

W Instytucie Technologii Eksploatacji we współpracy z firmą NEXIO i Instytutem Maszyn Matematycznych opracowano konstrukcję robota malarskiego, przeznaczonego do wykonywania kopii obrazów techniką malarską. Zadaniem robota „NOPM” (Nexio Oil Painting Machine) jest malowanie obrazów na podstawie pliku cyfrowej fotokopii oryginału, za pomocą zestawu pędzli o różnej grubości, przy użyciu farb (olejnych i akrylowych) na płaskiej powierzchni, wykonanej z płótna, terakoty, glazury lub papieru. Obraz w postaci bitmapy podlega procedurze wektoryzacji w ramach poszczególnych barw i za pomocą Gkodów zamieniany na pojedyncze ruchy pędzla. Maksymalny rozmiar malowanego podłoża wynosi 2×3 m. Dzięki opracowanym algorytmom oraz złożonej strukturze kinematycznej robot posiada możliwość poruszania pędzlem w sposób imitujący ruchy ręki ludzkiej (różnie w zależności od zadanego efektu czy stylu malarskiego). Ruch pędzla jest składany

z przemieszczeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach i obrotu wokół osi pędzla. Urządzenie może również dobierać i mieszać farby w celu uzyskania dowolnej barwy zidentyfikowanej na oryginalnym obrazie.

W wyniku wdrożenia rezultatów prac B+R, spółka zaoferuje klientom zupełnie nową usługę, polegającą na automatycznej reprodukcji obrazów, grafik, zdjęć etc. techniką malarską imitującą pracę „żywego” artysty. Odbiorcami będą: firmy świadczące usługi poligraficzno-reklamowe, galerie sztuki i sklepy z reprodukcjami obrazów, firmy świadczące usługi fotograficzne oraz firmy zajmujące się produkcją i/lub handlem unikalnymi wyrobami dekoracyjnymi. Działalność będzie ukierunkowaną na wytwarzanie kopii obrazów wielkoformatowych.

Analiza funkcjonalna

Malowanie obrazu związane jest z realizacją przez robota dziewięciu funkcji podstawowych, do których zaliczono:

1. Przemieszczanie pędzla do pozycji startowej – ze względu na duży dopuszczalny rozmiar podłoża i oczekiwaną dokładność odwzorowania, przemieszczanie pędzla zachodzi w układzie globalnym i lokalnym. Całkowita powierzchnia podłoża (układ globalny) jest dzielona na obszary cząstkowe (układ lokalny). W układzie globalnym pędzel jest przemieszczany w płaszczyźnie nad podłożem do współrzędnych wyznaczających początek cząstkowego obszaru malowania. W układzie lokalnym pędzel jest przemieszczany nad obszarem cząstkowym [7].
2. Pobieranie (wymiana) pędzla – pędzle podstawowe o numerach od 1 do 6 umieszczone są w magazynku manipulatora lokalnego. Pędzle dodatkowe o numerach od 7 do 12 umieszczone są w strefie serwisowej manipulatora globalnego. Pobieranie i oddawanie pędzla odbywa się po stałych zdefiniowanych trajektoriach w stałym położeniu kątowym. Wymiana pojedynczego pędzla lub całego zestawu przebiega w sposób zautomatyzowany.
3. Dozowanie farby – żądany kolor jest uzyskiwany jako połączenie 5 barw R, G, B oraz białej i czarnej (udział każdej z barw w proporcji od 0 do 16). Każda barwa jest dystrybuowana do mieszalnika przez osobny dozownik.
4. Mieszanie farby – mieszanie farby w ilości umożliwiającej wykonanie jednego pociągnięcia pędzla realizowane jest w sposób mechaniczny. Ruch mieszadła umożliwia ujednorodnienie barwy oraz wypchnięcie farby z mieszalnika w celu pobrania przygotowanej porcji na pędzel.
5. Pobieranie farby – następuje przemieszczenie pędzla w strefę mieszalnika do pozycji pobierania, a następnie złożony ruch pionowy w dół i poziomy zgarbijający porcję farby. Po pobraniu wykonywany jest jednoczesny ruch pionowy w górę i poziomy.
6. Pomiar odległości pędzla od podłoża – w celu kompensacji ugięcia płótna w wyniku nasiąkania

farbą zachodzi potrzeba realizacji pomiaru odległości pędzla od płótna w obszarze malowania.

7. Malowanie – realizacja zadanej trójwymiarowej trajektorii umożliwiającej: uzyskanie kontaktu pędzla z podłożem, wykonanie pociągnięcia przenoszącego farbę z włosia na płótno obrazu. Manipulacja pędzlem w obszarze cząstkowym imituje kinematykę prowadzenia pędzla przez człowieka.
8. Analiza namalowanego obrazu – przeprowadzana jest ocena zgodności namalowanego kształtu pod względem geometrycznym i kolorystycznym ze wzorcem zapisanym cyfrowo.
9. Wycieranie pędzla – następuje przemieszczenie pędzla do punktu początkowego obszaru wycierania, realizacja stałej trajektorii najazdu na taśmę wycieraka, wytarcie pędzla, wizyjna analiza ilości farby pozostałej na taśmie, przewijanie taśmy wycieraka. Każda z funkcji podstawowych może być uruchamiana w dowolnej sekwencji działań. Możliwy jest układ szeregowo-równoległy tzn. niektóre funkcje mogą być realizowane jednocześnie lub kolejno wg wymaganego algorytmu. Funkcjonowanie robota wymaga zdefiniowania szeregu danych wejściowych począwszy od odnoszących się do całego obrazu, po definiujące pojedyncze ruchy, takich jak np.:
 - Obszar malowania,
 - Rodzaj farby (olejna/akrylowa),
 - Malowanie (tak/nie),
 - Wycieranie (tak/nie),
 - Ilość farby [ml],
 - Kolor R, G, B, W, BI (udział w skali od 0 do 16 każdej z barw),
 - Numer pędzla (od 1 do 12),
 - Rodzaj malowania (mokre/suche – procent pokrycia obszaru odniesienia),
 - Położenie modułu malowania,
 - Punkt początkowy malowania,
 - Punkt końcowy malowania,
 - Trajektoria (linia, łuk, zdefiniowana krzywa).

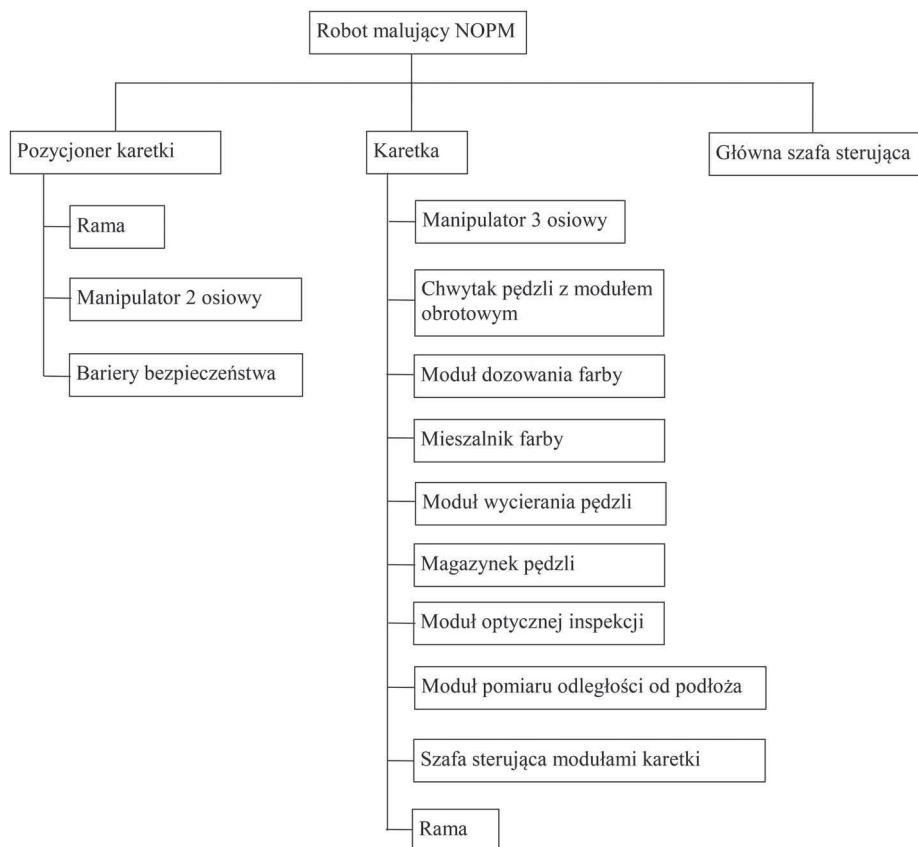
Analiza strukturalna

Na podstawie zdefiniowanych funkcji podstawowych określono strukturę sprzętową robota NOPM z uwzględnieniem podziału na główne moduły funkcjonalne oraz moduły wewnętrzne [8].

Robot malujący NOPM składa się z trzech podstawowych modułów funkcjonalnych: pozycjonera karetki, karetki malującej oraz sterujący (rys. 4).

W pozycjonerze karetki na ramie wsporczej znajduje się portalowy manipulator dwuosiowy działający w układzie globalnym YX. Do ramy zamocowany jest zestaw barier świetlnych zapewniających strefę bezpieczeństwa. Pozycjoner przemieszcza karetkę nad właściwy fragment podłoża, który podlega zamalowywaniu w ustalonej pozycji karetki.

Karetką malującą służy do malowania fragmentu obrazu w układzie lokalnym. Karetkę posiada konstrukcję



Rys. 4. Modułowa struktura robota malarskiego NOPM
 Fig. 4. Modular structure of the NOPM painting robot

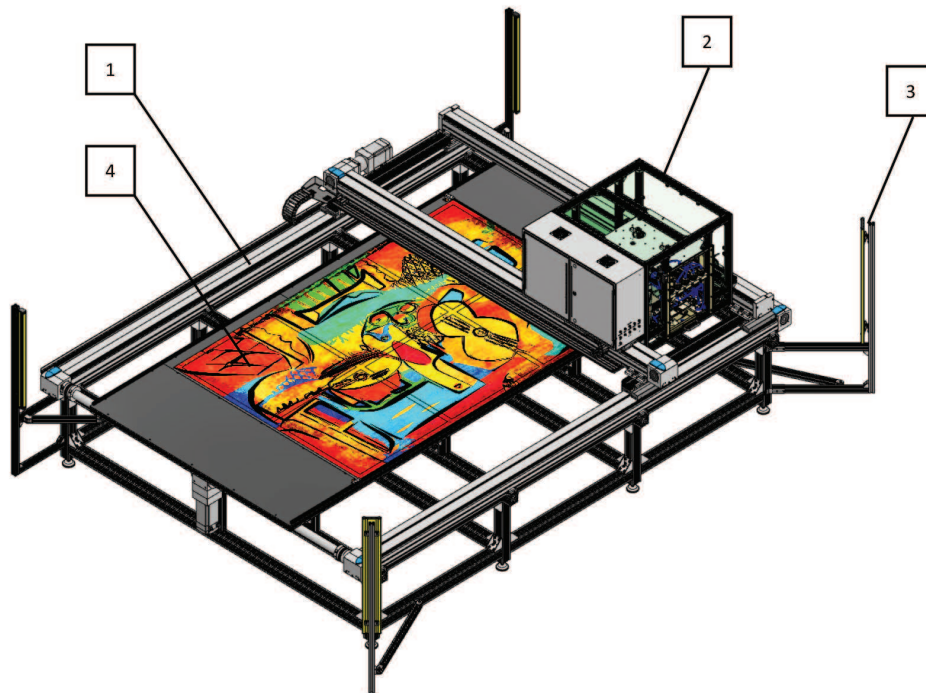
ramową, do której mocowane są wszystkie moduły wewnętrzne. Malowanie odbywa się za pomocą pędzla osadzonego w chwytaku z modulem obrotowym. Chwytnak wraz z pędzlem przemieszczany jest za pomocą lokalnego portalowego manipulatora trzyosiowego o ruchu postępowym z napędem elektrycznym. W karetkie zainstalowano magazynkę sześciu pędzli o różnych kształtach i rozmiarach włosia. Wymiana pędzla wykonywana jest automatycznie. Dostarczanie zaprogramowanych porcji farby realizowane jest za pomocą modułu dozownika. Dozownik wytwarza pięć mikrostrumieni farby olejnej lub akrylowej w proporcjach umożliwiających uzyskanie pożądanej barwy. Ujednorodnienie pięciokolorowego zestawu barw odbywa się w module mikromieszalnika. Pojemność mikromieszalnika zapewnia przygotowanie dawki możliwej do jednorazowego pobrania przez końcówkę pędzla. W karetkie znajduje się także moduł wycierania pędzli. Pędzle są wycierane w przypadku pobierania z mieszalnika koloru farby lub w przypadku malowania „na sucho”. Malowanie na sucho wymaga wytarcia pędzla i pozostawiania na nim jedynie resztek farby. Za ocenę wytarcia pędzla jest odpowiedzialny moduł optycznej inspekcji składający się z kamery z obiektywem i oświetlacza. Zadaniem modułu optycznej inspekcji jest także ocena zgodności namalowanego fragmentu obrazu z zapisem cyfrowym, na podstawie którego tworzona jest kopia. Ze względu na nasiąkanie podłoża zmniejszające

naciąg płótna konieczna jest ocena odległości płótna od końcówki pędzla. W przypadku zmiany ustalonej odległości konieczne jest automatyczne wprowadzenie odpowiedniej poprawki. W tym celu w karetkie zainstalowano moduł pomiaru odległości od podłoża. Przed każdym pociągnięciem pędzla laserowa głowica pomiarowa w sposób bezstykowy dokonuje pomiaru odległości, na podstawie którego korygowana jest trajektoria ruchu pędzla po płótnie. Do ramy karetki zamocowano także lokalną szafę sterującą z elementami automatyki odpowiadającymi za działanie wewnętrznych modułów znajdujących się w karetkie. Ponadto na szafie znajduje się pulpit operatora z przyciskami umożliwiającymi ręczne sterowanie modułami karetki w trybie serwisowym.

Główna, stacjonarna szafa sterująca integruje układy automatyki kontrolujące działanie pozycjonera karetki. Na szafie znajduje się panel z graficznym interfejsem operatora umożliwiającym programową konfigurację robota oraz bieżącą kontrolę realizowanych funkcji i zaistniałych stanów awaryjnych.

Model robota

Wykorzystując przeprowadzoną analizę strukturalną opracowano model wirtualny robota (rys. 5). W konstrukcji ramy zastosowano system profili aluminiowych firmy Bosch. Podczas malowania strefa pracy robota

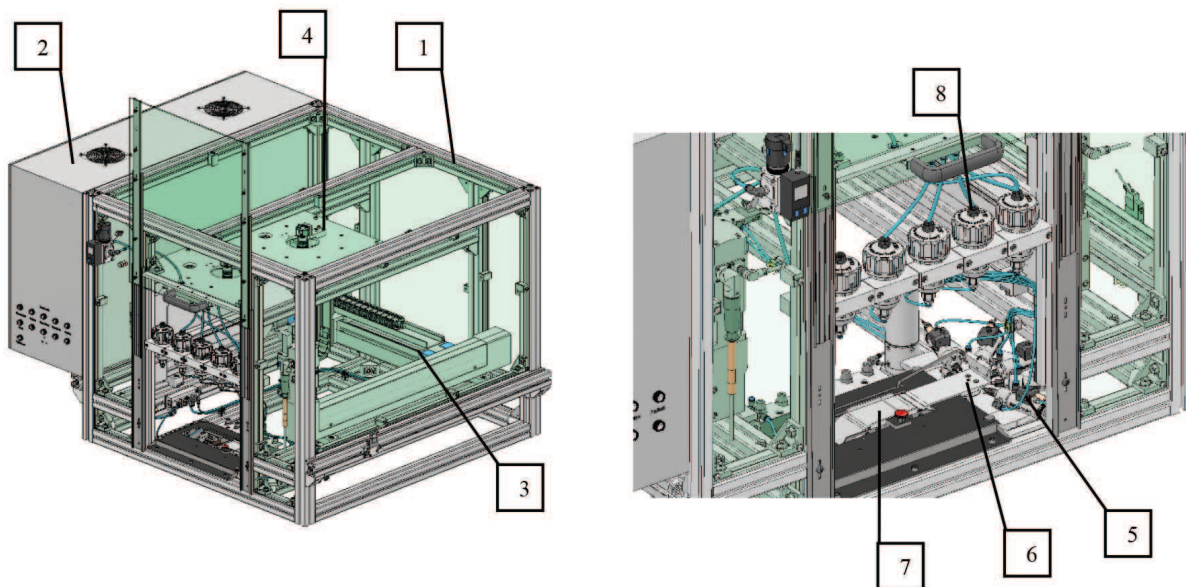


Rys. 5. Model robota malującego NOPM: 1 – pozycjoner karetki, 2 – karetką, 3 – bariera świetlna, 4 – malowany obraz
 Fig. 5. Model of the NOPM painting robot: 1 – positioner of the carriage, 2 – carriage, 3 – light barrier, 4 – painted picture

jest zabezpieczona przed nieautoryzowanym dostępem zestawem kurtyn świetlnych. Moduły liniowe Festo EGC 185 z pasem zębatym napędzane serwośilnikami EMMS-AS-140 wykorzystano w globalnym układzie do przemieszczania karetki, a w lokalnym portal płaski Festo EXCH-40-500-350 do pozycjonowania chwytaka

trójściskowego Festo DHDS zamocowanego na module obrotowym ERMO-12 również firmy Festo.

Pięć precyzyjnych wtryskiwaczy sterowanych pneumatycznie Nordson EFD 741V o częstotliwości cykli roboczych (włączania/wyłączania) 60 do 80 Hz i czasie zadziałania 5–6 ms, znalazło zastosowanie w konstrukcji



Rys. 6. Model karetki: 1 – rama, 2 – szafa sterownicza, 3 – manipulator 3 osiowy, 4 – moduł optycznej inspekcji, 5 – moduł dozowania farby, 6 – mieszalnik, 7 – moduł wycierania pędzli, 8 – zasobniki farby
 Fig. 6. Carriage model: 1 – frame, 2 – control cabinet, 3 – manipulator 3-axes, 4 – module optical inspection, 5 – ink dispensing module, 6 – mixer, 7 – wiper, 8 – paint buckets

modułu dozowania farby. Wtryskiwacze pobierają farbę znajdującą się w zasobnikach. Każdy kolor pobierany jest z osobnego zasobnika. Opracowano autorską konstrukcję mieszalnika z mikrostrumieniowym dozowaniem farby oraz zaprojektowano współpracujący z nim moduł wycierania pędzli (rys. 6).

Podsumowanie

Urządzenia modułowe szczególnie efektywnie można wykorzystywać jako unikatowe maszyny procesowe, przystosowane do elastycznej technologii wytwarzania. Właściwe zaprojektowanie robota malarskiego wymagało identyfikacji poszczególnych funkcji przyporządkowanych do wydzielonych modułów oraz opracowania właściwej konfiguracji zapewniającej funkcjonowanie układu technologicznego w ramach rekonfigurowanej struktury elastycznego systemu wytwarzania. Projektowanie struktury robota NOPM przeprowadzono z uwzględnieniem modularyzacji polegającej na wyodrębnieniu kompletnych podzespołów charakteryzujących się autonomią postaciową i funkcjonalną. Autonomia postaciowa umożliwia szybkie zamontowanie lub zdemontowanie zintegrowanego konstrukcyjnie modułu jako odrębnej jednostki montażowej, bez istotnego naruszania struktury pozostałych elementów maszyny. Autonomia funkcjonalna jest związana z możliwością samodzielnego funkcjonowania modułu, niezależnie od pozostałych elementów struktury. Modułowa struktura robota jest rozwiązaniem umożliwiającym wykonawstwo uwzględniające wykorzystanie gotowych, specjalistycznych komponentów oferowanych przez wiodących producentów. Pożądany wariant rozwiązania jest tworzony poprzez kombinację dostępnych typowych elementów i podzespołów z urządzeniami oryginalnymi.

LITERATURA

- [1] Aguilar C., H. Lipson. 2008. "A robotic system for interpreting images into painted artwork". 11th Generative Art Conference, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.531.8792&rep=rep1&type=pdf>, dostęp 22.10.2018.
- [2] Fenghui Y., S. Guifeng, Y. Jianqiang. 2004. "Extracting the trajectory of writing brush in Chinese character calligraphy". *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Volume 17, Issue 6: 631–644.
- [3] Kudoha S. et. al. 2009. "Painting robot with multi-fingered hands and stereo vision". *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 57, Issue 3: 279–288.
- [4] Moura L. 2018. "A New Kind of Art: The Robotic Action Painter", <http://generativeart.com/on/cic/papers-GA2007/16.pdf>, dostęp 22.10.2018.
- [5] Myoo S. 2016. „Twórcze roboty”. *Przegląd Filozoficzny – Nowa Seria*, 2 (98): 115–126.
- [6] Tresset P., F. Leymarie. 2013. "Portrait drawing by Paul the robot". *Computers & Graphics*, Volume 37, Issue 5: 348–363.
- [7] Yao F., G. Shao. 2005. "Painting Brush Control Techniques in Chinese Painting Robot". *IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication*, 462–467, <https://pdfs.semanticscholar.org/b8af/8636d0fdfa34f9edf36c83043f29107f2f33.pdf>, dostęp 22.10.2018.
- [8] Zbrowski A. 2016. „Metodyka badań prototypów i jednostkowych urządzeń technicznych”. Radom: Wydawnictwo Naukowe ITeE – PIB.
- [9] natemat.pl/80325,chinskie-fabryki-dziel-sztuki, dostęp 22.10.2018.
- [10] <https://www.polityka.pl/tygodnikpolityka/swiat/243682,1,w-chinach-kopiuja-na-potege.read>, dostęp 22.10.2018.
- [11] <http://rynekisztuka.pl/2014/02/07/sztuka-made-in-china/>, dostęp 22.10.2018.
- [12] <https://rctom.hbs.org/submission/dafen-village-factory-of-fine-art/>, dostęp 22.10.2018.
- [13] <https://iamyousheisme.wordpress.com/2009/08/14/balzac-pre-benjamin/>, dostęp 22.10.2018.
- [14] <https://blog.dupontregistry.com/news/audis-new-paint-shop-efficient-sustainable-operated-robots/>, dostęp 22.10.2018.
- [15] http://www.cmarobot.it/dyn_img/pdf/000018.pdf, dostęp 22.10.2018.
- [16] <https://www.theguardian.com/artanddesign/2016/apr/19/robot-art-competition-e-david-cloudpainter-bitpaintr>, dostęp 22.10.2018.
- [17] <https://www.technologyreview.com/s/600762/robot-art-raises-questions-about-human-creativity/>, dostęp 22.10.2018.
- [18] <https://bengrosser.com/projects/interactive-robotic-painting-machine/overhead-view/>, dostęp 22.10.2018.
- [19] <http://siamagazin.com/meet-the-man-teaching-robot-artists-to-paint-like-humans/>, dostęp 22.10.2018.
- [20] <https://www.digitalartsonline.co.uk/features/illustration/this-robot-thinks-it-can-paint-it-can/>, dostęp 22.10.2018.

Praca naukowa sfinansowana w ramach projektu nr RPMA.01.02.00-14-6202/16 pt.: „Stworzenie innowacyjnego robota NOPM” w Regionalnym Programie Operacyjnym Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020, Oś Priorytetowa I Wykorzystanie działalności badawczo-rozwojowej w gospodarce, działanie 1.2 Działalność badawczo-rozwojowa przedsiębiorstw.

dr inż. Stanisław Kozioł – Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: stanislaw.koziol@itee.radom.pl

dr inż. Tomasz Samborski, adiunkt, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: tomasz.samborski@itee.radom.pl

dr hab. inż. Andrzej Zbrowski, prof. ITeE-PIB – Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail: andrzej.zbrowski@itee.radom.pl

Jerzy Lipiński – Nexio Management Sp z o.o., Warszawa, e-mail: jerzy.lipinski@nexio.pl

WŁAŚCIWOŚCI PRZETŁOCZEŃ USZTYWIAJĄCYCH KSZTAŁTOWANYCH W CIENKICH BLACHACH Z LOTNICZEGO STOPU ALUMINIUM 2024-T3 METODĄ FORMOWANIA PRZYROSTOWEGO

The properties of the stiffening ribs shaped in thin sheetes with aviation alloy 2024-T3 by icremental forming method

Andrzej KUBIT, Dawid WYDRZYŃSKI, Magdalena BUCIOR, Rafał KLUZ, Bogdan KRASOWSKI

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, dotyczących podłużnych przetłoczeń w cienkich blachach, pełniących rolę ryfli usztywniających. Zagadnienie dotyczy przetłoczeń kształtowanych w blachach z lotniczego stopu aluminium 2024-T3 obustronnie platerowanych, o grubości 0,4 mm. Przetłoczenia wykonano relatywnie nową technologią tzw. kształtowania przyrostowego, która polega na punktowym odkształcaniu materiału poprzez narzędzie w formie trzpienia stopniowo zagłębiane w materiale, zgodnie z określoną ścieżką determinującą kształt finalnego przetłoczenia. Formowanie prowadzono przy użyciu trzy-osiowej frezarki numerycznej stosując narzędzie o średnicy 6 mm z promieniem na czole o wartości R3. Kształtowano przetłoczenia o długości 120 mm oraz szerokości 20 mm. W ramach badań rozpatrywano różne głębokości przetłoczeń stopniując je co 1 mm w zakresie od 1 do 5 mm. Największą wartość głębokości o podanej wartości przyjęto, ponieważ przy większej głębokości od 5,5 mm kształtowana blacha ulegała pękaniu, dlatego wartość 5 mm uznano za maksymalną, dla której prowadzono analizy.

Dla opisanych przetłoczeń przeprowadzono statyczne próby wyboczenia, a na ich podstawie stwierdzono, że głębokość przetłoczenia równa 4 mm, jest wartością krytyczną, gdyż siła wyboczenia dla przetłoczeń w zakresie od 1 do 4 mm wzrasta wprost proporcjonalnie do głębokości przetłoczenia, natomiast przy głębokości równej 5 mm siła ta ulega spadkowi.

