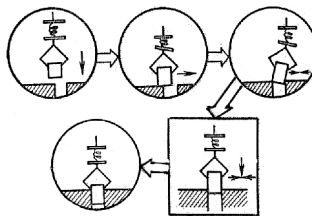


MECHANIKA

Technika i technologia montażu maszyn



Kwartalnik

zeszyt **83** (nr 1/2011)



WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. inż. Feliks STACHOWICZ

Redaktor serii
Jarosław SĘP

Redaktor naukowy
Jerzy ŁUNARSKI

Komitet Redakcyjny
Władysław FILAR
Roman PETRUS
Grzegorz PROKOPSKI
Jarosław SĘP
Jan STANKIEWICZ
Zbigniew ŚWIDER

Recenzenci artykułów
dr inż. Rafał KLUZ, prof. dr hab. inż. Volodymyr LIUBYMOV
prof. dr hab. inż. Jerzy ŁUNARSKI, prof. dr hab. inż. Paweł PAWLUS
dr hab. inż. Jarosław SĘP, prof. PRz, dr inż. Leszek SKOCZYŁAS
prof. dr hab. inż. Feliks STACHOWICZ, dr hab. inż. Łukasz WĘSIERSKI, prof. PRz
dr hab. inż. Władysław ZIELECKI, prof. PRz

Przygotowanie matryc
Dorota STADNICKA

Monotematyczny zbiór opracowań naukowych dotyczących aktualnych problemów projektowania, wytwarzania i montażu wyrobów maszynowych oraz związanych z tym ogólnych problemów montażu. Zamieszczone artykuły zostały opracowane w latach 2008-2011 przez osoby współpracujące z Wydziałem Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej oraz z Zakładem Obrabiarek i Technologii Montażu Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie.

p-ISSN 0209-2689
e-ISSN 2300-5211

Wersja drukowana Kwartalnika jest wersją pierwotną.

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Nakład 80 + 50 egz. Ark. wyd. 23,39. Ark. druk. 17,5. Papier offset. kl. III 70g B1.
Oddano do druku w kwietniu 2011 r. Wydrukowano w maju 2011 r.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
Zam. nr 37/11

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE

<i>Łunarski J.</i> : Zagadnienia automatyzacji montażu maszyn i urządzeń mechanicznych.....	5
---	---

I. PROBLEMY PROJEKTOWANIA SYSTEMÓW MONTAŻU.....	7
--	----------

1. <i>Pasichnyk V., Lashyna Y.</i> : Montażowo zorientowane projektowanie z zastosowaniem DFA Expert.....	9
2. <i>Pasichnyk V., Korenkow V.</i> : Matematyczne modele i procedury w zadaniach analizy i syntezy procesów montażu.....	15
3. <i>Bożkowska L.W., Wartanow M.W., Bakena Mbua Ż.K.</i> : Modelowanie procesu zrobotyzowanego montażu profilowanych wałów z pomocą wibracji.....	27
4. <i>Stelmakh N., Pasichnyk V.</i> : Modelowanie technologii montażu przyrządów w środowisku AsCAM.....	35
5. <i>Zenkin A., Oborskiy I., Oborskiy S.</i> : Grafo-analityczne wyznaczanie parametrów montażu połączeń wciskanych metodą termiczną.....	43
6. <i>Pasichnyk V., Korenkow V., Abdolreza B.</i> : Zwiększenie wydajności opracowania modeli matematycznych podwójnych ograniczeń przemieszczeń elementów wyrobów montowanych.....	49
7. <i>Kluz R.</i> : Optymalizacja parametrów konstrukcyjno-technologicznych modułowego stanowiska montażowego.....	55
8. <i>Ciszek O.</i> : Komputerowo wspomagane modelowanie i symulacja zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych.....	61

II. PROBLEMY TECHNIKI I TECHNOLOGII MONTAŻU WYROBÓW.....	67
---	-----------

9. <i>Zbrowski A., Samborski T., Kozioł S.</i> : Model linii do graficznej i elektronicznej personalizacji dokumentów.....	69
10. <i>Reifur B., Lekki B.</i> : Analiza przebiegu procesu montażowego kuchenki w aspekcie jego wyrównowania.....	81
11. <i>Kozioł S., Zbrowski A., Wiejak J.</i> : Koncepcja urządzenia do implementacji chipów RFID.....	93
12. <i>Melnuchyk P., Kyrylovych V., Pysarchuk O.</i> : Zastosowanie teorii kwaternionów do opracowania funkcjonalnych modeli układów manipulacyjnych robotów przemysłowych.....	103
13. <i>Kristal M., Drobotov A.W., Chernyshev D.E.</i> : Automatyczne urządzenia obrotowe z turbinowym napędem dla montażu.....	113
14. <i>Jastrzębski R., Osówniak P., Szepke A., Kowalski T.</i> : Wykrywanie błędów montażu precyzyjnych szybkoobrotowych wrzecion obrabiarek.....	119
15. <i>Antosz K., Łunarski J.</i> : Ocena konkurencyjności systemu maszyn technologicznych w procesach montażu.....	131

III. PROBLEMY PROJEKTOWANIA I MONTAŻU POŁĄCZEŃ.....	137
--	------------

16. <i>Kłonica M., Kuczmazewski J.</i> : Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych po oczyszczaniu mechanicznym i ozonowaniu.....	139
17. <i>Rudawska A., Błaziak M.</i> : Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopu tytanu.....	147
18. <i>Oborskiy I.</i> : Technologiczne i naukowe podstawy realizacji montażu połączeń wciskanych sposobem termicznym (TKSS).....	157
19. <i>Oborskiy I., Oborskiy A., Zenkin A., Koszel A.</i> : Projektowanie energooszczędnej technologii montażu połączeń wciskanych sposobem termicznym.....	163

20. Oborskiy I., Demkowski A., Oborska N., Chomenko D.: Wyznaczanie parametrów konstrukcyjno-technologicznych i projektowanie racjonalnej technologii montażu połączeń.....	171
21. Rabinovich L.A., Polyakova M. V.: Optymalizacja precyzyjnego montażu przy niepełnej zamienności części w połączeniach.....	179
22. Gromov V. F., Makarov A. F., Ovsyannikov D. A.: Stan naprężeń i deformacji przy obciążeniu zespołu przegubowego z wciśniętą cienkościenną tuleją.....	187
IV.PROBLEMY OGÓLNE WYTWARZANIA I MONTAŻU.....	195
23. Magiera M.: Metoda selekcji dostawców komponentów dla elastycznych systemów montażowych.....	197
24. Streubel A., Kuprowska I., Kuran M.: Logistyczne zabezpieczenie produkcji montażowej.....	211
25. Borowski Z., Matuszewski M., Musiał J., Styp-Rekowski M.: Organizacyjne i ekonomiczne uwarunkowania procesów wytwarzania elementów wielkogabarytowych.....	219
26. Klusek K., Rychlik K., Tyłenda J.: Badania własności mechanicznych okuć budowlanych.....	225
27. Makarov A.M., Rabinovich L.A.: Automatyzacja dozowania materiałów sypkich do mało sztywnych opakowań.....	233
28. Gawlik E., Gil S.: Koncepcja systemu oceny technologiczności konstrukcji części maszyn i zespołów maszynowych.....	239
29. Komorek A., Przybyłek P.: Naprawa uszkodzeń kompozytowych elementów lotniczych wywołanych niskoenergetycznym obciążeniem uderowym.....	251
30. Stadnicka D.: Symulacyjna linia montażowa do nauczania narzędzi lean manufacturing.....	261
Wykaz autorów i specjalistów.....	273
Artykuły w kwartalniku TiAM nr 2/11.....	277

Jerzy ŁUNARSKI

Politechnika Rzeszowska

Wprowadzenie

ZAGADNIENIA AUTOMATYZACJI MONTAŻU MASZYN I URZĄDZEŃ MECHANICZNYCH

W działalności przedsiębiorstw wytwarzających różnorodne wyroby obserwuje się tendencję coraz szerszego automatyzowania procesów podstawowych, pomocniczych jak również usługowych. Dotyczy to także procesów montażu maszyn, chociaż zaawansowanie wdrożeń systemów automatycznych w montażu nie dorównuje intensywności podobnym procesom w innych technikach wytwarzania (odlewanie, skrawanie, spawanie itp.).

Składa się na to wiele przyczyn, z których ważniejsze to:

- Wzrastająca złożoność budowy i funkcjonowania różnorodnych wyrobów elektromaszynowych, których ewentualny montaż automatyczny wymagałby specjalnych urządzeń montażowych, drogich i często jeszcze zawodnych.
- Ograniczona seryjność wytwarzania takich wyrobów stawiająca pod znakiem zapytania efektywność opracowania i wdrożenia automatycznych urządzeń technologicznych do montażu.
- Różnicowanie wytwarzanych wyrobów na szeregi typowymiarowe, modułowe, funkcjonalne itp., co wymaga zapewnienia znacznej elastyczności automatycznych urządzeń montażowych.
- Częste przypadki niedopracowania technologiczności konstrukcji ze względu na wymagania montażu automatycznego, co komplikuje i podraża specjalne urządzenia montażowe.
- Brak seryjnej produkcji typowych modułów do realizacji montażu automatycznego umożliwiających łatwe konfigurowanie automatycznych urządzeń montażowych ze względu na różnorodność potrzeb montażowych.
- Brak świadomości nabywców specjalnych zautomatyzowanych urządzeń montażowych o złożoności projektowania i wytwarzania (są to często egzemplarze prototypowe), co podnosi koszty wytwarzania powyżej typowych urządzeń automatycznych w innych technikach wytwarzania i często prowadzi do rezygnacji z zamawiania takich urządzeń.

Mimo tych czynników ograniczających zastosowania systemów zautomatyzowanych w montażu maszyn upowszechniają się one stopniowo w średnich i małych przedsiębiorstwach. W przedsiębiorstwach dużych systemy takie upowszechniały się już wcześniej i były z powodzeniem opracowywane i wdrażane. Sytuacje takie powodowane były m.in. przez:

- większą wiedzę i doświadczenie z zakresu procesów automatyzacji i jej korzyści oraz większym zasobom finansowym umożliwiającym wdrażanie tych systemów,
- potrzebą uruchamiania dużej skali produkcji nowych wyrobów celem redukcji kosztów jednostkowych i wykorzystania efektu nowości wyrobu.

Do czynników sprzyjających upowszechnianiu automatyzacji w małych i średnich przedsiębiorstwach, w tym również procesów montażowych, można zaliczyć następujące:

- Duży postęp w budowie i upowszechnianiu różnych elementów, zespołów, wyrobów i oprogramowania ułatwiających automatyczną realizację różnych złożonych działań.
- Postępującą specjalizację w wytwarzaniu wyżej wymienionych elementów sprzyjającą ich miniaturyzacji, uniwersalizacji, funkcjonalności itp., co polepsza jednocześnie ich niezawodność w seryjnym wytwarzaniu.
- Postępy w rozwoju nauk matematycznych umożliwiające modelowanie złożonych obiektów i procesów ułatwiające znajdowanie optymalnych rozwiązań różnych zadań z zakresu automatycznego montażu.

- Wzrastające zasoby wiedzy wytwórców zautomatyzowanych urządzeń montażowych umożliwiające rozwiązywanie coraz bardziej złożonych zadań.

- Wzrastające potrzeby poszukiwania i wykorzystywania wszelkich rezerw umożliwiających sprostanie naciskom konkurentów, w tym również rezerw tkwiących w możliwościach zwiększania produktywności i jakości procesów montażowych.

O ile w dużych przedsiębiorstwach automatyzacja w montażu rozwijana jest w sposób w miarę planowy, uwzględniając kompleksowe wskaźniki efektywności produkcji, to w mniejszych przedsiębiorstwach decyzje dotyczące automatyzacji montażu przeważnie są powodowane:

- ograniczonością zdolności produkcyjnych w określonych operacjach montażowych uniemożliwiającą pełne wykorzystanie możliwości technologicznych zmechanizowanych i częściowo zautomatyzowanych innych technik wytwarzania,

- koniecznością sprostania krótkim cykлом realizacji różnych dużych zleceń stawianych na przetargach, co często wymaga dysponowania wydajnymi metodami montażu,

- perspektywiczną kalkulacją zostania dostawcą określonych zespołów lub prostych wyrobów dla dużych firm globalnych – warunkiem tego jest duża skala produkcji i jej dobry poziom jakościowy, co przeważnie wymaga zautomatyzowania procesów wytwórczych w tym również montażu.

Sytuacje takie stwarzają szanse firmom specjalizującym się w projektowaniu i wytwarzaniu półautomatycznych i automatycznych maszyn montażowych, a pośrednio również dostawcom komponentów do takich maszyn.

W celu wykorzystania takich szans, które zwiększają się w okresach prosperity gospodarczej i maleją w okresach kryzysowych, konieczne jest:

- dysponowanie doświadczoną, kreatywną i innowacyjną kadrą projektantów zdolnych do szybkiego rozwiązywania złożonych problemów,

- dysponowanie odpowiednimi systemami informacyjnymi wspomagającymi prace projektantów oraz działania planistów realizujących te projekty (zaopatrywanie, priorytetowanie i szeregowanie zadań, wykorzystywanie posiadanych zdolności produkcyjnych i zasobów i in.)

- dysponowanie odpowiednią infrastrukturą techniczną umożliwiającą szybką i jakościową realizację projektów oraz powiązaniem z dostawcami, kooperantami i podwykonawcami ułatwiającymi realizację tych prac.

Potrzeby kreatywności wynikają z faktu, że automatyzacja montażu nie powinna naśladować zabiegów i operacji ręcznych a rozwiązywać te problemy nowatorskimi sposobami gwarantującymi dużą wydajność, stabilną jakość, bezpieczeństwo prac oraz niezawodność funkcjonowania zautomatyzowanego systemu montażowego.

Spełnienie tych wymagań stwarza konieczność znacznego zaangażowania potencjałów naukowych w zakresie badań podstawowych, stosowanych i rozwojowych. Celem tych wysiłków jest opracowanie i oferowanie różnorodnych rozwiązań, metod, narzędzi, oprzyrządowania i innych elementów niezbędnych do skutecznej i niezawodnej automatyzacji montażu.

Z powyższych względów pożyteczną i celową działalnością jest okresowe prezentowanie prac i osiągnięć poszczególnych specjalistów pracujących i współpracujących nad doskonaleniem technik i technologii montażu maszyn i urządzeń. W niniejszym Zeszycie Naukowym Politechniki Rzeszowskiej prezentowane są opracowania z lat 2008 – 2011 opracowane przez specjalistów współpracujących z Wydziałem Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej oraz z Zakładem Obrabiarek i Technologii Montażu Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie. Władze Politechniki i Instytutu wyrażają nadzieję, że obecna prezentacja wspólnych prac zaowocuje dalszym rozwojem współpracy dwustronnej i wielostronnej, której efektem będą kolejne, użyteczne dla przemysłu rozwiązania zautomatyzowanych systemów montażowych.

I
PROBLEMY PROJEKTOWANIA
SYSTEMÓW MONTAŻOWYCH

Vitalii PASICHNYK
Yuliya LASHYNA
Uniwersytet Techniczny
„Politechnika Kijowska”
Kijów, Ukraina

MONTAŻOWO ZORIENTOWANE PROJEKTOWANIE Z ZASTOSOWANIEM DFA EXPERT

ASSEMBLY-ORIENTED DESIGN USING DFA EXPERT® SOFTWARE

One of the most effective tools for reducing costs associated with assembling is currently the use of methods of improving assemblability of products based on assembly-oriented design (DFA – Design for Assembly).

The most known DFA-analysis methods are: Hitachi Assemblability Evaluation Method, Boothroyd Dewhurst System [1], Lucas DFA Technique [2]. Based on these methods, the following expert systems have been implemented: *Design for Assembly 9.2* (Boothroyd Dewhurst System) and *TeamSET Software* (Lucas DFA Technique). However, even these, universally recognized systems, are featured by a rather low automation level in particular due to the fact that almost all initial data are input by user manually.

A method of task-oriented redesigning an assembly product and DFA Expert® system implemented on its basis are presented in [3]. The use in this system of existing mathematical models of the *assembly product* (AP) [4] and assembly process allowed, further to basic analysis functions, implement integration of DFA Expert® with other product life cycle support systems.

Let us consider the use of the assembly-oriented design methodology based on the above method for the “Polimag” product (Fig. 1) manufactured by LBU-Tech Ltd.

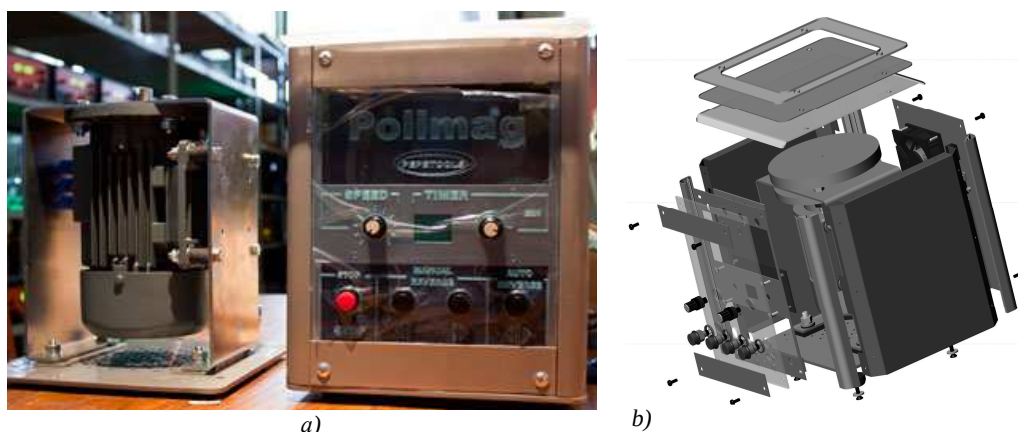


Fig. 1. Product “Polimag”: a) photograph; b) three-dimensional model

Rys. 1. Przyrząd “Polimag”; a) fotografia, b) trójwymiarowy model

The device is designed for finishing treatment of irregular shape parts by contacting with the medium in which metallic particles as free abrasive material of low concentration move under the influence of an

alternating magnetic field created by mechanical rotation of permanent magnets. Initially the design included 280 parts. Cost for manufacturing of such parts UAH 1,191 (~\$150). The product design was analyzed at the factory with the aim to reduce manufacturing cost due to the assembly-oriented design.

The analysis included six stages.

At the **first stage**, the existing (base) *Design and Manufacturing Concept* (DMC) [3] was formally described and initial data were prepared.

Formation of the *design* information DMC_0^D was started from creation of a 3D-model of the product (Fig. 1,b) based on which the data of decomposition, overall dimensions of parts, weight, materials were obtained. Information on physical properties, i.e. fragility, elasticity, etc. is determined by the user manually.

Formation of the *technological* information DMC_0^M was started from importing data from the 3D-model to the assembly sequence synthesis module. Then a model of *binary relations of movement restriction* (BRMR) was synthesized [4], *assembly sequence* (AS) was generated [5] and results were registered in a text file.

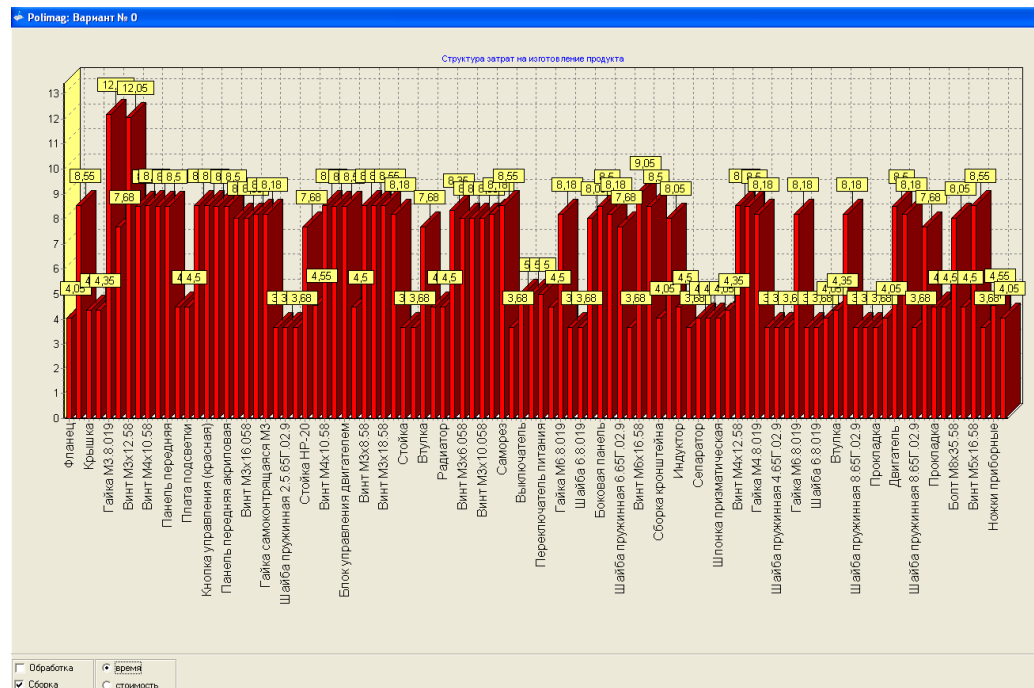
Formation of the *economic* information DMC_0^E was started by importing the text file to the DFA Expert[®] environment [3]. Then the information on the product part manufacturing cost was input to the system. All this allowed to link together engineering, technological and economic data, i.e. base DTS_0 was formed (Fig. 2).

N	Структура	Шифр	Колво	С. сум	С. сб	С. уст	С. изг.
0	Polimag	THTX.33...	1	1427,28	236,24	0,00	1191,00
1	Фланец	084	1	1,090	0,000	0,450	0,640
2	Винт М4х12.58	ГОСТ 174...	4	3,960	0,000	0,950	0,040
3	Крышка	083	1	12,483	0,000	0,483	12,000
4	Крышка	076	1	19,083	0,000	0,483	18,600
5	Гайка М3.8.019	ГОСТ 592...	12	16,840	0,000	1,353	0,050
6	Шайба стопорная 3.65...	ГОСТ 104...	12	10,720	0,000	0,853	0,040
7	Винт М3х12.58	ГОСТ 174...	12	16,427	0,000	1,339	0,030
8	Стойка корпуса	063	4	23,778	0,000	0,944	5,000
9	Винт М4х10.58	ГОСТ 174...	4	3,960	0,000	0,950	0,040
10	Накладка	057	2	5,689	0,000	0,944	1,900
11	Панель передняя	054СБ	1	206,977	32,582	0,944	173,450
12	Плата управления	103СБ	1	96,500	0,000	0,500	96,000
13	Плата подсветки	104 СБ	2	31,000	0,000	0,500	15,000
14	Кнопка управлени...	106-001 СБ	3	13,950	0,000	0,950	3,700
15	Кнопка управлени...	106-002 СБ	1	4,650	0,000	0,950	3,700

Fig. 2. Representation of AP "Polimag" in DFA Expert

Rys. 2. Widok montowanego wyrobu "Polimag" w środowisku DFA Expert

Analysis of joints and assembly cost determination in the DFA Expert environment showed that direct cost for assembly processes amount to UAH 236 (~\$30), i.e. 19.8% of the total direct costs. By investigating the structure of costs it was determined that the most labor-intensive in terms of assembly are processes of case base installation and making threaded connections (Fig. 3).

Fig. 3. Distribution of operating time for assembly DMC_0 Rys. 3. Struktura nakładów czasowych na montaż (KTP – konstrukcyjno-technologiczne rozwiązanie) KTP_0

At the **second stage**, DFA-analysis of DMC_j alternative was made. For this purpose, possibilities to reduce the number of AP parts were identified. It is known, that in terms of assembly, the ideal case is when all parts of an assembly product A are integrated into one part. There are, however, some restrictions of the integration process of the functional and technological nature [6]. To account for such restrictions formally, a procedure was used for searching groups of parts which may be integrated with regard to all restrictions.

AP kinematics analysis and division of the set of all AP parts into subsets representing kinematic chains showed that the set of all parts can be divided into two subsets: 1 – motor shaft, key, *assembly unit* (AU) “Inductor”; 2 – all other parts.

After that all parts requiring regular replacement or adjustment were excluded from consideration. The requirement to ensure easy access to assembly units “Illumination board”, “Control board”, “Controller board”, “Power module board” was established by the customer and in this case is a restriction related to the device operation. The said assembly units as well as handles, power and voltage switching connectors shall be made as separate subassemblies.

By analyzing part materials it was found that parts located above the AU “Inductor” shall be made of a magnetically permeable material; front panel of the device shall be made of a transparent material to ensure smart backlighting.

At the **third stage**, modifications to the device design were made.

In order to make decision on whether to modify the AP, basic information for a new $DMC_{0.1}$ was created. New design of the “Bracket” part was proposed allowing to make connection of the AP “Illumination board”, “Control board”, “Controller board”, “Power module board” without thread joints while keeping easy access during operation.

New design of the “Cover” part was proposed: to be made of acryl thus corresponding to magnetic permeability restriction. It was also offered to replace metallic straps for blanking individual parts of the front panel with film coating.

At the **fourth stage**, description of DMC_{0-1} was formalized. This stage differs from stage 1 only in that a portion of information is inherited from the parent DMC .

By carrying out the **fifth stage** implying comparative analysis of DMC_0 and DMC_{0-1} it was decided at the **sixth stage** to perform one more analysis iteration with the parent element DMC_{0-1} .

At the **second stage** of the second iteration no solution on the reduction of the number of parts of DMC_{0-1} was found, thus analysis of design and connections was made.

Based on the analysis of the connection design, screw fastening of power and voltage switching connectors was substituted for a more practically feasible one in terms of assembly, flexible element fastening, screw fastening of the AP “Front panel” and “Back panel” was substituted for a more practically feasible fastening with the use of rivet joints.

By performing the **third stage**, DMC_{0-1-1} (Fig. 4) with 151 components was obtained. For DMC_{0-1-1} , the **fourth stage** was carried out that resulted in supplementing design component, and technological and economic components were formed.

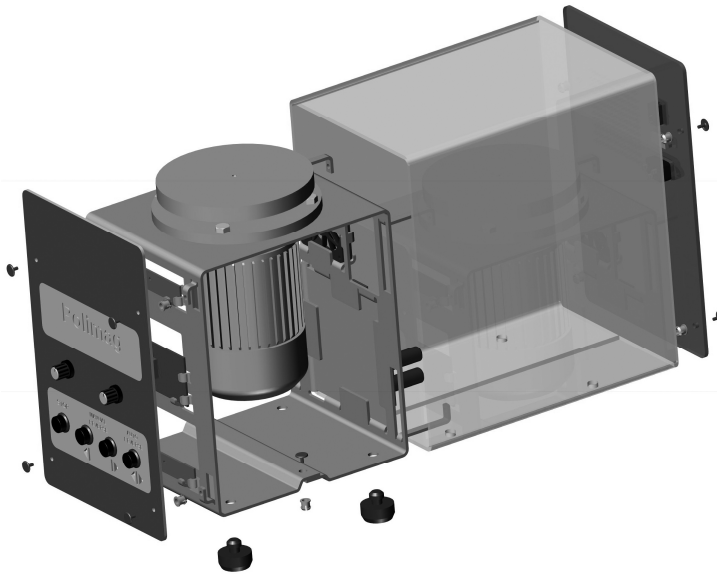


Fig. 4. DMC_{0-1-1} of AP “Polimag”

Rys. 4. KTP_{0-1-1} montowanego wyrobu „Polimag”

At the **fifth stage**, comparative analysis of DMC_0 and DMC_{0-1-1} design alternatives was made (Fig. 5).

At the **sixth stage** it was decided whether to make modifications. New design alternative for the “Polimag” AP, the number of parts was 151. Assembly cost and total manufacturing cost of DMC_{0-1-1} were reduced by UAH 143 per unit (~\$18) and UAH 212 per unit (~\$27) respectively. According to the DMC comparison report, the repeated design resulted in the reduction (Fig. 6) of the number of parts by 46.1%, of the time and cost for assembly, by 60.7%, cost for manufacturing of parts, by 5.8%, total AP manufacturing costs, by 14.9%.

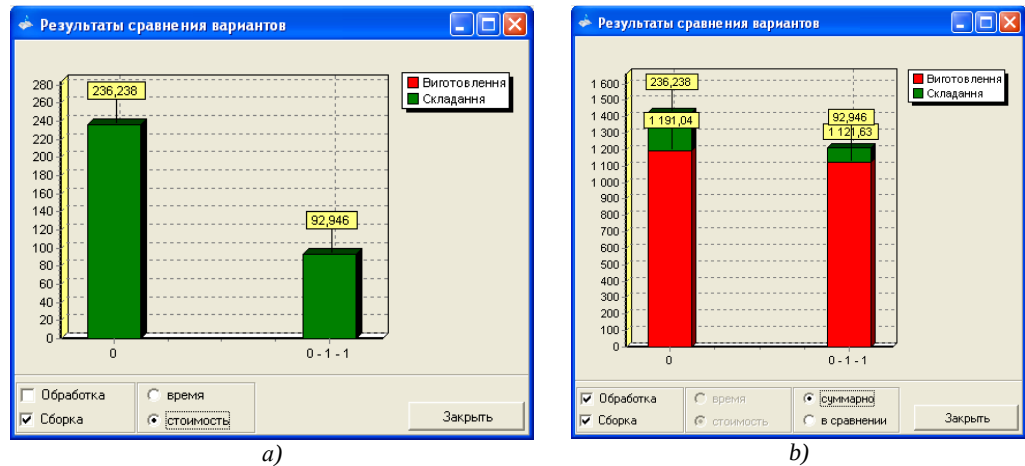


Fig. 5. Results of comparative analysis of the manufacturing costs (a) and the total assembly and manufacturing costs (b) for DMC_0 and DMC_{0-1-1}

Rys. 5. Wyniki porównania KTP_0 i KTP_{0-1-1} ; a) porównanie kosztów montażu; b) porównanie łącznych kosztów wytwarzania i montażu

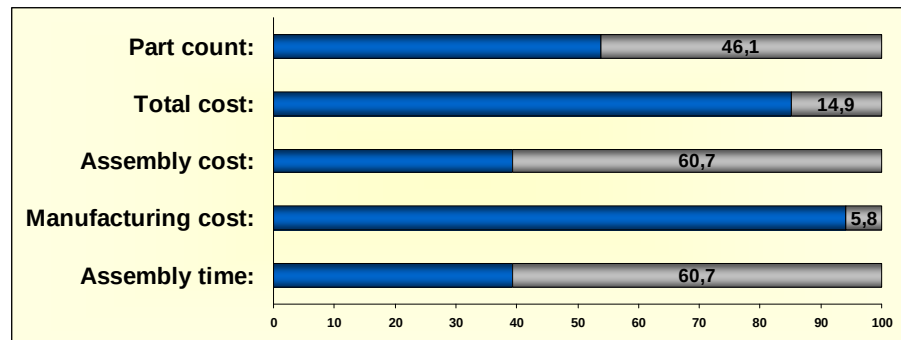


Fig. 6. A diagram of an effectiveness of the DMC_{0-1-1}

Rys. 6. Wykres efektywności nowego projektu

CONCLUSIONS

DFA Expert[®] software presented in this paper is an efficient design support tool in assembly-oriented design of a product enabling to assess new Design and Manufacturing Concept both in terms of assembly processes and manufacturing processes.

The proposed method proved its efficiency in the LBU-Tech company in engineering a new design of the "Polimag" product. Estimated saving due to implementation of the new design is UAH 212,000 (~\$27,000).

REFERENCES

1. Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Anthony Knight. Product design for manufacture and assembly. 2nd ed. ISBN 10: 082470584X, CRC Press Taylor & Francis Group, 2001
2. Lucas Engineering Systems Ltd., University Of Hull, Design For Assembly / Manufacture Analysis Practitioners Manual, Version 10.5, CSC Manufacturing, Solihull, UK, 1995.
3. Пасечник В. А. Анализ и усовершенствование конструкций изделий с использованием программного обеспечения «DFA Expert» / В.А. Пасечник, Ю.В. Лашина // Połączenia montażowe. – 2010. – z. 79. – P.17–25
4. Пасічник В. А. Принципи формування математичної моделі складальної одиниці в виді бінарних відношень обмежень рухливості / В. А. Пасічник, В. М. Кореньков // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр XV межд. науч. техн. конф., В 4-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2008. Т. 3. – С. 64–70.
5. Кореньков В.Н. Автоматизированный синтез множества технологически целесообразных последовательностей сборки изделий машиностроения / В.Н. Кореньков, В.А. Пасечник, А.А. Субин // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки / Хмельницький, 2010. – № 1 (144). С. 20-24
6. Лашина Ю. В. Формалізація обмежень на інтеграцію деталей в складальному виробі / Ю. В. Лашина, В. А. Пасічник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ. – 2010. – №26 – С.177–182.

ASSEMBLY-ORIENTED DESIGN USING DFA EXPERT[®] SOFTWARE

Abstract. *This paper presents the method of assembly-oriented design with the use of DFA Expert computer software. The use of this method for analysis and redesign of the assembly product “Polimag” allowed to reduce the number of parts almost by half and to cut the estimated production cost appreciably.*

Vitalii PASICHNYK
Vladimir KORENKOV
Uniwersytet Techniczny
„Politechnika Kijowska”
Kijów, Ukraina

MATEMATYCZNE MODELE I PROCEDURY W ZADANIACH ANALIZY I SYNTEZY PROCESÓW MONTAŻU

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОЦЕДУРЫ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ПРОЦЕССОВ СБОРКИ

В статье представлена реализация перспективной модели компьютерно-интегрированного производства для условий гибкого сборочного производства базирующаяся на взаимосвязанных моделях объекта сборки, процесса проектирования технологии и модели производства.

Математическая модель сборочного изделия (СИ). При информационной поддержке жизненного цикла СИ возникает целый ряд задач, решение которых базируется на анализе определенных свойств конструкции самого изделия. Поэтому понятно желание создать единую, универсальную по форме представления математическую модель, пригодную для решения большинства задач (в пределах рассматриваемой теории). В этих задачах имеют место несколько сущностей, и ключевую роль играет понятие связи между ними. Разумеется, в качестве сущностей выступают свойства реальных объектов (например, деталей изделия, технологической оснастки, оборудования и т.п.), а связи – своего рода ассоциация между отдельными свойствами упоминаемых объектов. В математике такие связи принято называть отношениями и представлять в виде декартова произведения множеств. Например, если под объектами понимать детали конструкции, то отношением (скажем, свойство "наличие контакта") является подмножество упорядоченных пар $R \subset A_1 \times A_2 \times \dots$, где $a_i \in A_1$, $a_j \in A_2$ и т. д. – номера деталей изделия.

Относительно степени отношения. Если n – общее количество деталей, то, конечно, должна выполняться равенство $A_1 \equiv A_2 \equiv \dots \equiv A_n \equiv A$. Однако рассматривать $R \subset A_n$ не целесообразно, поскольку любой процесс сборки можно свести к поддетальному (установка по одной детали на каждой операции). Это позволяет сделать вывод, что основное свойство такого представления – „ a_i следует за a_j ” – характеризует связь между парой деталей, т.е. бинарное отношение $R \subset A^2 = A \times A$.

Собственно, для теоретического рассмотрения математической модели сборочного изделия достаточным является ее описание в терминах теории множеств. Однако практическая реализация в САПР требует от разработчиков математического обеспечения подробной формы представления данных. Известно [1], что графическим изображением бинарного отношения является граф (рис. 1, а).

На сегодняшний день программное обеспечение, которое работает с подобным видом информации – объектными моделями на основе языка UML (англ. – *Unified Modeling Language*) активно развивается. Пока что это развитие идет в направлении управленческих и экономических моделей, но можно надеяться, что в будущем речь графического описания объектных моделей займет ведущее место. Одной из самых распространенных является табличная форма представления отношений (рис. 1, б). В случае бинарных отношений – это обычная квадратная таблица, в случае n -арных – множество связанных таблиц (вроде реляционных баз данных). Табличная форма удобна тем, что выполнение $a_i R a_j$ обозначается наличием переменной e_{ij} с помощью которой можно количественно охарактеризовать свойство отношения (например, величину зазора при наличии соединения).

Реже используются формы представления отношений в виде перечня дуг (рис. 1, в) и фактор-множеств (рис. 1, з). С точки зрения программирования – это обычные списки. Для решения поставленной задачи такое представление малоинформативно и достаточно неудобно в использовании.

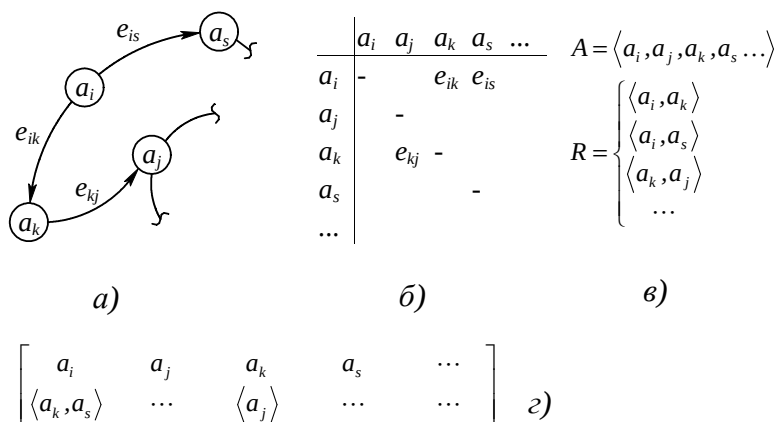


Рис. 1. Формы представления отношений

Rys. 1. Sposób prezentacji zależności

Логичным есть вопрос относительно содержания или семантики отношения. Выше уже упоминались два свойства: контакт и следования. Однако при автоматизированном проектировании основной исходной информацией является геометрическая информация о топологии поверхностей деталей, которая может быть получена из CAD, и свойство следования, которая не присутствует в 3D-моделях в явном виде. Поэтому свойство ограничения перемещения (подвижности), на основе которой будет делаться вывод об очередности установки деталей, должна быть формальной. Итак, в дальнейшем, выражение $\langle a_i, a_j \rangle \in R$ будет означать, что высказывание „деталь a_i ограничивает возможное перемещение a_j ” – истинное.

Способы проверки условий доступа является своего рода инструментом для формирования математического представления геометрической составляющей P модели СВ. Обычно этот относится к задачам систем компьютерной поддержки производства.

Математическое представление параметров пространственного положения деталей достаточно разнообразно, однако их общей особенностью является то, что они учитывают только свойства конкретной конструкции.

Предлагается [2] математическую модель СВ представить как сочетание функций:

- $F_G: R \times T \rightarrow \Theta$ – деталь a_i ограничивает возможное перемещение a_j по траектории $t \in T$ на расстоянии $\theta \in \Theta$ (здесь под t следует понимать произвольную кривую, как простейший и самый частый случай – поступательное перемещение вдоль координатного направления или поворот вокруг оси);
- $F_P: R \times H \rightarrow \Omega$ – соединение a_i и a_j принадлежит определенному типу соединений H с известной характеристикой $\omega \in \Omega$;
- $F_E: R \times O \rightarrow Z$ – соединение a_i и a_j может быть получено на оборудовании $o \in O$ с физическим (технологическим) принципами функционирования $\zeta \in Z$.

Функция F_G устанавливает соответствие между множествами деталей и траекторий перемещений. В общем случае это n -арное отношение, поскольку траекторий может быть множество.

Обычно множество T содержит до 6 элементов, которым отвечать 6 матриц перемещений и поворотов: $M_x, M_y, \dots, R_z$. Важно, что эти матрицы можно сформировать не вручную, что является непродуктивным и может содержать большое количество ошибок, а автоматически через анализ трехмерной модели, созданной в CAD [3, 4], с обеспечением их полной информативности. Рисунок 2 иллюстрирует выявление ограничений перемещения деталей в СЕ.

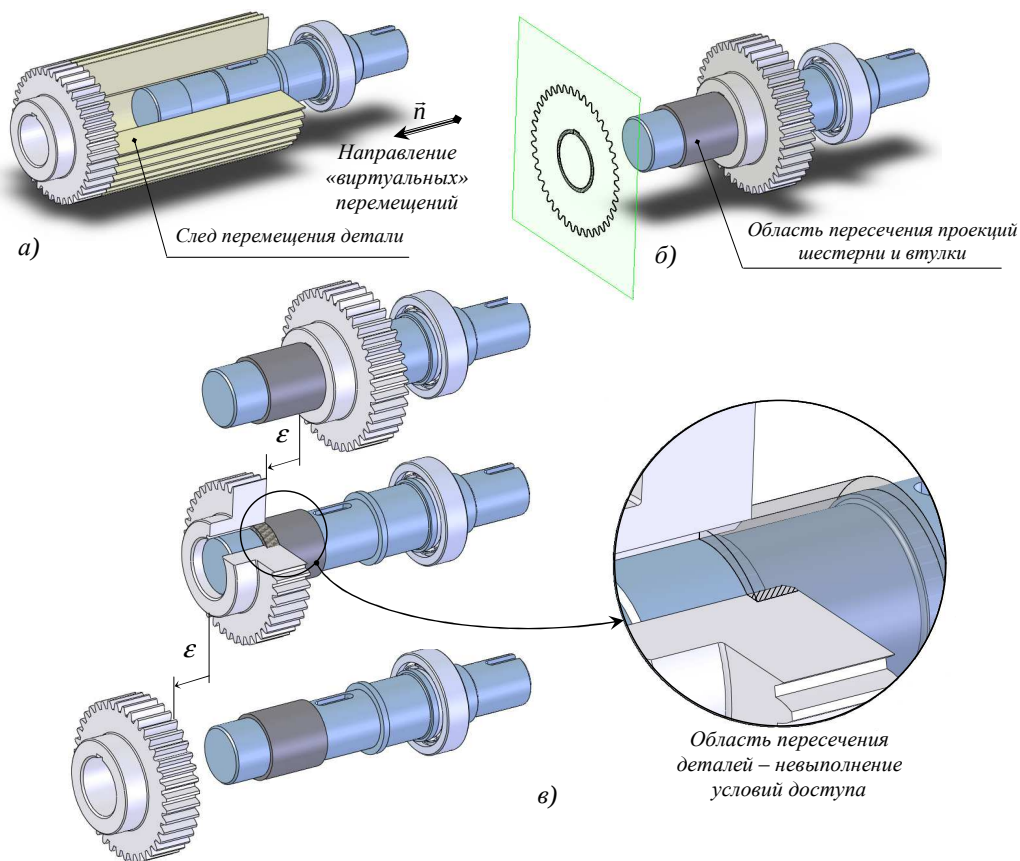


Рис. 2. Возникновение и выявление ограничений подвижности деталей в СЕ

Rys. 2. Tworzenie i identyfikacja ograniczeń przemieszczania części w jednostce montażowej (zespole)

Для общего анализа достаточно иметь значение $\theta \in \Theta$ функции F_G как логическое значение наличия или отсутствия того или иного свойства. Для более детального анализа, в частности для размерного анализа, можно под значением θ понимать размерную информацию.

Содержание функции F_P должно отражать, в первую очередь, физический принцип функционирования соединения и, во вторую очередь, подчиненно – конструктивное исполнение соединения. Такая постановка объясняется тем, что физический принцип функционирования

соединения, как правило, является неизменным, в то время когда конструктивная реализация соединения в процессе конструирования и отработки конструкции СИ на технологичность может подвергаться существенным изменениям.

Содержание функции F_E должно содержать, в первую очередь, физический или технологический принцип (набор принципов) реализации соединения и, во вторую очередь, подчиненно – технологическое оборудование, реализующее этот принцип.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Манипулирование с моделями изделий – прерогатива математических моделей процесса проектирования технологии. Это наименее формализованная составляющая всего процесса проектирования, поскольку она в определенной степени должна воспроизводить мышление человека. Здесь достаточно хорошо применим системный подход. Так, например, процесс синтеза технологического процесса сборки (ТПС) может быть унифицирован и сведен к нескольким типовым подпроцессам дальнейшей проработки принимаемых решений [5]. Иначе говоря, процесс Π проектирования маршрутного ТПС возможно представить как реализацию последовательности подпроцессов Π_i , на каждом из которых автономно решается ряд задач:

$$\Pi \rightarrow \bigcup_{i=1}^k \Pi_i \rightarrow \begin{cases} \bigcup_{j=1}^f \text{Pr}_j^1(Q, M_j) \rightarrow G \\ \bigcup_{t=1}^n \text{Pr}_t^2(G, D, W_t) \rightarrow R \end{cases}$$

Согласно данному утверждению, каждый подпроцесс Π_i представляет собой i -й уровень проектирования, на котором выполняются процедуры Pr_j^1 синтеза проектных решений. Результатом выполнения $\Pi_1 \dots \Pi_k$ будет множество G всех допустимых решений. Данное множество содержит только часть $R \subseteq G$ доминирующих вариантов, а поэтому для недопустимости синтеза $R \cap G$ заведомо неперспективных вариантов на каждом уровне проектирования вводятся процедуры Pr_t^2 анализа и оценки проектных решений. Процедуры Pr_j^1 выполняются над объектом моделирования Q на основе множества правил M_j , а Pr_t^2 – на основе исходных данных D и набора ограничений W_t .

Согласно сказанному, можно выделить следующие подпроцессы автоматизированного проектирования ТПС (рис. 3).

Подпроцессы $\Pi_1 \dots \Pi_3$ соответствуют традиционному проектированию, при котором предварительно из состава изделия выделяются технологически независимые части, для которых затем проектируются отдельные ТПС. Такой подход позволяет рассматривать ТПС изделия как совокупность процессов сборки отдельных его элементов, а количество итераций выполнения $\Pi_1 \dots \Pi_3$ равно количеству структурных элементов, входящих в состав изделия. Данная особенность технологии сборки позволяет ограничиться разработкой алгоритмов проектирования только для одного отдельного элемента, чем обеспечивается универсальность алгоритмического процесса относительно сложной структуры изделия.

Для математического описания подпроцессов, существуют два пути:

- *вероятностный* – позволяет с помощью сравнительно простых проектных процедур и с минимальной трудоемкостью вычислений получить приемлемые результаты, однако не дает гарантии того, что определенные порядки составления являются лучшими на множестве всех возможных альтернатив;
- *логический* – базируется на формализованных методах решения технологических задач, чем

обеспечивает предсказуемость результатов (обоснованность проектных решений). Однако из-за необходимости анализа полного пространства решений задачи, длительность расчетов при современном уровне развития вычислительной техники даже для несложных изделий может быть значительной.

С точки зрения технологии сборки, функция F_G несет информацию о геометрической замкнутости объектов, то есть они показывают, какие элементы конструкции препятствуют перемещению i -й детали по той или иной траектории.

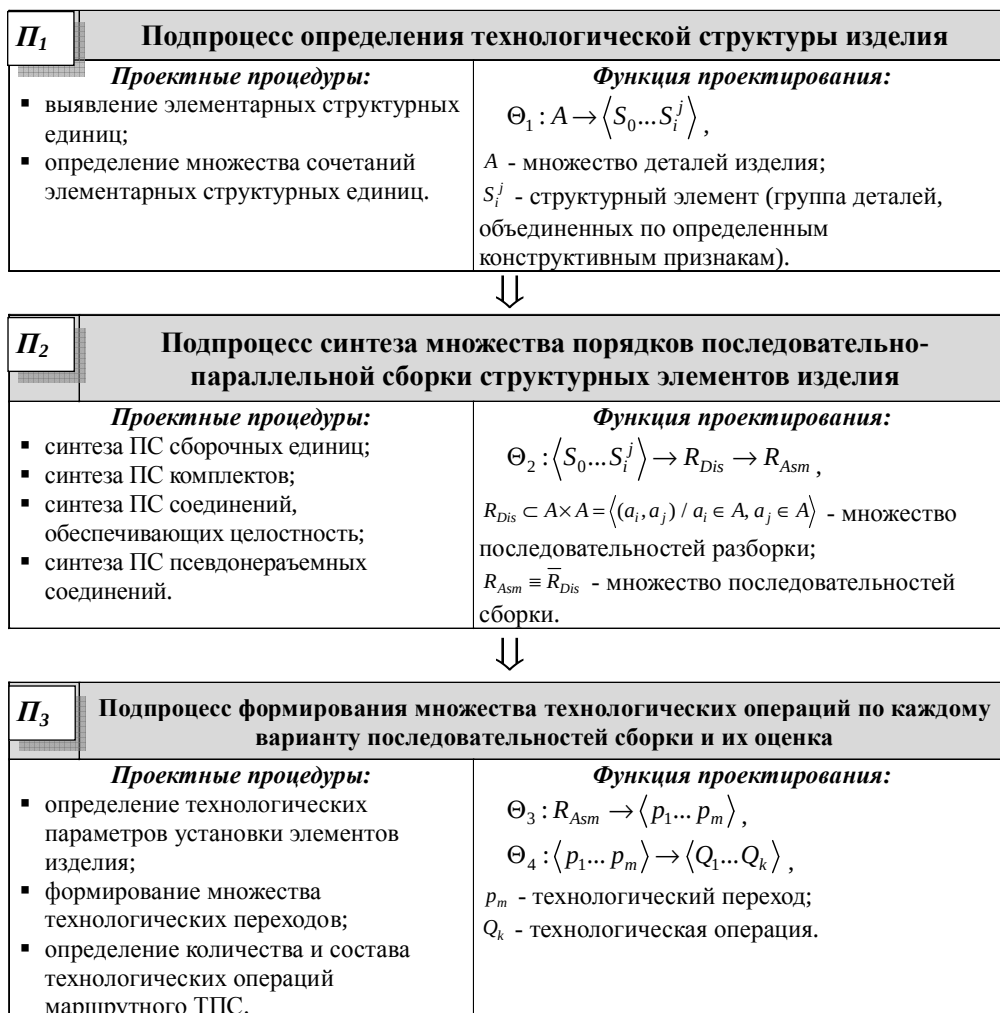


Рис. 3. Структура процесса синтеза маршрутных ТПС изделий

Rys. 3. Struktura procesu syntezy marszrut procesu montażu wyrobu

На основе данного свойства в [6, 7] был предложен метод автоматизированного синтеза последовательностей сборки, получивший название "обратного". Его основным преимуществом стала линейная зависимость количества арифметических операций от числа деталей изделия. Это одна из важнейших особенностей, что позволяет анализировать конструкции практически любой сложности (в сравнение, другие известные методы синтеза позволяют рассматривать сборку до 15÷20 деталей, поскольку сложность вычислительной задачи для них степенной зависимостью от n).