Słowa kluczowe: formowanie przyrostowe, przetłoczenia usztywniające, badania na wyboczenie

Abstract: The paper presents the results of experimental research on longitudinal ribbing in thin sheets, made as stiffening ribs. The issue concerns ribbing formed in 2024-T3 aluminum alloy plates, 0.4 mm thick. The embossing was made using a relatively new technology, the so-called incremental sheet forming, which is a point of deformation of the material through the tool in the form of a plunger, gradually penetrated into the material in accordance with a defined path that determines the shape of the final embossing. Forming was carried out using a three-axis numerical milling machine using a 6 mm diameter tool with a head radius of R3. Embossments 120 mm long and 20 mm wide were formed. As part of the research, different depths of embossing were considered, grading them every 1 mm in the range from 1 to 5 mm. The highest value of the depth with the given value was assumed, because above the 5.5 mm depth the shaped sheet was cracking, so the value of 5 mm was considered the maximum for which the analyzes were carried out.

For the described embossments static buckling tests were made, on the basis of which it was found that the embossing depth of 4 mm is a critical value, because the buckling force for extrusions in the range from 1 to 4 mm increases in direct proportion to the depth of the ribbing, while at a depth of 5 mm force this falls.

Keywords: incremental sheet forming, stiffened ribs, buckling tests

Wprowadzenie

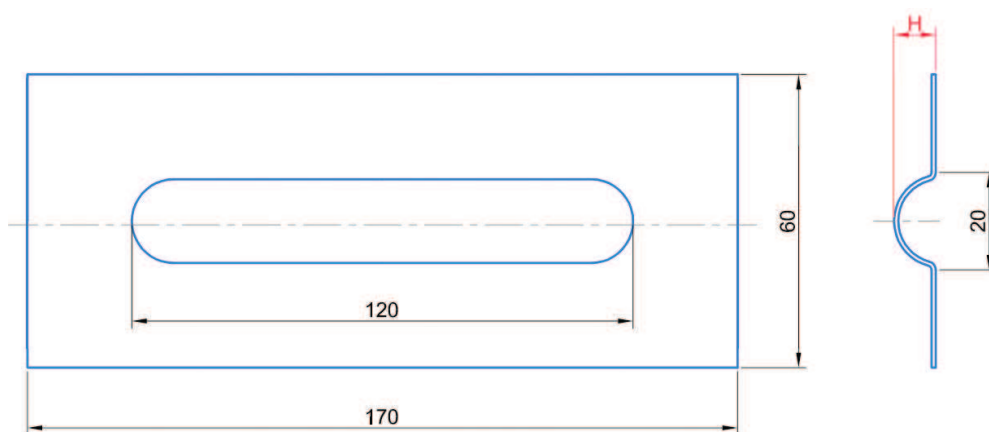
Jednopunktowe formowanie przyrostowe (ang. single point incremental forming) to uniwersalna, elastyczna metoda kształtowania plastycznego blach z użyciem uniwersalnych obrabiarek numerycznych lub robotów [6]. Rozwój tej technologii wiąże się z koniecznością szybkiego reagowania przedsiębiorstw produkcyjnych na potrzeby rynku. Nowe produkty muszą być wprowadzane na rynek w krótkim czasie, co wiąże się z wymogiem maksymalnego skrócenia etapu projektowo-wdrożeniowego. Stąd formowanie przyrostowe staje się obecnie metodą szybkiego prototypowania w obszarze przeróbki plastycznej blach bez wymogu stosowania drogiego, czasochłonnego w wykonaniu oprzyrządowania [6]. Dodatkową zaletą omawianej metody jest możliwość uzyskania większych odkształceń plastycznych niż w przypadku

tradycyjnej przeróbki plastycznej wykorzystującej klasyczny tłocznik [6].

Aktualnie można spotkać wiele prac naukowych, potwierdzających możliwości stosowania kształtowania przyrostowego w odniesieniu do różnych materiałów takich jak: stopy aluminium [3, 11, 13, 14], stopy tytanu [6], ale także sztuczne tworzywa polimerowe [1, 8, 9]. Z kolei autorzy pracy [5] wskazują na możliwości formowania kompozytowych struktur warstwowych typu „plaster miodu”.

Jednakże przede wszystkim, ze względu na uniwersalność, metoda formowania przyrostowego znajduje dziś zastosowanie jako technologia wytwarzania części w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, a także medycznym [2, 4, 7, 12].

Technikę formowania przyrostowego przyjęto w pracy jako metodę szybkiego prototypowania



Rys. 1. Kształt oraz wymiary próbki z przetłoczeniem usztywniającym do badań na wyboczenie
 Fig. 1. The shape and dimensions of specimen with stiffened rib that was used in experiment

Tabela 1. Skład chemiczny stopu aluminium 2024-T3
 Table 1. Chemical composition of 2024-T3 aluminium alloy

Stop Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Zn	Ti	Cr	Inne
2024-T3	4.35	1.50	0.50	0.50	0.30	0.25	0.15	0.10	0.20

ciężkościami struktur blaszanych usztywnionych przez przetłoczenia wzdłużne. Eksperymentalna weryfikacja różnych kształtów oraz konfiguracji przetłoczeń wymaga zastosowania uniwersalnej metody wraz z uniwersalnym oprzyrządowaniem. Klasyczne kształtowanie plastyczne w układzie stempel-matryca różnych konfiguracji przetłoczeń wiązałoby się z koniecznością wytworzenia ściśle dedykowanego kompletu oprzyrządowania do danej struktury. W związku z powyższym przyjęcie technologii formowania przyrostowego jest ekonomicznie uzasadnione, gdyż oprzyrządowanie sprowadza się tu do uniwersalnej matrycy, a kształt i konfiguracja przetłoczeń determinowane są dzięki zaprogramowaniu ścieżki narzędzia w systemie CAM.

Niniejszy artykuł ma na celu wstępną analizę przyjętej metody do kształtowania usztywnionych struktur blaszanych. W pracy skupiono się na doborze parametrów kształtowania oraz określeniu optymalnej głębokości z punktu widzenia sztywności.

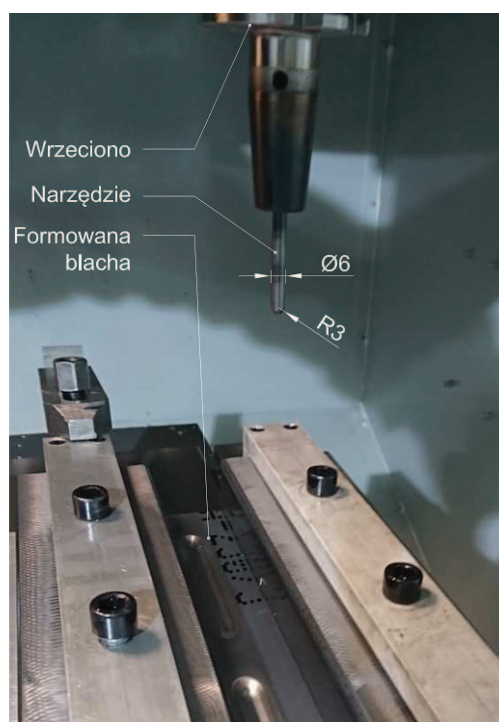
Metodyka badań

Praca zawiera wyniki badań eksperymentalnych skupionych na wytwarzaniu, w tym wstępnym doborze parametrów technologicznych oraz badaniu sztywności pojedynczych, podłużnych przetłoczeń o różnej głębokości. Kształtowano przetłoczenia o wymiarach i kształcie przedstawionych na rys. 1. Wartość głębokości maksymalnej wyznaczono eksperymentalnie stopniując co 1 mm, aż do momentu pęknięcia blachy.

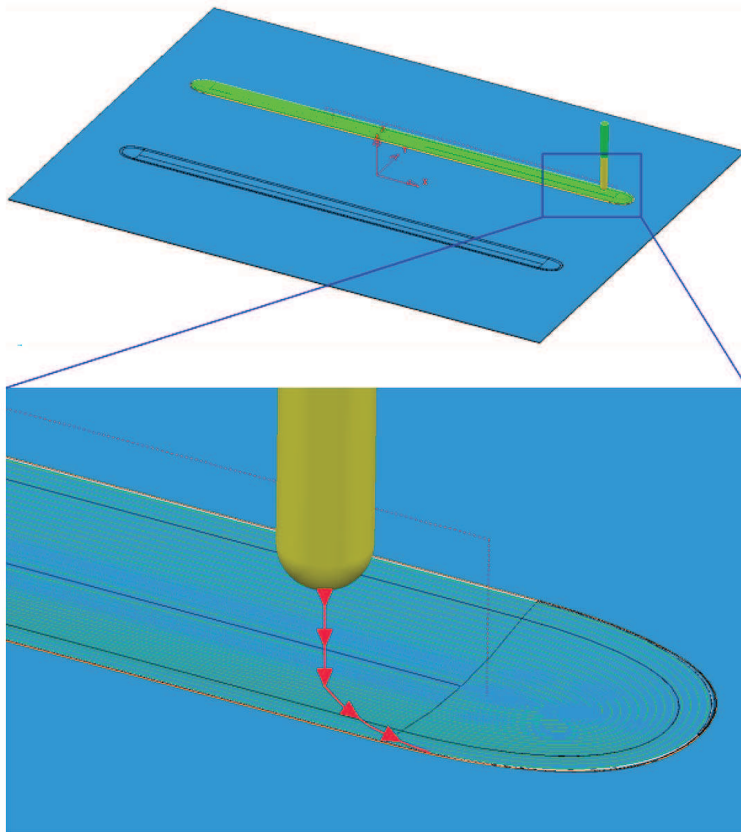
Skład chemiczny zastosowanego materiału przedstawiono w tab. 1. Powszechnie wiadomo, że zastosowany materiał lotniczy, jakim jest stop aluminium 2024-T3

jest trudny do formowania plastycznego, ze względu na wysoką wartość granicy plastyczności w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie.

Kształtowanie przeprowadzono przy użyciu frezarki numerycznej HAAS Mini Mill stosując przyrząd przedstawiony na rys. 2, zastosowano narzędzie wykonane



Rys. 2. Stanowisko do kształtowania przetłoczeń usztywniających na maszynie numerycznej HAAS
 Fig. 2. Work-stand on the HAAS CNC machine used for incremental sheet forming



Rys. 3. Przyjęta strategia obróbki – ścieżka narzędzia
Fig. 3. The shaping strategy – tool path

z węgliką spiekanego o średnicy 6 mm. Program sterujący wygenerowano przy użyciu programu CAM – PowerMill. Kształtowanie wykonano dla różnych prędkości obrotowych równych 12000 obr/min oraz 1100 obr/min. Prędkość posuwu w przypadku wariantu wysokoobrotowego była równa 1000 mm/min, z kolei dla niskoobrotowego wariantu 800 mm/min.

Przyjęto widoczną na rys. 3 ścieżkę ruchu narzędzia. Jeden cykl widoczny na rysunku wywołuje zagłębienie blachy o wartości 1 mm. W zależności od wariantu powtarzano cykle do momentu uzyskania określonej głębokości.

Stanowisko do testów wyboczenia przedstawiono na rys. 4. Próby wyboczenia przeprowadzono za pomocą przyrządu wymuszającego obustronne utwierdzenie próbki na maszynie wytrzymałościowej Instron E10000. Badania prowadzono w warunkach otoczenia, w temp. pokojowej przy stałej prędkości posuwu szczęk równej 5mm/min.

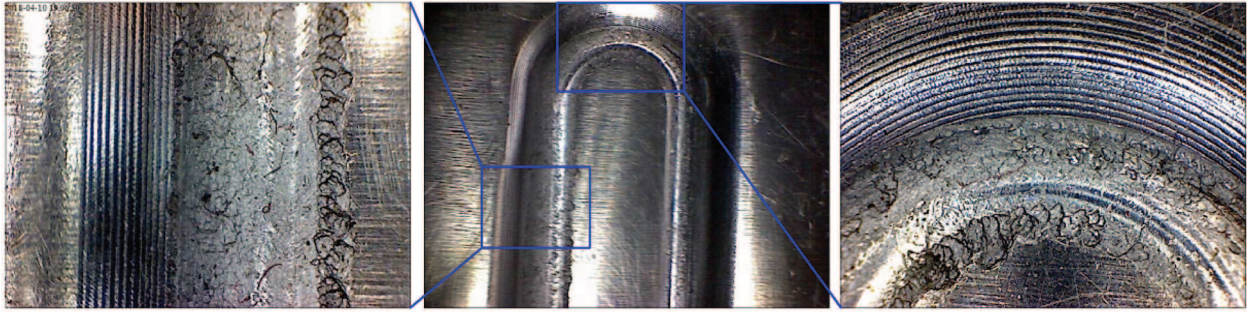
Wyniki badań

W pierwszym etapie badań zweryfikowano parametry formowania w celu określenia właściwego wariantu do prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych. Kształtowanie przetłoczeń przy wysokiej prędkości obrotowej okazało się być niesłuszne w przypadku blachy pokrytej platerem. Podjęto próby kształtowania z zastosowaniem

wysokich obrotów, gdyż oczekiwano, że w takich warunkach dojdzie do wytworzenia odpowiednio wysokiej ilości ciepła na skutek sił tarcia, które z kolei umożliwiłyby łatwiejsze kształtowanie blachy. Jednakże przy obrotach równych 12000 obr/min, dochodziło do zacierania plateru i usuwania go w obszar styku z narzędziem, co w konsekwencji prowadziło do naruszenia struktury kształtowanej blachy na skutek tarcia (rys. 5). W związku z powyższym do dalszych badań zastosowano wyłącznie parametry o niskiej prędkości obrotowej narzędzia równej 1100 obr/min i posuwie 800 mm/min. Przetłoczenia formowano o maksymalnej możliwej do uzyskania głębokości, która wyniosła ok. 5,8 mm. Pod pojęciem maksymalnej możliwej głębokości rozumie się tu wartość głębokości, przy której dochodzi do pęknięcia materiału. Ostatecznie do dalszych badań wykonano próbki o głębokościach od 1 do 5 mm stopniując je, co 1 mm. W tab. 2 usystematyzowano oznaczenia poszczególnych wariantów próbek w zależności od głębokości przetłoczeń. Z kolei na wykresie słupkowym (rys. 6) przedstawiono wyniki badań na wyboczenie dla próbek o rozważanych głębokościach przetłoczeń.



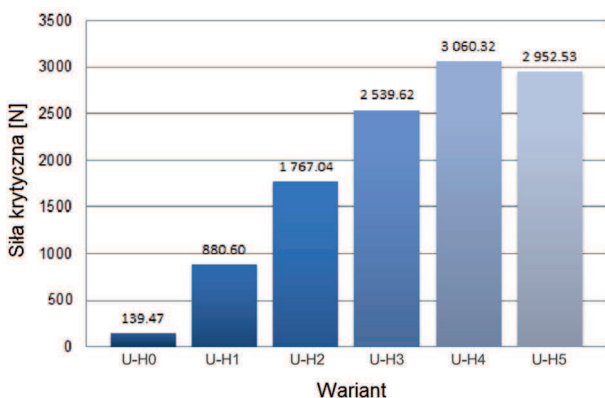
Rys. 4. Widok próbki zamocowanej na stanowisku do próby ściskania (a) oraz schemat obrazujący model utwierdzenia próbki (b)
Fig. 4. Specimen mounted on the testing machine (a) schematic of loading the specimen during compression test (b)



Rys. 5. Widok zatartej blachy przez narzędzie na skutek zastosowania zbyt wysokiej prędkości obrotowej
Fig. 5. View of the seized plate by the tool due to the use of a too high rotational speed

Tabela 2. Oznaczenia wariantów próbek w zależności od głębokości przetłoczenia
Table 2. Marking of specimen variants depending on the depth of the embossing

Symbol wariantu	Głębokość przetłoczenia (mm)
U-H0	0
U-H1	1
U-H2	2
U-H3	3
U-H4	4
U-H5	5



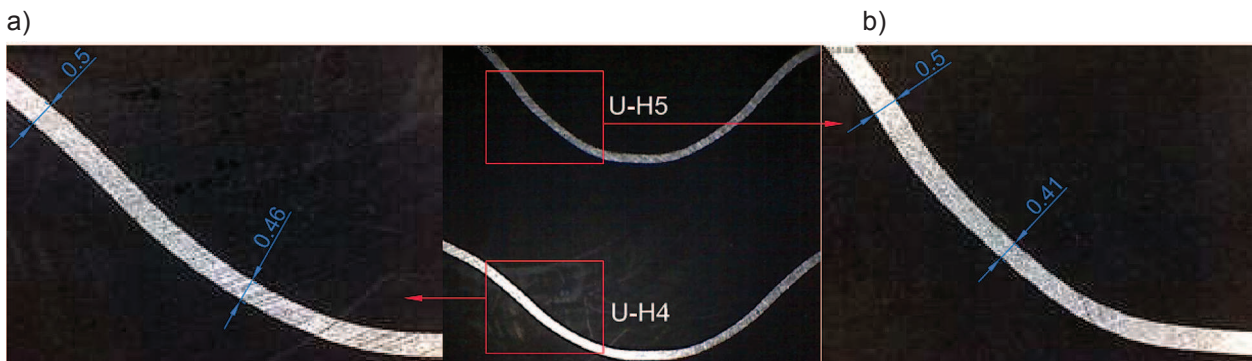
Rys. 6. Wyniki badań na wyboczenie usztywnionych blach
Fig. 6. Results of buckling tests of stiffened sheets

Analizując wartości sił wyboczenia, a także przebieg krzywych dla poszczególnych wariantów, w zakresie głębokości przetłoczenia od $H=0$ mm do $H=4$ mm wykazano spodziewaną tendencję, tj. większa głębokość przetłoczenia skutkuje wyższą siłą krytyczną. Maksymalną wartość siły wywołującej wyboczenie równą 3060,32 N otrzymano dla głębokości 4 mm. Dla głębokości przetłoczenia równej $H=5$ mm zauważono spadek siły krytycznej o około 4% w porównaniu do głębokości równej $H=4$ mm. Na podstawie wartości sił krytycznych zaobserwowano również inny charakter zniszczenia.

Granica głębokości, po przekroczeniu, której dochodzi do spadku siły krytycznej w próbie wyboczenia, związana jest ze zmniejszeniem grubości ścianek przetłoczenia. W związku z tym, wykonano zglądy w przekroju poprzecznym przetłoczeń, które następnie poddano pomiarom grubości ścianek. Przedstawiona różnica grubości ścianek dla głębokości przetłoczenia 4 oraz 5 mm wskazuje na zmniejszenie grubości ścianki we wskazanym miejscu (rys. 10). Świadczy to o tym, że dla rozpatrywanego wariantu zastosowanego kształtu nie powinno rozważać się większych głębokości przetłoczenia, gdyż dalsze zagłębienie będzie prowadziło do spadku siły krytycznej przy ściskaniu.

Podsumowanie

Podstawowym założeniem w pracy była eksperymentalna weryfikacja możliwości kształtowania przetłoczeń usztywniających metodą kształtowania przyrostowego.



Rys. 7. Widoki przekrojów poprzecznych przetłoczeń dla wariantów U-H4 (a) oraz U-H5 (b)
Fig. 7. Cross-section views of ribbons for variants U-H4 (a) and U-H5 (b)

Wykazano, że z powodzeniem metodę tę można stosować, jako swego rodzaju technikę rapid prototyping chcąc rozważać w planie badawczym różne konfiguracje, kształty oraz rozmiary przetłoczeń. Tradycyjne formowanie z zastosowaniem indywidualnego, ściśle dedykowanego tłoczniaka dla każdej konfiguracji przetłoczenia byłoby nieuzasadnione ekonomicznie. W zaprezentowanej metodzie mamy do czynienia z kolei z relatywnie tanią, uniwersalną matrycą oraz prostym narzędziem, które wytwarza przetłoczenie zdeterminowane przez zadany program sterujący obrabiarki numerycznej. Wprawdzie wytwarzanie takich przetłoczeń zaprezentowaną technologią jest czasochłonne, gdyż maszynowy czas formowania przetłoczenia o długości 120 mm, szerokości 20 mm oraz głębokości 4 mm trwa ok. 20 min. przy zastosowaniu proponowanych parametrów obróbki. Jednakże dla celów badawczych jest to metoda efektywna ze względu na jej elastyczność, możliwość manipulowania kształtem, czy konfiguracją formowanych struktur.

Pewnym utrudnieniem w przedstawionej obróbce okazał się plater, który uległ zacieraniu przy wysokich obrotach. Obróbka wysokoobrotowa została tu świadomie poddana weryfikacji i może być atrakcyjna z punktu widzenia dalszych badań, gdyż taki wariant prowadzi do lokalnego wygenerowania ciepła na skutek tarcia narzędzia o powierzchnię kształtowaną. Odpowiednia ilość ciepła może korzystnie przełożyć się na warunki plastycznego formowania blachy, która wykonana jest z materiału z założenia trudnego do przeróbki plastycznej – stopu aluminium 2024-T3. Jednakże, by móc stosować wysokoobrotową obróbkę, należy szczegółowo zdeterminować właściwości tribologiczne pary cieiernej stanowiącej przez materiał kształtowany i narzędzie.

LITERATURA

- [1] Bagudanch I., et. al. 2017. "Revisiting formability and failure of polymeric sheets deformed by Single Point Incremental Forming". *Polymer Degradation and Stability* 144: 366–377.
- [2] Centeno G. et. al. 2017. "Recent approaches for the manufacturing of polymeric cranial prostheses by Incremental Sheet Forming". *Procedia Engineering* (183): 180–187.
- [3] Devarajan N. et. al. 2014. "Complex incremental sheet forming using back die support on aluminium 2024, 5083 and 7075 alloys". *Procedia Engineering* (81): 2298–2304.
- [4] Emmens W.C. 2010. "The technology of Incremental Sheet Forming – A brief review of the history". *Journal of Materials Processing Technology* (210): 981–997.
- [5] Jackson K.P., Allwood J.M., Landert M. 2008. "Incremental Forming of Sandwich Panels". *Journal of Materials Processing Technology* (204/1–3): 290–303.
- [6] Jadhav S. et. al. 2003. "Process optimization and control for incremental forming sheet metal forming". *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference, IDDRG, Bled, Slovenia*, 165–171.
- [7] Jeswiet J. 2005. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal". *Annals of CIRP Vol. 54* (2): 623–650.
- [8] Le V.S., Ghiotti A., Lucchetta G. 2008. "Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials". *International Journal of Material Forming* (1): 1179–1182.
- [9] Marques T.A., Silva M.B., Martins P.A.F. 2012. "On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, issue 1–4: 75–86.
- [10] Naranjo J. et. al. 2017. "Influence of temperature on alloy Ti6Al4V formability during the warm SPIF process". *Procedia Engineering* (207): 866–871.
- [11] Raju C., Haloi N., Narayanan C.S. 2017. "Strain distribution and failure mode in single point incremental forming (SPIF) of multiple commercially pure aluminum sheets". *Journal of Manufacturing Processes* (30): 328–335.
- [12] Sá de Farias J. 2014. "Towards smart manufacturing techniques using incremental sheet forming". *Smart manufacturing innovation and transformation: Interconnection and Intelligence*, IGI Global.
- [13] Salem E. 2016. "Investigation of thickness variation in single point incremental forming". *Procedia Manufacturing* Vol. 5: 828–837.
- [14] Shim M.S., Park J.J. 2001. "The formability of aluminum sheet in incremental forming". *Journal of Material Processing Technology* Vol. 113, Issue 1–3: 654–658.

dr inż. Andrzej Kubit – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 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 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl

dr inż. Magdalena Bucior – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: magdabucior@prz.edu.pl

dr inż. Rafał Kluz – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkluz@prz.edu.pl

NORMALIZACJA W EWOLUCJI SYSTEMÓW

Standardization of evolution systems

Jerzy ŁUNARSKI

Streszczenie: W pracy przedstawiono w ogólnym zarysie istotę systemów i ich przybliżoną ewolucję oraz znaczenie systemowego podejścia na efektywność budowy przewagi konkurencyjnej. Bardziej szczegółowo przedstawiono zasady i podstawy normalizacji w systemach oraz ich nieświadomione wykorzystywanie w ewolucji systemów biologicznych oraz świadome wykorzystywanie norm dobrowolnych w systemach technicznych i gospodarczych oraz norm obowiązkowych w postaci przepisów prawa w tych systemach. Wskazano również wykorzystywanie zasad normalizacji w postaci praktycznego wykorzystywania obowiązkowych standardów wewnątrzorganizacyjnych.

Słowa kluczowe: normalizacja, standaryzacja, systemy, ewolucja

Abstract: The paper presents an overview of the essence of the systems and their approximate evolution and the importance of a systemic approach to the effectiveness of building a competitive advantage. More specifically, the rules and basics of standardization systems and their unconscious use of the evolution of biological systems and the conscious use of voluntary standards in technical systems and economic and compulsory standards in the form of the law in these systems. It also identifies the use of the principles of standardization in the form of a practical use of mandatory standards within the organization.

Key words: normalization, standardization, systems, evolution

Wprowadzenie

W warunkach globalizacji gospodarki i nasilającej się konkurencji między różnymi podmiotami (krajami, regionami, branżami, przedsiębiorstwami i in.) koniecznym staje się umiejętne wykorzystanie różnych metod, narzędzi i podejść w celu poprawy pozycji konkurencyjnej i zintensyfikowania działań, sprzyjających procesom rozwojowym, umożliwiającym wyprzedzenie konkurentów. Istnieje wiele różnorodnych metod i narzędzi, które odpowiednio dobrane i umiejętnie zastosowane przyniosą oczekiwane korzyści. Wymaga to jednak znacznego wysiłku, generowania nowej wiedzy, optymalizowania działań i skutecznego angażowania wykonawców. Przykładem działań sprzyjających doskonaleniu konkurencyjności są m.in.: informatyzacja procesów, automatyzacja działań, innowacyjność rozwiązań, ekonomizacja wytwarzania itp. Zdaniem autora skutecznym środkiem doskonalenia jest również normalizacja i jej umiejętne stosowanie i wykorzystywanie w procesach kreatywnych, wytwórczych, eksploatacyjnych, poznawczych i in.