Идея определения технически допустимой ПС состоит в том, что для СИ, который является иерархическим структурированным объектом с вложенным друг в друга сборочными единицами (СЕ), сначала моделируется процесс их разборки, при котором гарантированно выполняются все условия доступа деталей в зону сборки, после чего инвертированием может быть получена последовательность сборки (рис. 4).

Отметим, что информации только о факте ограничения возможного перемещения деталей недостаточно для выявления самых сборочных единиц, поэтому возникает необходимость в использовании функции F_p . Крім наявності контакту дана функція ставить у відповідність парі деталей певний тип з'єднання. С точки зрения технической реализации – это совершенно разные соединения (резьбовые, пресовые, сварные и т.д.), однако с точки зрения их представления в математической модели, все они имеют одно общее свойство – это *соединения, обеспечивающие нераспадемость* (СОН) структурной единицы [8]. Одно такое соединение, а также детали, установка которых предшествует его образованию, определяют элементарную сборочную единицу (рис. 4, а). Комбинируя между собой такого рода "кирпичики" можно создавать любую из технически возможных СИ (рис. 5, б), т.е. разделять всю конструкцию на целостные сборки по технологическим принципам (например, время сборки, количеством деталей и т.д.).

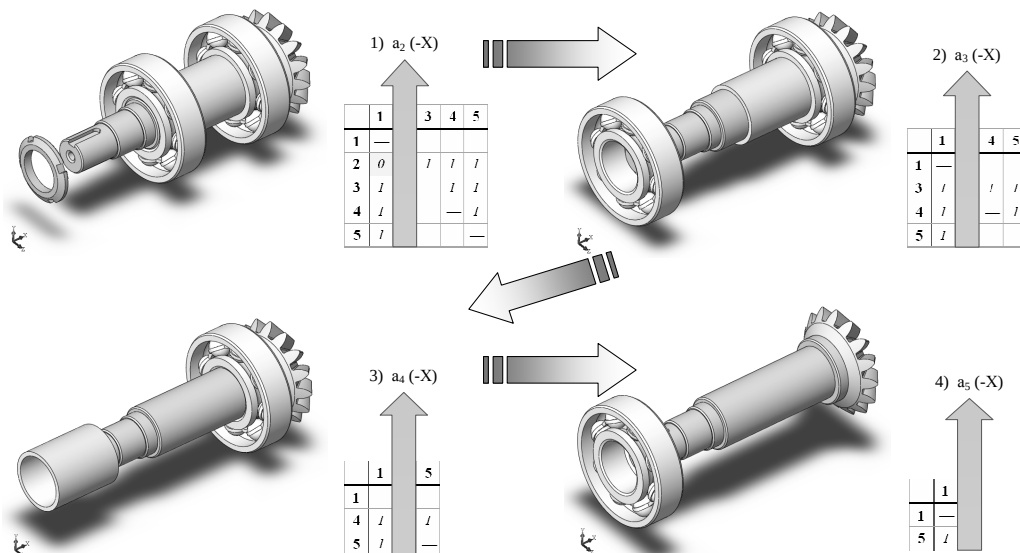


Рис. 4. Применение "обратного" синтеза для разборки-сборки:

разборка: $a_2 (-X) \triangleright a_3 (-X) \triangleright a_4 (-X) \triangleright a_5 (-X) \triangleright a_1$;

сборка: $a_1 \triangleleft a_5 (+X) \triangleleft a_4 (+X) \triangleleft a_3 (+X) \triangleleft a_2 (+X)$

Rys. 4. Zastosowanie „odwrotnej” syntezy dla demontażu-montażu:

$a_2 (-X) \triangleright a_3 (-X) \triangleright a_4 (-X) \triangleright a_5 (-X) \triangleright a_1$;

montaż: $a_1 \triangleleft a_5 (+X) \triangleleft a_4 (+X) \triangleleft a_3 (+X) \triangleleft a_2 (+X)$

Начиная с модели СИ разработка технологии должна выполняться САМ системой. К сожалению, сейчас в этих системах последовательность выполнения операций задается человеком вручную, то есть, разрывается связь CAD $\leftrightarrow$ CAM. В эту цепочку вмешивается технолог, обычно приводит не только к увеличению времени проектных работ, но и самое главное к ухудшению качества проектных решений за невозможности оценки их полного множества и выбора наилучшего варианта, а также обычных ошибок. Именно поэтому системы для решения слабо формализованных технологических задач выделено в отдельную группу: CAPP – системы компьютерного проектирования технологических процессов в технологической подготовке производства.

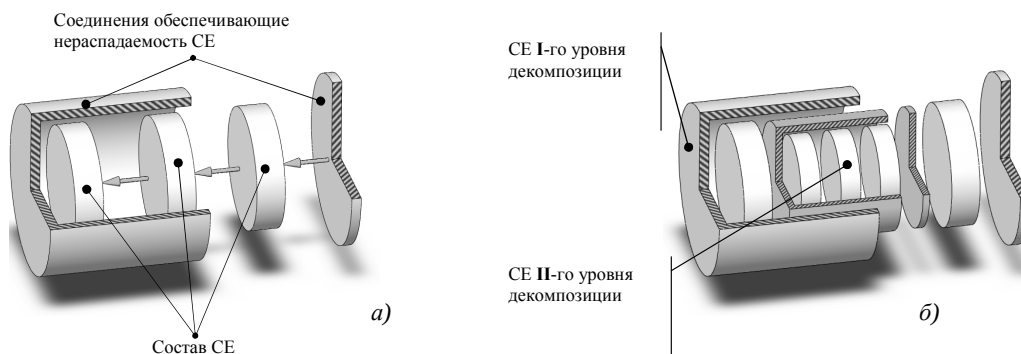


Рис. 5. Схематическое изображение структурных элементов изделия:
а – одноуровневая SE; б – двухуровневая SE

Rys. 5. Schematyczne przedstawienie strukturalnych elementów wyrobu:
a) jednopoziomowa jednostka montażowa, b) dwupoziomowa jednostka

Конечный результат проектирования здесь довольно часто представляется в виде графов (или таких, которые могут быть сведены к графам) – своего рода аналогов традиционных схем сборки. Однако до сих пор не решены вопросы автоматизированного ввода и обработки информации технологического содержания (ресурсы и время). Например, остро стоят вопросы автоматизированного выбора технических средств; почти отсутствуют связи между теоретическими моделями технологических процессов сборки и полученными из опытов моделями отдельных подпроцессов ориентирования или соединения деталей. Ввиду этого, модели технологии носят главным образом табличный характер (рис. 6).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сегодня наиболее востребованы САПР для экспресс-анализа и оценки стоимости и сроков выполнения заказа. Развитие такого рода программных продуктов возможен лишь на основе *математических моделей производства*. Разработанные модели производства предназначены, в основном, для решения задач организации и планирования, в качестве исходных данных опираются на информацию о технологии изготовления изделий. Как следствие, недостаточная формализация технологических знаний оказывается единственным звеном, которое разрывает целостную информационную цепочку между подготовкой производства, с одной стороны, и планированием и управлением, с другой.

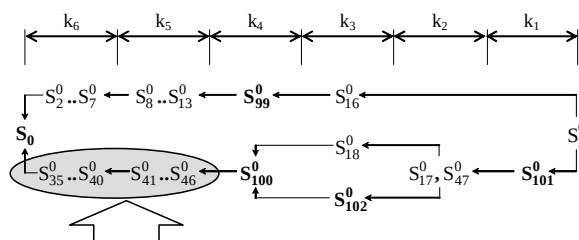
Вопросы планирования и управления производством отошли в разряд чисто математических, что позволило менеджерам проводить эксперименты с различными сценариями, разрабатывать долгосрочной стратегии, выполнять анализ и уменьшать риски. Планирование, координация

трудовых, финансовых и материально-технических ресурсов выполняется на протяжении всего проекта и позволяет автоматически формировать заказы, резервировать необходимые материалы, автоматически контролировать доступность финансовых средств, возможностей или материалов, необходимых для изготовления изделия.

Рассмотренные ранее методы позволяют получить любую технически допустимую последовательность сборки. Однако в их основу положены лишь геометрические и физические принципы построения объектов и, как следствие, количество таких последовательностей будет хотя и конечным, однако слишком большим, чтобы быть пригодной для анализа. Поэтому возникает необходимость введения ограничений технологического характера [9]. Все эти ограничения являются эмпирическими и позволяют свести окончательное число до нескольких вариантов сборки. За выполнение этой задачи отвечает функция F_E .

Структура взаимодействия элементов производства, интегрированная с гибкой технологией составления приведена на рис. 7.

Представление последовательности сборки изделия S_0 , в виде графа. Осуществима за $k=6$ шагов (символом S_i^j обозначено i -й сборочный элемент, принадлежащий j -й СЕ)



Модель выполнения процесса соединения (установки элемента) задается в виде декартова произведения $T \times F$, где $T = \{\tau_1, \dots, \tau_k\}$ – множество технологических операторов, характеризующих процесс производства (операции, переходы); F – понятие «контура» как совокупности свойств определенного назначения в изделии или технологической системе.

Для описания технологической системы S в целом, вводится множество операторов $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_j\}$, характеризующих материальные объекты (оборудование, инструмент, оснастку и т.п.). В таком случае: $S = T \cup \Pi$

Матрица контуров:

F_1 – отверстия; F_2 – положения болта;
 F_3 – положения шайбы; F_4 – положения гайки

	F_1	F_2	F_3	F_4
τ_1 – сверление	•			
τ_2 – зенкерование	•			
τ_3 – снятие фаски	•			
τ_4 – установка болта		•		
τ_5 – установка шайбы			•	
τ_6 – установка гайки				•
τ_7 – кернение				•
π_8 – сверло	•			
π_9 – зенкер	•			
π_{10} – сверло	•			
π_{11} – инструмент для установки болта		•		
π_{12} – инструмент для установки гайки				•
π_{13} – инструмент для выполнения операции кернения				•

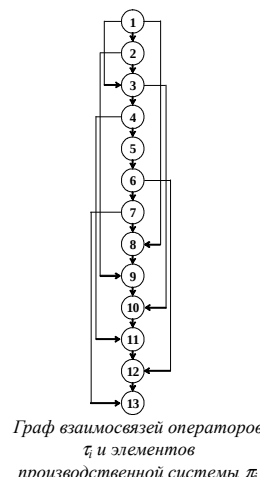


Рис. 6. Представление результатов моделирования ТПС

Rys. 6. Uwidocznienie wyników modelowania procesu technologicznego montażu

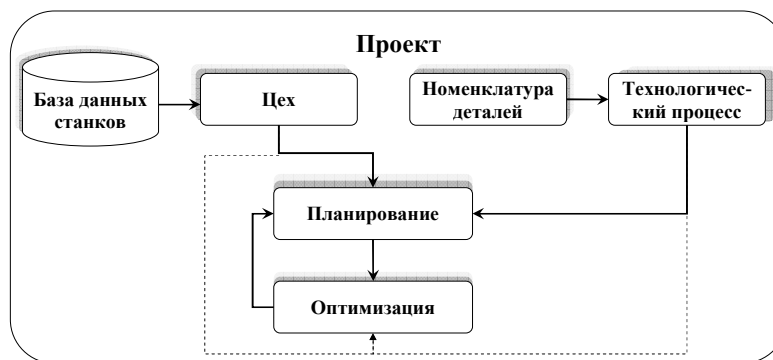


Рис. 7. Структура взаимодействия элементов производства

Rys. 7. Struktura współoddziaływania elementów produkcji

Данные, необходимые для описания взаимодействия этапов технологического подготовке и, в частности, полученной через анализ БВОР множества вариантов последовательностей подетального последовательного и параллельно-последовательной сборки должны описываться совокупностью:

- для технологического оборудования
 M_i – индекс оборудования ($i = 1..m$, где m – общее количество оборудования);
 $M_i.type$ – тип оборудования ($type = [манипулятор, пресс, винтовёрт, сварочный аппарат]$);
- для номенклатуры сборочных единиц
 a_j – наименование СЕ ($j = 1..n$, где n – общее количество наименований);
 $a_j.N$ – общее количество (программа выпуска) СЕ a_j ;
 $a_j.p$ – количество партий a_j ;
 $a_j.priority$ – приоритет сборки для a_j ;
- для технологии сборки СЕ a_j ;
 $a_j.Matrix$ – матрица ограничений последовательности технологических операций (ТО);
 $a_j.v$ – вариант ТРП j -ой СЕ (v – варианты ТП);
 $a_j.v.P_k$ – ТО сборки для a_j ($k = 1..q_v$, где q_v – общее количество ТО, предназначенных для сборки данной СЕ для v -го варианта технологии);
 $a_j.v.P_k.type$ – тип операции $a_j.P_k$ ($type = [установочная, прессовая, резьбозавинчивающая, сварочная]$);
 $a_j.v.P_k.time$ – время, необходимое для выполнения операции $a_j.P_k$;
 $a_j.v.P_k.dodtime$ – вспомогательное время, необходимое для выполнения операции $a_j.P_k$;
- для распределения (диспетчеризации) СЕ по оборудованию
 $a_j.v.P_k.ID$ – номер оборудования, на котором выполняется k -ая операция сборки j -ой СЕ;
 $M_i.T_r$ – ТО, которая выполняется на i -м оборудовании ($r=1..e$, где e – общее количество операций на i -м оборудовании);
 $M_i.T_r.a_j$ – номер СЕ, соответствующей r -й ТО, выполняемой на i -м оборудовании;
 $M_i.T_r.StartTime$ – время начала выполнения r -ой ТО на i -м оборудовании;
 $M_i.T_r.EndTime$ – время завершения r -ой ТО на i -м оборудовании;

Отметим, что важным на данном этапе является не получение одного варианта сборки изделия, а получение именно альтернативных, однако технически допустимых и технологически целесообразных вариантов сборки, которые можно описать ограничениями последовательности технологических операций (ОПТО):

$$M_{c,v} = \begin{bmatrix} l_{1,1} & l_{1,2} & \dots & l_{1,v} & \dots & l_{1,q} \\ l_{2,1} & l_{2,2} & \dots & l_{2,v} & \dots & l_{2,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{c,1} & l_{c,2} & \dots & l_{c,v} & \dots & l_{c,q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{q,1} & l_{q,2} & \dots & l_{q,v} & \dots & l_{q,q} \end{bmatrix},$$

где l – элемент *ОПТО*, отражающий связь последовательности операций. Может иметь одно из двух значений:

“0” – две операции не накладывают ограничения на последовательность выполнения друг друга, т.е. в вариантах ТП две операции могут быть записаны, как $(a_j.v.P_c \vee a_j.v.P_v)$;

“1” – существует технологически обусловлено ограничение последовательности операций, которое определяет жесткий порядок выполнения операций $(a_j.v.P_c \wedge a_j.v.P_v)$.

ВЫВОДЫ

Эффективная реализация компьютерно-интегрированного механосборочного производства должна опираться на совокупность математических моделей сборочного изделия, технологии сборки и производства, каждая из которых должна уточнять предыдущую. Модель изделия, как способ представления виртуального объекта производства, должна учитывать все значимые свойства и функции материального объекта. Модель технологии должна формально определять технологические возможности и способ изготовления материального объекта. Модель производства должна формально учитывать технологические возможности и реальную загрузку технологического оборудования. Все математические модели должны иметь совместимую, а в лучшем случае, единую математическую основу, что позволит исключить ошибки трансформации и передачи данных, существенно ускорит процесс проектирования технологии и организации производства и гарантировать его корректность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зыков А. А. Основы теории графов. – М.: Наука, 1987. – 384 с.
2. Пасічник В.А., Кореньков В.М. Принципи формування математичної моделі складальної одиниці в виді бінарних відношень обмежень рухливості // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб.тр XV межд.науч.техн.конф., В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2008. Т.3. – С. 64-70.
3. Пасічник В.А., Сімута Р.Р. Виявлення значущих координатних напрямків і технологічних груп деталей у складанні // Вісник ЖІТІ. – 2002 / Спеціальний випуск / ІКТ 2002. – С. 152-157.
4. Пасічник В.А., Сімута Р.Р. Автоматизоване формування математичної моделі складального виробу // Вісник Технологічного університету Поділля, Хмельницький. – 2003. – № 4, Ч.2 (53). – С. 236–242.
5. Кореньков В.М. Автоматизований синтез маршрутних технологічних процесів складання. Дис...канд. техн. наук:05.02.08. – К.: НТУУ «КПІ». – 2005. – 171 с.
6. Давыгора В.Н., Пасечник В.А. Теория формализованного синтеза исходного множества альтернатив доминирующих порядков последовательно- параллельной сборки // Вестник НТУУ „КПИ”. Машиностроение. – 2000. – № 39. – С. 55-77.
7. Давигора В.М. Методика автоматизованого синтезу раціональних порядків складання // Technologia i automatyzacja montazu. – Warszawa: OBR TEKOMA, 2001. – №2. – С. 3–10.

8. Лапковский С.В. Технологическая декомпозиция сборочных изделий: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – К.: НТУУ «КПИ», 1998. – 192 с.
9. Пасічник В.А., Галайда Р.В., Ратушна І.В. Моделювання механоскладального виробництва у середовищі „GalAss” // Труды Одесского политехнического университета: Науч. и произв.-прак. сб. по техн. и ест. наукам. – Одесса, 2008.– Вып. 1(29). – С. 26–30

MATHEMATICAL MODELS AND PROCEDURES IN TASKS OF ASSEMBLY UNITS ANALYSIS AND ASSEMBLY PROCESSES SYNTHESSES

Abstract. *The article presents the implementation of a prospective model of computer-integrated manufacturing for a flexible assembly manufacture based on the interconnected model of the object assembly process design technologies and production models.*

L. W. BOŻKOWA
M. W. WARTANOW
Ż. K. BAKENA MBUA
Uniwersytet Techniczny MAMI
Moskwa, Rosja

MODELOWANIE PROCESU ZROBOTYZOWANEGO MONTAŻU PROFILOWANYCH WAŁÓW Z POMOCĄ WIBRACJI

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Автоматизировать сборку профильных соединений трудно, поскольку необходимо обеспечить решение трех сложных технических задач. Нужно достигнуть совпадения осей сопрягаемых посадочных цилиндрических поверхностей профильных валов, их относительного углового положения в сечении, перпендикулярном оси сборки и точности осевого положения собираемых деталей. Авторами разработан метод роботизированной сборки профильных бесфасочных соединений с зазором [1]. Мы полагаем, что наличие вибраций и упругой податливости закрепления профильного вала могут компенсировать погрешности положения деталей.

В результате этого, вибрационное сборочное устройство будет представлять собой трехзвенный манипулятор, каждое звено которого приводится в движение от отдельного привода.

Задачей данной работы является изучение влияния вибрационных колебаний и вращения сборочного устройства на характер движения центра масс цилиндрической профильной детали по отношению к втулке (то есть по отношению к подвижной системе координат). Необходимо также определить влияние на характер движения центра масс устанавливаемой детали ряда параметров, а именно: конструктивных параметров вибрационного устройства; коэффициентов жесткости упругих элементов схвата; коэффициента трения между деталями; амплитуды и круговой частоты вибрационных колебаний устройства, а также величины угловой скорости вращения сборочного устройства.

С этой целью нами была разработана математическая модель динамики движения центра масс присоединяемой детали к оси базовой детали [1].

Чтобы выделить режимы вибрации и получить область изменения динамических и конструктивных параметров, при которых центр масс присоединяемой детали достаточно быстро асимптотически приближается к оси базовой детали, было проведено компьютерное моделирование процесса.

Компьютерное моделирование является в настоящее время одним из основных способов исследования динамики сложных механических систем. Оно стало неотъемлемым этапом проектирования конструкций, оптимизации их параметров и широко применяется в различных областях науки и техники, таких как робототехника и пр.

Программы моделирования реализуют методы построения и анализа математических моделей объектов, разработанные на основе обобщенных подходов к описанию разнообразных конструктивных элементов, условий их взаимодействия и функционирования. Эффективность математических моделей определяется допущениями, которые принимаются в рамках таких подходов.

На основе математической модели был разработан пакет программ, реализующий по заданным исходным параметрам аналитическое решение полученных уравнений.

Программный пакет позволяет пользователю задавать различные параметры модели и исследовать их влияние на результат. Интерфейс имеет следующий вид (рисунок 1).

Примеры вывода данных в графическом режиме показаны на рисунках 2, 3, 4, 5, являющиеся траекториями движения центра масс устанавливаемой детали по отношению к базовой.

Из рисунка 2 видно, что при большом значении амплитуды (рис. 2а и 2б) наблюдается движение присоединяемой детали не удовлетворяющие поставленным условиям, а при малой амплитуде ($A=0,001$ рад) наблюдается асимптотическое движение присоединяемой детали к оси базовой.

Из рисунка 3 видно, что существует область изменения жесткости упругих элементов, при которых движение центра масс присоединяемой детали не доходит (рис. 3а) или проходит (рис. 3в) ось базовой детали, а при других значениях центр масс присоединяемой детали асимптотически доходит до оси базовой детали.

Из рисунка 4 видно, что при изменении коэффициента трения (в зависимости от типа материала присоединяемых деталей) для получения поставленных результатов нужно варьировать сборочное усилие и жесткость упругих элементов.

Из рисунка 5 видно, что при любом изменении частоты центр масс присоединяемой детали приближается к оси базовой. Разница состоит лишь в скорости приближения.

Исходные данные:

Масса деталей - 0,13 кг;

Размер (h) - 0,04 м;

Радиус присоединяемой детали (r) - 0,005 м;

Длина присоединяемой детали (l) - 0.1 м;

Сборочное усилие (P) - 5 н и 10н;

Возьмем самую минимальную угловую скорость:

Амплитуда колебаний [рад]:	0.05	Масса вала [кг]:	0.07
Частота колебаний [Гц]:	42	Размер h [м]:	0.04
Коэффициент трения:	0.4	Размер l [м]:	0.005
Жесткость [Н/м]:	5	Радиус диска [м]:	0.005
Угловая скорость [рад/с]:	0.5	Сборочное усилие [Н]:	5

Изменяемый параметр: Отсутствует От: 0 До: 0 Шаг: 0

Старт

	Амплитуда	Частота	Козф. трения	Жесткость	Угловая скорость
*					

Рис. 1. Интерфейс программного пакета

Rys. 1. Okno widokowe pakietu programowego

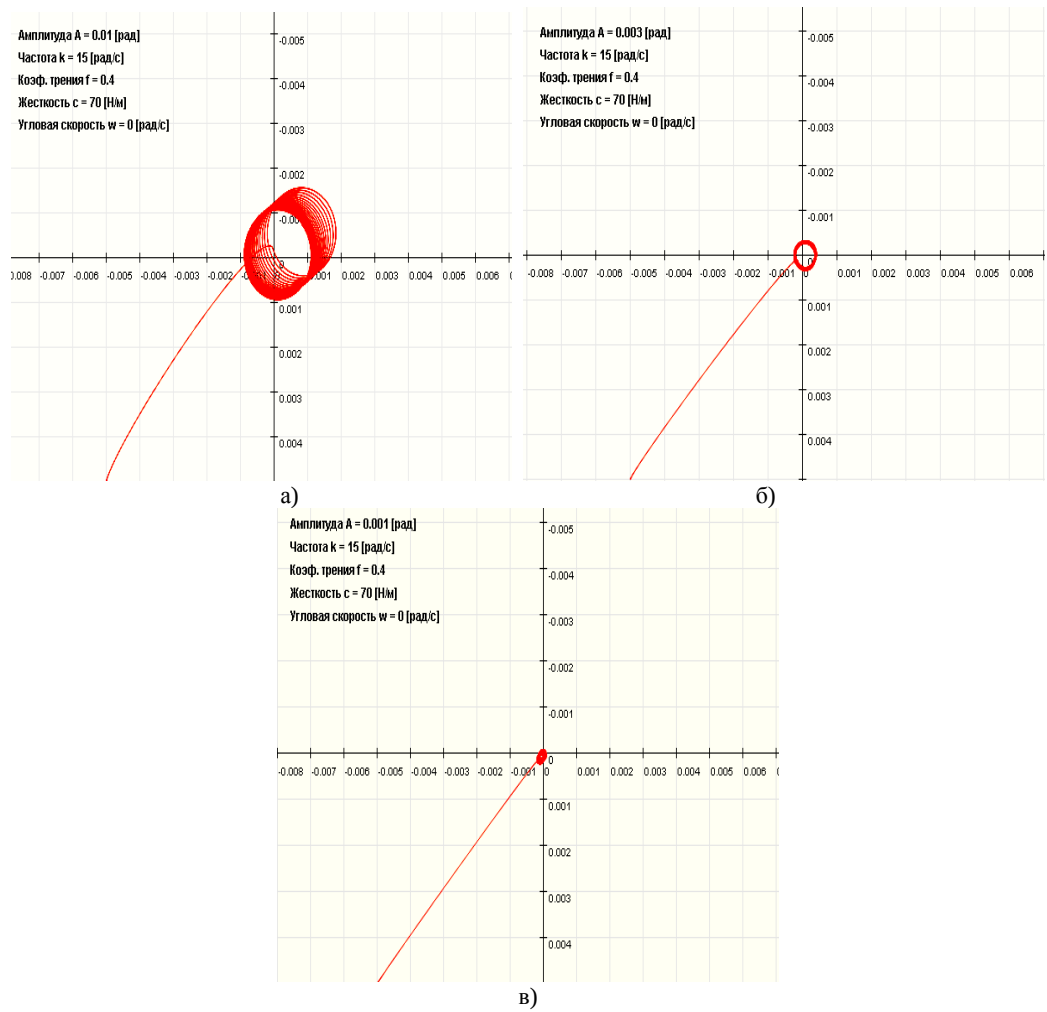


Рис. 2 Влияние амплитуды на характер траектории движения центр масс вала к оси втулки

Rys. 2. Wpływ amplitudy na trajektorię ruchu środka mas względem osi tulejki

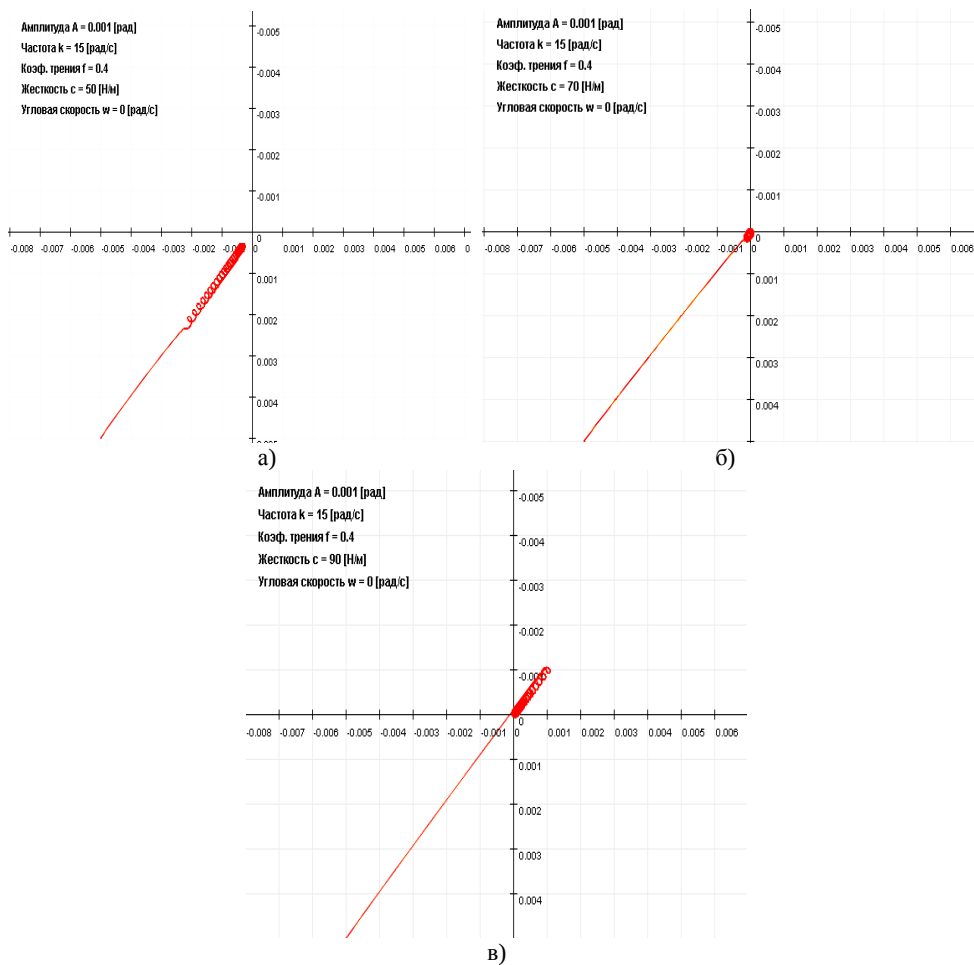


Рис. 3 Влияние жесткости упругих элементов на характер траектории движения центр масс вала к оси втулки

Rys. 3. Wpływ sztywności elementów sprężystych na trajektorię ruchu środka mas wału względem osi tulejki

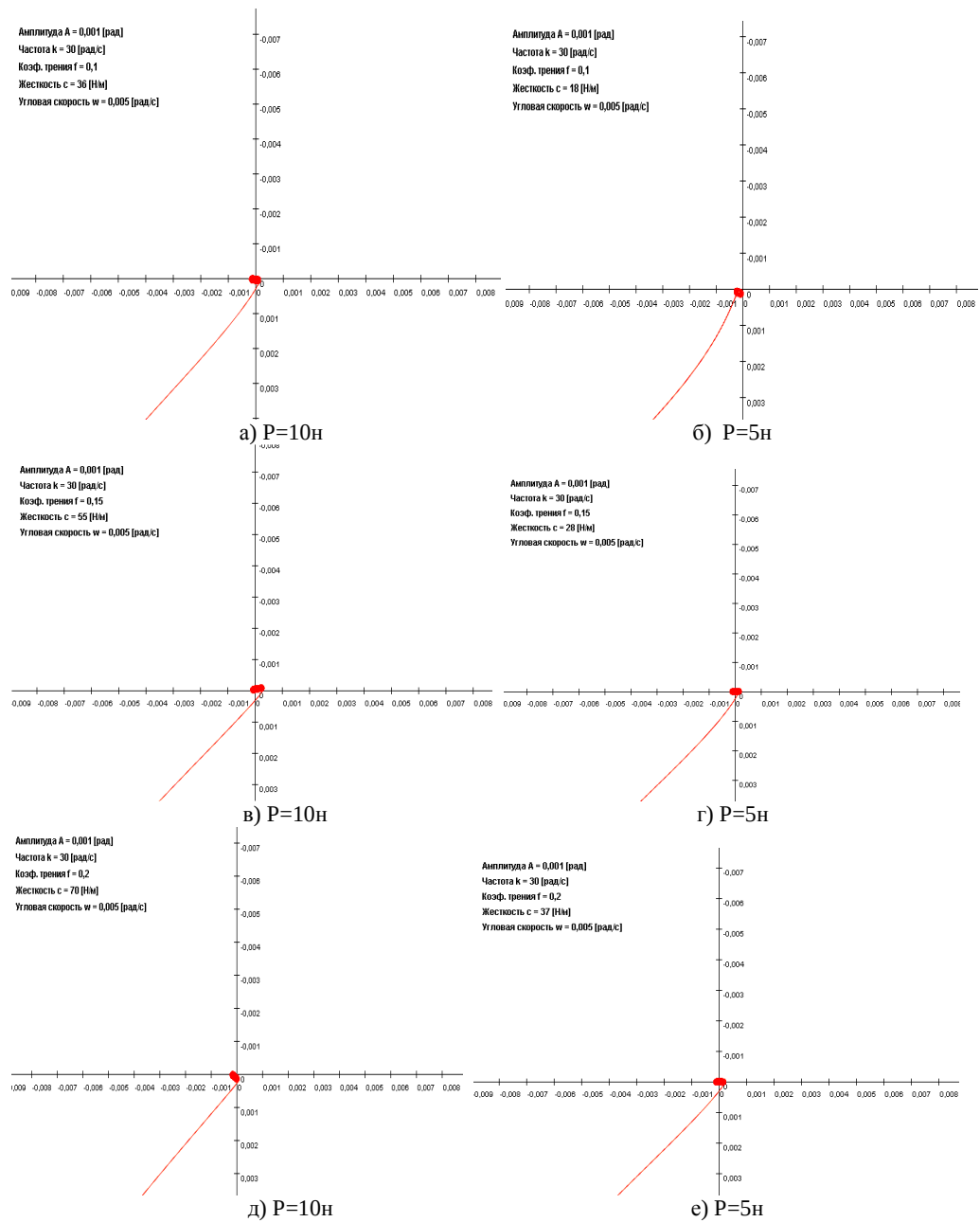
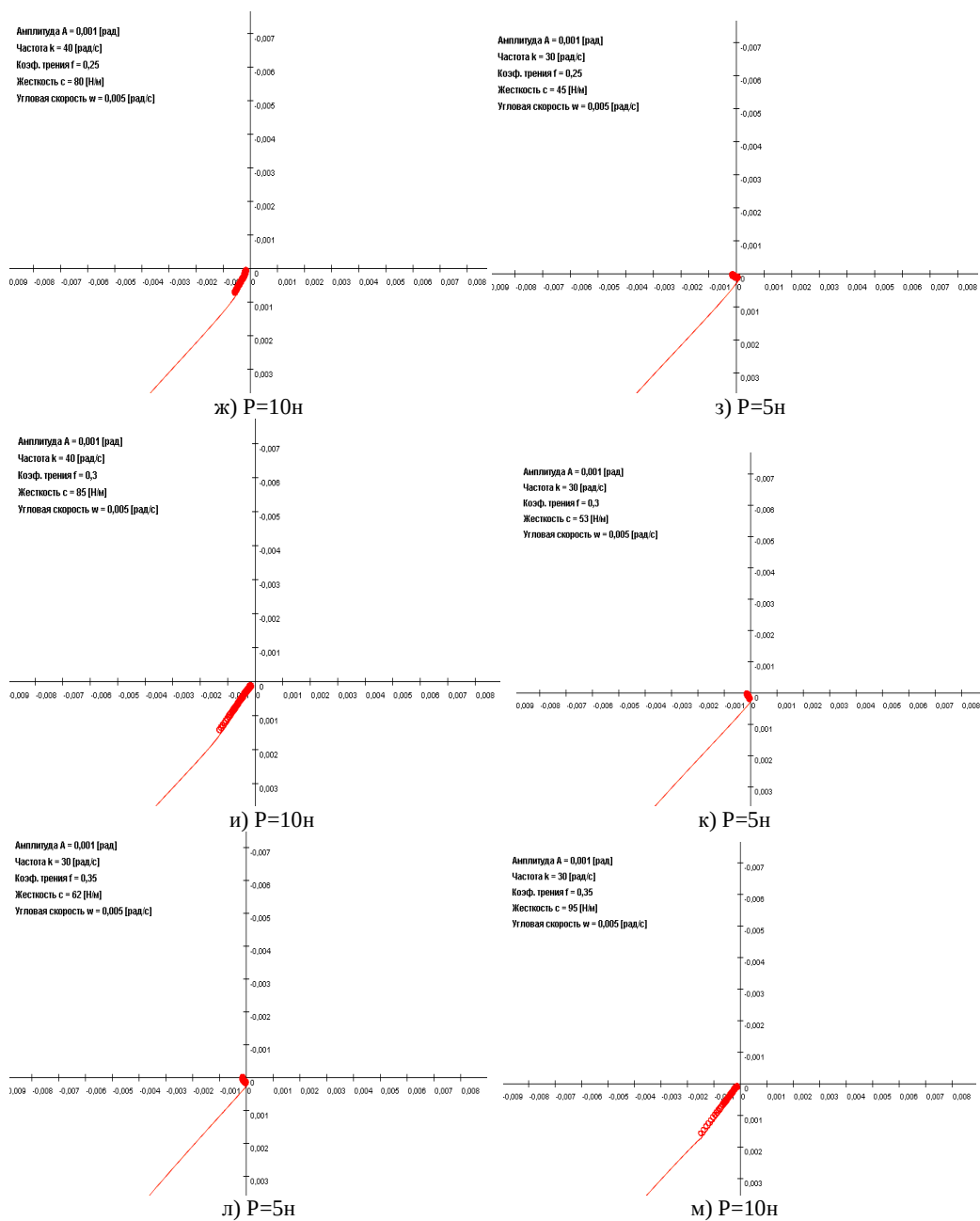
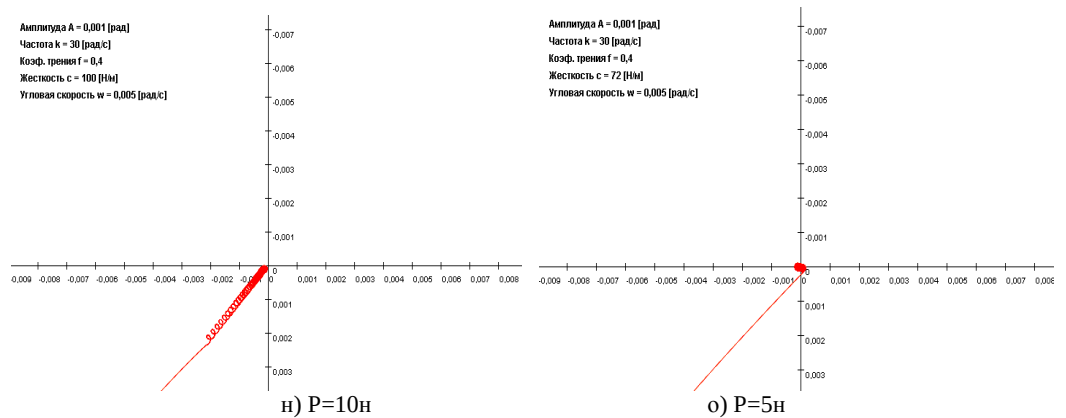


Рис. 4 Влияние коэффициента трения на характер траектории движения центр масс вала к оси втулки

Rys. 4. Wpływ współczynnika tarcia na trajektorię ruchu środka masy wału względem osi tulejki



Rys. 4. cd.



Rys. 4. cd.

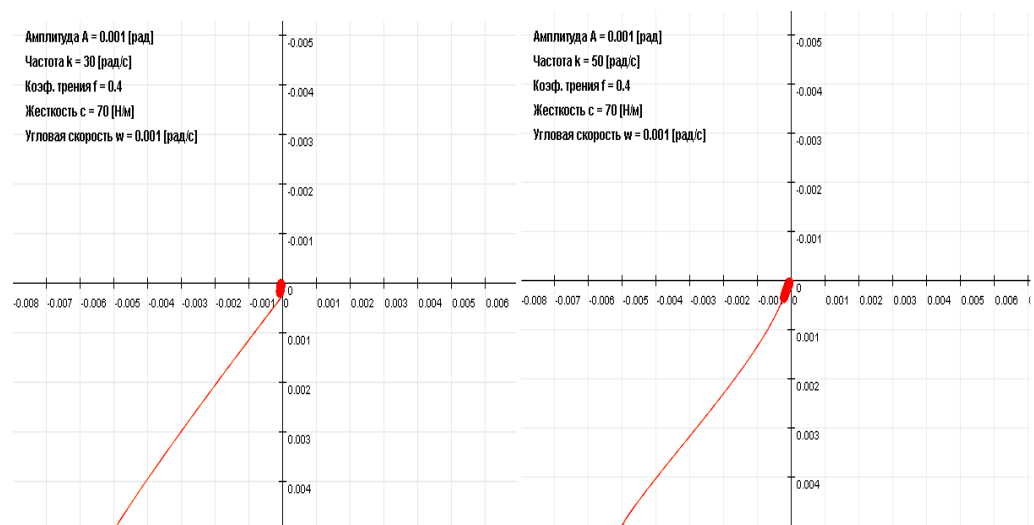
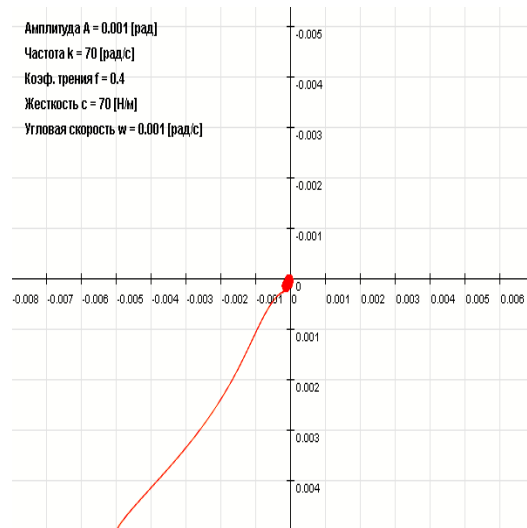


Рис. 5. Влияние частоты на характер траектории движения центр масс вала к оси втулки

Rys. 5. Wpływ częstotliwości na trajektorię ruchu środka mas wału względem osi tulejki



Rys. 5. cd.

Разработанные динамические модели, позволили теоретически обосновать возможность использования вибрационных колебаний для относительного ориентирования профильных валов с упругим закреплением. Компьютерное моделирование показало, что существует область изменения динамических и конструктивных параметров, при которых центр масс присоединяемой детали достаточно быстро асимптотически приближается к оси базовой детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Божкова Л.В., Варганов М.В., Бакена Мбуа Ж.К. Совершенствование технологии сборки цилиндрических профильных деталей с применением вибрационных колебаний и пассивной адаптации// «Сборка в машиностроении, приборостроении», 2010, №7, с. 26-31.
2. Протождяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов – М.: Наука, 1970. – 76с.

COMPUTER SIMULATION OF THE METHOD OF ROBOTIC ASSEMBLING PROFILE DETAILS WITH A BACKLASH WITH PASSIVE ADAPTATION AND LOW FREQUENCY

Abstract. The result of computer simulation of robotic assembling profile details with passive adaptation and low frequency is represented.

Nataliia STELMAKH
Vitaliy PASICHNYK
Uniwersytet Techniczny
„Politechnika Kijowska”
Kijów, Ukraina

MODELOWANIE TECHNOLOGII MONTAŻU PRZYRZĄDÓW W ŚRODOWISKU AsCAM

INSTRUMENT ASSEMBLY METHOD SIMULATION IN THE AsCAM SOFTWARE ENVIRONMENT

Accelerated method of preparation for assembling for small-scale instrument engineering implemented in a new software environment AsCAM has been presented. It has been demonstrated that the use of such software environment with relatively small amount of input data allows to get a solid solution and furthermore to reduce the preproduction preparation time.

INTRODUCTION

High precision and reliability of modern devices is generally a result of the use of a large number of high-precision instrumentation and performance of various adjustments, fine-tuning and setting-up operations. Thus the instrument assembly process is a labor-intensive one and in most cases comes up to 60-80 % of the total labor content for the manufacture of an instrument as a whole. Such high labor content share of assembly operations makes the organization and preproduction preparation more sophisticated and requires transition to a new manufacturing process arrangement based on group assembly workplaces with their differentiation and specialization.

It is known that these issues can be solved by integrating all manufacturing stages with the use of computer-aided design (CAD) systems. However, the principal obstacle is currently inconsistencies between high development level of the instrument computer-aided design systems and virtually total absence on the world market of computer-aided design and preproduction preparation systems for instrument assembly which would account for a specific character of the small-scale manufacture. All this impedes integration of the manufacturing cycle stages and drastically reduces manufacturing efficiency. This paper addresses developed mathematical models of assembly products with regard to instrument specificity allowing to develop procedures for their analysis and further synthesis of the assembly method and creation on this basis of new computer-aided design systems for assembly process.

MODEL OF AN ASSEMBLY PRODUCT IN INSTRUMENT ENGINEERING

Hierarchical structure of an assembly object can be presented as an *assembly composition diagram (ACD)* of a product determining which structural components belong to which separate *assembly units (AU)*. The following reference designations are introduced for further discussion of the assembly object and formal description of its structure:

$Ek = \{Ek_i\}$ – elements of the construction;

$$\left. \begin{array}{l} AP - \text{assembly products} \\ AU - \text{assembly units} \\ P - \text{parts} \\ P_{SP} - \text{standard products} \\ P_{PP} - \text{purchase products} \end{array} \right\} \Rightarrow Ek$$

Product component structure description model (PCSDM) can be presented as follows:

$$Ek.i.K.n.T_{dl}^{ii} \quad (1)$$

where:

i is the sequence number of Ek at the decomposition level $i=1..m, m \in N$;

K is the name of Ek ;

n is the number of Ek $n=1..l, l \in N$;

T is the type of $Ek, T = (AP, AU, P, P_{SP}, P_{PP})$;

dl is the decomposition level of $Ek, dl=1..k, k \in N$;

ii is the inclusion index of $Ek, iv=1..m, m \in N$.

For express analysis, the mathematical model (2) can be used in a simplified form:

$$Ek.i^{ii}_{dl} \quad (2)$$

Generally accepted construction of ACD for a product is started from division of the assembly product (AP) into AU and parts. AU formed after the first division of the product will be referred to as the 1st order AUs. 1st order AUs in turn can have complex structure and be broken up into simpler independent 2nd order AUs. Such 2nd order AUs are similarly divided further to 3rd order ones and so on till n th order AUs composed of individual indivisible elements, parts. Thus, the structure of any instrument can be presented as a graph with the instrument in its root and separate parts and AUs in its nodes, whose number increases and design becomes simpler with an increase of the division level [1]. Hierarchical structure of a product divided into separate elements, with regard to the above designations, can be presented as follows (fig. 1).

PCSDM can be presented as a table, list of graph thus allowing to:

- get information on the number of parts, their names, AUs, number of decomposition levels, where AUs are identified by whether other parts make part thereof, P_{SP} , other AUs.
- when a product is divided into AUs, the whole scope of assembly operations can be divided into separate parts and performed simultaneously thus considerably reducing the assembly cycle duration;
- form *assembly sequence* (AS) in view of the fact that AUs at the same division level not related by the presence of common loops (common mounting surface) can be assembled in any sequence.

Description of the mathematical model of the "Pressure Regulator" (fig. 2) component structure can be presented as a graph (fig.3) or list (fig. 4.).

Description of an assembly product in the expanded form (according to 1) allows a complete description of links and subordination of components in the assembly product. For products composed of a large number of elements such detailed description is however extremely labor-intensive.

For example, for an adjusted gyrocompass "CRUISE" composed of over 300 components, express description (according to 2) can be employed at the initial design stage which can be subsequently supplemented [2].

Such abbreviated description of an assembly unit of the adjusted gyrocompass "CRUISE" "Gimbal" (fig. 5) is as follows (fig. 6).