Systemy i ich znaczenie

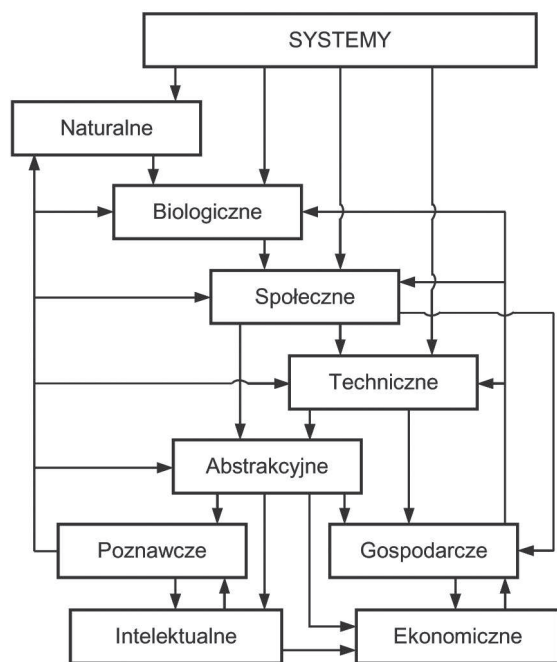
Doskonalenie, rozwój i poprawa konkurencyjności odbywa się przez aktywne oddziaływania i wywoływanie pożądaných (korzystnych) zmian różnych systemów. Teoria systemów i praktyka jej wykorzystywania umożliwiają przedstawianie, modelowanie i opisywanie wszelkich aspektów otaczającej nas rzeczywistości z określoną dokładnością. Wpływając na różne elementy systemów powodujemy ich zamierzone zmiany, którym często towarzyszą nieprzewidziane i niezamierzone efekty, co

wymaga analiz i korekty działań. Jak wiadomo systemy można ogólnie podzielić na obiektowe, procesowe i abstrakcyjne. Do ich cech charakterystycznych można zaliczyć następujące elementy, na które możemy wpływać różnymi sposobami tzn.:

- posiadaniem określonej struktury, składającej się z elementów składowych i określonych relacji między nimi. Struktura ta przeważnie bywa hierarchiczna, zaś jej elementy i relacje można opisać zestawem funkcji i parametrów,
- drugą cechą systemów jest ich ukierunkowanie na realizację określonej funkcji, która jest wypadkową funkcji realizowanych przez poszczególne elementy składowe systemu,
- trzecia cecha to możliwość parametrycznego opisu poszczególnych elementów i relacji w systemie, gdy jest on nam znany lub projektowany natomiast w systemach jeszcze nie rozpoznanych opis taki może być fragmentaryczny,
- kolejna cecha to określone powiązania rozpatrywanego systemu z otoczeniem w miejscach wejść i wyjść, w tym również między poszczególnymi poziomami w systemach zhierarchizowanych,
- ostatnia cecha związana jest z cyklem życia analizowanego systemu, który może ulegać stopniowej degradacji, starzeniu, zmianom ewolucyjnym itp. w wyniku czego jego stan jest pewną funkcją czasu jego funkcjonowania

Uogólniony proces rozwoju systemów przedstawiono w [1, 4]. W bardzo ogólnym ujęciu proces ten przebiega w następującej kolejności: prapoczątkiem są systemy naturalne i ich różne odmiany, z których powstały i rozwijały się systemy biologiczne, wewnątrz których ukształtowały

się załączy systemów społecznych. Ukształtowanie człowieka rozumnego w systemach biologicznych i rozwiniętych systemach społecznych umożliwiło rozwój systemów technicznych zaś ich interakcje z systemami społecznymi sprzyjały tworzeniu systemów abstrakcyjnych (intelektualne, ekonomiczne, poznawcze i in.), a w dalszej kolejności systemów gospodarczych [1, 6]. Między poszczególnymi etapami rozwoju nie ma wyraźnych granic, występują sytuacje jednoczesności tych systemów zaś obecnie nastąpiło skumulowanie różnych odmian systemów i znaczne skomplikowanie ich wzajemnych powiązań (rys. 1).



Rys. 1. Przybliżona klasyfikacja ważniejszych systemów i ich wzajemne oddziaływanie w procesach ewolucyjnego rozwoju
Fig. 1. Approximate classification of the major systems and their interaction in the process of evolutionary development

Konkurencyjność i jej uwarunkowania

Celem doskonalenia konkurencyjności jest pozyskiwanie i utrzymywanie klientów w sposób bardziej skuteczny od innych podmiotów uczestniczących w rywalizacji rynkowej. Sposoby i czynniki wpływające na uzyskiwanie przewagi konkurencyjnej opisano w wielu opracowaniach m.in. [3, 6], wskazując na znaczenie takich elementów jak: doskonałość wyrobów, kompetencje personelu, nowoczesność technologii, skuteczny marketing, sprzyjające warunki zewnętrzne i in. Rywalizacja odbywa się między systemami o różnych strukturach i na różnych poziomach ich hierarchii. Są to takie systemy jak: gospodarki krajowe i regionalne, klastry, konsorcja, przedsiębiorstwa, a w nich zakłady, wydziały, oddziały, gniazda i poszczególne stanowiska, które również stanowią dość złożone i różnorodne systemy.

W celu poprawy konkurencyjności na każdym z tych poziomów hierarchii systemowej dąży się do: redukcji

kosztów działań, polepszenia jakości opracowań (funkcjonalności, niezawodności i in.), zapewnienia bezpieczeństwa (wyrobu, personelu, środowiska) oraz minimalizacji cykli poszczególnych działań. Efektywność tych przedsięwzięć zależy od wielu czynników, z których ważnym lecz często niedocenianym jest wykorzystywanie zasad normalizacji.

Normalizacja i jej oddziaływanie

Problemy normalizacji znane są i opisane w wielu opracowaniach m.in. [4, 5]. Jest to działalność mająca na celu uzyskanie optymalnego stopnia uporządkowania w określonej dziedzinie z pomocą norm opracowywanych do powszechnego i dobrowolnego stosowania, w których zawarto sprawdzone rozwiązania spełniające wymagania potencjalnych użytkowników, z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć nauki i techniki. Normy takie dotyczą wyrobów, (terminologiczne, podstawowe, wymiarowe, badań i kontroli, parametrów użytkowych oraz ograniczania różnorodności), procesów, bezpieczeństwa, zarządzania i szeregu innych aspektów spotykanych w działalności gospodarczej i innych. Zasadnicze cele i zasady tej działalności przedstawiono na rys. 2.

Rozszerzeniem normalizacji na praktyczne działania jest standaryzacja stanowiąca wewnątrzorganizacyjną działalność, polegającą na opracowywaniu dokumentów regulujących powtarzalne czynności, operacje, procesy, w celu zapewnienia ich maksymalnej efektywności. Są one obowiązkowe w organizacji opracowującej te standardy, zaś ich treści winny uwzględniać konkretne warunki i najlepszą wiedzę jaką organizacja posiada. Ważniejsze zasady i podstawy normalizacji i standaryzacji, które są wykorzystywane przy projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji poszczególnych systemów uczestniczących w rywalizacji konkurencyjnej przedstawiono na rys. 2.

Oprócz normalizacji i standaryzacji powyższe zasady znajdują zastosowanie w szeregu innych dziedzinach, których systemy pośrednio lub bezpośrednio wpływają na konkurencyjność. Należą do nich m.in.:



Rys. 2. Przybliżone zestawienie ważniejszych podstaw i zasad normalizacji

Fig. 2. Approximate summary of the most important foundations of the principles of standardization

- a) Różnorodne przepisy prawa regulujące zachowania i postępowanie podmiotów w wielu systemach uczestniczących w konkurencji. Dotyczy to takich praw jak: zapewnienie bezpieczeństwa, operacji handlowych i finansowych, uczciwej konkurencji, warunków pracy itp. Przepisy te muszą być uwzględniane przez wszystkie systemy – podmioty uczestniczące w konkurencji, których przepisy te dotyczą.
- b) Poznane i potwierdzone prawa naukowe w poszczególnych dziedzinach naukowych (fizyka, chemia, biologia, socjologia itp.) i gospodarczych, które należy umiejętnie wykorzystywać w trakcie analiz, projektowania, użytkowania, opracowywaniu syntez w różnych systemach uczestniczących w rywalizacji konkurencyjnej.
- c) Różnorodne uwarunkowania regionalne i kulturowe będące zwyczajowymi zasadami lub normami powszechnie stosowanymi. Mogą one wywierać różny wpływ na potencjał konkurencyjny systemów. Wpływ ten może być zarówno konstruktywny jak i destrukcyjny. Dotyczy to różnorodnych unormowań etycznych, moralnych, religijnych, zwyczajowych i in., które wpływają na personel i jego zachowania. Projektując różne systemy często należy je uwzględniać obok przepisów prawa i praw naukowych oraz norm technicznych i zarządzania.

Normalizacja w systemach

Stosowanie norm umożliwia uzyskiwanie przewidywalnych efektów. Podobnie stosowanie praw naukowych umożliwia prognozowanie (przeważnie krótko- i średniookresowe) stanów opisywanych tymi prawami, które może być zniekształcone oddziaływaniami nieuwzględnionych czynników przypadkowych. Istnieje wiele praw zwyczajowych często wzajemnie sprzecznych, które mogą znacząco zniekształcić wyniki prognozowania. Im lepsza znajomość poszczególnych praw i norm w poszczególnych systemach tym dokładniej można odtworzyć wcześniejszą ewolucję systemu i prognozować ich rozwój. Można przytoczyć szereg przykładów wskazujących na oddziaływanie praw i norm na ewolucję różnych systemów, tzn.:

Systemy naturalne (kosmiczne, galaktyczne, planetarne, ziemskie, klimatyczne, sejsmiczne itp.). Przykładem użytecznej wiedzy w postaci praw i norm w systemach naturalnych może być pozyskiwanie wiedzy dotyczącej historii ewolucji Wszechświata (stanowiącej zagadki od zarania świadomego rozwoju ludzkości). Podstawą sformułowania tych praw były długotrwałe obserwacje, analizy, obliczenia, eksperymenty, hipotezy formułowane przez utalentowane jednostki i zespoły. Wynikiem tych prac było poznanie wielu praw z zakresu oddziaływań grawitacyjnych, elektromagnetycznych i jądrowych, budowy pierwiastków i związków chemicznych, formowania się obiektów kosmicznych (galaktyki, gwiazdy, układy planetarne), rozprzestrzeniania się materii i energii, ich przemian itp. Mimo poznania dotychczasowej ewolucji pozostaje jeszcze wiele do wyjaśnienia (istota grawitacji,

ciemna materia i ciemna energia, średnia gęstość materii w przestrzeni, kształtowanie obserwowalnej postaci praw natury i in.). Mimo tych braków wiedzy możliwe jest już sformułowanie prawdopodobnych scenariuszy dotychczasowego rozwoju (od wielkiego wybuchu do chwili obecnej) oraz hipotetycznych wariantów dalszego rozwoju. Należy tu podkreślić trudności obserwacyjne i eksperymentowania oraz teoretycznego ujęcia oddziaływań mnogości czynników systematycznych i przypadkowych występujących w tych systemach.

Na określonym etapie rozwoju systemów naturalnych w ich obrębie ukształtowały się **systemy biologiczne**. Mimo poznania praw rozwoju systemów biologicznych nadal jest wiele niejasności na temat jego początków (ok. 4 mld lat temu). Aktualnie istnieją różne formy organizmów żywych (archeony, bakterie, eukarioty i ewentualnie wirusy) lecz posiadają one cechy wspólne takie, jak:

- jednolity kod genetyczny w postaci czteroskładnikowych chromosomów i genów umożliwiające opisanie i powielanie cech osobniczych wszystkich gatunków fauny i flory,
- ukształtowane organy umożliwiające pobieranie z otoczenia potrzebnych do życia składników i mechanizmy przetwarzania ich w potrzebną energię i związki chemiczne,
- opanowanie technik reprodukcyjnych umożliwiających przystosowanie się do zmieniających się warunków otoczenia (poprzez przypadkowe mutacje z których tylko znikomy procent okazywał się przydatny w nowych warunkach),
- ukształtowanie typowych organów zmysłów i nadrzędnego organu sterującego w postaci mózgu nadzorującego funkcjonowanie całości,
- ukształtowanie określonych typów zachowań, instynktów, emocji koniecznych do przetrwania gatunkowego (agresja, symbioza, pasożytnictwo, mimikra, dbałość o potomstwo itp.).

W systemach biologicznych łatwo zaobserwować wykorzystanie szeregu zasad normalizacji, takich jak:

- a) **symplifikacji** polegającej na wielokrotnym wykorzystaniu użytecznych elementów (kod genetyczny, fotosynteza, typowe układy – kostny, mięśniowy, nerwowy i in., zmysły – wzrok, słuch i tp.
- b) **typizacji** polegającej na wykorzystaniu typowych elementów przez różne gatunki (pnie drzew, rogi, pazury, liście, kwiaty, futra, pióra itp.
- c) **modularyzacji** polegającej na wykorzystaniu typowych układów w różnych konfiguracjach (skrzydła, płuca, serce, żołądek itp.
- d) gatunkowe trwanie organizmów świadczy o ich **funkcjonalności** i określonej **efektywności** (wykorzystywanie składników otoczenia, homeostaza, regeneracja, układy odpornościowe itp.
- e) systemy biologiczne w trakcie ich kształtowania zostały w określony sposób **uporządkowane** zachowując **równowagę** poszczególnych ekosystemów i ich stabilizację, którą obecnie gwałtownie narusza ingerencja człowieka.

Poznanie praw rozwoju systemów biologicznych wraz z obserwacjami zachowań i kopalnych pozostałości organizmów żywych umożliwiło sformułowanie i wyjaśnienie zasad ich ewolucji oraz opracowanie sposobów ochrony tych systemów przed skutkami działalności człowieka. Prognozowanie przyszłego rozwoju systemów biologicznych jest utrudnione ze względu na problemy demograficzne, społeczne, energetyczne, surowcowe, klimatyczne i in. oraz ich duże zróżnicowanie.

W ramach tych systemów rozwijały się załączki systemów **społecznych i technicznych**, początkowo w sposób nieuświadomiony lecz sprawdzający się praktycznie w ułatwieniu przetrwania w wrogim i zmiennym środowisku.

Trudnymi do uporządkowania są **systemy społeczne**. O ile takie systemy w świecie zwierzęcym są dość przewidywalne ze względu na ich ukształtowanie w oparciu o kody genetyczne to w społecznościach ludzi są one znacznie uzależnione od cech osobowych dominujących jednostek. Są one formowane na różnych poziomach (rodziny, klanu, stowarzyszeń, partii, regionu, przedsiębiorstwa, narodowości, rasy, wiary, preferencji seksualnych itp.). Poszczególne podstawowe podsystemy preferują pewne wspólne normy i wartości, które często są w sprzeczności z sąsiednimi podsystemami co rodzi konflikty o różnym natężeniu. W zależności od „siły” tych podsystemów może dochodzić do różnych rozwiązań – kompromisu (konsensu), dominacji, podporządkowania lub eliminacji. Przewagę przeważnie uzyskują systemy, w których dominuje **konsens**, wzajemnie wygodna współpraca i wspomaganie posiadanymi zasobami (energetyczne, intelektualne, materiałowe i in.). W oparciu o dane historyczne możliwe jest w miarę dokładne odtworzenie i wyjaśnienie dotychczasowych form ewolucji, lecz trudno prognozować kierunki ich przyszłej ewolucji mimo iż jest wiele przykładów udanych krótkookresowych prognoz.

Analiza **systemów technicznych** wskazuje, że były one podporządkowane następującym zasadom:

- a) pojawienie się użytecznego pomysłu było wynikiem zdarzenia przypadkowego obserwacji w przyrodzie, skojarzenie go z nieuświadomioną (lub uświadomioną) potrzebą oraz bystrej umysłowości (talentu) potrafiącej dojrzeć użyteczność i przydatność zdarzenia,
- b) doskonalenie pomysłu i rozwiązań następowało przez stopniowe przybliżanie się do pożądanego celu, po rozpoznaniu znacznej liczby możliwych wariantów rozwiązań dochodząc w końcu do rozwiązań optymalnych lub idealnych z pomocą odpowiednich technologii,
- c) potrzebne zmiany łatwiej były realizowane w środowiskach otwartych, nie dogmatycznych, tolerancyjnych, łatwo akceptujących nowości i odmienność. Tworzyło to tzw. zasadę 3T (talent, technologia, tolerancja) sprzyjającą innowacyjności,
- d) kryteriami przydatności poszczególnych rozpatrywanych i stosowanych wariantów była użyteczność dla spełnienia potrzeb osobowych lub zespołowych

w zdefiniowanym otoczeniu (tzn. funkcjonalność, niezawodność, ekonomiczność, bezpieczeństwo i in.). Normy techniczne opracowywane w oparciu o powyższe zasady umożliwiały powszechne uzyskiwanie korzystnych rozwiązań.

Oprócz powyższych zasad można przytoczyć szereg innych szczegółowych pozwalających na doprecyzowanie rozwoju ewolucyjnego tych systemów. Systemy te rozwijają się w oparciu o pewne prawa naukowe oraz odkrywanie nowych praw coraz doskonalej odzwierciedlających rzeczywistość. Praktyczne potwierdzenie użyteczności odkrytych praw i zasad przeważnie skutkuje opracowaniem norm technicznych wskazujących na dalsze ich praktyczne i optymalne wykorzystywanie. Ważne lub epokowe odkrycia mogą diametralnie zmienić prognozowane scenariusze rozwojowe. Obecnie można z dużym prawdopodobieństwem prognozować rozwój systemów technicznych w następujących dziedzinach:

- a) Doskonalenia właściwości materiałów w oparciu o zasady inżynierii materiałowej, podstaw chemii, fizyki i systemów obliczeniowych co może sprzyjać realizacji takich celów jak: penetracja tajemnic kosmosu i głębin oceanicznych, opanowanie reakcji syntezy jądrowej i ulepszenie reakcji rozpadu jądrowego, opanowanie sztucznej fotosyntezy, ulepszenie OZE, maksymalizację struktur inżynierskich itp.
- b) Opanowanie technik miniaturyzacji wyrobów i elementów z pomocą rozwijanych nanotechnologii i ich wykorzystanie w różnych dziedzinach, tzn.: medycynie, informatyzacji, farmakologii, telekomunikacji, elektronice i in.
- c) Poznanie budowy i funkcjonowania mózgu człowieka z pomocą neurologii i neurotechnologii i sposobów świadomego ingerowania w jego leczenie, usprawnianie oraz wykorzystywanie tej wiedzy w realizacji nowych urządzeń technicznych użytecznych w różnych dziedzinach.
- d) Doskonalenie środków i technik poznawczych umożliwiających wyjaśnienie problemów ogólnie rozpoznanych lecz nie wyjaśnionych, na przykład: ciemna energia i ciemna materia, grawitacja, oddziaływania kwantowe, synteza struktur ożywionych, fuzja jądrowa, kolonizacja obiektów pozaziemskich i in.

Rozpowszechnione obecnie **systemy gospodarcze** wykorzystują niezliczoną liczbę obowiązujących **przepisów prawa, norm technicznych i norm zarządzania** związanych z systemami biologicznymi, technicznymi i społecznymi, abstrakcyjnymi i innymi wraz z konstytuowanymi przez siebie innowacyjnymi nowościami. Do norm regulujących ich postępowania zalicza się przepisy obowiązującego prawa, zaadoptowane normy techniczne związane z prowadzoną dziedziną działalności oraz obowiązujące **standardy wewnętrzne** wskazujące najlepsze sposoby wdrażania obowiązującego prawa i dobrowolnych norm technicznych. Można tu wskazać ważniejsze obszary aktywności regulowanej normami, tzn.:

- **postępowania inwestycyjne** związane z uruchomieniem produkcji wyrobów, pozyskiwaniem i wdrażaniem technologii, organizacją obrotu towarowego itp. (lokalizacje, zezwolenia, odpady, bezpieczeństwo, środowisko i in.),
- **planowanie i regulowanie pracy**, warunków socjalnych, motywowania, wynagradzania, odpowiedzialności, relacji interpersonalnych, zasad higieny, szkolenia itp.,
- **przestrzegania przepisów finansowych** dotyczących regulowania należności, ponoszenia opłat, transparentności, uczciwej konkurencji, eliminacji korupcji, dokumentowania działań itp.,
- **przestrzeganie zasad etyki**, uznawanych wartości, społecznej odpowiedzialności, zrównoważonego rozwoju itp.,
- **wykorzystywanie zasobów** z systemów abstrakcyjnych (wiedza, umiejętności, know how) pozwalających na planowanie strategiczne, wybór skutecznych sposobów wspomagania innowacyjności, prowadzenie rozważnej polityki ekonomicznej, minimalizacja strat i maksymalizacja zysków i in.

Podsumowanie

Analiza ewolucji poszczególnych systemów wskazuje, że ich rozwój postępuje zgodnie z określonymi prawami natury, prawami naukowymi i zwyczajowymi a ostatnio normami technicznymi i standardami z określonym oddziaływaniem czynników przypadkowych (pozytywnych

i negatywnych). Poznanie praw rządzących rozwojem umożliwia aktywne ingerowanie w procesy przyszłego planowanego rozwoju. Ujawnianie nowych praw lub zjawisk zwiększa skuteczność ingerowania w procesy rozwojowe poprzez ich adoptowanie i wykorzystywanie. Dużą pomocą jest wskazywanie racjonalnych, a nawet optymalnych, rozwiązań z pomocą norm technicznych opracowanych do dobrowolnego stosowania i przepisów prawa do obowiązkowego stosowania. Poznanie i stosowanie praw i norm jest stałym elementem procesów rozwojowych przynoszących korzyści społeczne. Istnieją również negatywne aspekty działalności gospodarczej, gdzie poprzez omijanie praw i nierzetelne powoływanie się na normy dąży się do uzyskiwania nieuczciwych korzyści kosztem potencjalnych użytkowników i społeczeństwa.

LITERATURA

- [1] Cempel Cz.: 2008. „Teoria i inżynieria systemów”. Radom: ITE Radom.
- [2] Hubka V. 1984. “Teorie Technisch Systeme”. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Litwinow B.W. 2005. „Osnowy inżyniernej diejatielnosti”. Maszynostrojenije, Moskwa.
- [4] Łunarski J.: 2014. „Normalizacja i standaryzacja”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [5] Normalizacja. Red. T. Schweitzer. Warszawa: PKN.
- [6] Sienkiewicz P. 1983. „Inżynieria systemów”. Warszawa: MON.

prof. dr hab. inż. Jerzy Łunarski, prof. IMBiGS, ul. Racjonalizacji 6/8, 02-673 Warszawa, e-mail: jlkmiop@prz.edu.pl

WPLYW PARAMETRÓW PROCESU KULOWANIA NA CHROPOWATOŚĆ KOMPONENTÓW DRUKOWANYCH METODĄ MEM

The influence of parameters of the shot peening process on the roughness of components printed by the MEM method

Rafał KLUZ, Magdalena BUCIOR, Łukasz PRZESZŁOWSKI, Władysław ZIELECKI

Streszczenie: W pracy dokonano analizy wpływu parametrów procesu kulowania na chropowatość powierzchni dla dwóch modeli wydrukowanych metodą MEM. Modele wykonano w dwóch różnych kierunkach nakładania materiału. Próbkę wykonano z tworzywa ABS. Dokonano również oceny powtarzalności doświadczeń według kryterium Cochran oraz oceny istotności współczynników równania regresji wykorzystującej test t-Studenta. Uzyskane modele matematyczne przedstawiają zależności występujące między parametrami chropowatości a parametrami procesu kulowania.

Słowa kluczowe: szybkie wytwarzanie, druk 3D, metoda MEM, pneumatyczne kulowanie

Abstract: The study analyzes the influence of shot peening process parameters on the surface roughness for the two models printed using the MEM method. The models were made in two different variants. The samples were made of ABS plastic. Also, the repeatability of experiments according to the Cochran criterion as well as the significance of the coefficients of the regression equation using the Student's t-test was also evaluated. The resulting mathematical models represent the relationships between the roughness parameters and shot peening process parameters.

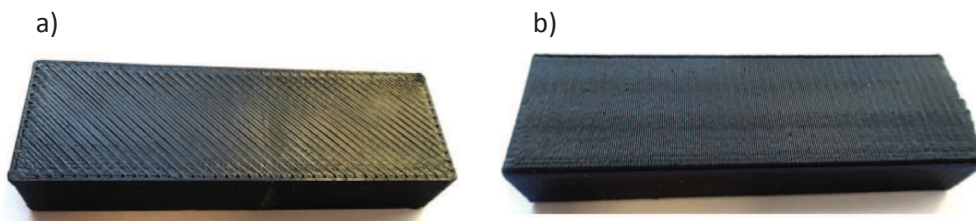
Key words: Rapid Prototyping, 3D printing, MEM method, pneumatic shot peening

Wprowadzenie

Rozwój technologii oraz wzrost konkurencji na rynku wprowadza konieczność obniżania kosztów produkcji przy jednoczesnym ciągłym doskonaleniu jakości wyrobów. Jedną z technologii zyskujących w ostatnich latach coraz większą popularność są przyrostowe metody wytwarzania. Technologia ta została stworzona głównie z myślą o produkcji prototypów, form czy matryc [4]. Prototypy wykonane metodami Rapid Manufacturing (RM) oraz Rapid Prototyping (RP) często stosowane są jako modele wzorcowe w badaniach procesów technologicznych czy funkcjonalnych, pozwalają na wykonywanie gotowych wyrobów możliwych do zastosowania jako elementy nośne czy konstrukcyjne maszyn oraz urządzeń stosowanych w różnych gałęziach przemysłu [7]. Metody szybkiego wytwarzania znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach [2, 3], m.in. w przemyśle lotniczym, spożywczym, medycynie, stomatologii czy wzornictwie przemysłowym. Prototypy wytwarzane w technologii RM mogą być stosowane do wytwarzania elementów lotniczych układów napędowych, kadłubów [7], czy w konstrukcji maszyn do wytwarzania prototypów kół zębatych [1]. Wśród technologii Rapid Manufacturing można wyróżnić kilka metod przyrostowych, do których można zaliczyć np. SLS (Selective Laser Sintering) selektywne spiekanie laserowe proszków, SLM (Selective Laser Melting) selektywne stapianie laserowe materiałów sproszkowanych czy FDM (Fused Deposition Modeling) modelowanie ciekłym tworzywem termoplastycznym [8].