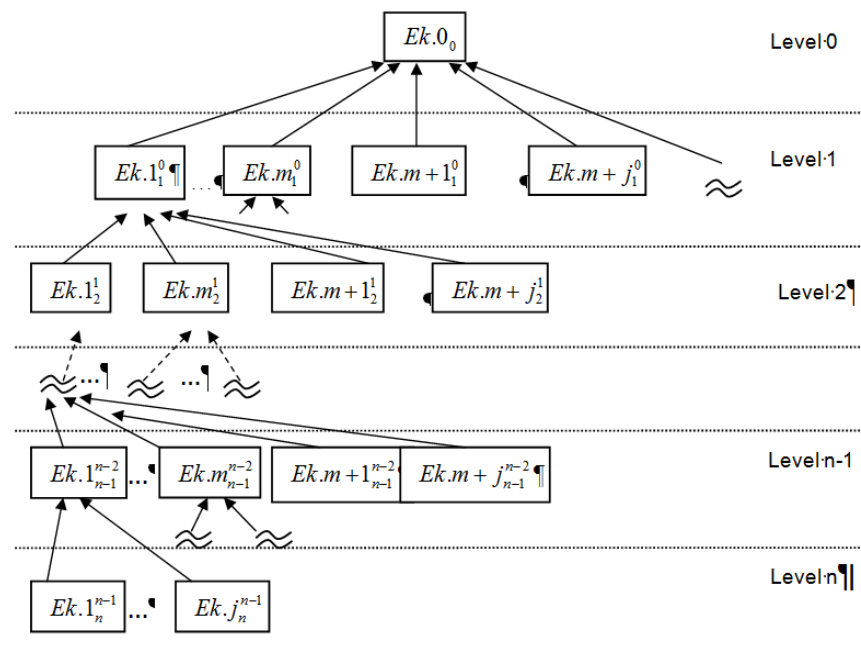


Fig 1. Decomposition of assembly product

Rys. 1. Dekompozycja montowanego wyrobu

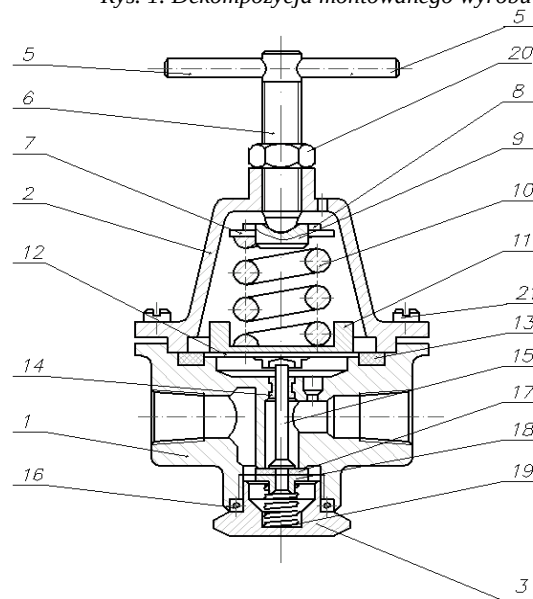


Fig 2. Assembly unit "Pressure regulator"

Rys. 2. Wyrób montowany "Regulator ciśnienia"

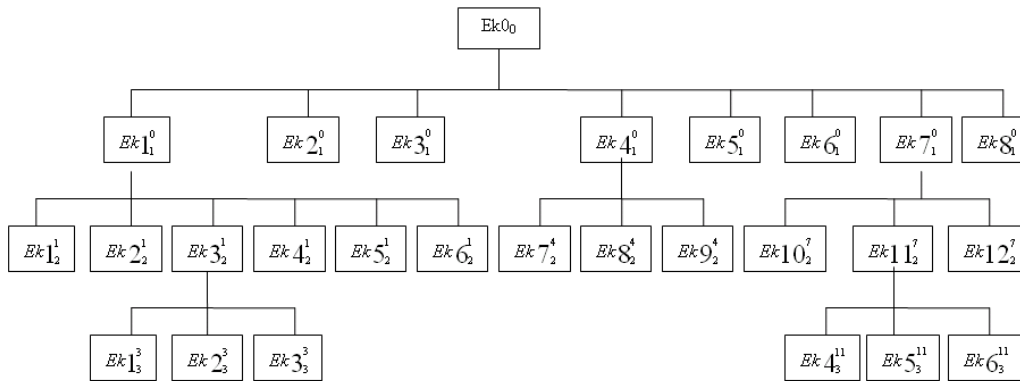


Fig 3. Description of the assembly structure of product "Pressure regulator" in a graph

Rys. 3. Przedstawienie wyrobu "Regulator ciśnienia" w postaci grafu

Ek.1.pressure regulator.1.CB₀; Ek.1.Body.1.CO₁⁰; Ek.1.Body.1.Π₂¹; Ek.2.Sealing.1.Π₂¹;
 Ek.3.Rod.1.CO₂¹; Ek.1.Rod.1.Π₃³ Ek.2.Sealing.1.Π₃³; Ek.3.Saddle.1.Π₃³;
 Ek.4.Sealing.1.Π₂¹; Ek.5.Spring.1.Π₂¹; Ek.6.Cover.1.Π₂¹; Ek.2.Diaphragm.1.Π₁⁰
 Ek.3.Sealing.1.Π₁⁰; Ek.4.Step – bearing.1.CO₁⁰; Ek.7.Washer.1.Π₂⁴; Ek.8.Flange.1.Π₂⁴;
 Ek.9.Step – bearing.1.Π₂⁴; Ek.5.Spring.1.Π₁⁰; Ek.6.Saddle.1.Π₁⁰; Ek.7.Cover.1.CO₁⁰;
 Ek.10.Cover.1.Π₂⁷; Ek.11.Drivescrew.1.CO₂⁷; Ek.4.Handle.1.Π₃¹¹; Ek.5.Screw.1.Π_{CT3}¹¹;
 Ek.6.Nut.1.Π_{CT3}¹¹; Ek.12.Screw.1.Π_{CT2}⁷; Ek.8.Screw.6.Π_{CT1}⁰.

Fig 4. Description of the assembly structure of product "Pressure regulator" in a list

Rys. 4. Przedstawienie wyrobu "Regulator ciśnienia" w postaci wykazu

Based on the PCSDM discussed above, procedures for building the assembly composition diagram and assembly process flow diagram and special software AsCAM have been developed [3, 4].

Process design in the AsCAM software environment is started from formation of an information file about the product. Information about the product for design purposes can be prepared by using two methods. The first one is based on the manual input of the overall information about the product, and the second one is based on the automatic input by using a dedicated macros [5].

Product assembly process design according to the first method can be implemented in two modes: a) based on the generation of new design solutions; b) based on existing design solutions (from archive).

Product assembly process design according to the second method is based on the use of a dedicated software module processing electronic version of the design documents for the product (specifications) and creates PCSDM automatically.

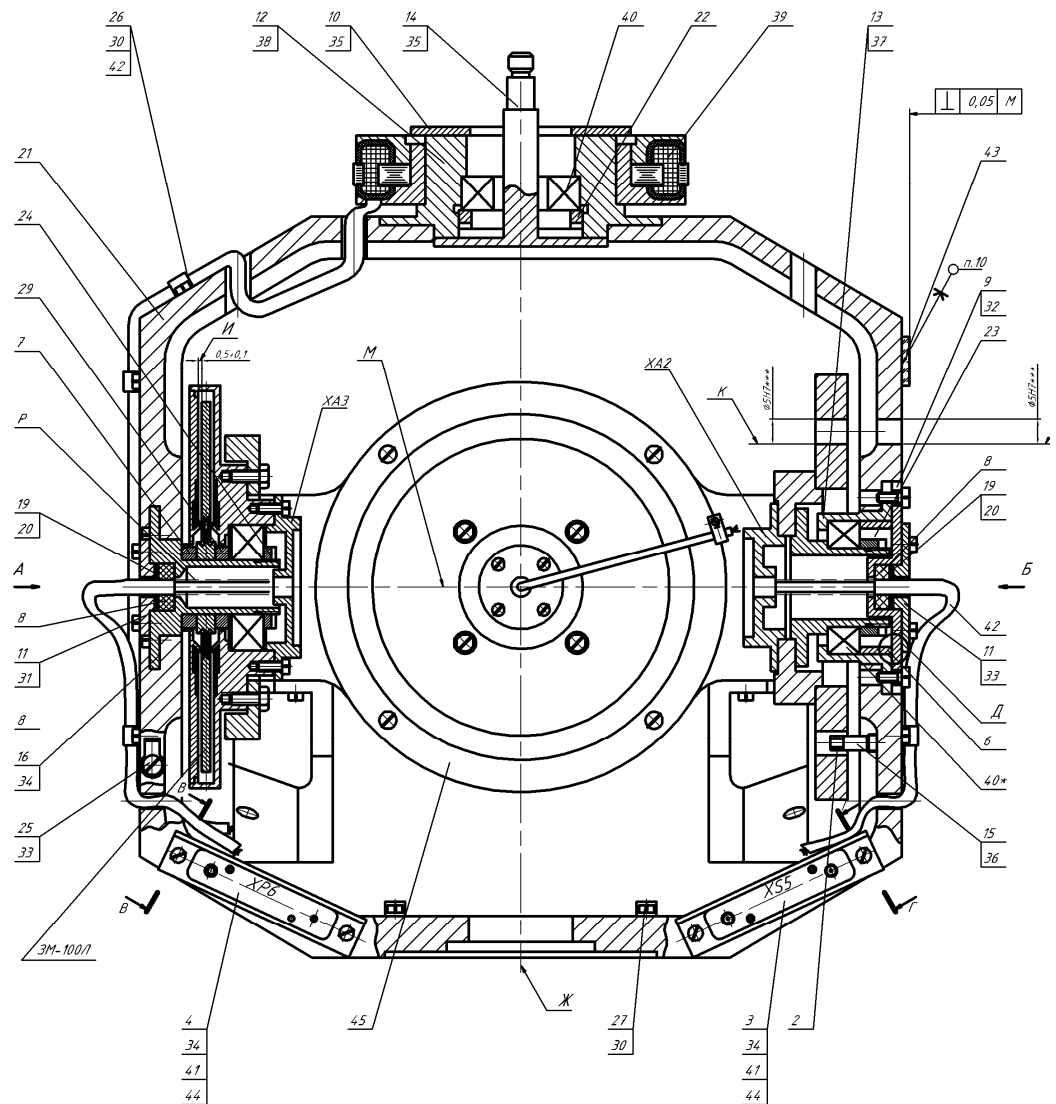


Fig 5. Assembly unit «Gimbal» by product of "CRUISE"

Rys. 5. Jednostka montażowa "Zawieś" z zestawu wyrobu montowanego KGK "KRUIZ"

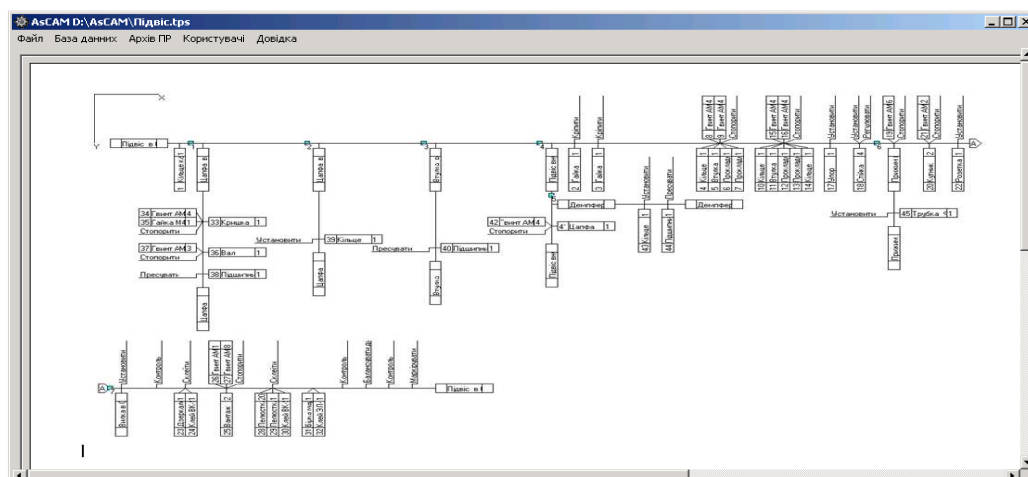


Fig 8. Output of simulation of assembly process flow diagram for AU «Gimbal»

Rys. 8. Okno programu schematu technologicznego montażu dla jednostki montażowej "Zawiesz"

REFERENCES

1. Румбешта В.О. Основи технології складання приладів: Підручник / Румбешта В.О. -К.: ІСДО,1993.—303с.
2. Стельмах Н. В., Румбешта В. О. Прийняття рішень в автоматизованій системі технологічної підготовки приладобудівного виробництва на базі дискретної оптимізації /Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління, "Нові технології", №1(23),2009,-с.189-191
3. Стельмах Н. В. Програмний модуль для прискореної технологічної підготовки складального дрібносерійного виробництва приладів // Вісник НТУУ "КПІ". К. : 2009. - № 54 / Машинобудування. С.12-17.
4. Патент України №41528 на корисну модель "Виробнича система для складання приладів", Бюл. №10, від 25.05.2009 р. Автори Стельмах Н. В., Румбешта В. О.
5. Свідчення про реєстрацію авторського прав на твір "Комп'ютерна програма «AsCAM» №31431, від 21.12.2009р. Автори Стельмах Н. В., Кот В. С.

INSTRUMENT ASSEMBLY METHOD SIMULATION IN THE AsCAM SOFTWARE ENVIRONMENT

Abstract. Accelerated method of preparation for assembling for small-scale instrument engineering implemented in a new software environment AsCAM has been presented. It has been demonstrated that the use of such software environment with relatively small amount of input data allows to get a solid solution and furthermore to reduce the preproduction preparation time.

Anatolij ZENKIN
Ivan OBORSKIY
Sergiej OBORSKIY
Uniwersytet Techniczny
„Politechnika Kijowska”
Kijów, Ukraina

GRAFO-ANALITYCZNE WYZNACZANIE PARAMETRÓW MONTAŻU POŁĄCZEŃ WCISKANYCH METODĄ TERMICZNĄ

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛИЗАЦИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ ТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение для формирования посадок с натягом приобрели способы сборки с использованием неравномерного нагрева охватывающих и охлаждения охватываемых деталей. Использование этих способов позволяет сократить временные и энергетические затраты на сборку, повысить плотность зоны контакта сопрягаемых деталей и прочность посадок с натягом, снизить натяг и напряженно-деформированное состояние сборочных единиц. Для реализации этих способов сборки необходимо создание новых научно-практических подходов для разработки методологии расчета или выбора рациональных технологических сборочных параметров. В частности, весьма важно получить не только теоретические зависимости для определения температур предварительного неравномерного нагрева охватывающих и низкотемпературного охлаждения охватываемых деталей, но и создать графоаналитические способы, которые позволяли бы конструктору-технологу машиностроительного производства оперативно решать задачи проектирования посадок и технологий их создания [1, 2].

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РЕАЛИЗАЦИЮ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

На основании выполненных теоретических исследований разработаны графоаналитические способы, позволяющие при проектировании оперативно определять рациональные технологические параметры реализации технологии формирования соединений с натягом способом КТСС. Предлагаемые графоаналитические способы созданы с учетом технологических параметров, которые гарантируют прочность соединений с натягом и условия осуществления их бесконтактной сборки при вертикальной и горизонтальной схемах ориентирования деталей. Графоаналитические способы, включают номограммы и позволяющие оперативно определять технологические параметры, обеспечивающие реализацию КТСС без непосредственного контакта и повреждения сопрягаемых поверхностей деталей. Номограммы представлены на рис. 1 и 2 и состоят с шести квадрантов. На границе первого с четвертым квадрантами по оси ординат отложены значения величин максимального сборочного натяга $N_{\text{макс}}$. Задавшись условиями реализации сборки и коэффициентами, учитывающими тепловые потери при совмещении деталей k_y и цикла сборки в целом $k_{\text{сб}}$, определим необходимые суммарные значения увеличения диаметров посадки при неравномерном нагревании охватывающей детали и при неравномерном охлаждении охватываемой детали. По этим данным строим наклонные лучи в квадрантах 4 и 1, соответствующие значениям коэффициента k_y и коэффициента $k_{\text{сб}}$. В первом квадранте проведены наклонные лучи,

соответствующие коэффициенту k_y (установки охватываемой детали в охватывающую с временным зазором) технологических условий реализации сборки. По оси абсцисс между первым и вторым квадрантами отложены значения необходимой разности Δd диаметров собираемых деталей, определяемой с учетом условий реализации сборки.

Затем переходим в квадрант 2.

Используя зависимость

$$\Delta T = \frac{\Delta d}{\alpha \cdot d} \quad (1)$$

находим для каждого посадочного диаметра d значения необходимого зазора S_y для качественной установки одной детали в другую без контакта сопрягаемых поверхностей. Значения зазора S_y откладываем по ординате между квадрантами 2 и 3. С учетом данных [3] рассчитываем предельно допустимые значения углов γ перекоса осей сопрягаемых деталей при совмещении деталей. По данным расчетов строим в координатах $S_y - \gamma$ кривые, соответствующие значениям l/d в квадрантах 3.

Для каждого посадочного диаметра d определяем значения $\Delta T \cdot \alpha = \Delta d / d$, которые откладываем на ординате между квадрантами 2 – 5 и по полученным данным строим в квадранте 2 наклонные лучи, соответствующие значениям посадочных диаметров.

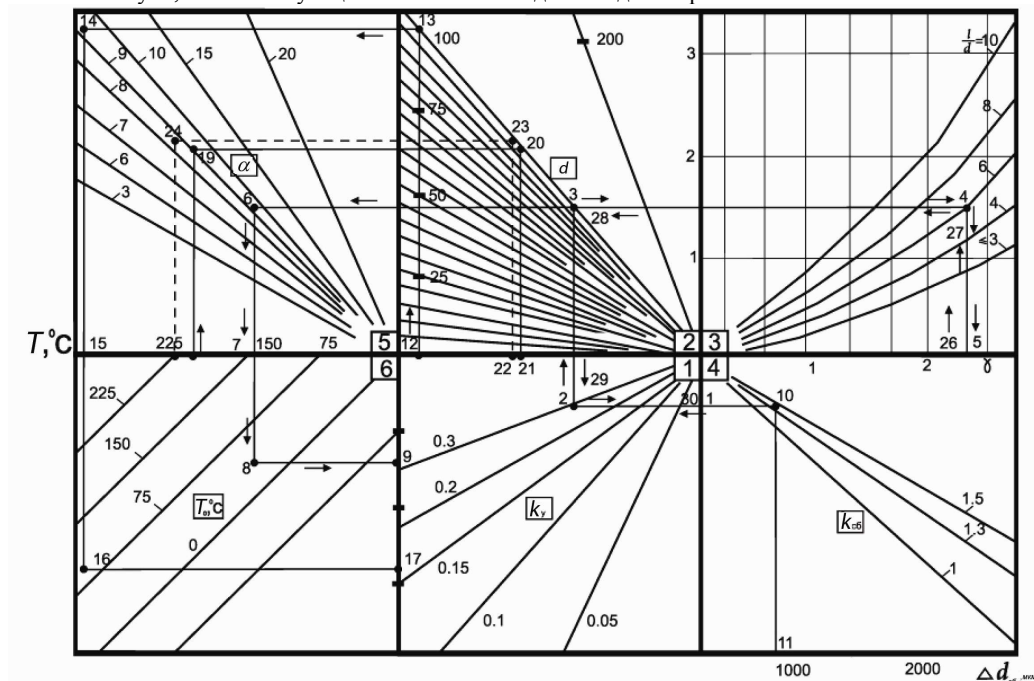


Рис. 1. Номограмма выбора технологических параметров КТСС соединений с натягом, обеспечивающих возможность качественной реализации технологии при вертикальной схеме сборки

Rys. 1. Nomogram wyboru parametrów technologicznych połączeń wciskanych sposobem termicznym umożliwiającą jakościowy montaż przy łączeniu pionowym

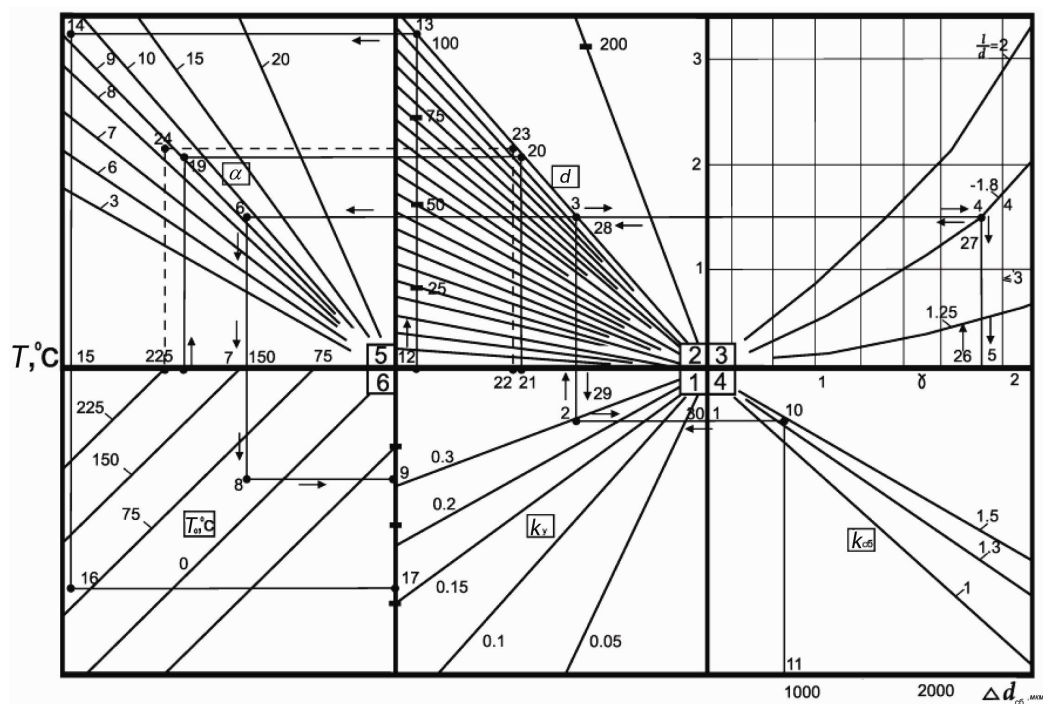


Рис. 2. Номограмма выбора технологических параметров КТСС соединений с натягом, обеспечивающих возможность качественной реализации технологии при горизонтальной схеме сборки

Rys. 2. Nomogram wyboru parametrów technologicznych połączeń wciskanych sposobem termicznym umożliwiającących jakościowy montaż przy łączeniu poziomym

Затем находим при заданных значениях коэффициентов линейного расширения α_p и сжатия $\alpha_{сж}$ материалов сопрягаемых деталей необходимые значения перепадов температуры $\Delta T = \Delta d / d \cdot \alpha$, которые откладываем с учетом значения температуры окружающей среды 20°C на абсциссе между квадрантами 5 – 6. По полученным данным в координатах $\Delta T = \Delta d / d \cdot \alpha - T_0^\circ\text{C}$ строим в квадранте 5 наклонные лучи, соответствующие значениям коэффициентов линейного расширения α_p и сжатия $\alpha_{сж}$ материалов сопрягаемых деталей.

Если величины температуры термовоздействия, например, при охлаждении охватываемой детали $T_0^\circ\text{C}$ может быть недостаточно, то необходимо найти температуру нагрева охватываемой детали $T_n^\circ\text{C}$. Для ее нахождения воспользуемся зависимостью (2.92) и рассчитаем необходимую температуру нагрева охватываемой детали $T_n^\circ\text{C}$, значения которой наносим на ординату между квадрантами 6 – 1. По расчетным данным температур $T_0^\circ\text{C}$ и $T_n^\circ\text{C}$ строим в квадранте 6 наклонные кривые, соответствующие значениям $T_0^\circ\text{C}$.

Следует также отметить, что на границе первого и второго квадрантов по оси абсцисс отложены значения необходимого суммарного при КТСС значения $\Delta d_{сб}$, соответствующие его значениям, отложенным на абсциссе квадранта 4.

Рассмотрим вариант решения задач по разработанным номограммам.

Так, если известна величина максимального сборочного натяга N (точка 1) и условия технологической реализации взаимного соединения деталей с временным зазором, то проводя

горизонталь в первом квадранте до пересечения (точка 2) с наклонным лучом, соответствующим заданному коэффициенту k_y (установки охватываемой детали в охватывающую с временным зазором), с точки 2 – вертикаль в точку 3 до пересечения с заданным диаметром d посадки, с точки 3 – горизонталь в третий квадрант до пересечения в точке 4 с кривой, соответствующей заданному соотношению l/d длины l и диаметра d посадки, затем опустив из этой точки вертикаль вниз в точку 5, находим допустимый угол γ перекося осей сопрягаемых деталей в начальный момент сборки.

Далее из точки 3 проводим в квадрант 5 до пересечения с лучом (точка 6), соответствующим значению коэффициента α линейного, например, сжатия $\alpha_{сж}$ для материала охватываемой детали. Из точки 6 ставим вертикаль вниз (точка 7) до пересечения с осью абсцисс и находим перепад температур ΔT_y между сопрягаемыми деталями в момент начала их взаимного соединения (установки с временным зазором). Затем определяемся с возможно допустимой величиной температуры охлаждения T_o охватываемой детали в начальный момент ее установки. Проводим из точки 7 вертикаль в точку 8 до пересечения с наклонной линией, соответствующей установленной величине температуры охлаждения T_{oy} . После этого из точки 8 проводим горизонталь вправо до пересечения в точке 9 с осью ординат и находим возможную температуру T_{ny} нагрева охватывающей детали в момент начала установки в нее охватываемой детали.

С помощью приведенной номограммы представляется возможность решения задачи по определению необходимых величин температуры нагрева T_n охватывающей и низкотемпературного охлаждения T_o охватываемой деталей перед началом осуществления технологического процесса сборки, то есть перепада ΔT температур между сопрягаемыми деталями.

Так, если известна величина максимального сборочного натяга N (точка 1) и условия технологической реализации сборки деталей с временным зазором, то проведя горизонталь в первом квадранте до пересечения (точка 10) квадранта 4 с наклонным лучом, соответствующим заданному коэффициенту $k_{сб}$ (сборки охватываемой детали с охватывающей с временным зазором), а из точки 10 вертикаль в точку 11 до пересечения с осью абсцисс найдем необходимую величину $\Delta d_{сб}$, то есть суммарное увеличение Δd_n диаметра охватывающей детали при ее нагревании и Δd_o охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении.

Определив необходимую величину $\Delta d_{сб}$, находим на оси абсцисс между первым и вторым квадрантами точку 12, определяющую величину $\Delta d_{сб}$.

Далее, из точки 12 проводим вертикаль вверх до пересечения в точке 13 с наклонной, соответствующей величине d посадки, а с точки 13 горизонталь в квадрант 5 до пересечения в точке 14 с наклонной кривой, соответствующей величине коэффициента линейного сжатия $\alpha_{сж}$ для материала охватываемой детали. Опустив из точки 14 вертикаль вниз на ось абсцисс квадранта 5 (точка 15), находим величину перепада температур. Если этот перепад может быть реализован за счет низкотемпературного охлаждения в интервале температур до $-195,6^\circ\text{C}$, принимаем величину температуры T_o низкотемпературного охлаждения и перепад $215,6^\circ\text{C}$.

Если этот перепад не может быть реализован за счет низкотемпературного охлаждения в интервале температур до $-195,6^\circ\text{C}$, то необходимо определить температуру нагрева. Для этого продлеваем вертикаль в квадрант 6 до пересечения с наклонной, соответствующей температуре жидкого азота (точка 16), с нее проводим горизонталь влево к оси ординат до пересечения в точке 17 и находим температуру нагрева – около 440°C .

Если проводится сборка деталей из различных материалов, то на оси абсцисс квадрантов 5 и 6 находим величину температуры T_o низкотемпературного охлаждения охватываемой детали 9 (точка 18). Затем из нее восстанавливаем вертикаль в точку 19 до пересечения с наклонной, соответствующей коэффициенту линейного сжатия $\alpha_{сж}$ для материала охватываемой детали. Далее проводим горизонталь в квадрант 2 до пересечения в точке 20 с лучом, соответствующим заданному диаметру посадки d , и из точки 20 – вертикаль вниз до абсциссы квадрантов 2 и 1 в точке 21. Так находим в точке 21 возможную величину усадки $\Delta d_o = 212$ мкм охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении.

Определяем далее по номограмме разницу $\Delta d_n = \Delta d_{сб} - \Delta d_o$ между общей необходимой величиной $\Delta d_{сб}$ и Δd_o охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении, соответствующей необходимому значению Δd_n изменения диаметра посадки охватываемой детали при ее нагревании. Находим эту величину по линии абсцисс между квадрантами 1 и 2 (точка 22). Из точки 22 восстанавливаем вертикаль вверх до пересечения в точке 23 с лучом, соответствующим диаметру посадки. Затем проводим горизонталь влево в квадрант 5 до пересечения в точке 24 с лучом, соответствующим коэффициенту $\alpha_p = 8,5$ линейного расширения для материала охватываемой детали. Восстанавливаем вертикаль с точки 24 вниз на ось абсцисс в точку 25 и находим необходимую величину ΔT_n перепада температур за счет нагрева охватываемой детали и окончательную температуру $T_n = \Delta T_n - T_c$ ее нагрева, где T_c – температура окружающей среды.

Если известен допустимый угол γ скрещивания осей сопрягаемых деталей, диаметр посадки, параметр соотношения длины и диаметра посадки, то возможно установить допустимую величину максимального натяга, при котором еще можно собрать детали.

При известном допустимом угле γ скрещивания осей сопрягаемых деталей восстанавливаем с точки 26 вертикаль до пересечения с кривой, соответствующей заданному соотношению длины и диаметра посадки (точка 27), а далее – с нее горизонталь в квадрант 2 до пересечения в точке 28 с лучом, соответствующим заданному диаметру d посадки. Из точки 28 устанавливаем вертикаль вниз в квадрант 1 до пересечения с лучом в точке 29, соответствующим заданному коэффициенту k_y (установки охватываемой детали в охватывающую с временным зазором), а далее – горизонталь вправо до оси ординат. Находим в точке 30 возможно допустимую величину натяга, при котором еще можно провести сборку деталей без заклинивания.

На основании проведенных исследований установлено, что с увеличением сборочного натяга необходимо увеличивать перепад температур между сопрягаемыми деталями. При идентичности условий сборки (коэффициенты условий сборки $k_{сб}$ и взаимной установки k_y деталей постоянны) представляется возможность увеличения угла γ перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение соотношения l/d длины посадки к диаметру посадки требует уменьшения угла перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение времени сборки и продолжительности (коэффициенты условий сборки $k_{сб}$ и взаимной установки k_y увеличиваются) при постоянной величине перепада температур между сопрягаемыми деталями требует роста начального угла перекоса их осей.

С увеличением диаметра посадки при фиксированных значениях сборочного натяга и условиях сборки ($\Delta d_{сб} = \text{const}$ и $k_y = \text{const}$) представляется возможность уменьшать перепад температур между сопрягаемыми деталями и увеличивать угол γ перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение соотношения l/d длины посадки к диаметру посадки требует уменьшения угла перекоса осей сопрягаемых деталей. Увеличение времени сборки и продолжительности (коэффициенты условий сборки $k_{сб}$ и взаимной установки k_y увеличиваются) при постоянной величине перепада температур между сопрягаемыми деталями требует уменьшения начального угла перекоса их осей.

По разработанным номограммам представляется возможным решать следующие задачи:

1 – определять режимы термовоздействия на сопрягаемые детали с учетом заданной величины допустимого угла γ перекоса осей при заданных условиях реализации сборки, позволяющего разрабатывать в перспективе необходимые модули для нагрева и охлаждения конкретных изделий;

2 – устанавливать условия реализации сборки с учетом режимов термовоздействия на сопрягаемые детали и угла γ перекоса их осей при ориентировании и совмещении;

3 – определять величину допустимого угла γ перекоса осей сопрягаемых деталей при заданных режимах термовоздействия и условиях сборки, позволяющего разрабатывать в перспективе необходимые ориентирующие модули для конкретных изделий.

ВЫВОДЫ

Таким образом, создан способ и номограммы, позволяющие оперативно решать задачи по выбору взаимосвязанного комплекса технологических параметров, обеспечивающих успешную реализацию сборки соединений с натягом с использованием КТСС и создавать оригинальные модули для ориентирования деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И.Л., Шалай В.А., Зенкин А.С. Выбор температуры нагрева и охлаждения для сборки соединений с натягом комбинированным термическим способом. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциалов в современных условиях» Сб.: Материалы 9-й юбилейной Промышленной конференции с международным участием и блиц – выставки, 11- 18 февраля 2009 г., п. Славское, Карпаты. – К., 2009.- с. 315 – 316
2. Оборский И.Л. Выбор условий для качественной реализации процесса формирования соединений деталей с натягом КТСС. // "Человек–технологии–среда. Теория и практика". 15 – 19 сентября 2009 г. Сб.: Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции, 15 – 19 сентября 2009 г., г. Судак, Украина. – 2009. – С. 83 – 85.
3. Оборский И.Л. Методология определения технологических параметров, обеспечивающих качественный процесс выполнения соединений деталей с натягом КТСС. // "Человек–технологии–среда. Теория и практика". 15 – 19 сентября 2009 г. Сб.: Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции, 15 – 19 сентября 2009 г., г. Судак, Украина. – 2009. – С. 85 – 88.

GRAPHO - ANALYTICAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE REALIZATION OF ASSEMBLING CONNECTIONS WITH THE INTERFERENCE BY THE THERMAL METHODS

Abstract. *It is developed method and the nomograms, which make it possible to operationally solve problems in the selection of the interconnected complex of the technological parameters, which ensure the successful realization of assembling connections with the interference with the use [KTSS] and to create original modules for the orientation of components.*

Vitalii PASICHNYK
 Vladimir KORENKOV
 Bayesteh ABDOLREZA
 Uniwersytet Techniczny
 „Politechnika Kijowska”
 Kijów, Ukraina

ZWIĘKSZENIE WYDAJNOŚCI OPRACOWANIA MODELI MATEMATYCZNYCH PODWÓJNYCH OGRANICZEŃ PRZEMIESZCZEŃ ELEMENTÓW WYROBÓW MONTOWANYCH

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БИНАРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ОГРАНИЧЕНИЙ ПОДВИЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СБОРОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Представлено новое решение задачи автоматизированного формирования математической модели сборочной единицы в виде бинарных отношений ограничений подвижности на основе трехмерной модели, созданной в CATIA. Показано, что применение нового программного обеспечения позволяет анализировать сборки с большим числом деталей практически за полиномиальное время.

На данном этапе развития 3D CAD/CAPP систем, в частности по автоматизированному проектированию технологических процессов сборки, одной из основных проблем является большой объем и сложность ввода исходной информации о деталях и изделии в целом. Под термином «исходной» чаще всего понимают информацию о механических связях между деталями, их размерные, точностные характеристики и т.п.

В работах [1-3] уже рассматривались способы представления и математического описания подобной информации, а также подходы к формализованному анализу и синтезу порядков сборки изделий на ее основе.

В соответствии с данными работами, ограничения подвижности деталей в сборочной единице представляются в виде матриц $M(T+)$ БООП (бинарных отношений ограничений подвижности) размером $N \times N$ (N – количество деталей изделия). Каждой детали $a_i \in A$ (A – множество всех деталей изделия) соответствует i -я строка и i -й столбец. Элемент $m_{ij} \in M(T+)$ являются не нулевым, если деталь a_i ограничивает возможное перемещение детали a_j в положительном направлении оси $T = \{X, Y, Z, \dots\}$. При этом, символ «1» отражает факт существования контактных, а «8» – удаленных БООП (рис. 1).

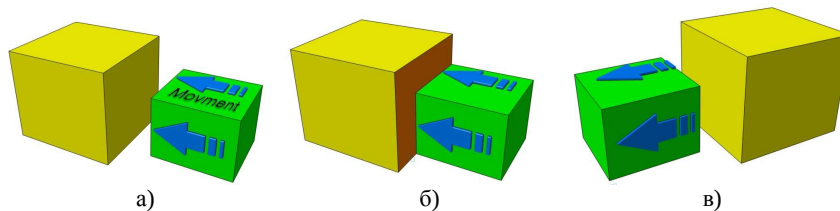


Рис. 1. Типы БООП: а) удаленное ограничение подвижности; б) контактное ограничение подвижности; в) отсутствие ограничений

Rys. 1. Typy podwójnych ograniczeń przemieszczeń (BOOP); a) odległościowe ograniczenie, b) ograniczenia kontaktowe, c) brak ograniczenia

В работе [4] представлен расширенный способ описания соединений, позволяющий

идентифицировать их тип (а соответственно и назначать типовой технологический процесс сборки данного соединения), сложную траекторию перемещения и пр. Однако в данной статье рассматривается лишь формирование упрощенной математической модели, которая не детализирует специфику технологии сборки, а ограничивается только инвариантной составляющей последовательности сборки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СБОРОЧНОГО ИЗДЕЛИЯ

Формирование матриц БООП является одним из самых узких мест в современных САРР системах сборки, так как требует заполнения матриц размерностью как минимум $3 \times N \times N$. Диалоговый режим заполнения в данном случае следует сразу отбросить, поскольку помимо высокой трудоемкости самого процесса не исключаются ошибки, существенно влияющие на правильность и эффективность проектных решений. Попытки автоматизировать ввод информации путем анализа сборочного чертежа или анализа различных проекций сборочной единицы при 2D моделировании мы также считаем бесперспективными. Подобный анализ, наверное, сугубо теоретически возможно описать, но практически реализовать чрезвычайно сложно. Таким образом, единственным выходом для автоматизированного ввода исходных данных является использование 3D моделей, полученных в одной из современных CAD системах.

В этой статье мы предлагаем подход к выявлению взаимных ограничений подвижности деталей, реализованный в системе CATIA V5R20.

Основная идея предлагаемого подхода заключается в следующем: мы последовательно перебираем все пары деталей, входящих в изделие и одной из них предоставляем виртуальные перемещения в положительном и/или отрицательном направлении оси X, Y, Z и определяем, возникла ли область пересечения этих деталей или нет. Наличие такой области свидетельствует о наличии ограничений подвижности, а ее отсутствие – о том, что данные детали не ограничивают друг друга по данному координатному направлению. Факт наличия или отсутствия области пересечения двух деталей при виртуальном перемещении можно определяется встроенной функцией «Clash».

Рассмотрим более подробно общий алгоритм формирования матриц БООП.

Шаг 1. На основании информации о габаритах объектов (рис. 2) решается вопрос о потенциальной возможности их пересечения, – если проекции ограничивающих параллелепипедов в определенном координатном направлении пересекаются, то высока вероятность того, что рассматриваемые объекты при монтажном перемещении также могут столкнуться.

Шаг 2. В случае выявления области пересечения выполняется уточнение наличия или отсутствия препятствия выполнению монтажного перемещения. Для этого сборочный элемент передвигается на некоторую величину Δ вдоль координатного направления и выполняется функция «Clash».

Данная функция определяет область пересечения между трехмерными телами в CAD системе. В ее основу положен алгоритм поиска пересечения полигональных фигур. То есть, вначале анализа модель разбивается на сетку треугольников (рис. 3), а далее выявляются области пересечения данных треугольников.

Следует отметить, что размеры треугольников настраиваемы и зависят от формы и габаритов деталей. В настоящее время величина перемещений Δ , а также точность расчета (фактически, размер полигональной фигуры) задаются пользователем вручную, однако ведутся работы по автоматизации данного процесса.

Шаг 3. Выявляются крепежные соединения: на данном этапе автоматически выявляются резьбовые соединения, моделируемые функцией «Cosmetic Thread», а также соединения определенные как библиотечные (например, заклепки, сварные швы и пр.).

Результатом работы описанного выше алгоритма будут матрицы БООП, имеющие вид, показанный на рис. 4.

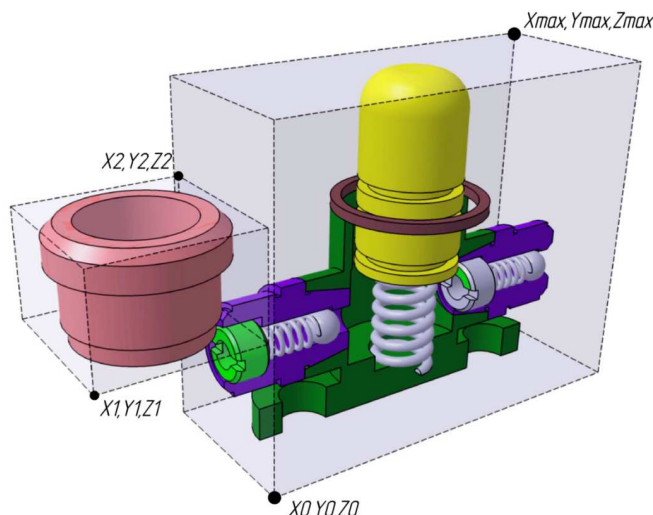


Рис. 2. Предварительный этап выявления механических связей, накладывающих ограничения на перемещения элементов сборки в зону монтажа

Rys. 2. Wstępny etap identyfikacji mechanicznych powiązań wywołujących ograniczenia przemieszczeń elementów montowanych do strefy montażu

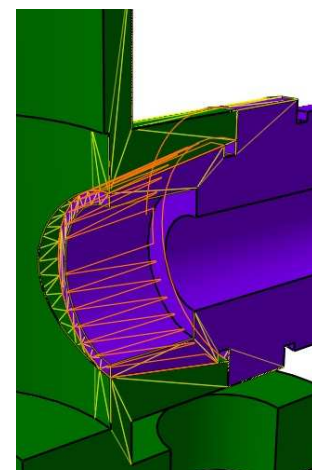


Рис. 3. Определение места контакта или области пересечения моделей функцией «Clash»

Rys. 3. Wyznaczanie miejsca kontaktu lub obszaru przecinania modelu funkcji „Clash”

Математическая модель сборочного изделия имеет иерархическую структуру и кроме геометрической информации (о БООП и свободных для доступа поверхностях) содержит еще достаточно большое количество параметров: массово-инерционные характеристики элементов; ссылки на типовые переходы сборки отдельных соединений; временные характеристики и пр., которые в данной статье не рассматриваются.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ

Основное внимание при разработке САПР систем уделяется методам синтеза последовательностей сборки. Данное положение объясняется тем, что:

- задача синтеза – математическая и не требует особых знаний технологии сборки;
- от полноты решения данной задачи зависит эффективность всей системы;
- задача в любом случае имеет ограниченное множество решений (их количество хотя и достаточно велико, но конечно, поскольку является функцией от числа деталей в изделии).

Известны несколько подходов к решению данной задачи. Среди них наибольшее распространение получили: вероятностные методы, использующие в основном генетические алгоритмы [5,6]; методы прямого синтеза [7-9], характеризующиеся большой трудоемкостью вычислений, и методы обратного синтеза [4]. Вероятностные методы не гарантируют оптимальности решения, а методы прямого синтеза являются комбинаторными с трудоемкостью алгоритмов $\sim O(2^N)$ и, следовательно, не могут применяться на больших сборках. Данных недостатков лишены методы обратного синтеза последовательностей сборки.

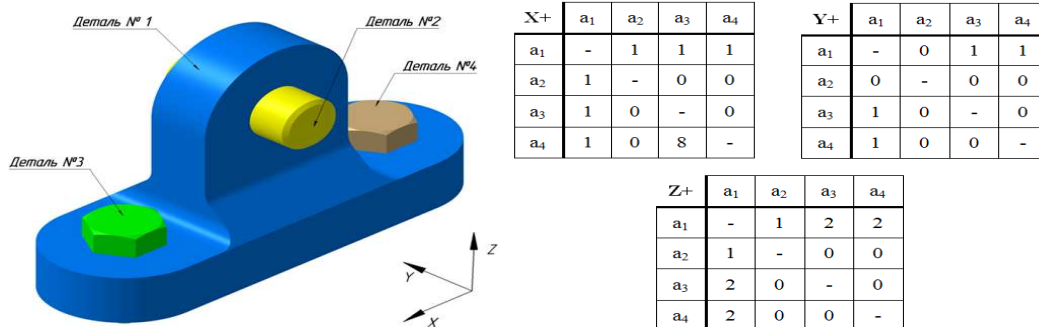


Рис. 4. Математическая модель сборочного изделия

Rys. 4. Model matematyczny montowanego wyrobu

Сама процедура происходит в два этапа. На первом этапе устанавливаются допустимые конструкцией варианты разборки изделия, которые потом, на втором этапе, трансформируются во множество технологически целесообразных вариантов последовательно-параллельной сборки.

Определение множества последовательностей разборки изделий сводится к поиску в матрицах БООП элементов $a_i \in A$, представляющих собой мажоранту на отношении $L \subseteq A \times A$, если для всех $a_j \in A$ выполняется $a_j \bar{L} a_i$, или миноранту, если для всех $a_j \in A$ выполняется $a_i \bar{L} a_j$. Отсутствие ограничений подвижности в положительном или отрицательном направлениях свидетельствует о возможности беспрепятственного удаления a_i из изделия, а итерационный процесс удаления таких деталей, с поэтапным сужением матриц БООП, соответствует процессу последовательно-параллельной разборки изделия. В целом трудоемкость подобных алгоритмов $\sim O(N)$, что позволяет их применять к изделиям с числом деталей >100 .

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

С целью проверки и тестирования разработанных алгоритмов, была написана программа на языке C#, использующая функции API системы CATIA V5R20 (рис. 5).

В настоящее время функционал программы обеспечивает:

- полностью автоматическое построение матриц БООП для прямолинейных поступательных перемещений деталей во время сборки;
- ввод информации о крепежных соединениях (автоматизирована процедура выявления резьбовых, а также библиотечных элементов);
- автоматизированный синтез последовательностей сборки изделий с произвольным уровнем вложенности подборок (технологическая структура изделия строится по принципу максимальной концентрации операций);
- программную интеграцию с офисными пакетами (файлы MS Excel используются в качестве носителей исходных данных, а MS Word – для вывода отчетов);
- представление последовательностей сборки в виде диаграмм.

Тестирования программного обеспечения проводились на сборочных изделиях машино- и приборостроения. Усредненные оценки времени работы программы приведены на рис. 6.

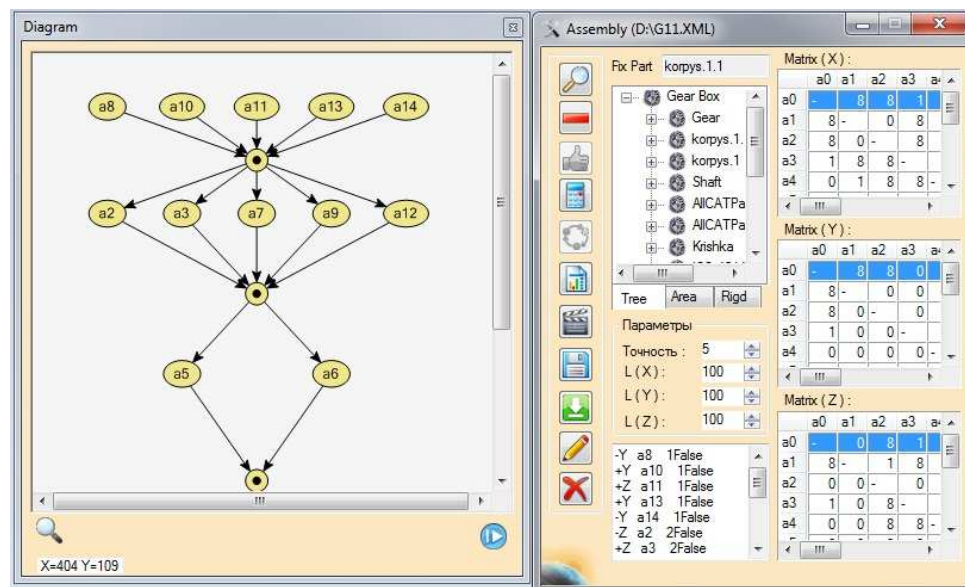


Рис. 5. Интерфейс программы

Rys. 5. Widok okna programu

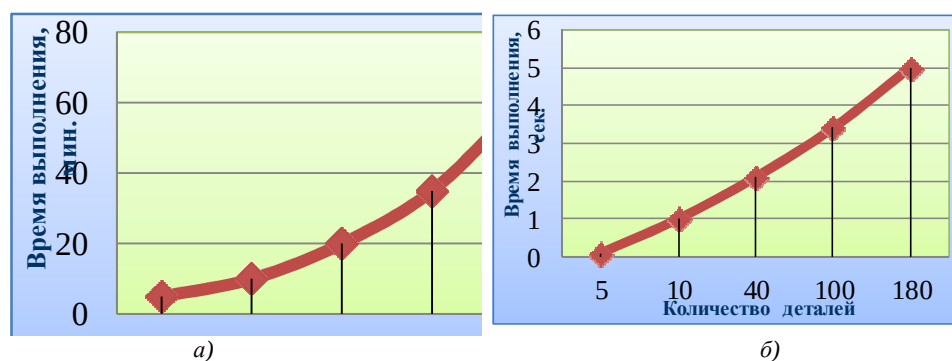


Рис. 6. Средняя оценка времени работы программы:

- а) анализ геометрии трехмерной сборочной модели и формирование матриц БООП;
 б) синтез последовательностей сборки с последующим выводом результатов

Rys. 6. Średnia ocena czasu pracy programu: a) analiza geometrii trójwymiarowego modelu montażowego i kształtowanie matryc BOOP; b) synteza kolejności montażu ze wskazaniem wyników

ВЫВОДЫ

Усовершенствован и реализован в виде нового программного обеспечения метод формирования математических моделей бинарных отношений ограничений подвижности элементов сборочных изделий, позволяющий автоматизировать процесс синтеза последовательностей сборки.