Jedną z najpopularniejszych technik wytwarzania wykorzystującą modele 3D-CAD jest metoda FDM/ MEM, która polega na budowaniu modelu z półpłynnego materiału termoplastycznego za pomocą rozgrzewanej dyszy [1]. Dysza umieszczona jest w korpusie głowicy z podajnikiem (ekstruderem) materiału, tzw. filamentem [5]. Dysza wraz z głowicą przemieszcza się w osiach X i Y, a stół roboczy w osi Z. W przypadku metody MEM można zastosować tylko jedną dyszę dla jednego materiału, z którego wykonywany jest prototyp i konstrukcje podpierające [7]. Do materiałów wykorzystywanych w metodzie FDM/MEM zaliczyć można ABS, PLA, wosk czy poliwęglan. Tworzywa sztuczne charakteryzujące się lepszą wytrzymałością mechaniczną, odpornością chemiczną, odpornością na korozję czy wysoką odpornością na ścieranie oraz niewielki ciężar to główne zalety komponentów wykonanych z tych materiałów w porównaniu do tradycyjnych materiałów stosowanych w konstrukcji maszyn. Wpływają one również na zasadność zastosowania tej metody w produkcji jednostkowej oraz wytwarzaniu prototypów [4]. Do wad tej technologii należą m. in. ograniczenia wymiarowe tworzonych elementów, długi czas druku czy niewystarczająca dokładność, z którą wiąże się konieczność dodatkowej obróbki mechanicznej.

Wysoka chropowatość elementów drukowanych metodą MEM jest jedną z głównych wad tej technologii. W związku z tym przeprowadzono badania eksperymentalne, mające na celu zastosowanie jednej z metod obróbki powierzchniowej, która poprawiłaby jakość drukowanych komponentów. W pracy skupiono się na analizie wpływu parametrów procesu pneumatycznego kulowania na

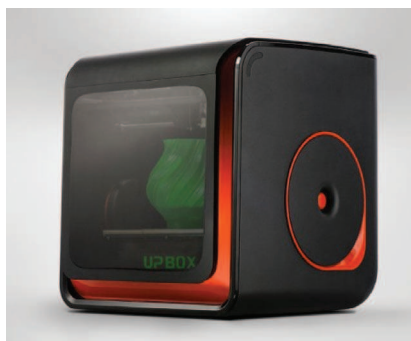


Rys. 1. Próbkę wypełnioną pod kątem: a) 45° o gęstości wypełnienia 65%, b) 90° o gęstości wypełnienia 65%
 Fig. 1. Sample filled at an angle of: a) 45° with a filling density of 65%, b) 90° with a filling density of 65%

chropowatość powierzchni dla dwóch modeli wydrukowanych metodą MEM. Modele wykonano w dwóch różnych kierunkach nakładania materiału z tworzywa ABS o gęstości wypełnienia 65%.

Metodyka badań

Do badań użyto próbek wydrukowanych w dwóch różnych kierunkach nakładania materiału, pod kątem 45° oraz 90° o gęstości wypełnienia 65% (rys. 1). Modele wykonano z tworzywa ABS firmy Finnotech w kolorze czarnym na drukarce UP BOX + (rys. 2). Budowanie modelu metodą MEM na tym urządzeniu polega na nakładaniu warstwowym rozgrzanego to temperatury płynięcia termoplastycznego polimeru. Przestrzeń robocza maszyny jest zamknięta, a wielkość zabudowy wynosi 255 × 205 × 205. Podstawowe parametry wytwarzania detali w metodzie przyrostowej MEM przedstawiono w tab. I.



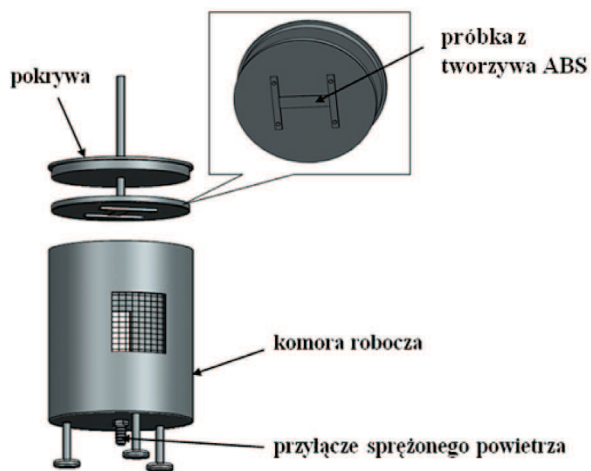
Rys. 2. Urządzenie pracujące w metodzie przyrostowej MEM
 Fig. 2. Device working in MEM incremental forming method

Tabela I. Podstawowe parametry wytwarzania detalu w metodzie przyrostowej MEM
 Table I. Basic parameters of detail production in MEM incremental forming method

Grubość warstwy	0,2 [mm]
Temperatura głowicy	270 [°C]
Temperatura stołu	90 [°C]
Stopień wypełnienia	65 [%]
Temperatura komory drukarki	45 [°C]
Materiał	ABS
Średnica filamentu	1,75 [mm]

W pierwszym etapie badań próbkę o wymiarach 63 × 20 × 10 mm zamocowano w urządzeniu do kulowania (rys. 3), gdzie następnie ją kulowano przyjmując odpowiednio wartości podane w tab. II. Parametrami zmiennymi w doświadczeniu był czas kulowania t oraz ciśnienie p . Średnica kulek d_k w doświadczeniu była parametrem stałym i wynosiła 1,5 mm, została ona tak dobrana, aby stopień pokrycia powierzchni w badanym czasie był jak największy. Odległość próbki od dyszy wynosiła $l = 250$ mm. Jako wariant wyjściowy (wariant nr 1) przyjęto próbki z powierzchnią nieobrabianą mechanicznie, bezpośrednio po wydruku metodą MEM.

Chropowatość powierzchni zmierzono za pomocą profilometru stykowego Surtronic 25 Taylor Hobson na odcinku pomiarowym równym 4 mm, zgodnie z normą PN EN-ISO 4287:1999 [8].



Rys. 3. Urządzenie do kulowania
 Fig. 3. Device for shotpeeningprocess

Tabela II. Warianty przyjęte w procesie pneumokulowania
 Table II. Variants adopted in the pneumatic shot peening process

Nr próbki	Parametry technologiczne pneumokulowania	
	t [min]	p [MPa]
2	2	0,2
3	3	0,2
4	2	0,4
5	3	0,4

Wyniki badań

W pracy przeprowadzono analizę powtarzalności doświadczeń oraz dokonano oceny istotności współczynników równania regresji. Szczególną uwagę zwrócono na dwa parametry amplitudy a mianowicie na parametr Ra – średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu oraz parametr Rz – wysokość chropowatości według dziesięciu punktów.

Ocenę powtarzalności warunków doświadczeń przeprowadzono wg kryterium Cochra. W tab. III przedstawiono obliczone wartości współczynnika G wg wzoru 1 dla próbek wypełnionych pod kątem 45° oraz 90°. Otrzymane wartości porównano z wartością krytyczną G_{kr} (4) przy przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$ oraz w zależności od liczby stopni swobody (2–3). W przypadku, gdy powtarzalność warunków doświadczeń uznawano za zadowalającą.

Tabela III. Wyniki analizy powtarzalności warunków doświadczeń ($\alpha = 0,05$)

Table III. Results of the repeatability analysis of the experimental conditions ($\alpha = 0,05$)

Współczynnik	Próbki wypełnione pod kątem 45°		Próbki wypełnione pod kątem 90°
	Badany parametr		
G	Ra	Rz	Ra
	0,477	0,559	0,898

$$G = \frac{S^2 y_{i\max}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i} \quad (1)$$

$$f_1 = N = 4 \quad (2)$$

$$f_2 = r - 1 = 1 \quad (3)$$

$$G_{kr} = G_{(\alpha; f_1; f_2)} = 0,9065 \quad (4)$$

gdzie:

$S^2(y)$ – wariancja błędów pomiaru,

N – całkowita liczba doświadczeń,

r – liczba powtórzeń w doświadczeniu,

f_1 – liczba stopni swobody dla licznika,

f_2 – liczba stopni swobody dla mianownika.

W kolejnym kroku dokonano oceny istotności współczynników równania regresji wykorzystującej test t -Studenta. Następnie po określeniu istotności określono równania opisujące wpływ parametrów pneumatyzacji na chropowatość powierzchni dla próbek wypełnionych pod kątem 45° (5–6) oraz dla próbek wypełnionych pod kątem 90° (7–8).

$$Ra = 5,065 + 0,888 t + 0,365 p \quad (5)$$

$$Rz = 21,156 + 3,856 t + 2,781 p + 1,531 tp \quad (6)$$

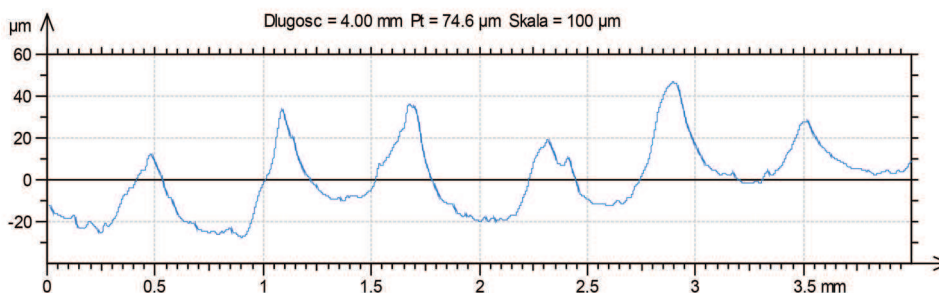
$$Ra = 6,321 - 1,266 t - 1,788 p + 0,884 tp \quad (7)$$

$$Rz = 33,787 + 4,487 t + 9,237 p + 3,187 tp \quad (8)$$

Analizując uzyskane równania (5–8) dla parametrów chropowatości takich jak Ra i Rz można stwierdzić, że znaczący wpływ na chropowatość powierzchni w obydwu analizowanych wariantach miał czas kulowania, ciśnienie zasilania, oraz interakcja obu analizowanych parametrów technologicznych.

Pomiary chropowatości powierzchni wskazują, że kierunek wypełnienia w dużym stopniu wpływa na jakość powierzchni. W przypadku próbek wypełnionych pod kątem 90° ($Ra = 17,1 \mu\text{m}$) zaobserwowano większą chropowatość powierzchni o 46%, w porównaniu do próbek wypełnionych pod kątem 45° gdzie $Ra = 9,22 \mu\text{m}$. Potwierdzają to również przedstawione profile chropowatości dla wariantu wyjściowego (rys. 4 i 6) oraz wariantu nr 5 (rys. 5 i 7). Najmniejszą chropowatość w obydwu analizowanych przypadkach uzyskano dla wariantu nr 5 ($t = 3 \text{ min}$, $p = 0,4 \text{ MPa}$). Natomiast największą chropowatość uzyskano dla czasu kulowania $t = 2 \text{ min}$ oraz ciśnienia $p = 0,2 \text{ MPa}$ (wariant nr 2).

Analizując wykresy (8–9) można zaobserwować korzystny wpływ pneumatyzacji na chropowatość powierzchni. W przypadku próbki wypełnionej pod kątem 90° dla wariantu nr 5 parametry chropowatości takie jak Ra i Rz zmniejszyły się odpowiednio o 76% oraz 68% w porównaniu do wariantu wyjściowego. Z kolei dla próbki wypełnionej pod kątem 45° parametr Ra zmniejszył się o 57%, natomiast parametr Rz o 55% w porównaniu

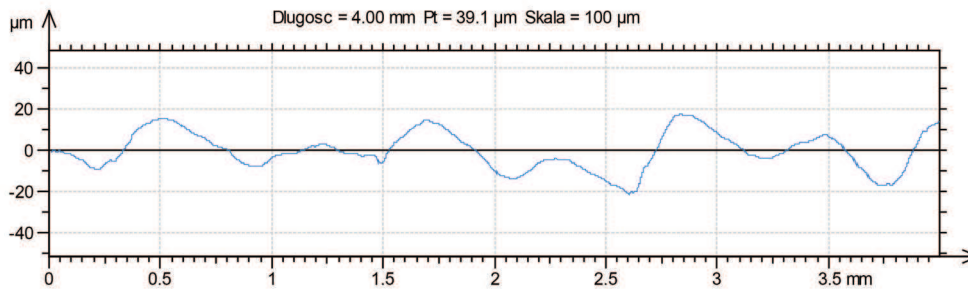


Rys. 4. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 45° (wariant nr 1).

Parametry amplitudy: $R_p = 26,7 \mu\text{m}$, $R_v = 12 \mu\text{m}$, $R_z = 38,7 \mu\text{m}$, $R_c = 39,8 \mu\text{m}$, $R_t = 47,7 \mu\text{m}$, $R_a = 9,22 \mu\text{m}$, $R_q = 11 \mu\text{m}$

Fig. 4. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 45° (variant No. 1).

Amplitude parameters: $R_p = 26,7 \mu\text{m}$, $R_v = 12 \mu\text{m}$, $R_z = 38,7 \mu\text{m}$, $R_c = 39,8 \mu\text{m}$, $R_t = 47,7 \mu\text{m}$, $R_a = 9,22 \mu\text{m}$, $R_q = 11 \mu\text{m}$

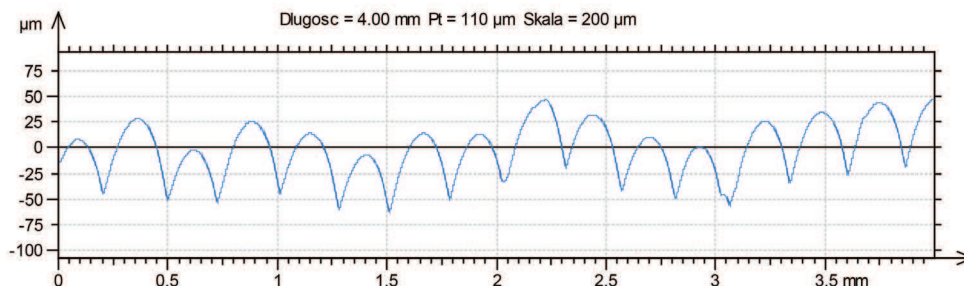


Rys. 5. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 45° (wariant nr 4).

Parametry amplitudy: $R_p = 8,67 \mu\text{m}$, $R_v = 8,57 \mu\text{m}$, $R_z = 17,25 \mu\text{m}$, $R_c = 15,75 \mu\text{m}$, $R_t = 23,3 \mu\text{m}$, $R_a = 3,99 \mu\text{m}$, $R_q = 4,8 \mu\text{m}$

Fig. 5. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 45° (variant No. 4).

Amplitude parameters: $R_p = 8,67 \mu\text{m}$, $R_v = 8,57 \mu\text{m}$, $R_z = 17,25 \mu\text{m}$, $R_c = 15,75 \mu\text{m}$, $R_t = 23,3 \mu\text{m}$, $R_a = 3,99 \mu\text{m}$, $R_q = 4,8 \mu\text{m}$

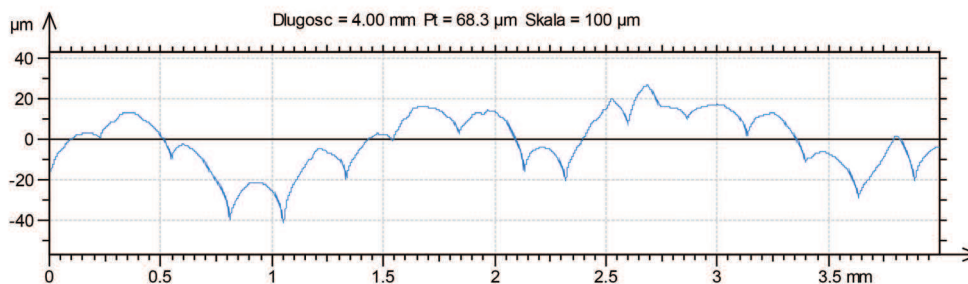


Rys. 6. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 90° (wariant nr 1).

Parametry amplitudy: $R_p = 28,1 \mu\text{m}$, $R_v = 43,9 \mu\text{m}$, $R_z = 72 \mu\text{m}$, $R_c = 64,8 \mu\text{m}$, $R_t = 75,3 \mu\text{m}$, $R_a = 17,1 \mu\text{m}$, $R_q = 20,1 \mu\text{m}$

Fig. 6. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 90° (variant No. 1).

Amplitude parameters: $R_p = 28,1 \mu\text{m}$, $R_v = 43,9 \mu\text{m}$, $R_z = 72 \mu\text{m}$, $R_c = 64,8 \mu\text{m}$, $R_t = 75,3 \mu\text{m}$, $R_a = 17,1 \mu\text{m}$, $R_q = 20,1 \mu\text{m}$



Rys. 7. Profil chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 90° (wariant nr 4).

Parametry amplitudy: $R_p = 7,87 \mu\text{m}$, $R_v = 15,4 \mu\text{m}$, $R_z = 23,25 \mu\text{m}$, $R_c = 17,4 \mu\text{m}$, $R_t = 29,1 \mu\text{m}$, $R_a = 4,15 \mu\text{m}$, $R_q = 5,17 \mu\text{m}$

Fig. 7. Roughness profile for a specimen filled at an angle of 90° (variant No. 4).

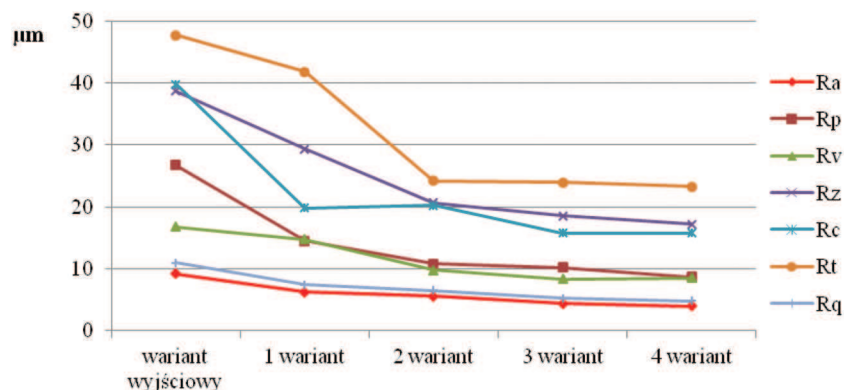
Amplitude parameters: $R_p = 7,87 \mu\text{m}$, $R_v = 15,4 \mu\text{m}$, $R_z = 23,25 \mu\text{m}$, $R_c = 17,4 \mu\text{m}$, $R_t = 29,1 \mu\text{m}$, $R_a = 4,15 \mu\text{m}$, $R_q = 5,17 \mu\text{m}$

do wariantu nr 1. Wraz ze zwiększaniem parametrów procesu kulowania chropowatość powierzchni maleje.

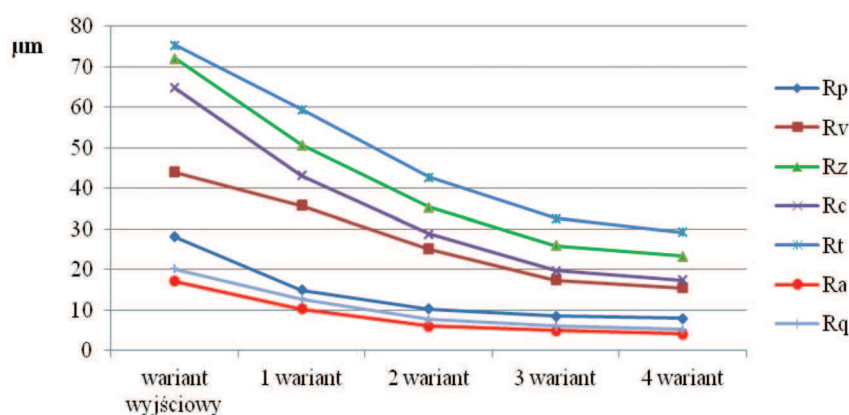
Wnioski

W artykule przedstawione zostały wyniki badań chropowatości powierzchni dla próbek wydrukowanych z tworzywa ABS, które następnie poddano pneumatycznemu kulowaniu. Znaczący wpływ na chropowatość powierzchni w obydwu analizowanych przypadkach miał czas kulowania, ciśnienie oraz interakcja obu analizowanych parametrów

technologicznych procesu kulowania. Wraz ze wzrostem parametrów technologicznych procesu chropowatość maleje. Największą chropowatość uzyskano dla czasu kulowania $t = 2 \text{ min}$ oraz ciśnienia $p = 0,2 \text{ MPa}$, a najmniejszą dla $t = 3 \text{ min}$, $p = 0,4 \text{ MPa}$. Parametr R_a w wyniku kulowania dla wariantu nr 5 zmniejszył się odpowiednio o 76% oraz 57% dla próbki wypełnionej pod kątem 90° oraz 45° w porównaniu do próbki bezpośrednio po wydruku. Z kolei parametr R_z zmniejszył się w zakresie 55%–68%. Znaczący wpływ na chropowatość powierzchni ma również kierunek wypełnienia. Mniejszą chropowatość



Rys. 8. Parametry chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 45°
 Fig. 8. Roughness parameters for a specimen filled at an angle of 45°



Rys. 9. Parametry chropowatości dla próbki wypełnionej pod kątem 90°
 Fig. 9. Roughness parameters for a specimen filled at an angle of 90°

o 46% uzyskano w przypadku próbek wypełnionych pod kątem 45° w porównaniu do próbek wypełnionych pod kątem 90°.

Podsumowując można stwierdzić, że pneumokulowanie może być stosowane w celu poprawy jakości powierzchni elementów drukowanych z tworzywa ABS.

LITERATURA

- [1] Budzik G. et. al. 2016. „Wykorzystanie szybkiego prototypowania do wykonania kół zębatych na przykładzie metody MEM”. *Przegląd Mechaniczny* (3): 14–16.
- [2] Budzik G. 2009. „Odzworowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1–145.
- [3] Chlebus E. 2000. „Techniki komputerowe CAx i inżynierii produkcji”. Warszawa: WNT.
- [4] Dziubek T., M. Filip. 2015. „Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania”. *Mechanik* (12): 54–61.
- [5] Miazio Ł. 2015. „Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wydrukowanych w technologii FDM z różną gęstością wypełnienia”. *Mechanik* (7): 533–538.
- [6] Norma PN EN-ISO 4287:1999. Specyfikacja geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni:

Metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

- [7] Sęp J., G. Budzik. 2015. „Możliwości aplikacyjne technologii Rapid Manufacturing w przemyśle lotniczym”. *Mechanik* (12): 169–172.
- [8] Siemiński P., G. Budzik. 2015. „Techniki przyrostowe”. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

dr inż. Rafał Kluz – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkluz@prz.edu.pl

dr inż. Magdalena Bucior – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: magdabucior@prz.edu.pl

dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRZ – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: wzktmiop@prz.edu.pl

dr inż. Łukasz Przeszlowski – Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: lprzeszl@prz.edu.pl

WPLYW OBRÓBKI POWIERZCHNIOWEJ ZGNIEMEM PO UTWARDZENIU SPOIN NA NOŚNOŚĆ ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH

Effect of surface treatment cold-work hardening after adhesive curing on strength of adhesive lap joints

Jan GODZIMIRSKI, Anna JAGIEŁŁO

Streszczenie: Wprowadzenie naprężeń ściskających do warstwy wierzchniej materiału może powodować odkształcenia plastyczne, powodujące odkształcenia (deformacje) cienkich blach. Piaskowanie powierzchni zewnętrznych zakładkowych połączeń klejowych, po utwardzeniu ich spoin, powinno spowodować odkształcenia, które mogą zmniejszyć wartość naprężeń w obciążonych spoinach i w ten sposób zwiększyć wytrzymałość połączeń. Przeprowadzono badania eksperymentalne, które potwierdziły tę hipotezę. Zaproponowano również metodę uwzględnienia skutków obróbki powierzchniowej zgniotem w obliczeniach numerycznych wytrzymałości połączeń klejowych. Z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych wynika, że wzrost wytrzymałości, wynikający z zastosowania obróbki powierzchniowej zgniotem klejonych elementów połączeń zakładkowych po utwardzeniu ich spoin, może wynieść od kilkunastu do kilkudziesięciu procent.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, obróbka powierzchniowa zgniotem, obliczenia numeryczne

Abstract: Loading compressive stress into surface layer of thin sheets cause possibility of their deformations. The sand blasting of surface layer of adhesive lap joints after adhesive curing should cause such deformation that can reduce stresses in adhesive layer, so enlarge joint strength. The experimental tests and numerical calculations verify this hypothesis. The method of considering in numerical calculations the effect of surface treatment cold-work hardening was proposed. Made experimental tests and numerical calculations showed that the increase of strength of cold-work hardening lap adhesive joints may cause strength increase from a dozen or so to dozen percent.

Keywords: Adhesive joints, surface treatment cold-work hardening, numerical calculation

Wprowadzenie

Klejenie konstrukcyjne jest cennym uzupełnieniem innych metod łączenia materiałów. Trudno jest sobie wyobrazić działalność współczesnego budownictwa, przemysłu samochodowego, lotniczego oraz budowy maszyn bez stosowania w większym lub mniejszym zakresie technologii klejenia. Działalność ponad 700 firm specjalizujących się w wytwarzaniu klejów [4] świadczy o powszechności i perspektywach tej metody łączenia. W spoinach klejowych, nawet najbardziej popularnych połączeń zakładkowych, występuje złożony stan naprężenia i często naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny osiągają większe wartości od naprężeń stycznych. W celu ograniczenia ich wartości zalecane jest konstruowanie połączeń zakładkowych symetrycznych. W połączeniach zakładkowych występuje problem granicznej długości zakładki, tzn. takiej, której zwiększenie nie powoduje już wzrostu wytrzymałości połączenia [2]. W celu zwiększenia wytrzymałości połączeń zakładkowych, obciążonych na ścinanie, zalecane jest stosowanie bardziej efektywnych sposobów przygotowania powierzchni do klejenia [1], ukosowanie krawędzi klejonych elementów [5] oraz pozostawianie wypłytki na krawędziach spoin [3]. Ciekawe wyniki dotyczące zwiększania wytrzymałości połączeń zakładkowych uzyskał zespół prof. Zielińskiego, stosując peumokulowanie łączonych blach po utwardzeniu spoin klejowych [6, 7]. Było to inspiracją do

zastosowania piaskowania po utwardzeniu spoin w celu zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych i próby wyjaśnienia tego efektu dzięki przeprowadzeniu obliczeń numerycznych.