Сам метод, а также элементы его программной реализации могут быть использованы самостоятельно или в качестве одной из составляющих 3D CAD/CAPP на этапе конструкторской (для оценки технологичности конструкции изделия) и технологической подготовки механосборочного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сімута Р.Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – К., 2003. – 174 с.
2. Сімута Р.Р. Визначення бінарних відношень обмеження рухливості деталей складальної одиниці в напрямках, які не є колінеарними головній системі координат // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2002. – №6. – С. 89-93.
3. Пасічник В.А. Виявлення кінематичних з'єднань у складальній одиниці на основі інформації про бінарні відношення обмеження рухливості / В.А.Пасічник, Ю.В.Лашина // Труды Одесского политехнического университета: Науч. и произв.-прак. сб. по техн. и ест. наукам. – Одесса, 2008. – Вып. 1(29). – С.31-35
4. Пасічник В.А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва: дис... д-ра техн. наук : 05.02.08 / НТУУ «КПІ». - К., 2009.
5. Dini G., Failli F., Lazzerini B., Marcelloni F. Generation of optimized assembly sequences using genetic algorithms // Annals of CIRP. – 1999. – Vol. 48, №1. – P. 227-235.
6. Fujimoto H., Fares Sebaaly M., Mrad F. A concurrent approach for assembly design and planning // International Journal of Science and Technology. – 1999. – Vol.10, №2. – P.19-33.
7. Laperrière L., ElMaraghy H. GAPP: A generative assembly process planner // Journal of Manufacturing Systems. – 1996. – Vol. 15, №4. – P. 282-293.
8. Rejneri N. Détermination et simulation des opérations d'assemblage Lors de la conception de systèmes mécaniques: These Pour obtenir le grade de Docteur de l'Inpg Institut national polytechnique de Grenoble 2000.
9. Romney B., Godard C., Goldwasser M., Ramkumar G. An Efficient System for Geometric Assembly Sequence Generation and Evaluation // Proc. ASME International Computers in Engineering Conference. – 1995. – P. 699-712.

INCREASED PRODUCTIVITY OF MATHEMATICAL MODELS DEVELOPMENT OF ASSEMBLY ELEMENTS MOBILITY

Abstract. This article presented a new solution to the problem of forming a mathematical model of an automated assembly in the form of binary relations of movement restrictions on 3D models created in CATIA. Shown that the use of new software lets you analyze an large assembly, is practically in polynomial time.

Rafał KLUZPolitechnika Rzeszowska
Rzeszów**OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNO-TECHNOLOGICZNYCH MODUŁOWEGO STANOWISKA MONTAŻOWEGO****THE OPTIMIZATION OF THE CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MODULE ASSEMBLY STAND**

Intensywny rozwój budowy maszyn, oraz stale zwiększające się wymagania rynku doprowadziły do powstania i rozwoju elastycznych systemów montażowych, które można zdefiniować jako: komputerowo zintegrowane systemy produkcyjne, zbudowane z robotów oraz urządzeń peryferyjnych, w których podstawowymi operacjami technologicznymi są operacje montażowe [2, 5].

Budowa zrobotyzowanych systemów montażowych w oparciu o komponenty automatyzacji pozwala na łatwe dostosowanie produkcji do zmieniających się wymagań rynkowych w aspektach małej liczebności serii połączonej z wysoką jakością produkcji. Postęp w zakresie uniwersalności technologicznej współczesnych maszyn i urządzeń technologicznych pociąga za sobą rosnące wymagania wobec urządzeń składających się na podsystemy transportu i manipulacji. Modułowy sposób budowy tych urządzeń na wiele zalet, gdyż charakteryzuje się [2]:

- krótkim czasem projektowania robotów i urządzeń, których poszczególne funkcje realizują poszczególne moduły,
- skróceniem czasu przeznaczonego na testowanie i wdrażanie urządzenia do produkcji
- szybkim i łatwym montażem i demontażem oraz szybkim usuwaniem skutków awarii,
- ponownym wykorzystaniem sprawnych modułów do budowy innych urządzeń.

Jednym z ważniejszych zadań podczas projektowania zrobotyzowanego stanowiska jest wybór odpowiedniego układu kinematycznego robota oraz określenie jego dokładności oraz oprzyrządowania. Zadanie to nabiera obecnie dużego znaczenia, gdyż na rynku pojawiły się wyspecjalizowane firmy (np. Bosch Rexroth GmbH, Fastems), które dostarczają elementy modułowe do montażu zautomatyzowanych urządzeń wytwórczych, warsztatowych i pomocniczych. Najczęściej systemy modułów pozwalają na zestawienie kilku układów, rozwiązujących określone zadanie [5]. Z punktu widzenia wydajności, dokładności oraz jakości wykonywania prac i pracochłonności zainstalowania układy te jednak nie są równoważne, dlatego w niniejszej pracy przedstawiono algorytm umożliwiający porównanie i wybór optymalnej struktury kinematycznej robota do realizacji zadanej operacji montażu. Zaproponowano również metodykę wyznaczania parametrów łańcucha wymiarowego operacji montażowej, dającą możliwość konfiguracji stanowiska montażowego bez zbędnego zwiększania jego kosztów.

ALGORYTM WYBORU UKŁADU KINEMATYCZNEGO ROBOTA MODUŁOWEGO

Algorytm umożliwia porównanie układów na podstawie parametrów, które mają największy wpływ na koszty eksploatacji stanowiska, a mianowicie: objętości przestrzeni roboczej, dokładności pozycjonowania, szybkości pracy, parametrów energetycznych, pola powierzchni zajmowanego przez skonfigurowany system, wygody obsługi oraz złożoności konstrukcji (rys. 1)

Każdemu z analizowanych parametrów należy przypisać współczynnik wagowy, uwzględniający jego wpływ na wybór ostatecznej konfiguracji robota. Wskaźnikom, które mają największy wpływ na przebieg realizacji procesu należy przypisać wartość 1, natomiast pozostałym wartości z przedziału od 0 do 1, w zależności od konkretnych warunków produkcyjnych realizacji procesu.

Na etapie 1 (rys. 1) przedstawionego algorytmu ze zbioru układów możliwych do zrealizowania wybiera się kilka najbardziej odpowiednich do wykonania danej operacji. W kolejnym kroku (etap 2) dla wybranych układów dokonywana jest analiza objętości przestrzeni roboczej. W celu porównania różnych konfiguracji należy przyjąć następujące parametry:

- liniowe przemieszczenie pary kinematycznej S ,
- katowe przemieszczenie pary kinematycznej $\pi/2$,
- długość ogniw l ,
- długość zatwierdzenia $l/3$.

Przyjęte umowne wartości parametrów umożliwiają oszacowanie objętości przestrzeni roboczej oraz wyznaczenie objętości względnej V_y , będącej stosunkiem objętości do liczby par kinematycznych układu. Wybór przeprowadzany na etapie 3 przedstawionego algorytmu polega na wyborze struktur mających największą jednostkową objętość i pracujących w różnych układach współrzędnych (cylindrycznym, sferycznym, kartezjańskim, katowym) (rys 2).

Na etapie 4 następuje porównanie układów z punktu widzenia błędu generowanego na stanowisku montażowym δ . W ogólnym przypadku błąd ten jest sumą błędu statycznego (wynikającego z obciążenia konstrukcji nośnej robota masą przenoszonej części) oraz błędu kinematycznego wynikającego z błędów ustawienia zaprogramowanych wartości współrzędnych konfiguracyjnych robota [3, 4].

$$\delta = \left[4 \left((\mu_{\eta x1} - \mu_{\xi x1}) \pm 3 \left(\sigma_{\eta x1}^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \right)^2 + 4 \left((\mu_{\eta x2} - \mu_{\xi x2}) \pm 3 \left(\sigma_{\eta x2}^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial h}{\partial q_i} \right)^2 \sigma_{q_i}^2 \right)^{0.5} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

gdzie: $\mu_{\xi x1}$, $\mu_{\eta x1}$, $\mu_{\xi x2}$, $\mu_{\eta x2}$ – odpowiednio wartości oczekiwane (błędy systematyczne) zmiennej losowej błędu położenia osi części bazowanej w chwytaku robota i zastosowanym urządzeniu bazującym względem osi układu współrzędnych OX_1X_2 ; $\sigma_{\eta x1}^2$, $\sigma_{\eta x2}^2$ – wartości wariancji dwuwymiarowej zmiennej losowej błędu położenia osi części ustalonej w urządzeniu bazującym, $\sigma_{q_i}^2$ – wariancja zmiennej losowej błędu ustawienia i – tej współrzędnej uogólnionej robota montażowego

W celu określenia maksymalnego czasu cyklu montażu, należy przyjąć, że prędkość na poszczególnych współrzędnych uogólnionych jest wartością stałą. Dokonane założenie umożliwia oszacowanie czasu potrzebnego na realizację procesu (etap 5) za pomocą zależności [1]:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\dot{S}_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i l_{mi}}{\dot{S}_i} \quad (2)$$

gdzie: S_i – całkowite liniowe przemieszczenie w cyklu, φ_i – sumaryczne katowe przemieszczenie, $\dot{S}_i$ – liniowa prędkość przemieszczenia, l_{mi} – maksymalna odległość chwytaka od osi obrotu.

Na etapie 6 następuje ocena wybranych układów ze względu na straty energetyczne, powstające w czasie wykonywania przemieszczenia w cyklu na podstawie zależności [1]:

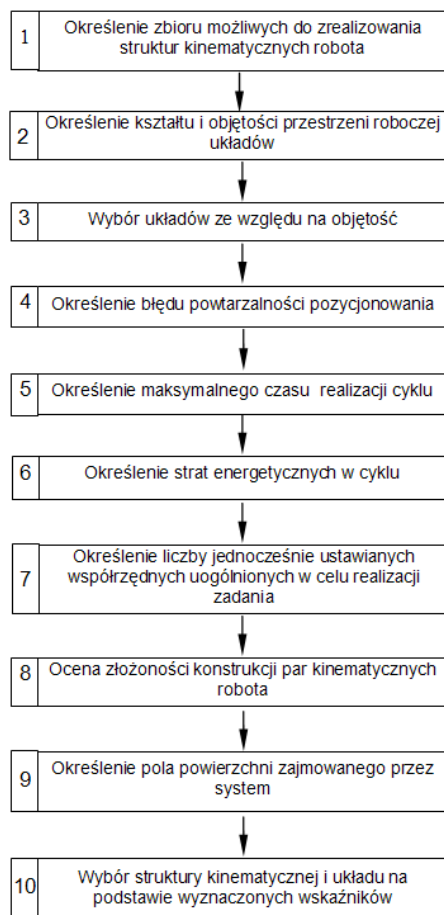
$$E_s = \sum_{i=1}^n S_i F_{i0} + \sum_{i=1}^n \varphi_i l_{mi} F_{i0} \quad (3)$$

Na etapie 7 analizowany jest proces technologiczny pod kątem ilości punktów w przestrzeni roboczej niezbędnych do prawidłowej realizacji procesu, wymagających wysokiej dokładności ustawienia chwytaka robota. Następnie określana jest ilość jednocześnie pracujących par kinematycznych niezbędnych do realizacji zadania. W dalszej kolejności na etapie 8 porównywana jest złożoność konstrukcji par kinematycznych łączących ogniw robota. W tym celu wprowadzono współczynnik określający stopień złożoności K_p konstrukcji, opierający się na porównaniu własności i budowy obrotowych i postępowych par kinematycznych.

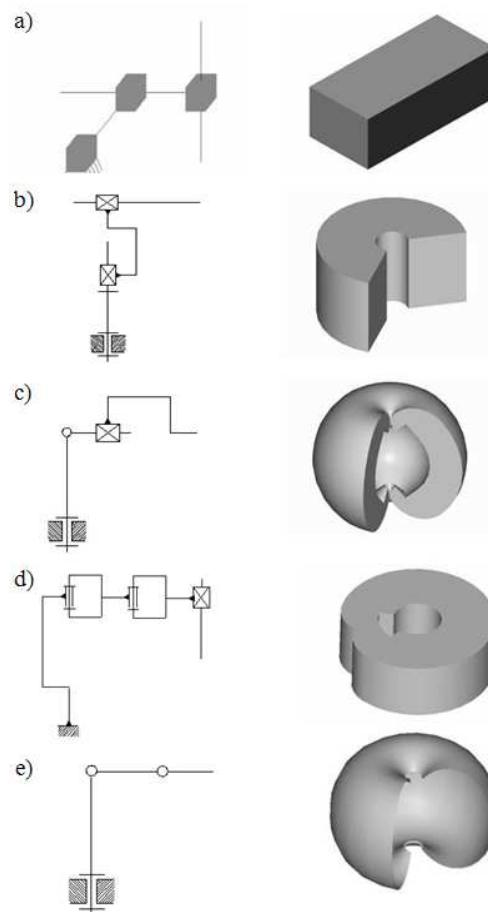
Ogólnie współczynnik złożoności całej konstrukcji jest sumą współczynników wszystkich par obrotowych i postępowych w niej występujących [7]:

$$K_p = \sum_{i=1}^n K_{ppi} + \sum_{i=1}^m K_{poi} \quad (4)$$

gdzie: K_{pp} – stopień złożoności par postępowych, K_{po} – stopień złożoności par obrotowych.



Rys. 1. Algorytm wyboru układu kinematycznego robota w procesach



Rys. 2. Struktura kinematyczna robotów: a) kartezyjska, b) cylindryczna, c) sferyczna, d) scara, e) kątowa

Na etapie 9 ocenie podlega powierzchnia zajmowana przez układ, wraz z niezbędnymi środkami pomocniczymi. Ostatecznie w bloku 10 następuje wybór kinematycznej struktury robota, najbardziej odpowiedniej do realizacji procesu montażu cylindrycznych połączeń części maszyn. Wybór następuje w oparciu o wartość współczynnika porównania K_{pi} układu i oraz układu j :

$$Kp_{ij} = \prod_k K_k \cdot \frac{P_{ki}}{P_{kj}} = K_1 \cdot \frac{P_{11}}{P_{12}} \cdot K_2 \cdot \frac{P_{21}}{P_{22}} \dots K_6 \cdot \frac{P_{61}}{P_{62}} \quad (5)$$

gdzie K_k - współczynnik znaczenia k – tego parametru oceny. P_{1i} , P_{2i} , P_{3i} - pierwszy, drugi, k – ty parametr i – tego robota, P_{1j} , P_{2j} , P_{3j} - pierwszy, drugi, k – ty parametr j – tego robota.

Za pomocą współczynnika Kp_{ij} porównywane są wszystkie analizowane układy, spośród których wybierany jest najodpowiedniejszy względem analizowanych kryteriów do realizacji zadanej operacji, w myśl zasady: jeżeli $Kp_{ij} > 1$ odpowiedniejszą strukturę ma i – ty robot.

OKREŚLENIE DOKŁADNOŚCI MODUŁÓW STANOWISKA MONTAŻOWEGO

Wybrany na podstawie przedstawionego algorytmu układ kinematyczny robota zapewnia minimalną liczbę stopni swobody, konieczną do zrealizowania zadanej operacji montażu, przy spełnieniu stawianych mu wymagań technicznych. Jednakże w celu minimalizacji nakładów na wykonanie, zainstalowanie i nastawienie robota montażowego wykonującego zadaną operację, przy jednoczesnym zapewnieniu niezawodności jej wykonywania, błąd powtarzalności pozycjonowania i orientacji jego końcówki roboczej powinien być maksymalnie zbliżony do wielkości dopuszczalnych przemieszczeń liniowych i kątowych łączonych elementów w przestrzeni, w granicach których możliwy jest jeszcze ich montaż [6].

Przeprowadzone badania wykazały [3] iż największy wpływ na proces montażu mają kinematyczne błędy ustawienia za pomocą zastosowanych napędów zaprogramowanych wartości współrzędnych uogólnionych, oraz błędy statyczne pochodzące od ciężaru przenoszonej części. W przypadku, gdy robot przeznaczony jest do konkretnej operacji technologicznej montażu maszyn, znany jest zakres obciążeń w czasie pracy robota, w związku z czym istnieje możliwość skonfigurowania najbardziej adekwatnej jego konstrukcji na bazie ujednoliconych modułów. Potwierdza to przeprowadzona analiza wpływu błędów robota na montowalność cylindrycznych połączeń części maszyn. Dla dwóch różnych punktów w przestrzeni roboczej robota antropomorficznego Mitsubishi RV-M2 przeprowadzono symulację, polegającą na badaniu wpływu błędów ustawienia poszczególnych współrzędnych uogólnionych na wielkość luzu kojarzonych części (rys. 3).

Przeprowadzona analiza wykazała zróżnicowany wpływ tych błędów na możliwość poprawnej realizacji połączenia, z założonym (0.9998) prawdopodobieństwem (uzależnionym dodatkowo od wyboru punktu w przestrzeni roboczej zrobotyzowanego stanowiska montażowego) (rys. 3), dlatego w przedstawionym zadaniu wybór optymalnych parametrów stanowiska montażowego rozpatrzono w zależności od błędów realizacji k – tym napędem ruchu obrotowego $\sigma_{\phi k}$, oraz błędów realizacji j – tym napędem ruchu wzdłużno – postępowego σ_{sj} .

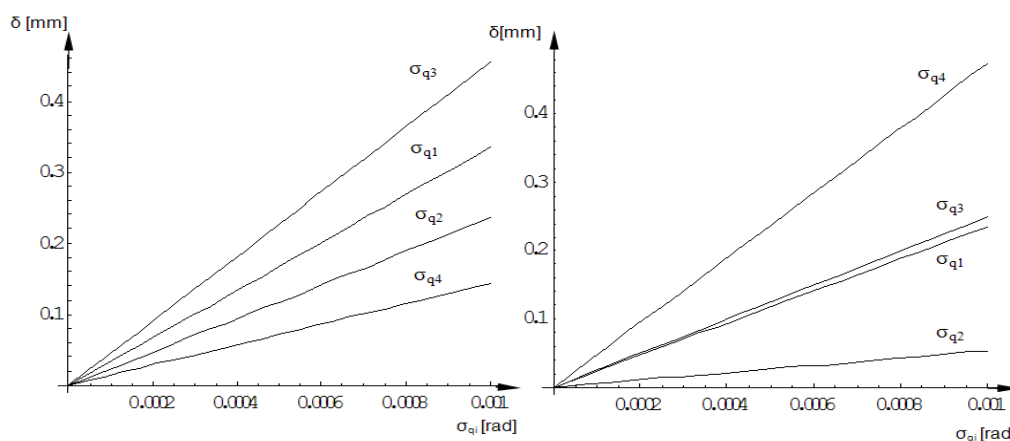
Rozwiązanie przedstawionego zagadnienia polega na poszukiwaniu minimum funkcji celu (6), zapewniającej maksymalne zbliżenie błędu generowanego przez robota do tolerancji na względne przemieszczenie osi łączonych części:

$$f(X) = |\delta - T_\delta| \rightarrow \min \quad (6)$$

$$f(X) = \left| T_\delta - \sqrt{(\mu_{\xi_{x1}} \pm 3\sigma_{\xi_{x1}})^2 + (\mu_{\xi_{x2}} \pm 3\sigma_{\xi_{x2}})^2} \right| \quad (7)$$

$$X = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n] \in Z_M = \{ \sum : \psi_i(X) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \} \quad (8)$$

gdzie: T_δ - tolerancja względnego przesunięcia osi łączonych elementów, $\mu_{\xi_{x1}}$, $\mu_{\xi_{x2}}$ - wartość oczekiwana kinematycznego błędu położenia osi montowanych elementów odpowiednio na osi X_1 i X_2 , $\sigma_{\xi_{x1}}$, $\sigma_{\xi_{x2}}$ - odchylenie standardowe błędu odległości między osiami montowanych elementów, ψ - układ warunków ograniczających nałożonych przez konstruktora – skrajne wartości błędów poszczególnych modułów



Rys. 3. Wpływ błędów ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych robota o strukturze kątowej na wartość błędu całkowitego δ dla dwóch punktów w jego przestrzeni

Do rozwiązania przedstawionego zagadnienia wykorzystano metodę sekwencyjnego programowania kwadratowego (SQP). W celu porównania uzyskanych wyników, przyjęto następujące dane: $\sigma_{\eta x1} = 0.02\text{mm}$, $\sigma_{\eta x2} = 0.015\text{mm}$, $\mu_{\eta x1} = 0$, $\mu_{\eta x2} = 0$, $\text{cov}_{\eta}(x_1, x_2) = 0$ (parametry błędu ustawienia części bazowej), oraz luz cylindrycznej jednostki montażowej równy 0.194mm . W wyniku rozwiązania przedstawionego zadania uzyskano następujące dopuszczalne wartości odchyłeń standardowych błędów ustawienia poszczególnych wartości współrzędnych konfiguracyjnych robota: $\sigma_{q1} = 0.00003688\text{ rad}$, $\sigma_{q2} = 0.0001593\text{ rad}$, $\sigma_{q3} = 0.00003603\text{ rad}$, $\sigma_{q4} = 0.00003230\text{ rad}$, przy wartości funkcji celu (6.26) równej $3.7928 \cdot 10^{-11}$. W celu określenia wpływu wyboru punktu w przestrzeni roboczej robota na postać rozwiązania, przedstawione zagadnienie rozwiązano dla trzech różnych zbiorów zmiennych uogólnionych, oraz dla wartości luzu połączenia równego odpowiednio: 0.194mm i 0.28mm , uzyskując w każdym przypadku różne wartości dopuszczalnych błędów generowanych przez robot (odchyłeń standardowych σ_{qi}), oraz różny rozkład wartości tych błędów, między poszczególnymi przekładniami. Uzyskane rozwiązania dla poszczególnych punktów w przestrzeni roboczej wraz z uzyskanymi wartościami funkcji celu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości odchyłeń standardowych błędu regulacji poszczególnych współrzędnych uogólnionych dla trzech różnych punktów w przestrzeni robota uzyskane w wyniku optymalizacji

Wartości współrzędnych uogólnionych [rad]	$\delta = 0.194\text{mm}$		$\delta = 0.28\text{mm}$	
	Rozwiązanie [rad]	Wartość funkcji celu	Rozwiązanie [rad]	Wartość funkcji celu
$q_1 = 0.5236$ $q_2 = 0.8727$ $q_3 = 1.3963$ $q_4 = 1.0472$	$\sigma_{q1} = 0.00002646$ $\sigma_{q2} = 0.00014006$ $\sigma_{q3} = 0.00003101$ $\sigma_{q4} = 0.00006335$	$2.2458 \cdot 10^{-11}$	$\sigma_{q1} = 0.00005421$ $\sigma_{q2} = 0.00021635$ $\sigma_{q3} = 0.00006458$ $\sigma_{q4} = 0.00011649$	$2.8154 \cdot 10^{-11}$
$q_1 = 1.0472$ $q_2 = 1.0472$ $q_3 = 1.2217$ $q_4 = 1.3963$	$\sigma_{q1} = 0.00002123$ $\sigma_{q2} = 0.00003343$ $\sigma_{q3} = 0.00001290$ $\sigma_{q4} = 0.00001176$	$3.35863 \cdot 10^{-11}$	$\sigma_{q1} = 0.00007192$ $\sigma_{q2} = 0.00030347$ $\sigma_{q3} = 0.00005189$ $\sigma_{q4} = 0.00049026$	$3.17097 \cdot 10^{-11}$

WNIOSKI

Przedstawiona metodyka wyznaczania parametrów konstrukcyjno – technologicznych parametrów robota montażowego można wykorzystać w praktyce przemysłowej. Na podstawie przedstawionego algorytmu projektant zrobotyzowanego stanowiska montażowego może wybrać optymalną strukturę kinematyczną robota dla realizowanej operacji montażu oraz określić wymagania dokładnościowe urządzeń wchodzących w skład łańcucha kinematycznego operacji montażowej. Przeprowadzona optymalizacja parametrów technologicznych robota, wykazała, iż istnieje możliwość zastosowania do realizacji procesu montażu cylindrycznej jednostki montażowej o luzie 0.194mm mniej dokładnej konstrukcji robota, bez obniżania niezawodności stanowiska. Otrzymane wyniki odbiegają, bowiem od rzeczywistych błędów generowanych w przegubach robota, zarówno pod względem wartości tych błędów, jak i stosunku wartości przypadających na poszczególne przekładnie. Największym błędem obciążona jest przekładnia odpowiadająca współrzędnej uogólnionej q_3 , pozostałe zaś przekładnie generują w przybliżeniu taką samą wartość błędu $\sigma_{q3} > \sigma_{q1} \approx \sigma_{q2} \approx \sigma_{q4}$ ($0.0000436 > 0.0000349 = 0.0000349 = 0.0000349$ rad), podczas gdy zmiana stosunku wartości tych błędów umożliwia zwiększenie ich wartości o 5.68% dla współrzędnej uogólnionej q_1 , 356.65% dla q_2 , kosztem zmniejszenia błędów o – 17.35% dla współrzędnej q_3 i – 7.42% dla q_4 .

LITERATURA

1. Frołow K.W., Worobiew E.I., *Mechanika promyszlennych robotow*. Tom 3, Wysszaia szkoła, Moskwa 1995.
2. Honczarenko J., Berliński A., *Zastosowanie komponentów mechatronicznych w budowie zrobotyzowanych systemów produkcyjnych*, *Technologia I Automatyzacja Montażu*, nr 3, 2006 .
3. Kluz R., *Marking the optimum configuration of robotized assembly stand*, *Archives of Mechanical Technology and Automation* vol. 29, No 2 (2009) 113-122.
4. Kluz R., *Montowalność czopowo – tulejowych połączeń realizowanych przez roboty montażowe*, *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 2007, nr 2, s. 17–20
5. Rout B. K., Mittal R.K., *Tolerance design of robot parameters using Taguchi method*, *Mechanical System and Signal Processing* 20, 2006, s. 1832-1852
6. Singh P. K., Jain S.C., Jain P.K.: *Advanced optimal tolerance design of mechanical assemblies with interrelated dimension chains and process precision limits*. *Computers in Industry* Volume: 56, Issue: 2, February, 2005, 179-194.