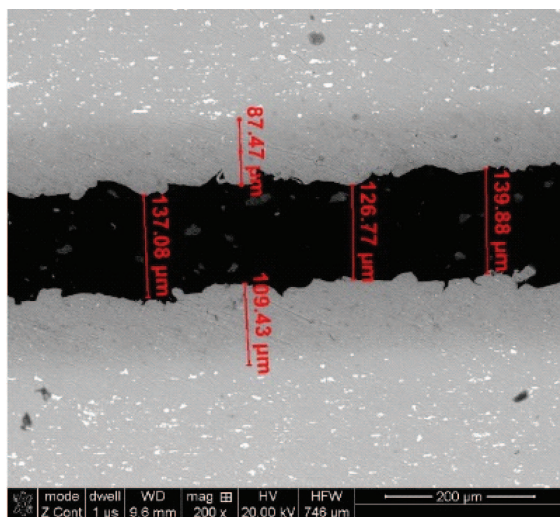
Ocena wpływu piaskowania na odkształcenia blach

Piaskowanie wprowadza naprężenia ściskające do warstwy wierzchniej materiału i może powodować jej odkształcenia plastyczne. Skutkuje to odkształceniami (deformacją) cienkich blach. Znając wartości odkształceń (deformacji) można oszacować wartość naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej, które spowodowałyby



Rys. 1. Odkształcenia próbek metalowych spowodowane jednostronnym piaskowaniem powierzchni

Fig. 1. Deformation of metal sheets caused by one-sided sand blasting



Rys. 2. Obraz z badania tomografem komputerowym spoiny klejowej (powierzchnie piaskowana)

Fig. 2. Adhesive layer tested by means of computer-assisted tomograf (sandblasted surface)

takie same odkształcenia. Znajomość wartości takich naprężeń może być przydatna do numerycznego modelowania połączeń piaskowanych po utwardzeniu spoin klejowych. W badaniach wykorzystano próbki prostopadłościowe wykonane ze stopu aluminium AW 2024T3 o grubości 2 mm i stalowe (C35) o takiej samej grubości, które poddano jednostronnemu piaskowaniu. Próbki uległy wygięciu (rys. 1). Za pomocą głębokościomierza mikrometrycznego zmierzono strzałki ich ugięcia.

Na podstawie badania tomografem komputerowym (rys. 2.) oszacowano głębokość warstwy wierzchniej, w której występują naprężenia spowodowane piaskowaniem na ok. 0,1 mm.

Odształcenie próbki potraktowano jako zginanie belki obciążonej momentem. Odształcenie belki zginanej opisuje zależność:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_g, \quad (1)$$

gdzie:

E – moduł Younga

I – moment bezwładności

y – strzałka ugięcia

M_g – moment gnący

Dwukrotne całkowanie zależności (1) daje rezultat:

$$EIy = -M_g \frac{x^2}{2} + Cx + D \quad (2)$$

Stałe C i D można obliczyć z warunków brzegowych:

$$\begin{aligned} x = 0 & \quad y = 0 \\ x = l & \quad y = 0 \end{aligned}$$

$$D = 0 \quad C = M_g \frac{l}{2}$$

co sprowadza równanie (2) do postaci:

$$EIy = -M_g \frac{x^2}{2} + M_g \frac{l}{2} x \quad (3)$$

Dla $x = 0,5l$ równanie (3) uzyskuje postać:

$$EIy = M_g \frac{l^2}{8} \quad (4)$$

Moment gnący działający na piaskowaną próbkę można określić jako funkcję umownych naprężeń normalnych dodatnich w warstwie wierzchniej

$$M_g = \sigma_x A \times r = \sigma_x g_\sigma b \left(\frac{g_m}{2} - 0,5g_\sigma \right) \quad (5)$$

gdzie:

g_m – grubość materiału

g_σ – grubość warstwy, w której występują naprężenia

b – szerokość próbki

r – odległość warstwy wierzchniej od środkowej warstwy próbki

Podstawiając do równania (5) znane wartości grubości g_m i g_σ otrzymujemy:

$$M_g = 0,1b(1 - 0,05)\sigma_x = 0,095\sigma_x b \quad (6)$$

Podstawiając zależność (6) do równania (4) i przekształcając otrzymujemy:

$$\sigma_x = \frac{8EIy}{l^2 b 0,095} \quad (7)$$

Obliczono wartość momentu bezwładności przekroju badanych próbek i umowne naprężenia (tab. 1).

Tabela 1. Moment bezwładności i naprężenia umowne w warstwach wierzchnich próbek

Table 1. Moment of inertia and conventional stresses in surface layer

Próbki	AW 2024T3	C35
moment bezwładności, mm ⁴	13,3	
Naprężenia, MPa	390	418

Piaskowanie powierzchni zewnętrznych zakładkowych połączeń klejowych po utwardzeniu ich spoin powinno wprowadzić do łączonych blach naprężenia, które powinny zmniejszyć wartość naprężeń w obciążonych spoinach i w ten sposób zwiększyć wytrzymałość połączeń.

Badania eksperymentalne

Celem prowadzonych badań było porównanie wytrzymałości próbek zakładkowych o szerokości 25 mm, sklejonych klejem Epidian 57/Z1, z próbkami piaskowanymi po sklejeniu i utwardzeniu spoin. Przygotowano po 5 zestawów próbek sklejonnych zakładkowo. Porównywane próbki przygotowano do klejenia w jednakowy sposób. Przygotowanie powierzchni do klejenia polegało na obróbce strumieniowej elektrokorundem F40

Tabela 2. Wyniki badań eksperymentalnych
Table 2. Results of experimental tests

	rodzaj próbki	AW 2024T3	AW 2024T3	AW 2024T3	C35	C35
przygotowanie powierzchni		piaskowanie	płatno ścierne	płatno ścierne	piaskowanie	piaskowanie
długość zakładki, mm		25	25	12	22	12,5
Nośność, N	zwykłe	4958,6±873,9	2961±393	3520± 393,3	7020± 262,2	5967,2±291,8
	piaskowane	5969,6±641,8	4692,6±335	4420± 382,6	7270± 521,5	6318,6±242,1
Wytrzymałość na ścinanie, MPa	zwykłe	8,02±1,41	4,74±0,63	11,95 ± 1,34	12,76 ± 0,48	19,1±0,93
	piaskowane	9,53±1,02	7,51±0,54	14,88 ±1,29	13,22 ±0,95	20,22±0,77
Przyrost wytrzymałości, %		19	58	26	4	5

przez 30 s przy ciśnieniu 0,5 MPa lub szorstkowaniu płótnem ściernym numer 80, a następnie przemywaniu benzyną ekstrakcyjną, która była odparowywana w suszarce laboratoryjnej. Bezpośrednio po przygotowaniu powierzchni sklejało 10 próbek. Utwardzanie spoin przeprowadzono dwustopniowo: 24 h w temperaturze pokojowej i 5 h w temperaturze 80°C. Połowa ze sklepanych próbek była poddawana ponownemu piaskowaniu po utwardzeniu spoin. W celu uzyskania podobnych grubości spoin umieszczono w nich nitki dystansowe. Po utwardzeniu próbek usuwano wycieki kleju w celu eliminacji efektu wypływek. Średnią wytrzymałość połączeń określono na podstawie pięciu próbek i obliczono przedziały ufności dla poziomu ufności $1-\alpha = 0,95$. Badania zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Hung-Ta HT-2402 przy prędkości rozciągania 2 mm/min (tab. 2).

We wszystkich badaniach stwierdzono wzrost wytrzymałości próbek piaskowanych po utwardzeniu spoiny. Większy wzrost wytrzymałości uzyskano przy mniej efektywnym sposobie przygotowania powierzchni do klejenia. Większy wzrost wytrzymałości uzyskano dla próbek o dłuższej zakładce oraz dla próbek duralowych w porównaniu ze stalowymi. Największy wzrost wytrzymałości uzyskano klejąc duralowe próbki na zakładkę 25 mm,

których powierzchnie przygotowano do klejenia metodą obróbki płótnem ściernym.

Analiza numeryczna

Przeprowadzono obliczenia numeryczne w systemie Ansys w celu analizy przyczyn wzrostu wytrzymałości połączeń zakładkowych poddanych procesowi piaskowania po utwardzeniu spoin klejowych. Model połączenia elementów ze stopu aluminium klejonych na zakładkę o długości 25 mm przedstawiono na rys. 3.

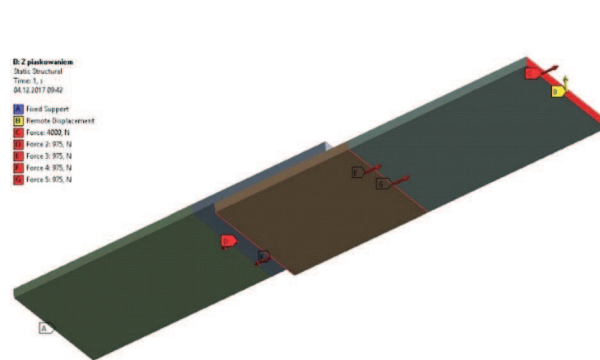
Efekt umocnienia zgniotem piaskowanej powierzchni zamodelowano przez obciążenie siłami rozciągającymi powierzchniowych warstw klejonych elementów poddanych piaskowaniu. Wartość sił obciążających wynikała z obliczonych naprężeń (tab. 2) oraz pola przekroju poprzecznego umocnionej warstwy (0,1 × 25 mm). Model połączenia zakładkowego obciążano:

- siłą rozciągającą 4000 N,
- siłą rozciągającą 4000 N i siłami modelującymi efekt piaskowania powierzchni (rys. 4),
- tylko siłami modelującymi efekt piaskowania powierzchni.

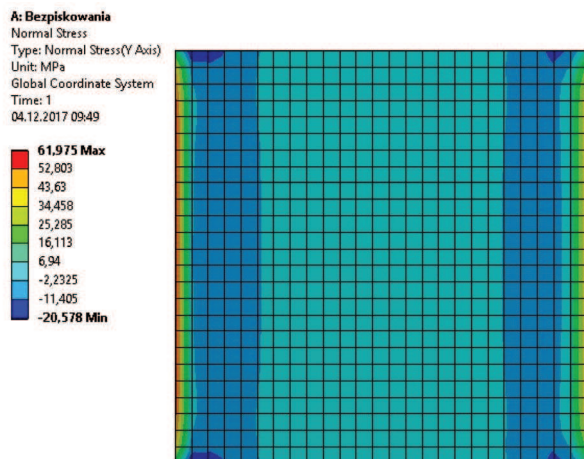
Porównano rozkłady naprężeń w spoinie: maksymalnych głównych, normalnych prostopadłych do powierzchni spoin klejowych (rys. 5–7) i naprężeń stycznych.



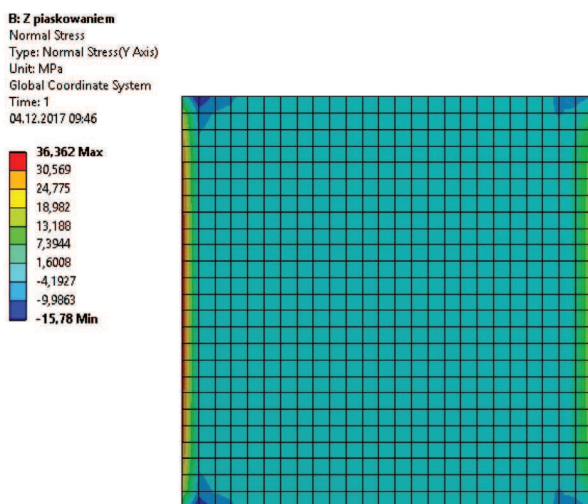
Rys. 3. Model połączenia zakładkowego
Fig. 3. Numerical model of lap joint



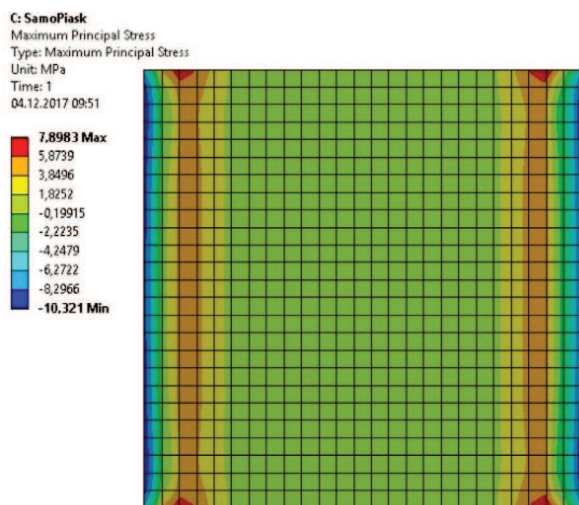
Rys. 4. Model obciążenia próbki
Fig. 4. Model of specimen loading



Rys. 5. Mapa naprężeń normalnych – obciążenie 4000 N
Fig. 5. Stress normal pattern – loading 4000 N



Rys. 6. Mapa naprężeń normalnych – obciążenie 4000 N + 4 × 975 N
Fig. 6. Stress normal pattern – loading 4000 N + 4 × 975 N



Rys. 7. Mapa naprężeń normalnych – obciążenie 4 × 975 N
Fig. 7. Stress normal pattern – loading 4 × 975 N

Maksymalne wartości analizowanych naprężeń zamieszczono w tab. 4.

Tabela 4. Porównanie wartości maksymalnych naprężeń dla różnych wariantów obciążenia

Table 4. Comparison of maximum stresses value for different loading variant

Obciążenie	4000 N	4000 + 4 × 975 N	4 × 975 N
Naprężenia, MPa			
σ_I	89,9	65,2	-10,3
σ_y	62	36,4	-24,5
τ_{xy}	39,5	35,2	3

Przeprowadzone obliczenia numeryczne wykazały, że w połączeniu zakładkowym o długości zakładki 25 mm naprężenia normalne dodatnie prostopadłe do powierzchni spoiny osiągają większe wartości od naprężeń stycznych i one głównie decydują o wyężeniu spoiny. Efektem wprowadzenia zgniotu do powierzchni łączonych elementów po utwardzeniu spoiny jest ich odkształcenie skutkujące powstaniem w spoinie naprężeń normalnych ujemnych, co powoduje zmniejszenie naprężeń normalnych wynikających z obciążenia połączenia. Spowodowany tym wzrost wytrzymałości połączenia ocenianego na podstawie wartości naprężeń maksymalnych głównych może wynieść 27%.

Wnioski

Obróbka powierzchniowa zgniotem powierzchni klejonych elementów połączeń zakładkowych po utwardzeniu spoin klejowych może powodować odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej co skutkuje odkształceniami łączonych elementów, spadkiem naprężeń normalnych w spoinach i wzrostem wytrzymałości połączeń.

W celu numerycznego modelowania połączeń klejowych poddawanych obróbce powierzchniowej zgniotem, odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej można zastąpić obciążeniem siłami powierzchniowymi obliczonymi według zaproponowanej metodyki.

Z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych wynika, że wzrost wytrzymałości wynikający z zastosowania obróbki powierzchniowej zgniotem klejonych elementów połączeń zakładkowych po utwardzeniu ich spoin może wynieść od kilkunastu do kilkudziesięciu procent.

Większy wzrost wytrzymałości połączeń klejowych, wynikający z obróbki powierzchniowej zgniotem po utwardzeniu spoin, dotyczył połączeń, w których zastosowano mniej efektywny sposób przygotowania powierzchni do klejenia, a więc o mniejszej wytrzymałości adhezyjnej.

LITERATURA

- [1] Cagle Ch.V. 1977. „Kleje i klejenie”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [2] Czaplicki J. i in. 1987. „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [3] Klein B. 1994. „Leichtbau – Konstruktion Berechnungsgrundlagen und Gestaltung Vieweg“. Verlag GmbH. Braunschweig-Wiesbaden.
- [4] Mirski Z., T. Piwowarczyk. 2008. „Historia klejenia – od prehistorii do dzisiaj”. *Przegląd Spawalnictwa* (8).
- [5] Ptakowska-Wyżanowicz H. 1961. „Klejenie metali”. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Techniczne.
- [6] Zielecki W., K. Korzyńska. 2017. „Analiza wpływu wybranych parametrów pneumokulowania na nośność jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 55–59.
- [7] Zielecki W., K. Korzyńska. 2016. „Umacnianie zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V metodą pneumokulowania”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (1): 44–47.

prof. dr. hab. inż. Jan Godzimirski – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

inż. Anna Jagiełło – studentka Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa

WPLYW WARUNKÓW UTWARDZANIA I SEZONOWANIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH DOCZOŁOWYCH

The effect of curing and seasoning conditions on the strength of adhesive butt joints

Anna RUDAWSKA, Izabela MITURSKA

S t r e s z c z e n i e: W pracy przedstawiono wpływ warunków utwardzania i sezonowania na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych doczołowych. Łączone elementy, w postaci dwustopniowego wałka, wykonane zostały ze stali stopowej C45. Elementy te skleiono przy użyciu trzech rodzajów kompozycji klejowych epoksydowych na bazie różnych żywic epoksydowych i utwardzacza PAC: E5/PAC/100:80, E53/PAC/100:80, E57/PAC/100:80. Badania przeprowadzono dla trzech wariantów okresu utwardzania i sezonowania: 7 dni utwardzania w warunkach otoczenia, 7 dni utwardzania oraz 7 dni sezonowania w komorze klimatycznej oraz 3 dni utwardzania i 7 dni sezonowania w komorze klimatycznej. Po upływie okresu utwardzania i sezonowania przeprowadzono badania wytrzymałościowe, podczas których określono wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-59/C-89301. Najwyższą wytrzymałość spośród zastosowanych kompozycji klejowych osiągnęły połączenia wykonane za pomocą kleju E5/PAC/100:80. Porównując pierwszy wariant czasu sezonowania z drugim zauważono, że sezonowanie próbek przez kolejne 7 dni w komorze wpłynęło negatywnie na ich wytrzymałość. Natomiast najlepsze rezultaty wytrzymałości na odrywanie osiągnięto dla trzeciego wariantu okresu sezonowania. Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań, mających na celu określenie czynników technologicznych wpływających na osiągnięcie jak najlepszych założonych właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych.

S ł o w a k l u c z o w e: połączenia klejowe doczołowe, wytrzymałość na odrywanie, sezonowanie, stal C45

A b s t r a c t: The paper presents the influence of the curing and seasoning conditions on the strength properties of the butt joints. The joined elements in the form of a two-stage roller are made of C45 alloy steel. These elements were bonded using the three types of the epoxy adhesive based on three various epoxy resins and PAC hardener: E5/PAC/100:80, E53/PAC/100:80, E57/PAC/100:80. The tests were carried out for three variants of the curing and seasoning period: 7 days of curing under ambient conditions, 7 days of curing and 7 days of seasoning in a climatic chamber, 3 days of curing and 7 days of seasoning in a climatic chamber. After the curing and seasoning period, peel strength of adhesive joints was determined in accordance with PN-59/C-89301. The highest strength from among the applied adhesive compositions was achieved by used E5/PAC/100:80 epoxy adhesive. Comparing the first variant of the seasoning time with the second, it was noticed that the seasoning of the samples for the next 7 days in the chamber negatively influenced their strength. However, the best results of peel strength were achieved for the third variant of the seasoning period. The presented variants of seasoning and their results diversity encourage further research to determine the technological factors affecting the best achievement of the assumed strength properties of adhesive joints.

K e y w o r d s: adhesive butt joints, peel strength, curing, seasoning, C45 steel

Wpływ czynników technologicznych na wytrzymałość połączeń

Wśród technologicznych czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych można wymienić [1,3,6,9,10]:

- sposób przygotowania powierzchni łączonych materiałów,
- rodzaj kleju (właściwości i skład chemiczny kleju),
- metoda przygotowania oraz nakładania kleju,
- czas żywotności kleju,
- warunki tworzenia połączeń klejowych (wilgotność, temperatura, warunki sezonowania klejonych elementów),
- utwardzanie spoiny klejowej (temperatura, docisk, czas, katalizator procesu utwardzania)
- inne.

Uzyskanie odpowiedniego połączenia klejowego, uwzględniając powtarzalność wymiarowo-kształową i uzyskaną wytrzymałość, wymaga rozpatrywania zarówno czynników materiałowych, konstrukcyjnych,

technologicznych, jak i warunków eksploatacyjnych analizowanych rodzajów połączeń. Czynniki materiałowymi badanymi podczas wykonywania połączeń klejowych są struktura powierzchni oraz właściwości fizyczne materiałów łączonych. Czynniki te wymuszają specjalistyczną metodę przygotowania powierzchni materiałów łączonych. Struktura powierzchni bardzo istotnie wpływa na uzyskanie połączenia o wymaganej wytrzymałości. Związane jest to przede wszystkim z wnikaniem kleju w mikropory powierzchni oraz powstawaniem zakotwieczeń adhezyjno-mechanicznych. Rozwinięcie struktury geometrycznej przygotowanej powierzchni do procesu klejenia, korzystnie wpływa na jej rozwinięcie.

Na właściwości połączenia klejowego, oprócz wymienionych czynników, wpływa również budowa chemiczna podstawowego składnika kleju (monomeru lub polimeru). Kohezja, adhezja, a także oddziaływanie czynników szkodliwych (np. promienie UV, ciepło), uzależnione są od składu chemicznego podstawowej bazy kleju. W zależności od budowy związku chemicznego, znajdującego się w składzie kleju, w trakcie utwardzania wytwarzają

się różne struktury klejów, które odznaczają się różnymi właściwościami chemicznymi i fizycznymi.

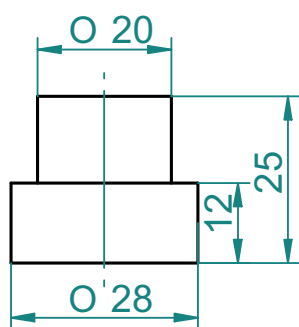
Temperatura utwardzania zależy od temperatury polimeryzacji oraz topnienia użytego kleju, pożądanych właściwości połączenia oraz temperatury mięknięcia łączonych materiałów. Podczas klejenia „na zimno”, nie jest wymagane ogrzewanie, ponieważ proces utwardzania odbywa się w temperaturze otoczenia przez odparowanie rozpuszczalnika. W procesie klejenia „na gorąco” podczas czasu utwardzania wymaga podwyższonej temperatury w granicach 120°C–180°C. Jest to ograniczenie tej metody, jednak kleje termoutwardzalne mają wyższą odporność i wytrzymałość w czasie eksploatacji [7,11].

Czas utwardzania i sezonowania jest uzależniony od temperatury utwardzania podczas procesu klejenia. Gdy proces utwardzania realizowany jest na zimno, wytrzymałość połączeń klejowych wzrasta z czasem utwardzania. Proces utwardzania na ciepło oraz gorąco zawiera optymalny przedział czasu, w którym połączenia klejowe charakteryzują się największą wytrzymałością [12–14]. Kolejnym czynnikiem powiązanim z utwardzaniem w przypadku klejów składających z rozpuszczalników jest czas schnięcia otwartego. W trakcie tego procesu rozpuszczalniki odparowują.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu warunków utwardzania i sezonowania na wytrzymałość połączeń klejowych doczołowych.

Badania doświadczalne

Przedmiotem badań były połączenia klejowe doczołowe elementów w postaci dwustopniowego wałka, wykonane ze stali C45. Wymiary elementów walcowych



Rys. 1. Element klejony – wałek dwustopniowy
Fig. 1. Joints element – a two-stage roller

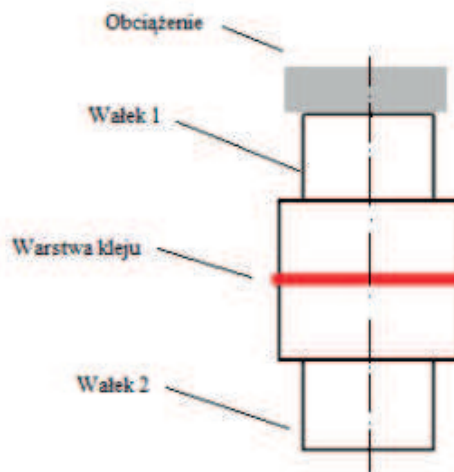
przedstawiono na rys. 1, a schemat wykonanych połączeń zaprezentowano na rys. 2.

Powierzchnie przeznaczone do klejenia, przed wykonaniem procesu zostały poddane obróbce mechanicznej za pomocą ścierniwa KL381 P320 oraz odtłuszczone z użyciem acetonu. Sposób odtłuszczenia opisano w pracy [11]. Połączenia klejowe wykonane w sposób doczołowy zostały obciążone obciążnikiem o masie 0,5 kg.

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano trzy rodzaje kompozycji klejowych. Skład tych kompozycji przedstawiono w tab. 1.

Kompozycje klejowe przygotowywano bezpośrednio przed procesem klejenia i наносzono w jednakowych ilościach na jedną z łączonych powierzchni. Wykonano po 10 połączeń dla każdej kompozycji klejowej w każdym wariantcie sezonowania. Tak przygotowane próbki pozostawiono do utwardzenia, następnie część z nich została poddana procesowi sezonowania w komorze klimatycznej SH661, gdzie temperatura wyniosła 80°C, zaś wilgotność – 80%. Zastosowane warunki utwardzania i sezonowania w trzech wariantach przedstawiono w tab. 2.

Podczas utwardzania, monitorowano temperaturę oraz wilgotność powietrza w pomieszczeniu, gdzie przechowywano próbki. Po upływie okresu utwardzania i sezonowania, połączenia klejowe poddano badaniom wytrzymałościowym, gdzie zmierzono siłę niszczącą oraz wytrzymałość na odrywanie. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-59/C-89301 [8].



Rys. 2. Połączenia klejowe doczołowe
Fig. 2. Adhesive butt joint

Tabela 1. Rodzaje kompozycji klejowych wykorzystanych w badaniach
Table 1. Types of epoxy adhesive compositions used in the research

Nr kompozycji	Skład		Stosunek stechiometrycznych	Oznaczenie kompozycji
	Żywica	Utwardzacz		
1.	Epidian 5	PAC	100:80	E5/PAC/100:80
2.	Epidian 53	PAC	100:80	E53/PAC/100:80
3.	Epidian 57	PAC	100:80	E57/PAC/100:80

Tabela 2. Zastosowane warianty utwardzania i sezonowania połączeń klejowych

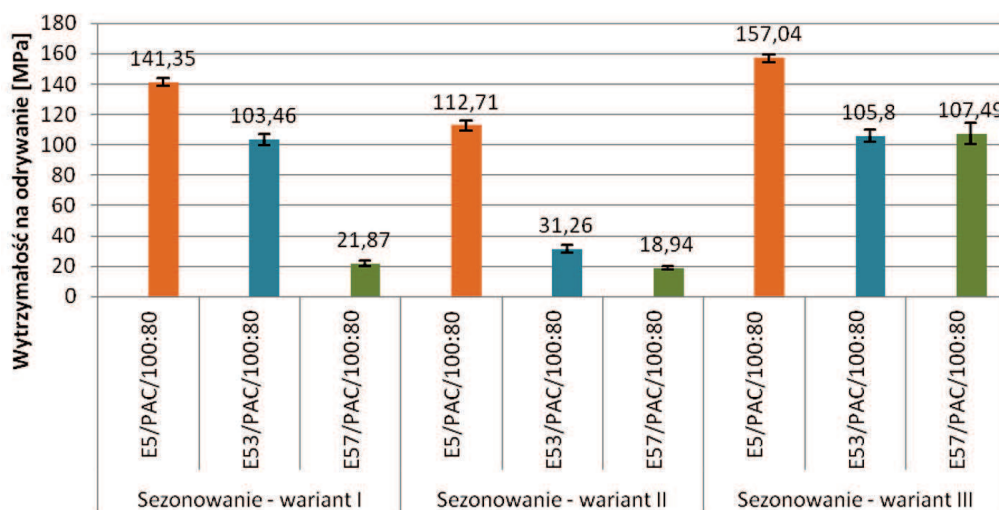
Table 2. The used variants of curing and seasoning adhesive joints

Wariant utwardzania i sezonowania	Czas utwardzania: – temperatura: 23 ± 1°C – wilgotność: 23 ± 2%	Okres sezonowania w komorze klimatycznej: – temperatura: 80°C – wilgotność: 80%
Wariant I	7 dni	-
Wariant II	7 dni	7 dni
Wariant III	3 dni	7 dni

Wyniki badań doświadczalnych

Uzyskane wyniki badań zebrano w tab. 3. Przedstawiono średnie wyniki wytrzymałości na odrywanie połączeń klejowych dla poszczególnych wariantów sezonowania.

Z analizy uzyskanych wyników badań wynika, że dla pierwszego wariantu okresu sezonowania najwyższą wytrzymałością na odrywanie charakteryzowały się połączenia klejowe wykonane za pomocą kompozycji klejowej E5/PAC/100:80. Średnia wytrzymałość tych połączeń wyniosła 9,11 MPa. Połączenia klejowe wykonane przy użyciu kompozycji E53/PAC/100:80 osiągnęły wytrzymałość na odrywanie na poziomie 6,66 MPa, czyli 73% wytrzymałości połączeń wykonanych kompozycją E5/PAC/100:80. Najmniejszą wytrzymałość wykazały połączenia przygotowane z użyciem kleju E57/PAC/100:80



Rys. 3. Zestawienie wyników wytrzymałości na odrywanie dla wszystkich wariantów utwardzania i sezonowania połączeń klejowych doczołowych

Fig. 3. Comparison of the peel strength results for all curing and seasoning variants of butt adhesive joints

Tabela 3. Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych połączeń klejowych

Table 3. Comparison of the results of strength tests of adhesive bonds

Kompozycja klejowa użyta w badaniach	Wielkość mierzona	Utwardzanie i sezonowanie		
		Wariant I	Wariant II	Wariant III
E5/PAC/100:80	Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	141,35 ± 2,27	112,71 ± 3,43	157,04 ± 2,67
	Nośność [N]	5 605,06 ± 128,60	4 611,75 ± 350,05	5 945,06 ± 101,63
E53/PAC/100:80	Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	103,46 ± 3,78	31,26 ± 2,55	105,80 ± 4,15
	Nośność [N]	4 102,82 ± 249,88	1 183,45 ± 245,28	4 258,46 ± 256,12
E57/PAC/100:80	Wytrzymałość na odrywanie [MPa]	21,87 ± 1,69	18,94 ± 1,24	107,49 ± 6,84
	Nośność [N]	1 059,37 ± 113,56	860,09 ± 106,71	4 279,71 ± 378,57

– 1,72 MPa, co stanowi jedynie 15% największego uzyskanego wyniku wytrzymałości.

Na rys. 3 przedstawiono zestawienie wyników nośności dla wszystkich wariantów analizowanych połączeń klejowych.

Z analizy otrzymanych wyników zaobserwować można, że każda grupa połączeń klejowych uzyskała najlepsze rezultaty w przypadku, gdy czas utwardzania wyniósł 3 dni, a następnie połączenia sezonowano przez 7 dni w komorze klimatycznej (wariant III), natomiast najniższa wartość wytrzymałości została uzyskana dla wariantu II (7 dni utwardzania + 7 dni w komorze klimatycznej). Uzyskane wyniki charakteryzowały się wysoką powtarzalnością – wartości odchyień standardowych mieszczą się w przedziale od 1,6% (dla I wariantu – kompozycja E5/PAC/100:80) do 8,15% (dla II wariantu – kompozycja E53/PAC/100:80).

Przeprowadzone badania oraz ich analiza udowodniły, jak ważnym czynnikiem jest aspekt utwardzania i sezonowania próbek oraz warunki, w jakich ono się odbywa. W pierwszym wariacie czas utwardzania wynosił 7 dni. Najwyższą wytrzymałość spośród zastosowanych kompozycji klejowych osiągnęły połączenia wykonane za pomocą kleju E5/PAC/100:80. Średnia wytrzymałość na odrywanie wyniosła 9,11 MPa. W drugim wariacie sezonowania (utwardzanie przez 7 dni oraz sezonowanie przez 7 dni w komorze klimatycznej), jak i w trzecim wariacie (utwardzanie przez 3 dni oraz sezonowanie przez 7 dni w komorze klimatycznej), również połączenia wykonane z użyciem kompozycji E5/PAC/100:80 osiągnęły najlepsze wyniki wytrzymałościowe wynoszące odpowiednio 7,49 MPa oraz 9,66 MPa. Ponadto, porównując pierwszy wariant czasu sezonowania z drugim wariantem, można zauważyć, że sezonowanie połączeń klejowych przez kolejne 7 dni w komorze wpłynęło negatywnie na ich wytrzymałość (wariant II).

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione wyniki badań odnoszą się do badanych połączeń klejowych doczołowych elementów walcowych wykonanych ze stali C45, wykonanych za pomocą trzech rodzajów klejów, uwzględniając czas utwardzania na zimno (w temperaturze otoczenia) oraz warianty sezonowania. Na podstawie przeprowadzonych badań przedstawiono następujące spostrzeżenia:

- połączenia klejowe wykonane za pomocą kompozycji klejowej na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5 oraz utwardzacza PAC (E5/PAC/100:80) uzyskały największą wytrzymałość na odrywanie spośród wszystkich badanych wariantów połączeń,
- dla danych serii połączeń klejowych w badanych wariantach sezonowania stwierdzono, że skrócenie czasu utwardzania przed sezonowaniem w komorze klimatycznej w temperaturze 80°C i wilgotności 80% z 7 do 3 dni korzystnie wpływa na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie wytrzymałości nawet

pięciokrotnie w przypadku połączeń wykonanych za pomocą kompozycji E57/PAC/100:80,

- czas utwardzania w temperaturze otoczenia wynoszący 7 dni jest wystarczającym do uzyskania odpowiednio wysokiej wytrzymałości dla kompozycji klejowych wykonanych na bazie żywicy epoksydowej Epidian 5 (E5/PAC/100:80) oraz Epidian 53 (E53/PAC/100:80). Inaczej jest natomiast w przypadku kompozycji bazującej na żywicy epoksydowej Epidian 57 (E57/PAC/100:80),
- Epidian 57 jest lepką kompozycją klejową modyfikowaną żywicą poliestrową, co wyróżnia ją od pozostałych żywic [2,4,5]. Wnioskować więc można, że skład chemiczny tej żywicy, wymusza na użytkowniku stosowania odpowiednich parametrów w zakresie utwardzania i sezonowania spoin klejowych, w celu uzyskania korzystniejszych właściwości wytrzymałościowych.

Czas utwardzania i sezonowania jest jednym z parametrów wpływającym na wytrzymałość połączeń klejowych, jednak jest on ściśle powiązany zarówno z rodzajem kleju, jak i warunkami utwardzania. Zaprezentowane warianty sezonowania oraz różnorodność ich wyników zachęcają do dalszych badań, mających na celu określenie czynników technologicznych, wpływających na jak najlepsze osiągnięcie założonych właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych.

LITERATURA

- [1] Brockmann W. et. al. 2009. "Adhesive Bonding". Materials, Applications and Technology. Wiley-VCH, Weinheim.
- [2] Fink J.K. 2005. "Epoxy resin. Chapter 3 in: Reactive Polymers Fundamentals and Applications". A volume in Plastics Design Library.
- [3] Godzimirski J. i in. 1997. „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [4] Godzimirski J., A. Komorek, M. Rośkowicz. 2008. „Trwałość zmęczeniowa tworzywa Epidian 57”. *Polimery* (10): 737–742.
- [5] Godzimirski J., M. Rośkowicz. 2002. „Wytrzymałość doraźna i długotrwała oraz pełzanie kleju Epidian 57”. *Polimery* (10): 721–726.
- [6] Kuczmaszewski J. 1990. „Technologia śmigłowców. Teoria i technika klejenia”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [7] Lapique F., K. Redford. 2013. "Curing effects on viscosity and mechanical properties of a commercial epoxy resin adhesive". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (27): 1933–1950.
- [8] PN-59/C-89301 Kleje do metali. Oznaczanie wytrzymałości na odrywanie.
- [9] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [10] Rudawska A. i in. 2016. „Wytrzymałość połączeń klejowych po różnym czasie sezonowania”. *Przetwórstwo Tworzyw* (3): 126–131.

- [11] Rudawska A. 2016. „Wpływ wybranych czynników technologicznych i eksploatacyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych blach tytanowych”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (3): 45–48.
- [12] Murakami S. et. al. 2016. “Strength of cylindrical butt joints bonded with epoxy adhesives under combined static or high-rate loading”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (67): 86–93.
- [13] Pethrick R. A. 2015. “Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding—a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L”. *Journal of Materials: design and applications* (5): 349–379.
- [14] Spaggiari A., D. Castagnetti., E. Dragoni. 2012. “Experimental tests on tubular bonded butt specimens: effect of relief grooves on tensile strength of the adhesive”. *The Journal of Adhesion* (88): 499–512.

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

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

KATALOGOWA WYDAJNOŚĆ WĘGLIKOWYCH FREZÓW TRZPIENIOWYCH DO OBRÓBKI ZGRUBNEJ

Catalog performance of solid carbide endmills for roughing milling

Leszek SKOCZYLAŚ, Krystyna SKOCZYLAŚ

Streszczenie: Artykuł charakteryzuje współczesne metody zgrubnej obróbki skrawaniem. Na przykładzie trzpieniowych frezów pełnowęglkowych wskazuje innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne w ich budowie. Dla wybranych narzędzi, pochodzących od różnych producentów oraz zaleceń dotyczących parametrów skrawania, zawartych w katalogach narzędziowych, przedstawia obliczenia wydajności obróbki. Obliczenia odnoszą się do narzędzi dedykowanych do obróbki uniwersalnej oraz do obróbki wysokowydajnej HPC. Uzyskane wyniki są podstawą wyciągnięcia wniosków.

Słowa kluczowe: obróbka zgrubna, obróbka wysokowydajna, frezy walcowo-czołowe

Abstract: The paper describes modern methods of roughing machining. On the example of solid carbide endmills, it indicates innovative solutions in their construction. For selected tools from different manufacturers and recommendations for cutting parameters contained in tool catalogs, it presents machining performance calculations. The calculations refer to tools dedicated for universal machining and for HPC high performance machining. The results obtained are the basis for drawing conclusions.

Key words: roughing machining, high performance machining, endmills

Wprowadzenie

Jednym z elementów przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw produkcyjnych oprócz kosztu wytwarzania wyrobu jest czas jego wykonania, który zależy od szeregu czynników wśród których wyróżnić można organizację produkcji, realizowaną technologię wytwarzania oraz posiadane zaplecze produkcyjne w postaci obrabiarek i oprzyrządowania. Aktualna oferta rynkowa w obszarze środków produkcji jest bardzo szeroka. Odnosi się do wszystkich metod wytwarzania. Prezentowane opracowanie odnosi się do jednej z metod obróbki tj. obróbki skrawaniem. W obszarze tym można zaobserwować dynamiczny rozwój materiałów narzędziowych, narzędzi, przyrządów, uchwytów, obrabiarek jak i samych metod obróbki. W odniesieniu do obróbki zgrubnej frezowaniem, obok metod konwencjonalnych można spotkać się z metodami wysokowydajnymi HPC (High Performance Cutting) czy też szybkościowymi HSM (High Speed Machining) [1, 20–23]. Realizacja wymienionych metod wiąże się ze spełnieniem określonych wymagań w stosunku do wykorzystywanych środków. Stąd też w ofercie wielu producentów znajdują się wyroby dedykowane pod określony sposób obróbki [2]. W grupie frezów można wyróżnić narzędzia do zastosowań uniwersalnych, obróbki określonej grupy materiałów, obróbki wysokowydajnej, szybkościowej itp. Każdy z wymienionych sposobów obróbki charakteryzuje się określoną specyfiką. Prezentowane opracowanie ogranicza się do trzpieniowych frezów pełnowęglkowych uniwersalnych oraz HPC przeznaczonych do obróbki zgrubnej. Podejmuje zagadnienia różnorodności zalecanych w katalogach producentów parametrów skrawania

dla narzędzi tego samego typu o podobnym przeznaczeniu oraz ich wpływie na wydajność obróbki.

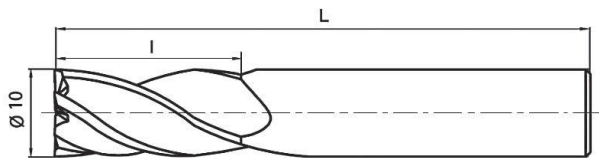
Odmiany obróbki zgrubnej frezowaniem

Istota obróbki zgrubnej skrawaniem polega na szybkim usunięciu dużych ilości materiału przy zachowaniu stosunkowo niskiej dokładności wymiarowej przedmiotu oraz jakości uzyskiwanej powierzchni. Małe wymagania w odniesieniu do dokładności (przeważnie powyżej 12 klasy dokładności) i chropowatości powierzchni (parametr R_a większy od $10 \mu\text{m}$), sprawiają że w obróbce tej stosowane są duże głębokości skrawania i duże posuwy. Przyjmowanie takich parametrów pozwala na dużą wydajność obróbki. W konwencjonalnym podejściu obróbki zgrubnej wyszczególniany jest wariant obróbki rowków, gdzie narzędzie usuwa materiał całą średnicą. Współczesne podejście do obróbki zgrubnej wyszczególnia kolejne warianty tej obróbki, określone udziałem średnicy narzędzia w usuwaniu materiału. Wyróżniana jest obróbka wysokowydajna HPC z udziałem 0,4–0,15 średnicy narzędzia w usuwaniu materiału oraz obróbka zgrubna szybkościowa HSM z udziałem 0,15–0,05 średnicy narzędzia. Mniejszy udział zaangażowania narzędzia w usuwanie materiału od 0,05 jego średnicy taktowany jest jako obróbka dokładna. Przy obróbce całą szerokością narzędzia, osiowa głębokość skrawania, ze względu na wytrzymałość narzędzia, najczęściej ograniczona jest do wartości odpowiadającej jego średnicy. Przy mniejszym udziale średnicy narzędzia w usuwaniu materiału osiowe zagłębienie narzędzia może być większe i dochodzi nawet do kilku jego średnic. Sposób obróbki z niewielkim kątem opasania narzędzia przez materiał zaimplementowany

jest w środowisku CAM w strategii trochoidalnej [3]. Mały kąt opasania narzędzia sprawia, że występuje mniejsze wydzielanie ciepła, co sprawia, że narzędzie może pracować z większą prędkością skrawania. Ponadto, przy małym udziale średnicy narzędzia w usuwaniu materiału, dla zapewnienia określonej grubości wióra należy dodatkowo zwiększyć posuw na ostrze. Wymienione czynniki oraz współczesne materiały narzędziowe i stosowane powłoki sprawiają, że narzędzie może pracować z bardzo dużą prędkością obrotową i prędkością posuwu, kwalifikując się do szybkościowych, wysokowydajnych metod obróbki. Realizacja takiego sposobu obróbki narzuca z kolei wymagania dotyczące odpowiedniej konstrukcji i dokładności wykonania narzędzi. Chodzi tutaj o eliminację drgań narzędzi oraz efektywne usuwanie wiórów. Sprostanie tym wymaganiom związane jest z odpowiednią konstrukcją ostrzy frezów, zapewniającą ich zwiększoną wytrzymałość czy też rozdzielanie wiórów, odpowiednią konstrukcją rowków wiórowych zapewniającą odpowiednie odprowadzanie usuwanego materiału. Stosowane jest również nierównomierne rozmieszczenie ostrzy (zmienna podziałka) czy też różne kąty linii śrubowych kolejnych ostrzy narzędzia. W narzędziach dedykowanych pod obróbkę wysokowydajną często zwracana jest uwaga na specjalny gatunek materiału narzędziowego oraz zastosowanej powłoki ochronnej.

Analiza porównawcza katalogowej wydajności narzędzi

Obliczenia wydajności frezowania frezów uniwersalnych oraz wysokowydajnych w zależności od zalecanych parametrów skrawania przeprowadzono dla frezu węglowego powlekanego o geometrii określonej normą DIN6527 z czterema ostrzami o średnicy $\varphi = 10$ mm, całkowitej długości $L = 72$ mm oraz długości części roboczej $l = 22$ mm. Wymienione parametry przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Podstawowe parametry geometryczne frezu
Fig. 1. Basic geometrical parameters of the endmill

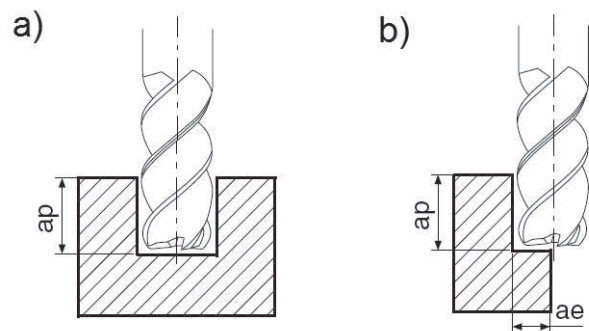
Różnice pomiędzy porównywanymi narzędziami, pochodzącymi od poszczególnych producentów, dotyczyły geometrii ostrza, podziałki, kąta rowków wiórowych, rodzaju węgla oraz zastosowanej powłoki. W prezentowanym opracowaniu nie są one wyszczególniane. Założono, że obróbce będzie poddana stal węglowa C45. Dla każdego narzędzia z katalogów producentów odczytano zalecenia dotyczące takich parametrów jak prędkość skrawania V , posuw na ostrze f_z , promieniowa głębokość skrawania a_e oraz poosiowa głębokość skrawania a_p . Na

podstawie wymienionych parametrów w każdym przypadku obliczono wydajność objętościową frezowania Q z następującej zależności:

$$Q = \frac{a_p * a_e * z * f_z * V}{\pi * d}$$

gdzie: Q – objętość skrawania [cm^3/min], a_p – głębokość skrawania [mm], a_e – szerokość skrawania [mm], z – liczba ostrzy, f_z – posuw na ostrze [mm], V – prędkość skrawania [m/min], d – średnica narzędzia [mm].

Obliczenia wydajności skrawania obliczono dla obróbki całą średnicą narzędzia przy zalecanym przez producentów w katalogach zagłębieniu oraz dla frezowania bocznego zgodnie z parametrami, określonymi w katalogach. Oba przypadki obróbki zilustrowano na rys. 2.



Rys. 2. Warianty obróbki poddane obliczeniom
Fig. 2. Variants of machining subjected to calculations

Z uwagi na fakt, że przeprowadzone obliczenia służą tylko do wskazania różnorodności w wydajności poszczególnych narzędzi, wynikającej z zalecanych parametrów obróbkowych, a nie do celów marketingowych, w prowadzonych analizach nie podano nazw producentów ani symboli narzędzi. W oznaczeniu narzędzia producentom przypisano kolejne litery alfabetu, a wybrane narzędzia o największej wydajności z oferty danego producenta ponumerowano. Ponadto w oznaczeniu narzędzi zawarto literę U lub Q, co informuje o przeznaczeniu danego narzędzia do obróbki uniwersalnej lub wysokowydajnej. Spośród wielu przeanalizowanych katalogów narzędzi [4–19], do analizy wybrano sześciu producentów, którzy w swej ofercie mają zarówno frezy do obróbki uniwersalnej, jak również frezy dedykowane do obróbki wysokowydajnej. Wyniki obliczeń wydajności dla obróbki całą średnicą narzędzia dla narzędzi uniwersalnych oraz dedykowanych do obróbki wysokowydajnej przedstawiono w tab. I i II.

Analizując wartości w tabelach można zauważyć pewne rozbieżności w wydajności skrawania narzędzi uniwersalnych, wynikające z różnic w zaleceniach prędkości skrawania oraz posuwu. Wszyscy producenci zalecają identyczną głębokość skrawania, odpowiadającą średnicy narzędzia. Wyjątek stanowi jedno narzędzie producenta A, przez co i wydajność jest znacząco mniejsza. Odnosząc się do narzędzi wysokowydajnych

Tabela I. Wydajność narzędzi uniwersalnych dla obróbki całą średnicą
Table I. Performance of universal tools for the slotting machining

Narzędzie	V [m/min]	f_z [mm/ostrze]	a_e [mm]	a_p [mm]	Q [cm ³ /min]
A1U	120	0,05	10	5	38,22
A2U	140	0,06	10	10	107,01
B1U	130	0,06	10	10	99,36
B2U	130	0,04	10	10	66,24
C1U	125	0,042	10	10	66,88
C2U	125	0,042	10	10	66,88
D1U	150	0,05	10	10	95,54
D2U	160	0,035	10	10	71,34
E1U	100	0,05	10	10	63,69
E2U	100	0,05	10	10	63,69
F1U	175	0,026	10	10	57,96
F2U	130	0,039	10	10	64,59

Tabela II. Wydajność narzędzi wysokowydajnych dla obróbki całą średnicą
Table II. Performance of HPC tools for the slotting machining

Narzędzie	V [m/min]	f_z [mm/ostrze]	a_e [mm]	a_p [mm]	Q [cm ³ /min]
A1Q	120	0,1	10	10	152,87
A2Q	120	0,05	10	12	91,72
B1Q	110	0,04	10	10	56,05
B2Q	140	0,04	10	10	71,34
C1Q	270	0,05	10	10	171,97
C2Q	180	0,07	10	10	160,51
D1Q	150	0,05	10	14	133,76
D2Q	145	0,055	10	12,5	126,99
E1Q	186	0,06	10	10	142,17
E2Q	186	0,06	10	10	142,17
F1Q	200	0,05	10	5	63,69
F2Q	250	0,05	10	5	79,62

można zaobserwować znaczący wzrost wydajności, jednak nie we wszystkich przypadkach. Niektóre narzędzia, pomimo przeznaczeniu do obróbki wysokowydajnej, zawierają zalecenia odpowiadające narzędziom uniwersalnym. Wzrost wydajności skrawania wynika przede wszystkim ze zwiększonej prędkości skrawania oraz nieznacznie większego posuwu. W niektórych przypadkach można zaobserwować większą zalecaną głębokość skrawania niż dla narzędzi uniwersalnych. Wyniki obliczeń wydajności dla obróbki bocznej przedstawiono w tab. III i IV.

Obróbka boczna narzędziami uniwersalnymi (tab. III) charakteryzuje się nieznacznie mniejszą wydajnością niż obróbka całą szerokością narzędzia. W zaleceniach widać wyższe wartości prędkości skrawania jak i wyższe wartości posuwu na ostrze. Znacznie częściej aniżeli w obróbce całą szerokością narzędzia występują

większe głębokości skrawania. W przypadku narzędzi wysokowydajnych różnice są bardzo duże. Dotyczą one zarówno zalecanych parametrów obróbki jak i wynikającej z tego wydajności. W porównaniu z narzędziami uniwersalnymi zauważalny jest wzrost prędkości oraz głębokości skrawania, jednak nie we wszystkich przypadkach. Występują narzędzia dla których zalecane parametry odpowiadają parametrom dla narzędzi uniwersalnych.

Podsumowanie

Analizując ofertę rynkową w zakresie narzędzi do obróbki zgrubnej można stwierdzić, że jest ona bardzo szeroka. Uzyskane wyniki wydajności obróbki, bazujące na zaleceniach producentów, także są różnorodne. Porównując zalecane parametry skrawania dla obróbki

Tabela III. Wydajność narzędzi uniwersalnych dla obróbki bocznej
Table III. Performance of universal tools for the roughing machining

Narzędzie	V [m/min]	f_z [mm/ostre]	a_e [mm]	a_p [mm]	Q [cm ³ /min]
A1U	150	0,09	3	10	51,59
A2U	175	0,095	4	10	84,71
B1U	150	0,06	4	10	45,86
B2U	140	0,05	4	15	53,50
C1U	125	0,042	5	15	50,16
C2U	125	0,042	5	15	50,16
D1U	180	0,05	8	10	91,72
D2U	200	0,04	4,5	15	68,79
E1U	100	0,05	4	15	38,22
E2U	100	0,05	4	10	38,22
F1U	175	0,041	3	15	53,17
F2U	130	0,061	3	15	45,46

Tabela IV. Wydajność narzędzi wysokowydajnych dla obróbki bocznej
Table IV. Performance of HPC tools for the roughing machining

Narzędzie	V [m/min]	f_z [mm/ostre]	a_e [mm]	a_p [mm]	Q [cm ³ /min]
A1Q	140	0,1	4	10	71,34
A2Q	145	0,06	4	12	53,20
B1Q	130	0,05	4	10	33,12
B2Q	150	0,04	4	10	30,57
C1Q	350	0,06	4	20	214,01
C2Q	200	0,07	3	20	107,01
D1Q	180	0,05	5,5	15	94,59
D2Q	180	0,075	4	15	103,18
E1Q	196	0,05	5	10	62,42
E2Q	196	0,05	5	10	62,42
F1Q	200	0,05	5	10	63,69
F2Q	250	0,05	5	10	79,62

całą szerokością narzędzia z parametrami dla obróbki bocznej można zauważyć ich wyższe wartości w drugim przypadku. Wynika to z mniejszego kąta opasania narzędzia przez materiał obrabiany a przez to możliwości korekty prędkości skrawania i posuwu. To samo zjawisko obserwowane jest dla narzędzi wysokowydajnych. Zestawiając z kolei narzędzia wysokowydajne z uniwersalnymi w większości przypadków widać wzrost wydajności obróbki. W niektórych przypadkach, pomimo dedykacji narzędzi pod obróbkę HPC, zalecane parametry są porównywalne z parametrami dla narzędzi uniwersalnych. Bazując tylko na zaleceniach można stwierdzić, że może to być działanie marketingowe. Podsumowując należy jeszcze zauważyć, że na wydajność obróbki istotny wpływ wywiera prędkość skrawania. Ma ona również istotny wpływ na trwałość ostrza narzędzia. W przypadku analizowanych danych

zalecane prędkości skrawania są różne, zaś w katalogach brakuje informacji na temat okresu trwałości ostrza [24]. Jest to istotny parametr zwłaszcza w analizie kosztów obróbki. Bez tej informacji obliczona wydajność może być wysoka, jednak trwałość narzędzia niska i odwrotnie. Tak więc okres trwałości ostrza powinien być również podawany w katalogach przy zaleceniach dotyczących parametrów obróbki. Informacje te pokazywałyby pełny obraz opłacalności wykorzystywania narzędzi danego producenta.

LITERATURA

- [1] Burek J., M. Płodzień. 2012. „Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach”. *Mechanik* (7).
- [2] Guhring. 2014. „Frezowanie wysoko wydajne frezami Ratio”. *Mechanik* (4).

- [3] Józwik J., M. Kobyłka. 2011. „Badanie wpływu parametrów geometrycznych kieszeni prostokątnej oraz warunków realizacji procesu skrawania na drgania podczas frezowania trochoidalnego”. *Postępy Nauki i Techniki* (8).
- [4] Katalog narzędzi skrawających BEWE
- [5] Katalog narzędzi skrawających FANAR
- [6] Katalog narzędzi skrawających FENES
- [7] Katalog narzędzi skrawających FRAISA
- [8] Katalog narzędzi skrawających FRANKEN
- [9] Katalog narzędzi skrawających GUHRING
- [10] Katalog narzędzi skrawających KYOCERA
- [11] Katalog narzędzi skrawających MAYKESTAG
- [12] Katalog narzędzi skrawających MITSUBISHI
- [13] Katalog narzędzi skrawających PAFAMA
- [14] Katalog narzędzi skrawających PROCUTTER
- [15] Katalog narzędzi skrawających RUKO
- [16] Katalog narzędzi skrawających SANDVIK
- [17] Katalog narzędzi skrawających SECO
- [18] Katalog narzędzi skrawających WALTER
- [19] Katalog narzędzi skrawających VAN HOORN
- [20] Kuczmaszewski J. 2011. „Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu”. „Komputerowo zintegrowane zarządzanie”. Praca pod red. Knosala R. Oficyna Wyd. PTZP. t. 2.
- [21] Oczos K.E. 2002. „Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów”. Cz. 1. Obróbka skrawaniem. *Mechanik* (8–9)
- [22] Pieśko P., I. Zagórski. 2011. „Analiza porównawcza metod frezowania HSM, HPC oraz frezowania konwencjonalnego wysokokrzemowych stopów aluminium”. *Postępy Nauki i Techniki* (7).
- [23] Poradnik Obróbki skrawaniem. Garant 2010.
- [24] Przybylski L. 2000. „Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami”. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.

dr hab. inż. Leszek Skoczylas – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: lesko@prz.edu.pl

dr Krystyna Skoczylas – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, e-mail: kszfb@prz.edu.pl

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВРАЩЕНИЯ ДЕТАЛИ НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

Analysis of the effect of the rotation of the part on the reliability the robotics' assembly process

Badania wpływu efektu obrotów części na niezawodność zrobotyzowanego montażu

Михаил В. ВАРТАНОВ, Инна Н. ЗИНИНА, Чан Чунг ТА

Abstract: The main stage of automatic assembly is the process of parts mating. At this stage, there are problems associated with the probability of jamming the parts. To solve this problem, adaptive assembly heads are usually used. However, known dynamic models and control algorithms based on them relate to plane-parallel motion. In this case, considerable frictional forces arise that preventing coupling. The article deals with the assembly method using the rotational motion effect of the installed part. The presence of rotation makes it possible to significantly reduce the part of the friction force, which prevents the movement of the part. In this case, the task becomes spatial.

A dynamic model of the coupling process with the use of the industrial robot ABB IRB140, equipped with an adaptive head, which has the ability to rotate about its own axis, is constructed. The rotation is realized by the kinematics of the output link of the robot.

The mathematical model of the coupling process is considered in the form of Lagrange equations of the second kind. Two cases are considered: with the installation without contact with the chamfer and with the slip on the chamfer. The resulting systems of differential equations allow us to investigate the process of a robotic assembly using the effect of rotation of the gripper. On the basis of mathematical models, both direct and inverse tasks of dynamics can be solved.

The created mathematical model will be used to determine the conditions of the robotic assembly using the adaptation and the rotation effect of the part.

Keywords: robotic assembly, adaptive gripper, effect of rotation, mathematical model

Сборочные операции ставят перед промышленными роботами требования безотказности выполнения сборочных операций. Одним из способов повышения технологической надежности роботизированной сборки является применение адаптивных головок. В ряде работ адаптивность схватов рассматривается с позиции расширения диапазона размеров [1] и конфигураций собираемых деталей [2]. В данной работе нами рассматривается адаптивность схвата, как возможность компенсации погрешности расположения деталей перед сопряжением.

Известные динамические модели роботизированной сборки цилиндрических соединений с пассивной адаптацией [3, 4, 5], а также построенные на их основе алгоритмы управления, относятся к случаю плоскопараллельного движения детали. При малых зазорах в случае плоскопараллельного движения детали могут возникнуть значительные по величине силы трения скольжения в местах её контакта с базовой деталью, приводящие к заклиниванию.

Использование сканирования по различным траекториям с целью обеспечения условий собираемости

является одним из широко применяемых в теории и промышленной практике подходов [6]. Однако в рассматриваемых моделях решается задача совмещения контуров деталей и не рассматривается сам процесс сопряжения.

Одним из путей повышения эффективности сборки, особенно при наличии малых зазоров в соединении, являются различные способы уменьшения величины сил трения. Вращательное движение устанавливаемой детали может обеспечить достижение данного эффекта. Эффективность вращательного движения в процессе обеспечения условий собираемости при роботизированной сборке рассматривалась в [7]. Экспериментально была доказана эффективность вращения детали при пневматической сборке [8].

Построена динамическая модель процесса сборки цилиндрического соединения с применением промышленного робота типа ABB IRB-140, снабженного пассивной адаптивной сборочной головкой. Схват робота может совершать в процессе сопряжения деталей вращательное движение вокруг своей вертикальной оси, совпадающей с осью вращения выходного

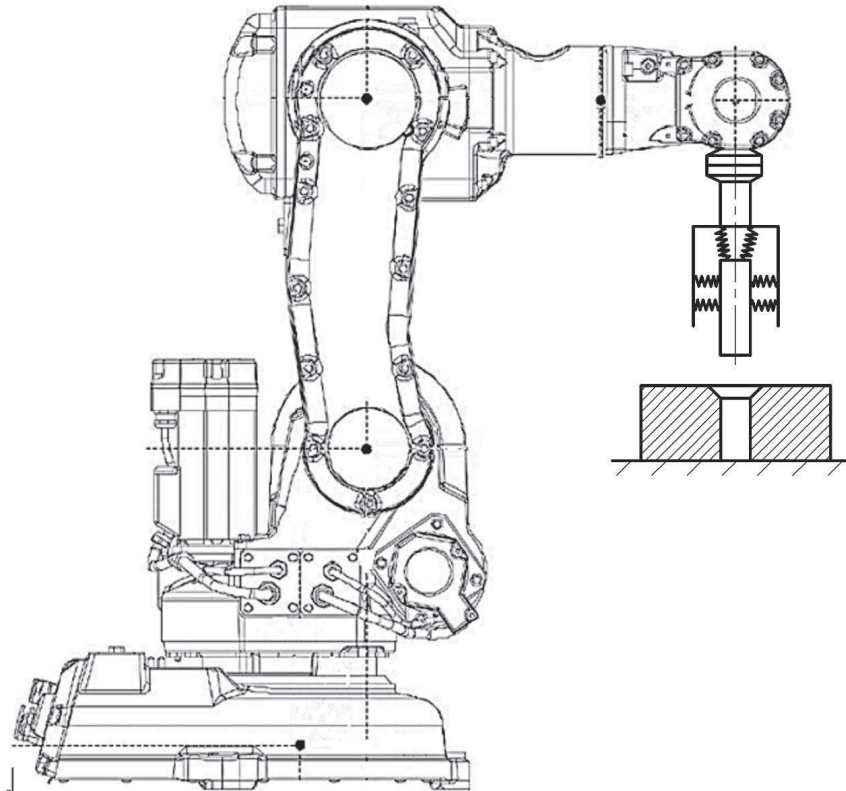


Рис. 1. Упрощенная схема адаптивной головки сборочного робота
 Fig. 1. Simplified diagram of the adaptive head of the assembly robot

звена робота. Расчетная кинематическая схема робота представлена на рис. 1.

Манипулятор робота, учитывая движение схвата, имеет шесть степеней свободы. Однако, в модели учитываются только четыре звена робота, как значимо влияющие на динамику процесса. За обобщенные координаты манипулятора примем параметры, характеризующие перемещение последующего звена по отношению к предыдущему (ψ – угол поворота схвата относительно выходного звена).

Для определенности на рис. 1 приведены системы координат c_i, x_i, y_i, z_i ($i=1, 2, 3, 4$) жестко связанные с соответствующими звеньями и со схватом. Система координат $(0, x_0, y_0, z_0)$ связана с базовой деталью и является неподвижной.

Основной целью этого динамического моделирования является выявление эффектов, обусловленных наличием вращательного движения вала вместе со схватом. В расчетную схему механической системы введен ряд допущений, упрощающих динамическое моделирование.

Прежде всего пренебрежем упругой податливостью звеньев манипулятора робота. В системе также будет иметь место погрешность позиционирования закрепленной в схвате детали (вала) из-за наличия между схватом и деталью упругих связей. Упругие связи могут быть причиной возникновения колебаний детали на этапе ее транспортировки к месту монтажа,

что в конечном итоге приведет к погрешности ее позиционирования.

При динамическом моделировании как этапа транспортировки детали к месту монтажа, так и этапа собственно сопряжения деталей необходимо учитывать функциональные возможности выбранной пассивной адаптивной сборочной головки

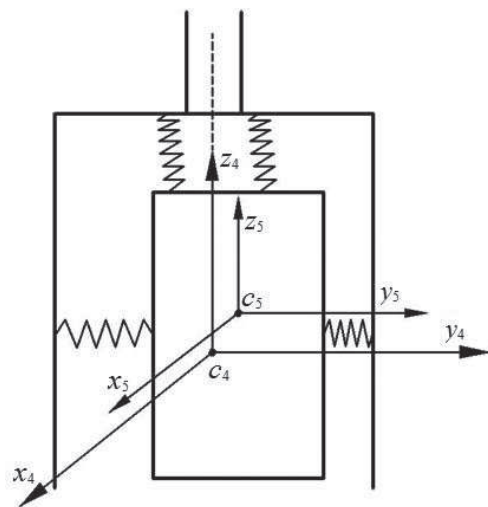


Рис. 2. Кинематическая схема пассивной адаптивной сборочной головки
 Fig. 2. Kinematic diagram of the passive adaptive assembling head

и обусловленное ею дополнительное число степеней свободы механической системы.

Предполагаем, что упругие связи в схвате допускают перемещение детали в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям, а именно в направлении координатных осей y_4 и z_4 (рис. 2).

Для определенности свяжем жестко с деталью систему координат $c_5 x_5 y_5 z_5$ с началом в центре масс (точке c_5) детали. При этом считаем, что в положении равновесия детали системы координат $c_4 x_4 y_4 z_4$ и $c_5 x_5 y_5 z_5$ (жестко связанные соответственно со схватом и с деталью) совпадают. В этом случае упругие связи в схвате будут допускать перемещение центра масс детали (точки C_5) по отношению к схвату в координатной плоскости $c_4 y_4 z_4$, а растяжение или сжатие упругих элементов, отсчитываемые от положения равновесия в направлении координатных осей y_4 и z_4 будут равны соответствующим координатам точки c_5 (η и ζ) и в системе координат $c_4 x_4 y_4 z_4$ (рис. 2).

Таким образом, рабочими движениями исполнительного механизма робота на этапе сопряжения деталей являются: поступательное перемещение выходного звена вертикально вниз и вращение схвата вокруг собственной вертикальной оси. При этом механическая система, состоящая из трех тел, (выходного звена манипулятора, схвата и упруго закрепленной в схвате детали), в случае отсутствия контакта детали с цилиндрическим отверстием имеет четыре степени свободы. За обобщенные координаты данной механической системы выберем параметры ψ . Как было указано ранее, и определяют соответственно поступательное перемещение выходного звена робота по отношению к пятому звену и угол поворота схвата вокруг вертикальной оси по отношению к выходному звену, а параметры η и ζ определяют поступательное перемещение детали по отношению к схвату.

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы представим в форме уравнений Лагранжа II рода [9]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} - \frac{\partial T}{\partial q_3} = Q_3, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_4} - \frac{\partial T}{\partial q_4} = Q_4, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \psi}{\partial \dot{\psi}} - \frac{\partial \psi}{\partial \psi} = Q_5, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \xi}{\partial \dot{\xi}} - \frac{\partial \xi}{\partial \xi} = Q_6, \end{cases} \quad (1)$$

где

T – кинетическая энергия механической системы;

Q_j ($j = 3, 4, \dots, 6$) – обобщенные силы, соответствующие выбранным обобщенным координатам.

Кинетическую энергию рассматриваемой механической системы представим в виде суммы кинетических энергий тел, входящих в эту систему:

$$T = T_3 + T_4 + T_5, \quad (2)$$

где T_i ($i = 3, 4, 5$) – кинетические энергии соответственно выходного звена манипулятора робота, схвата и детали.

При этом на основании теоремы Кёнига [9] были получены выражения кинетической энергии звеньев.

С использованием метода преобразования однородных координат были определены координаты детали в неподвижной системе $0 x_0 y_0 z_0$.

Обобщенные силы Q_3 и Q_4 , входящие в правые части первых двух уравнений (1), можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$Q_3 = Q_{3g} + Q_{3b}, \quad (3)$$

$$Q_4 = Q_{4g} + Q_{4b},$$

где

Q_{3g} , Q_{4g} – обобщенные силы, обусловленные усилиями и моментами, развиваемыми соответственно приводами выходного звена и схвата;

Q_{3b} , Q_{4b} – а также Q_5 и Q_6 – обобщенные силы, обусловленные остальными активными силами, действующими на рассматриваемую механическую систему, к которым относятся силы тяжести тел, силы упругости и диссипативные силы внутреннего вязкого трения в упругих элементах схвата.

Таким образом, обобщенные силы Q_{3g} и Q_{4g} , соответствующие выбранным обобщенным координатам q_3 и $q_4 = \psi$, будут равны:

$$Q_{3g} = -P_3, \quad Q_{4g} = M_C, \quad (4)$$

где

P_3 – усилие, развиваемое приводом выходного звена робота;

M_C – момент, развиваемый двигателем выходного звена.

Обобщенные силы Q_{jb} ($j = 3, 4, 5, 6$) могут быть определены по формулам:

$$Q_{jb} = \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j}, \quad (j = 3, 4, 5, 6), \quad (5)$$

где

Π – потенциальная энергия системы,

Φ – диссипативная функция, связанная с демпфированием в упругих элементах.

Далее были получены аналитические выражения для потенциальной энергии системы и диссипативной функции. При получении аналитических выражений было принято допущение, что коэффициенты жесткости упругих связей в схвате, а также коэффициенты демпфирования по обоим направлениям одинаковы и равны соответственно c и b .

Для получения аналитических зависимостей для обобщенных сил стало возможным определить

дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы (в случае отсутствия контакта штифта с базовой деталью) в форме уравнений Лагранжа II рода (1) с учетом (3) и (4) примут вид:

$$\begin{cases} (m_3 + m_4 + m_5)\bar{q}_3 + m_5\bar{\xi} = -P_3 - (m_3 + m_4 + m_5)g, \\ (J_{z4}^{(cx)} + J_{z5}^{(g)})\bar{\psi} + m_5\eta^2\bar{\psi} + 2m_5\eta\dot{\eta}\dot{\psi} = M_c, \\ m_5(\ddot{q}_3 + \ddot{\xi}) = -c\xi - b\dot{\xi}, \\ m_5\ddot{\eta} - m_5\eta\psi^2 = -c\eta - b\dot{\eta}. \end{cases} \quad (6)$$

Далее рассмотрим случай динамического моделирования этапа сопряжения деталей при наличии контакта вала с базовой деталью, имеющей фаску

Следует отметить, что при наличии контакта сопрягаемых деталей уменьшается число степеней свободы рассматриваемой механической системы и соответственно число независимых обобщенных координат также должно стать на единицу меньше.

При наличии контакта сопрягаемых деталей, за обобщенные координаты механической системы выбираем параметры ξ, η, ψ .

Для получения дифференциальных уравнений движения рассматриваемой механической системы при наличии контакта сопрягаемых деталей необходимо прежде всего найти выражение кинетической энергии системы в виде зависимости от трех, вновь выбранных обобщенных координат q_j ($j = 3, 4, 5$).

Дифференциальные уравнения движения рассматриваемой механической системы (при наличии контакта устанавливаемой детали с базовой) в форме уравнений Лагранжа II рода примут вид:

$$\begin{aligned} (m_3 + m_4)\bar{q}_3 + \frac{m_5(q_3 + \bar{\xi})}{\sin^2 \beta} - m_5 \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \xi)\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta\psi^2 = \\ = -P_3 - (m_3 + m_4 + m_5)g - c \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \xi)\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta - b(\dot{q}_3 + \dot{\xi})\text{ctg}^2\beta + Q_3(\bar{F}_p), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left\{ J_{z4}^{(c)} + J_{z5}^{(g)} + m_5 \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \xi)\text{ctg}\beta \right]^2 \right\} \ddot{\psi} + \\ + 2m_5\dot{\psi} \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \xi)\text{ctg}\beta \right] (\dot{q}_3 + \dot{\xi})\text{ctg}\beta = M_c + Q_4(\bar{F}_p), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_5(\bar{q}_3 + \bar{\xi})}{\sin^2 \beta} - m_5 \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \xi)\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta\psi^2 = \\ = -c\xi - b\dot{\xi} - c \left[\frac{1}{2}(D_0 - d) + (q_3 + \xi)\text{ctg}\beta \right] \text{ctg}\beta - b(\dot{q}_3 + \dot{\xi})\text{ctg}^2\beta + Q_5(\bar{F}_p). \end{aligned} \quad (9)$$

В этих уравнениях остались не найденными обобщенные силы $Q_j(\bar{F}_{Tp})$ ($j = 3, 4, 5$), обусловленные наличием силы трения в точке контакта деталей. Обобщенные силы определены по формулам [9]:

$$Q_j(\bar{F}_{Tp}) = F_{Tpx} \frac{\partial x_k}{\partial q_j} + F_{Tpy} \frac{\partial y_k}{\partial q_j} - F_{Tpz} \frac{\partial z_k}{\partial q_j}, \quad j = 3, 4, 5, \quad (10)$$

где $F_{Tpx}, F_{Tpy}, F_{Tpz}$ – проекции силы трения скольжения на оси неподвижной системы координат.

Далее были найдены частные производные функций по соответствующим обобщенным координатам – X_k, Y_k, Z_k .

С целью определения неизвестной величины реакции было составлено дополнительное уравнение на основании теоремы о движении центра масс.

$$m_5\bar{z}_{C5} = N \cos \beta + F_{Tpz} + F_{y\pi z} + R_{gz} - m_5 \quad (11)$$

где $F_{Tpz}, F_{y\pi z}, R_{gz}$ – проекции силы трения скольжения на оси неподвижной системы координат.

Полученные дифференциальные уравнения (6) – (9) позволяют исследовать процесс роботизированной сборки цилиндрических соединений на этапе сопряжения деталей. При этом система (6) относится к идеальному (желаемому), но маловероятному случаю процесса сопряжения деталей, когда контакт между ними отсутствует, так как это предполагает исключительно высокую точность позиционирования. В то же время уравнения (7) – (9) описывают сопряжение деталей в более реальном случае, когда к началу этапа сопряжения деталей вал будет контактировать с базовой деталью по её фаске.

На основе полученных систем дифференциальных уравнений движения можно решать, как прямую, так и обратную задачу динамики. Наличие аналитической модели процесса роботизированной сборки с использованием эффекта вращательного движения схвата позволит провести математическое моделирование процесса и определить условия выполнения сборки без заклинивания деталей, то есть повысить технологическую надежность процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Oscari F., Minto S., Rosati G. (2017) Functional Design of a Robotic Gripper for Adaptive Robotic Assembly. In: Boschetti G., Gasparetto A. (eds) Advances in Italian Mechanism Science. Mechanisms and Machine Science, vol 47. Springer, Cham. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-48375-7_28
- [2] C. Canali, F. Cannella, F. Chen, T. Hauptman, G. Sofia, D. G. Caldwell and A. A. Eytan (2014) High Reconfigurable Robotic Gripper for Flexible Assembly // ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 5B: 38th Mechanisms and Robotics Conference, Buffalo, New York, USA, August 17–20, 2014. DOI:10.1115/DETC2014-35245
- [3] Кузнецова С.В. Условия потери управляемости при относительной и угловой адаптации положения детали при сборке // Материалы V международного научно-технического семинара

- «Современные технологии сборки» 19-20 октября 2017 г. – Москва: Московский Политех, 2017 – с. 155–165
- [4] Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И. Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении, №9, 2006. С. 62-67.
- [5] Симаков А.Л. Обоснование методов и средств адаптации соединяемых деталей на базе принципов автоматического управления и выявленных взаимосвязей при автоматизированной сборке. Дисс. на соискание уч. ст. д.т.н. – Ковров, 1993. – 373 с.
- [6] Ghalyan I.F.J. Industrial Applications. In: Force-Controlled Robotic Assembly Processes of Rigid and Flexible Objects. Springer, Cham. 2016. – 195 p.
- [7] Кристаль М.Г. Производительность и надежность сборочных автоматов: монография. – Волгоград, ВОЛГТУ, 2011. – 160 с.
- [8] Левчук Д. М. Исследование и разработка методов относительного ориентирования сборочных единиц соединения во вращающемся потоке газов по автоматической сборке : диссертация кандидата технических наук : 05.02.08 Москва, 1974 – 143 с.
- [9] Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 736 с.
-
- Вартанов Михаил В., профессор, д-р техн. наук, m.v.vartanov@mospolytech.ru
- Зинина Инна Н., доцент, канд. техн. наук, i.n.zinina@mospolytech.ru
- Чан Чунг Та, аспирант
- Кафедра «Технологий и оборудования машиностроения», Московский политехнический университет, 107023, Москва, ул. Б. Семеновская, д. 38

Z PRASY ZAGRANICZNEJ

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

Sborka nr 10, 2017 (207)

- Optymalizacja czasu montażu specjalnych wyrobów z wykorzystaniem grafów
- Nowa metoda projektowania elektromechanicznych przekształtników energii z wykorzystaniem algorytmów genetycznych
- Zastosowanie haczykowatych podająco-orientujących urządzeń w wieloasortymentowych pojemnikach produkcji montażowej
- Montaż i demontaż korbowodowo-tłokowych zespołów maszyn
- Konstrukcja przeciwiernych kompozycyjnych pokryć zawierających fluoro-plastikowe elementy
- Porównanie oceny intensywności zużycia obręczy znormalizowanych i innowacyjnych kół wagonów towarowych
- Polepszenie efektywności obsługi technicznej urządzeń przemysłowych w oparciu o analizę stanu oleju
- Komputerowe modelowanie i konstruowanie oświetlacza z autonomicznym źródłem zasilania
- Programowe wspomaganie dla zautomatyzowanego projektowania trzpieniowego freza palcowego dla ewolwentowego śrubowego koła zębatego
- Polepszenie jakości i techniki bezpieczeństwa produkcji urządzeń do odkażania wody

Sborka nr 11, 2017 (208)

- Polepszenie dynamicznych charakterystyk okrągłego gazowo-statycznego podnośnika z pierścieniowymi przeponami
- Siłowa analiza procesu montażu połączeń śrubowych przy symetrycznym dokręcaniu części złącznych
- Kontrola bicia kół zębatych ciężkich przekładni lokomotywy
- Teoria i ocena siły relaksacji dokręcania śrubowych połączeń przy podwyższonych temperaturach (część 1)
- Technologiczne zasady wykonywania połączeń śrubowych wciskanych za pomocą łączonych części z gwintowym falistym profilem
- Klinowe opory ślizgowe pracujące na mikropolarnym materiale smarnym uzyskanym przez roztopienie przewodnicy uwzględniającym zależność lepkości od ciśnienia

- Analiza kontaktowego oddziaływania w ślimakowych przekładniach związanych z opracowaniem modelu ich drgań nieliniowych
- Wzory dla prognozowania siły kompleksowego rozłaczania otworów z pomocą narzędzi z regularnymi mikronierównościami powierzchni w warunkach zastosowania metalowo-przylgowych smarów
- Programowe wspomaganie 3D-modelu montażu USP typu tarczowego z pomocą systemu Nx open API w CAD/CAM Nx

Sborka nr 12, 2017 (209)

- Sposób rozszerzenia strumienia w celu rozwiązania trójparametrycznego zadania kompletowania
- Teoria i ocena relaksacji sił dokręcania połączeń śrubowych w podwyższonych temperaturach (część 2)
- Dynamiczna stabilność połączeń wielowypustowych z falistym gwintowym profilem
- Polepszenie jakości prac związanych z wibracyjnym uszczelnianiem balastu
- Badania temperatury strefy roboczej przy przeciąganiu kształtowych otworów
- Model obliczeniowy łożyska oporowego z podatną powierzchnią oporową
- Dobór metalicznych przeciwiernych materiałów w połączeniach tribologicznych systemów technicznych
- Polepszenie efektywności magnetycznego polerowania
- Programowe wspomaganie dla oceny funkcjonowania elementów skrzyni biegów obrabiarki do metali
- Cechy charakterystyczne integracji Microsoft Excel z Esteco ModeFrontier przy modelowaniu obliczeń cieplnych hydroakustycznych przyrządów

ABSTRACTS:

1. The learning-based optimization algorithm for robotic dual peg-in-hole assembly

Authors: Zhimin Hou, Markus Philipp, Kuangen Zhang, Yong Guan, Ken Chen, Jing Xu

This paper aims to present an optimization algorithm combined with the impedance control strategy to optimize the robotic dual peg-in-hole assembly task, and to reduce the assembly time and smooth the contact forces during assembly process with a small number of experiments.

Support vector regression is used to predict the fitness of genes in evolutionary algorithm, which can reduce the number of real-world experiments. The control parameters of the impedance control strategy are defined as genes, and the assembly time is defined as the fitness of genes to evaluate the performance of the selected parameters.

The learning-based evolutionary algorithm is proposed to optimize the dual peg-in-hole assembly process only requiring little prior knowledge instead of modeling for the complex contact states. A virtual simulation and real-world experiments are implemented to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

The proposed algorithm is quite useful for the real-world industrial applications, especially the scenarios only allowing a small number of trials.

2. A novel optimal method of robotic weld assembly line balancing problems with changeover times: a case study

Authors: Binghai Zhou, Qiong Wu

This paper aims to investigate the most suitable way to assign both assembly tasks and type of robots to every workstation, and present an optimal method of robotic weld assembly line balancing (ALB) problems with the additional concern of changeover times. An industrial case of a robotic weld assembly line problem is investigated with an objective of minimizing cycle time of workstations.

Theory analysis and simulation experiments on an industrial case of a car body welding assembly line are conducted in this paper. Satisfactory results show that the performance of GA is enhanced owing to the mechanism of SA, and the proposed method can efficiently solve the

real-world size case of robotic weld ALBPs with changeover times.

The additional consideration of tool changing has very realistic significance in manufacturing. Furthermore, this research work could be modified and applied to other ALBPs, such as worker ALBPs considering tool-changeover times.

For the first time in the robotic weld ALBPs, the fixtures' (tools') changeover times are considered. Furthermore, a mathematical model with an objective function of minimizing cycle time of workstations was developed. To solve the proposed problem, a GA with the mechanism of SA was put forth to overcome the inferior capability of GA in the aspect of local search.

3. An assembly sequence optimization oriented small world networks genetic algorithm and case study

Authors: Liping Zhao, Bohao Li, Hongren Chen, Yiyong Yao

The assembly sequence in the product assembly process has effect on the final product quality. To solve the assembly sequence optimization problem, such as rotor blade assembly sequence optimization, this paper proposes a small world networks-based genetic algorithm (SWN_GA) to solve the assembly sequence optimization problem. The proposed approach SWN_GA consists of a combination between the standard Genetic Algorithm and the NW Small World Networks.

The selection operation and the crossover operation are improved in this paper. The selection operation remains the elite individuals that have greater fitness than average fitness and reselects the individuals that have smaller fitness than average fitness. The crossover operation combines the NW Small World Networks to select the crossover individuals and calculate the crossover probability.

In this paper, SWN_GA is used to optimize the assembly sequence of steam turbine rotor blades, and the SWN_GA was compared with standard GA and PSO algorithm in a simulation experiment. The simulation results show that SWN_GA cannot only find a better assembly sequence which have lower rotor imbalance, but also has a faster convergence rate.

Finally, an experiment about the assembly of a steam turbine rotor is conducted, and SWN_GA is applied to optimize the blades assembly sequence. The feasibility and effectiveness of SWN_GA are verified through the experimental result.

4. Comprehensive identification of aircraft coordination feature based on complete importance modeling and its engineering application

Authors: Feiyan Guo, Fang Zou, Jian Hua Liu, Bo Zhao, Zhongqi Wang

Coordination feature (CF) is the information carrier in dimension and shape transfer process in aircraft manufacturing. The change of its geometric size, shape, position or other attributes would affect the consistency of accumulated errors between two or more assemblies. To identify these "key characteristics" that have a close relationship with the assembly precision, a comprehensive method was developed under digital manufacturing environment, which was based on importance calculation. The multi-hierarchy and multi-station assembly process of aircraft products were also taken into consideration.

First, the interaction and evaluation relationship between components at different manufacturing stages was decomposed with a hierarchical net. Second, to meet coordination accuracy requirements, with the integrated application of Taguchi quality loss function, accuracy principal and error correction coefficient H , the quality loss between target features and candidate features at adjacent assembly hierarchies were calculated, which was based on their precision variation. Third, the influence degree and affected degree of the features were calculated with DEMATEL (decision-making trial and evaluation laboratory) method, and the concepts of centrality degree index and cause degree index were proposed for calculating the complete importance degree to eventually identify the CFs.

Based on the proposed methodology, CFs, affecting the skin profile and the flush coordination accuracy, were successfully identified at different assembly hierarchies to a certain type of wing flap component.

5. Positioning variation analysis and control for automated drilling in aircraft manufacturing

Authors: Biao Mei, Weidong Zhu, Yinglin Ke

Aircraft assembly demands high position accuracy of drilled fastener holes. Automated drilling is a key technology to fulfill the requirement. The purpose of the paper is to conduct positioning variation analysis and control for an automated drilling to achieve a high positioning accuracy.

The nominal and varied connective models of automated drilling are constructed for positioning variation analysis regarding automated drilling. The principle of a strategy for reducing positioning variation in drilling,

which shortens the positioning variation chain with the aid of an industrial camera-based vision system, is explored. Moreover, other strategies for positioning variation control are developed based on mathematical analysis to further reduce the position errors of the drilled fastener holes.

The propagation and accumulation of an automated drilling system's positioning variation are explored. The principle of reducing positioning variation in an automated drilling using a monocular vision system is discussed from the view of variation chain.

The strategies for reducing positioning variation, rooted in the constructed positioning variation models, have been applied to a machine-tool based automated drilling system. The system is developed for a wing assembly of an aircraft in the Aviation Industry Corporation of China.

Propagation, accumulation and control of positioning variation in an automated drilling are comprehensively explored. Based on this, the positioning accuracy in an automated drilling is controlled below 0.13 mm, which can meet the requirement for the assembly of the aircraft.

6. Mathematical models and simulated annealing algorithms for the robotic assembly line balancing problem

Authors: Zixiang Li, Mukund Nilakantan Janardhanan, Peter Nielsen, Qihua Tang

Robots are used in assembly lines because of their higher flexibility and lower costs. The purpose of this paper is to develop mathematical models and simulated annealing algorithms to solve the robotic assembly line balancing (RALB-II) to minimize the cycle time.

Four mixed-integer linear programming models are developed and encoded in CPLEX solver to find optimal solutions for small-sized problem instances. Two simulated annealing algorithms, original simulated annealing algorithm and restarted simulated annealing (RSA) algorithm, are proposed to tackle large-sized problems. The restart mechanism in the RSA methodology replaces the incumbent temperature with a new temperature. In addition, the proposed methods use iterative mechanisms for updating cycle time and a new objective to select the solution with fewer critical workstations.

The comparative study among the tested algorithms and other methods adapted verifies the effectiveness of the proposed methods. The results obtained by these algorithms on the benchmark instances show that 23 new upper bounds out of 32 tested cases are achieved. The RSA algorithm ranks first among the algorithms in the number of updated upper bounds.

Four models are developed for RALBP-II and their performance is evaluated for the first time. An RSA algorithm is developed to solve RALBP-II, where the restart mechanism is developed to replace the incumbent temperature with a new temperature.

7. A coaxial alignment method for large aircraft component assembly using distributed monocular vision

Authors: Shuanggao Li, Zhengping Deng, Qi Zeng, Xiang Huang

The assembly of large component in out-field is an important part for the usage and maintenance of aircrafts, which is mostly manually accomplished at present, as the commonly used large-volume measurement systems are usually inapplicable. This paper aims to propose a novel coaxial alignment method for large aircraft component assembly using distributed monocular vision.

For each of the mating holes on the components, a monocular vision module is applied to measure the poses of holes, which together shape a distributed monocular vision system. A new unconstrained hole pose optimization model is developed considering the complicated wearing on hole edges, and it is solved by an iterative reweighted particle swarm optimization (IR-PSO) method. Based on the obtained poses of holes, a Plücker line coordinates-based method is proposed for the relative posture evaluation between the components, and the analytical solution of posture parameters is derived. The required movements for coaxial alignment are finally calculated using the kinematics model of parallel mechanism.

The IR-PSO method derived more accurate hole pose arguments than the state-of-the-art method under complicated wearing situation of holes, and is much more efficient due to the elimination of constraints. The accuracy of the Plücker line coordinates-based relative posture evaluation (PRPE) method is competitive with the singular value decomposition (SVD) method, but it does not rely on the corresponding of point set; thus, it is more appropriate for coaxial alignment.

8. Response surface approach to robust design of assembly cells through simulation

Authors: Cem Savas Aydin, Senim Ozgurler, Mehmet Bulent Durmusoglu, Mesut Ozgurler

This paper aims to present a multi-response robust design (RD) optimization approach for U-shaped assembly cells (ACs) with multi-functional walking-workers by using operational design (OD) factors in a simulation setting. The proposed methodology incorporated the design factors related to the operation of ACs into an RD framework. Utilization of OD factors provided a practical design approach for ACs addressing system robustness without modifying the cell structure.

Taguchi's design philosophy and response surface meta-models have been combined for robust simulation optimization (SO). Multiple performance measures have been considered for the study and concurrently optimized by using a multi-response optimization (MRO) approach. Simulation setting provided flexibility in experimental design selection and facilitated experiments

by avoiding cost and time constraints in real-world experiments.

The present approach is illustrated through RD of an AC for performance measures: average throughput time, average WIP inventory and cycle time. Findings are in line with expectations that a significant reduction in performance variability is attainable by trading-off optimality for robustness. Reductions in expected performance (optimality) values are negligible in comparison to reductions in performance variability (robustness).

ACs designed for robustness are more likely to meet design objectives once they are implemented, preventing changes or roll-backs. Successful implementations serve as examples to shop-floor personnel alleviating issues such as operator/supervisor resistance and scepticism, encouraging participation and facilitating teamwork.

9. Neural network model reference decoupling control for single leg joint of hydraulic quadruped robot

Authors: Bingwei Gao, Wenlong Han

To control one of the joints during the actual movement of the hydraulically driven quadruped robot, all the other joints in the leg need to be locked. Once the joints are unlocked, there is a coupling effect among the joints. Therefore, during the normal exercise of the robot, the movement of each joint is affected by the coupling of other joints. This brings great difficulties to the coordinated motion control of the multi-joints of the robot. Therefore, it is necessary to reduce the influence of the coupling of the hydraulically driven quadruped robot.

To solve the coupling problem with the joints of the hydraulic quadruped robot, based on the principle of mechanism dynamics and hydraulic control, the dynamic mathematical model of the single leg mechanism of the hydraulic quadruped robot is established. On this basis, the coupling dynamics model of the two joints of the thigh and the calf is derived. On the basis of the multivariable decoupling theory, a neural network (NN) model reference decoupling controller is designed.

The simulation and prototype experiment are carried out between the thigh joint and the calf joint of the hydraulic quadruped robot, and the results show that the proposed NN model reference decoupling control method is effective, and this method can reduce the cross-coupling between the thigh and the calf and improve the dynamic characteristics of the single joint of the leg.

10. Reassembly classification selection method based on the Markov Chain

Authors: Maogen Ge, Jing Hu, Mingzhou Liu, Yuan Zhang

As the last link of product remanufacturing, reassembly process is of great importance in increasing the utilization of remanufactured parts as well as decreasing

the production cost for remanufacturing enterprises. It is a common problem that a large amount of remanufactured part/reused part which past the dimension standard have been scrapped, which have increased the production cost of remanufacturing enterprises to a large extent. With the aim to improve the utilization of remanufacturing parts with qualified quality attributes but exceed dimension, the purpose of this paper is to put forward a reassembly classification selection method based on the Markov Chain.

To begin with, a classification standard of reassembly parts is proposed. With the thinking of traditional ABC analysis, a classification management method of reassembly parts for remanufactured engine is proposed. Then, a homogeneous Markov Chain of reassembly process is built after grading the matching dimension of reassembly parts with different variety. And the reassembly parts selection model is constructed based on the Markov Chain. Besides, the reassembly classification selection model and its flow chart are proposed by combining the researches above. Finally, the assembly process of remanufactured crankshaft is adopted as a representative example for illustrating the feasibility and the effectiveness of the method proposed.

11. Coordinate transformation uncertainty analysis and reduction using hybrid reference system for aircraft assembly

Authors: Zhengping Deng, Shuanggao Li, Xiang Huang

In aircraft assembly, standard reference points with nominal coordinates are commonly applied for coordinate transformation between multiple measurement stations and the assembly coordinate system. For several reasons in practical application, these points often fail to envelop the key assembly space, which leads to large transformation uncertainty. This paper aims to analyze and further reduce the coordinate transformation uncertainty by introducing a new hybrid reference system (HRS).

Several temporary extension points without known coordinates are added to enhance the tightness between different stations, especially at the weakness area in the network, thus constituting an HRS together with the existing standard reference points. The coordinate transformation model of the HRS-based measurement network is established based on an extend Gauss–Markov model. By using the geometrical differential property and variance-covariance propagation law, the covariance matrices in the transformation model are calculated, and the analytical solution of the uncertainties of transformation parameters are ultimately derived. The transformation uncertainty of each check points is presented by Helmert error expression.

The proposed analytical solution of transformation uncertainty is verified using the state-of-the-art Monte Carlo simulation method, but the solution process is simpler and the computation expenses are much less.

The HRS with three temporary extension points is practically applied to a tail boom in-site measurement for assembly. The average transformation uncertainty has been reduced by 26 per cent to less than 0.05 mm.

12. Analysis and optimization of assembly precision-cost model based on 3D tolerance expression

Authors: Wei Sun, Xiaokai Mu, Qingchao Sun, Zhiyong Sun, Xiaobang Wang

This paper aims to comprehensively achieve the requirements of high assembly precision and low cost, a precision-cost model of assembly based on three-dimensional (3D) tolerance is established in this paper.

The assembly precision is related to the tolerance of parts and the deformation of matching surfaces under load. In this paper, the small displacement torsor (SDT) theory is first utilized to analyze the manufacturing tolerances of parts and the assembly deformation deviation of matching surface. In the meanwhile, the extracting method of SDT parameters is proposed and the assembly precision calculation model based on the 3D tolerance is established. Second, an integrated optimization model based on the machining cost, assembly cost (mapping the deviation domain to the SDT domain) and quality loss cost is built. Finally, the practicability of the precision-cost model is verified by optimizing the horizontal machining center.

The assembly deviation has a great influence on cost fluctuation. By setting the optimization objective to maximize the assembly precision, the optimal total cost is CNY 72.77, decreasing by 16.83 per cent from the initial value, which meets economical requirements. Meanwhile, the upper bound of each processing tolerance is close to the maximum value of 0.01 mm, indicating that the load deformation can be offset by appropriately increasing the upper bound of the tolerance, but it is necessary to strictly restrict the manufacturing tolerances of lower parts in a reasonable range.

13. Balancing a mixed-model assembly line with unskilled temporary workers: algorithm and case study

Authors: Dongwook Kim, Dug Hee Moon, Ilkyeong Moon

The purpose of this paper is to present the process of balancing a mixed-model assembly line by incorporating unskilled temporary workers who enhance productivity. The authors develop three models to minimize the sum of the workstation costs and the labor costs of skilled and unskilled temporary workers, cycle time and potential work overloads.

This paper deals with the problem of designing an integrated mixed-model assembly line with the assignment of skilled and unskilled temporary workers. Three mathematical models are developed using integer linear

programming and mixed integer linear programming. In addition, a hybrid genetic algorithm that minimizes total operation costs is developed.

Computational experiments demonstrate the superiority of the hybrid genetic algorithm over the mathematical model and reveal managerial insights. The experiments show the trade-off between the labor costs of unskilled temporary workers and the operation costs of workstations.

The developed models are based on practical features of a real-world problem, including simultaneous assignments of workers and precedence restrictions for tasks. Special genetic operators and heuristic algorithms are used to ensure the feasibility of solutions and make the hybrid genetic algorithm efficient. Through a case study, the authors demonstrated the validity of employing unskilled temporary workers in an assembly line.

14. An intelligent computation system for precise assembly of large laser optics

Authors: Hui Wang, Zheng Zhang, Zhao Xiong, Tianye Liu, Kai Long, Xusong Quan, Xiaodong Yuan

It is a huge technical and engineering challenge to realize the precise assembly of thousands of large optics

in high power solid-state laser system. Using the 400-mm aperture-sized transport mirror as a case, this paper aims to present an intelligent numerical computation methodology for mounting performance analysis and modeling of large optics in a high-power laser system for inertial confinement fusion (ICF).

Fundamental principles of modeling and analysis of the transport mirror surface distortion are proposed, and a genetic algorithm-based computation framework is proposed to evaluate and optimize the assembly and mounting performance of large laser optics.

The stringent specifications of large ICF optics place very tight constraints upon the transport mirror's assembly and mounts. The operational requirements on surface distortion [peak-to-valley and root mean square (RMS)] can be met as it is appropriately assembled by the close loop of assembly-inspection-optimization-fastening. In the end, the experimental study validates the reliability and effectiveness of the transport mirror mounting method.

In the assembly design and mounting performance evaluation of large laser optics, the whole study has the advantages of accurate evaluation and intelligent optimization on nano-level optical surface distortion, which provides a fundamental methodology for precise assembly and mounting of large ICF optics.

„TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU”

KWARTALNIK NAUKOWO-TECHNICZNY ROCZNY SPIS TREŚCI 2018 r.

Zeszyt 1/2018

1. Rudawska A., Chyliński D.: Wpływ kąta zukosowania próbek na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stopu aluminium EN AW-5754
2. Nieoczym A.: Analiza zmiany technologii produkcji części
3. Makarow A.M., Serdobintser J.P., Mushkin D.V., Lapi-kov M.A.: Strukturalno-parametryczna synteza zautomatyzowanych urządzeń dla napełniania elastycznych pojemników materiałami sypkimi
4. Kasperek D., Rudawska A.: Wybrane aspekty procesu montażu autobusów z wykorzystaniem technologii klejenia
5. Zawieski W.: Potencjał wykorzystania nowoczesnych technologii kompozytowych do wytwarzania elementów maszyn montażowych
6. Zielecki W., Korzyńska K.: Analiza wpływu parametrów pneumokulowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V.
7. Barylski A.: Analiza czasochłonności docierania technologicznego powierzchni płaskich w operacjach montażowych
8. Wartanow M.B., Gashin T.A.Ł.: Analiza rozwiązań technologicznych dla projektowania ładowarki robotycznej automatycznej linii montażowej mikrotubów medycznych
9. Rychlik K.: Analiza skuteczności w szkoleniu praktycznym z wykorzystaniem symulatorów maszyn budowlanych
10. Rośkiewicz M., Chudowolska J.: Wpływ łączników mechanicznych na nośność połączeń hybrydowych
11. Reinżyniering przekładni zębatych na bazie modelu zunifikowanego opisu parametrów

Zeszyt 2/2018

1. Kielec R., Sąsiadek M.: Macierzowa metoda planowania przedsięwzięć technicznych w budowie maszyn
2. Domińczuk J.: Analiza możliwości budowy wysoko-wydajnych elastycznych linii pakowania w oparciu o konstrukcje modułowe
3. Wiśnicki B., Dzhuguryan T.: Elastyczne procesy logistyczne z wykorzystaniem modułowych jednostek ładunkowych
4. Barylski A.: Analiza porównawcza stosowania przedmiotowych uchwytów modułowych i specjalnych
5. Chłosta M., Klusek K., Kobiałka J., Welc M.: Nitownica z modułową głowicą narzędziową
6. Nieoczym A., Drozd K.: Modułowa konstrukcja żurawi przyczepowych
7. Kluz R., Bucior M., Wydrzyński D.: Wpływ błędów orientacji robota montażowego na montowalność części o powierzchniach płaskich
8. Modrak V., Soltysowa Z., Stadnicka D.: Czynniki sukcesu i przyszłe trendy w masowej indywidualizacji
9. Antosz K., Kluz R.: Badanie zdolności jakościowej procesów z jednostronną granicą tolerancji
10. Gąsior J., Komorek A., Rośkiewicz M., Tkaczuk S.: Ocena możliwości zastąpienia nitów typu solid w połączeniach konstrukcji lotniczych
11. Akimow O., Oborski I., Lipiński T.: Dynamiczne charakterystyki uchwytu szpulowego z trójstożkowym pakietowaniem szpulowo-przewijającej maszyny BP-340

Zeszyt 3/2018

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

1. Peta K., Wiśniewski M., Suszyński M., Cieślak R., Żurek J.: Ocena połączeń klinczowych z uszczelką kształtową nakładaną ręcznie i wylewaną na modułowym zrobotyzowanym stanowisku montażowym
2. Zielecki W., Perłowski R., Tłuczek R.: Mass Customization – typ produkcji dedykowany dla organizacji procesu wytwarzania wyrobów modułowych
3. Fiedorenko A., Styp-Rekowski M., Oborski I.: Badanie kompleksu charakterystyk strukturalnych i masowo zmiennych węglowo-włóknistych materiałów filtracyjnych
4. Koziół S., Samborski T., Zbrowski A., Lipiński J.: Modułowa struktura robota malarskiego do malowania obrazów
5. Kubit A., Wędrzyński D., Bucior M., Kluz R.: Właściwości przetłoczeń usztywniających kształtowanych w cienkich blachach z lotniczego stopu aluminium 2024-T3 metodą formowania przyrostowego
6. Łunarski J.: Normalizacja w ewolucji systemów
7. Kluz R., Przeszlowski Ł., Bucior M., Zielecki W.: Wpływ parametrów procesu kulowania na chropowatość komponentów drukowanych metodą MEM
8. Godzimirski J., Jagiełło A.: Wpływ obróbki powierzchniowej zgniotem po utwardzeniu spoin na nośność zakładkowych połączeń klejowych
9. Rudawska A., Miturska A.: Wpływ warunków utwardzania i sezonowania na wytrzymałość połączeń klejowych doczołowych
10. Skoczylas L., Skoczylas K.: Katalogowa wydajność węglkowych frezów trzpieniowych do obróbki zgrubnej
11. Vartanov M., Zinina I., Chang Chung Ta: Badania wpływu efektu obrotów części na niezawodność zrobotyzowanego montażu

LISTA RECENZENTÓW ARTYKUŁÓW W CZASOPIŚMIE „TECHNOLOGIA I AUTOMATYZACJA MONTAŻU” W 2018 r.

dr inż. Magdalena Bucior
dr inż. Sylwia Dziedzic
dr inż. Andrzej Dzierwa
prof. dr hab. inż. Victor Eremeev
dr inż. Lidia Gałda
prof. dr hab. inż. Krzysztof Gołoś
prof. dr hab. inż. Witold Gutkowski
dr hab. inż. Wojciech Homik, prof. PRz
prof. dr hab. inż. Ihor Hurey
prof. dr hab. inż. Tadeusz Kasperski
dr inż. Andrzej Kubit
prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski
prof. dr hab. inż. Kazimierz Lejda
dr hab. inż. Adam Marciniak, prof. PRz
dr inż. Ryszard Perłowski
dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PRz
dr hab. inż. Leszek Skoczylas, prof. PRz
dr hab. inż. Mariusz Sobolak, prof. PRz
prof. dr hab. inż. Feliks Stachowicz

dr inż. Leszek Tomczewski
dr inż. Tomasz Trzepieciński
dr inż. Andrzej Zbrowski
dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRz
prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski
prof. dr hab. inż. Leszek Woźniak
dr hab. inż. Tadeusz Balawender, prof. PRz
dr inż. Dariusz Szybicki
prof. dr hab. inż. Walery Kyrylovych
dr hab. inż. Waldemar Koszela, prof. PRz
prof. dr hab. inż. Tygran Dzhuguryan
prof. dr hab. inż. Andrzej Tylikowski
dr inż. Andrzej Misztela
dr inż. Tadeusz Nyklewicz
prof. dr hab. inż. Zbigniew Starczewski
dr hab. inż. Jacek Mucha, prof. PRz
dr inż. Dawid Wydrzyński
dr hab. inż. Stanisław Antas, prof. PRz

SKORZYSTAJ Z NASZEJ WIEDZY

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

 <p>mięsięcznik 312,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 300,00 zł</p>	 <p>dwumiesięcznik 210,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 348,00 zł</p>	 <p>dwumiesięcznik 198,00 zł</p>	 <p>dziesięć wydań 180,00 zł</p>
 <p>mięsięcznik 420,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 348,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 312,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 378,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 384,00 zł</p>	 <p>dwumiesięcznik 378,00 zł</p>
 <p>mięsięcznik 300,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 480,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 372,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 612,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 312,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 330,00 zł</p>
 <p>dwutygodnik 299,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 330,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 366,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 330,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 258,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 366,00 zł</p>
 <p>dwumiesięcznik 240,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 636,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 330,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 330,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 384,00 zł</p>	 <p>mięsięcznik 396,00 zł</p>
 <p>kwartalniki 100,00 zł</p>					

Czasopisma dostępne tylko w prenumeracie w wariantach:

- wersja papierowa (dolicza się roczną opłatę za dostarczenie czasopism),
 - wersja **PLUS** z dostępem do e-publikacji (bezpłatne dostarczenie czasopism),
 - wersja **ciągła PLUS** z dodatkowym rabatem **10%**
- (automatycznie odnawiająca się co roku, bezpłatne dostarczenie czasopism)



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

70 lat
WYDAWNICTWO SIGMA-NOT



Urządzenia

do montażu elementów złącznych dla budownictwa

- montaż wkrętów farmerskich
- montaż kołków rozporowych
- montaż 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