THE OPTIMIZATION OF THE CONSTRUCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE MODULE ASSEMBLY STAND

Abstract. *The article presents the methodology of the choice of the kinematic module industrial robot systems used in casting processes. The methodology makes possible of the accomplishment choice of the robot optimum configuration from point of view of the key process parameters, i.e. the volume of working space, the positioning accuracy, the working speed, energetics parameters, the surface area occupied by configured system, the service comforts and the construction complexity. Besides this method was used to elaborate the optimization model the assuring selection of parameters of dimension chain assembly operation, meringues superfluous enlarging the accuracy of applied instrumentation of stand, and in relationship from this also his costs.*

Olaf CISZAK

Politechnika Poznańska
Poznań

KOMPUTEROWO WSPOMAGANE MODELOWANIE I SYMULACJA ZROBOTYZOWANYCH STANOWISK PRODUKCYJNYCH

COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF ROBOTIC CELLS

Praca dotyczy komputerowego wspomagania programowania i symulacji pracy zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych realizowanych za pomocą współczesnych programów należących do grupy CAM (*ang. Computer Aided Manufacturing*). W pracy przedstawiono opracowany wirtualny model i wyniki badań symulacyjnych przykładowego zrobotyzowanego stanowiska do obróbki wstępnej części a w końcowej części wyniki i wnioski z przeprowadzonych badań.

WSTĘP

Automatyzacja i robotyzacja wkracza do coraz większej liczby sektorów gospodarki, nie tylko do przemysłu maszynowego, spożywczego, ale i innych obszarów życia społecznego. Obecnie uważa się [4], że rozwój robotyki będzie polegał na rozszerzeniu zastosowań robotów do nowych obszarów pozaprzemysłowych, głównie w usługach i medycynie. Rosnące koszty pracy, wzrost konkurencyjności oraz ciągłe poszukiwania redukcji kosztów inwestycyjnych, wzrostu elastyczności produkcji przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej powtarzalnej jakości końcowej wyrobów to podstawowe czynniki rozwoju automatyzacji i robotyzacji, która obejmuje już nie tylko pojedyncze stanowiska ale i całe linie produkcyjne. Według raportu z badań dotyczącego polskiego rynku robotów przemysłowych opublikowanego w [1] można, zauważyć powrót trendu wzrostowego popularności i zainteresowania wdrożeniem do praktyki przemysłowej rozwiązań z robotami przemysłowymi. Dotychczasowe podejście inwestorów ulega zmianie na rzecz rozwiązań z robotami przemysłowymi widząc w tego typu rozwiązaniach korzyści długookresowe.

Obecnie szacuje się, że w przypadku programowania obrabiarek sterowanych numerycznie, ponad 70% zadań opracowywanych jest za pomocą specjalistycznego oprogramowania CAM. Dla robotów przemysłowych te statystyki są znacznie gorsze, ponieważ tylko około 1-2% z nich jest programowanych w trybie *off-line*, czyli poza stanowiskiem produkcyjnym wyposażonym w robota przemysłowego z zastosowaniem nowoczesnych programów wspomagających te działania [5]. Powszechnie uważa się, że programowanie robotów jest znacznie trudniejsze niż maszyn obrabiarek CNC, ponieważ oprócz trajektorii ruchu należy także zaprogramować orientację narzędzia, którym manipuluje robot. Rozwój metod programowania trwa od momentu powstania pierwszych robotów aż po dzień dzisiejszy i powiązane jest bezpośrednio z rozwojem systemów sterowania i szeroko rozumianej elektroniki, języków programowania i komputerów. Znane metody opracowywania programów sterujących można podzielić na *off-* lub *on-line*, czyli potocznie na stanowisku lub w środowisku wirtualnym tj. poza stanowiskiem produkcyjnym bez przerywania jego pracy.

Stosując współczesne programy komputerowe do programowania robotów przemysłowych można uzyskać szybkie i dokładne generowanie programów sterujących, testować różne warianty organizacyjne stanowiska i scenariusze pracy przy zachowaniu możliwości łatwego i szybkiego wprowadzania poprawek z zachowaniem bezpieczeństwa testowania (np. wykrywanie kolizji) programu dzięki symulacji w środowisku wirtualnym.

PROGRAMY WSPOMAGAJĄCE PROGRAMOWANIE ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

Obecnie standardem jest oferta producentów robotów przemysłowych w zakresie specjalistycznych rozwiązań programowych, w tym dedykowanych do określonych aplikacji (np. spawania, malowania, paletyzacji, cięcia itd.) oprogramowania do komputerowego wspomagania programowania ich zadań (tab. 1).

Oprócz rozwiązań dedykowanych i specjalistycznych oferowanych przez producentów robotów na rynku jest wiele innych programów przeznaczonych do wspomagania programowania i symulacji ich pracy. Należą do nich: MASTERCAM, RobotMaster, Delmia Igrip, RobCAD, Robot 3D, Cosimir, Robot Works i inne.

Do podstawowych i niezaprzeczalnych zalet wszystkich wymienionych wyżej programów należy zaliczyć:

- opracowywanie (pisanie) programów w trybie *off-line*,
- symulację trajektorii ruchu (pracy) robota,
- weryfikację przestrzeni roboczej pracy robota,
- sprawdzenie występowania ewentualnych kolizji z otoczeniem,
- oszacowanie czasu trwania cykli,
- możliwość transmisji gotowych programów do układu sterowania robota i odwrotnie,
- biblioteki modeli robotów, przenośników, pozycjonerów i innych elementów wyposażenia techniczno-technologicznego wraz z możliwością importu z innych programów CAD,
- monitorowanie i symulację wejść i wyjść cyfrowych.

Podstawową zaletą zastosowania w praktyce przemysłowej programów do wspomagania programowania i symulacji jest eliminacja do minimum czasu przestoju stanowiska lub linii produkcyjnej, ponieważ im jest on krótszy, tym mniejszy jest jego negatywny wpływ na opłacalność produkcji. Przy okazji redukcji może ulec czas dostarczenia do odbiorcy zamówionego wyrobu.

Tabela 1. Przykładowe programy wspomagające programowanie i symulacje pracy robotów przemysłowych (oferta producentów robotów przemysłowych)

Producent robotów przemysłowych	Nazwa programu (pakietu)
Fanuc Robotics Inc.	Roboguide (HandlingPRO, WeldPRO, PAintPRO, PalletPRO)
Kawasaki Robotics Inc.	PC-ROSET (Material Handling, ArcWelding, Panting)
Panasonic-Matsushita Welding Systems Co. Ltd.	DTPS 3D, G2 PC Tools 3D (ARC Welding)
Kuka Roboter GmbH	Kuka Sim Pro (Arc.Tech, Bend.Tech, Conveyor.Tech, Glue.Tech, Laser.Tech, CAMRob, PalletPro, Plast.Tech, Se-am.Tech, ServoGun, TourchSense)
Motoman Robotics - Yaskawa Corp.	MotoSim (MotoCAL VEG, MotoPallet EG, MotoSize, Points Importer EG)
ABB Robotics Ltd.	ABB RobotStudio (Arc Welding, Die Casting, Plastic, Press Automation, Assembly, Packing, Spot Welding)
DENSO Robotics	WINCAPS III
Stäubli Robotics	Stäubli Robotics Suite
Reis Robotics GmbH	ProSim
Mitsubishi Robotics Corp.	Melfa Works

W warunkach przemysłowych bywa i tak, że wytwarzanie jednego rodzaju wyrobu musi być rozpoczęta jak najszybciej po ukończeniu produkcji innego, wskutek czego nie ma praktycznie czasu na przeprogramowanie robotów w trybie *on-line*. Konieczne jest, zatem zastosowanie programów do modelowania i symulacji pracy robotów przemysłowych, które pozwolą zmniejszyć i przyspieszyć tą operację.

MODELOWANIE I SYMULACJA PRACY ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO W ŚRODOWISKU WIRTUALNYM

Praca w wirtualnym środowisku wymaga systematycznego postępowania tak aby uzyskać założone cele. Najczęściej takie postępowanie sprowadza się do realizacji następujących kroków [2, 3]:

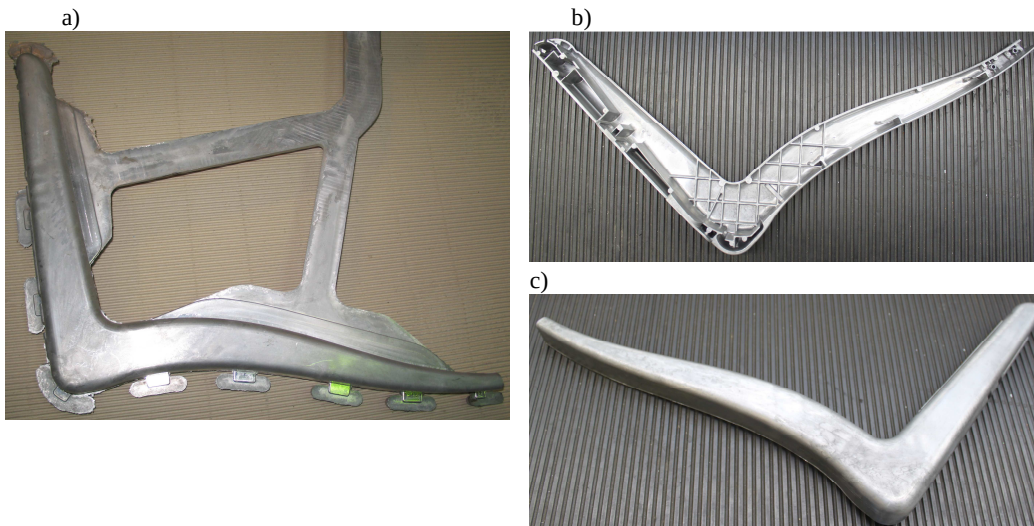
1. definicja projektu (aplikacji),
2. wybór modelu wirtualnego robota (z dostępnej biblioteki),
3. wybór rodzaju oprogramowania, w które wyposażony ma być układ sterowania (np. handling, welding, painting itd.),
4. wybór rodziny i typu robota dla którego będzie pisany program,
5. wybór wersji oprogramowania, w które wyposażony jest US RP (ten punkt jest istotny w przypadku późniejszego transferu programu do rzeczywistego US RP),
6. konfiguracja zewnętrznych osi (np. tory jezdne, pozycjonery),
7. konfiguracja opcji robota (np. język)
8. modelowanie wirtualnego środowiska stanowiska (*ang. layout*) - wybór i rozmieszczenie elementów i innego wyposażenia techniczno-technologicznego oraz bezpieczeństwa zrobotyzowanego stanowiska (z biblioteki elementów gotowych lub import z innego systemu CAD),
9. określenie i konfiguracja powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami stanowiska,
10. pisanie programu – najczęściej za pomocą wirtualnego panelu programowania (*ang. teach pendant*) w pełni zgodnego z rzeczywistym.
11. testowanie i symulacja,
12. analiza i weryfikacja otrzymanych wyników.

PRZYKŁAD MODELOWANIA I SYMULACJI ZROBOTYZOWANEGO STANOWISKA DO OBRÓBKI CZĘŚCI

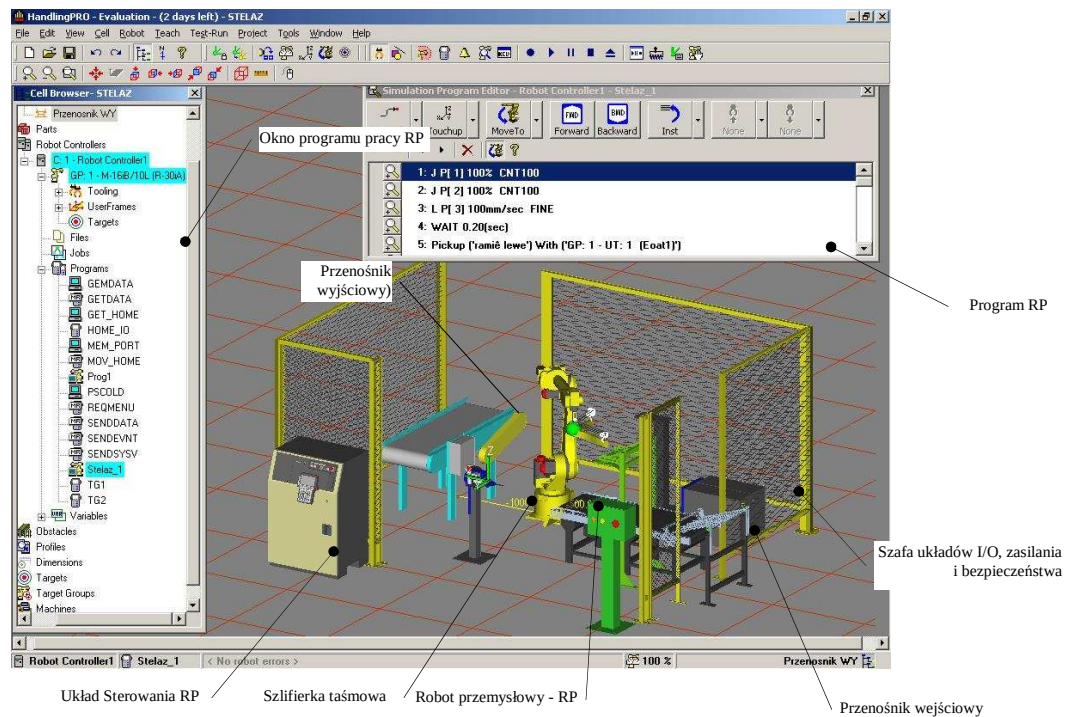
Proces obróbki wstępnej (np. gratowanie, szlifowanie, polerowanie) dla wybranego typu części wykonywany jest najczęściej przez pracownika ręcznie i wymaga skomplikowanych oraz skoordynowanych ruchów jego kończyn górnych. W projektowanym wirtualnym stanowisku planuje się zastosowanie robota przemysłowego, którego zadaniem będzie przejęcie od pracownika (jego wyeliminowanie) zadań trzymania i manipulowania obrabianą częścią podczas operacji obróbki. Dla tego typu zadań mogą być zastosowane współczesne roboty przemysłowe o liczbie ruchliwości równej 6 (tzw. roboty 6-cio osiowe), które spełniają wymagania pod względem ruchliwości, dokładności, powtarzalności i uzyskiwanych prędkości ruchów.

Poprawne zaprojektowanie zrobotyzowanego stanowiska do obróbki części w celu uzyskania oczekiwanych efektów ekonomicznych i wydajnościowych, wymaga przeprowadzenia badań symulacyjnych z uwzględnieniem zakładanych parametrów (np. czasu trwania operacji, ruchów roboczych i jałowych - szybkich ruchów przestawczych manipulatora) oraz uwzględnienia możliwych zakłóceń np. awarii, przestojów i przerw w trakcie realizacji procesu.

Modelowanie i symulację pracy wydzielonego organizacyjnie stanowiska do obróbki części (rys. 1) wykonano z zastosowaniem oprogramowania wspomagającego programowanie robotów w trybie offline RoboGuide v 6.4 firmy Fanuc Ltd [3]. Głównym celem modelowania i symulacji pracy stanowiska jest analiza porównawcza opracowanych modeli symulacyjnych z aktualnie realizowanym procesem obróbki. Zaprojektowany wirtualny model zrobotyzowanego stanowiska do obróbki części przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Półfabrykat stelaża siedzenia pasażerskiego: a) po operacji odlewania ciśnieniowego, b-c) po odcięciu układu wlewowego i wypływek przeznaczony do obróbki

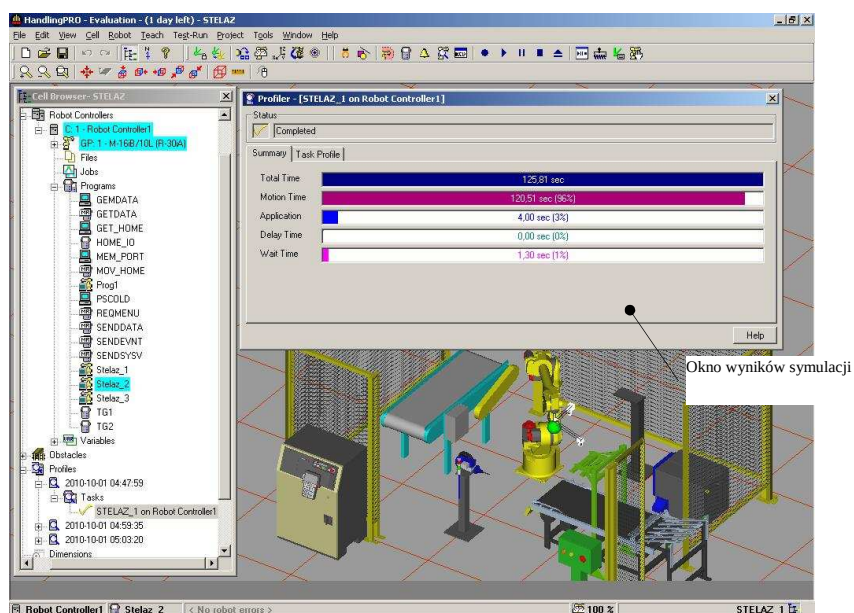


Rys. 2. Model zrobotyzowanego stanowiska do obróbki części opracowany w programie RoboGuide v6.4 firmy FANUC Ltd.

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych przyjęto następujące założenia:

- stanowisko wyposażone jest w 6-cio osiowego robota przemysłowego FANUC M16iB/10L o udźwigu 10 kg i dokładności pozycjonowania $\pm 0,1$ mm z układem sterowania R30iA,
- prędkości ruchów dla punktu TCP narzędzia:
 - roboczych: 3,5 m/min (2 % prędkości maksymalnej)
 - jałowych: 15 m/min (8 % prędkości maksymalnej),
 - przestawczych: 100 % prędkości maksymalnej,
- części do i po obróbce są transportowane za pomocą przenośników taśmowych.

Wyniki z przeprowadzonych symulacji (rys. 3) według wybranego wariantu konfiguracyjnego dla kilku możliwych scenariuszy (programów pracy robota) procesu obróbki wstępnej części przedstawiono zbiorczo w tabeli 2. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że zastosowanie robota przemysłowego, niezależnie od scenariusza przebiegu procesu obróbki wstępnej dla jednego cyklu pracy stanowiska wynosi średnio około 2 min a dla stanowiska testowego (rys. 4) ok. 2,2 min. Uzyskane wyniki z badań symulacyjnych i testowych potwierdzają możliwość zastosowania robota przemysłowego, który będzie bardziej wydajny niż pracownik wykonujący operacje obróbki ręcznie trwającej średnio w przedziale od 3 – 4 minut w zależności od zdolności manualnych i predyspozycji.



Rys. 3. Okno programu RoboGuide po wykonaniu symulacji dla 1 cyklu pracy stanowiska

Tabela 2. Wyniki symulacji procesu obróbki wstępnej części (wartości średnie dla 10-ciu powtórzeń symulacji)

Numer scenariusza (programu robota)	Całkowity czas cyklu pracy stanowiska [s]
1	160,34
2	125,81
3	127,54
4	126,67
5	128,37



Rys. 4. Zrobotyzowane stanowisko do badań testowych w Laboratorium Podstaw Robotyzacji ZPT IMt PP

PODSUMOWANIE

Przedmiotem opisywanych badań było uzyskanie odpowiedzi dotyczącej celowości zastosowania komputerowego wspomagania programowania robotów przemysłowych. Jak wynika z przeprowadzonych wstępnych badań symulacyjnych i testowych zastosowanie programowania w środowisku wirtualnym w znaczny sposób skraca czas przygotowania programu pracy robota i wydatnie wpływa na podniesienie efektywności produkcji, co powinno przynieść oczekiwane efekty ekonomiczne i jakościowe oraz przyczynić się do podniesienia jakości końcowej wyrobu, a na etapie projektowania pozwoli wybrać najkorzystniejszy wariant organizacyjny i konfiguracyjny. Ponadto należy stwierdzić, że zastosowanie programów do komputerowego wspomagania programowania i symulacji pracy robotów i stanowisk zrobotyzowanych w znaczny sposób ułatwiają podjęcie decyzji o planowanej inwestycji.

LITERATURA

1. Cieniak I., Roboty w ruchu. Polski rynek robotów przemysłowych. Raport. Control Engineering Polska, 1-2.2010, s. 24-33
2. Dokumentacja programu Roboguide firmy Fanuc Robotics Co., Ltd., Japan, 2007.
3. Podręcznik Programowania - Roboguide. Fanuc Robotics Co., Ltd., Japan, 2007.
4. Wyręczyć człowieka. Nowy Przemysł - Specjalista, nr 1, 2005, s. 3-6.
5. Zalewski A. Nowa jakość w programowaniu robotów przemysłowych. Biuletyn Automatyki, nr 3 (65), Kraków, 2010, s. 10-11.
6. Zdanowicz R., Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania. WPŚ, Gliwice 2002.

COMPUTER AIDED MODELING AND SIMULATION OF ROBOTIC CELLS

Abstract. *The paper presents the issue of modeling and simulation of the computer aided programming and simulation of robotic cells using today's CAM (Computer Aided Manufacturing) programs. The developed virtual model and the experimental results of simulation the robotic pretreatment cell are presented. The final part of the paper presents the results and conclusions from conducted tests and analyses.*

II
PROBLEMY TECHNIKI I TECHNOLOGII
MONTAŻU WYROBÓW

Andrzej ZBROWSKI

Tomasz SAMBORSKI

Stanisław KOZIOŁ

Instytut Technologii Eksploatacji

Państwowy Instytut Badawczy

Radom

MODEL LINII DO GRAFICZNEJ I ELEKTRONICZNEJ PERSONALIZACJI DOKUMENTÓW

THE MODEL OF THE PRODUCTION LINE FOR GRAPHIC AND ELECTRONIC PERSONALISATION OF THE DOCUMENTS

W systemach zabezpieczeń dokumentów i obiektów technicznych powszechnie stosowana jest metoda RFID (Radio Frequency Identification) polegająca na przesyłaniu drogą radiową informacji zakodowanej w układzie elektronicznym. Metoda ta jest coraz szerzej wykorzystywana zarówno w ochronie obiektowej, ochronie danych, bezpieczeństwie publicznym, jak i w komercyjnych dziedzinach gospodarki np. związanych z kontrolą procesów technicznych, technologicznych lub automatyczną dystrybucją [1, 2, 3].

Powszechność zastosowania technologii RFID towarzyszy rozwój technik fałszowania danych zawartych w nośnikach elektronicznych jak również rozwój nowych możliwości podrabiania samych nośników [4]. Niezbędne jest zatem stałe doskonalenie technik zabezpieczania dokumentów zawierających układy RFID i zawartych w nich informacji [5, 6, 7]. Konieczność rozwoju i wykorzystania elektronicznych zabezpieczeń zarówno pod względem doskonalenia jakości, jak i coraz szerszego zastosowania wskazują tendencje światowe widoczne zarówno w postaci upowszechnienia tych rozwiązań w wielu dziedzinach życia społecznego i gospodarki jak i we wprowadzanych nowych międzynarodowych uregulowaniach prawnych. Szczególnie istotne jest zwiększenie bezpieczeństwa publicznego przez możliwość szybkiej i skutecznej identyfikacji osób [8]. Identyfikacja osób ma obecnie strategiczne znaczenie wobec zagrożeń ze strony międzynarodowego terroryzmu.

W celu zwiększenia poziomu bezpieczeństwa aktywnego i pasywnego często stosowane jest łączenie technik zabezpieczeń w postaci unikalnych informacji graficznych przypisanych odpowiednim danym wprowadzonym do pamięci mikroprocesora. Odpowiednie systemy weryfikacji porównują zgodność zapisu elektronicznego z informacją alfanumeryczną oraz zgodność grafiki zapisanej cyfrowo z grafiką znajdującą się w postaci nadruku widocznego w odpowiednich warunkach oświetlenia. Rozwiązania w postaci łączenia cyfrowego obrazu odcisku palca lub siatkówki z ich odpowiednikiem graficznym są już powszechnie stosowane w dokumentach tożsamości w wielu krajach świata. Przykładem są paszporty biometryczne oraz dowody osobiste w postaci kart plastikowych, które w wielu krajach są wyposażane w dodatkową cechę biometryczną, tj. obraz odcisków palców. Unia Europejska w 2004 r. wprowadziła obowiązek zapisu w paszportach danych biometrycznych.

Ze względu na bezpieczeństwo narodowe we wdrożeniach metod biometrycznych połączonych z wykorzystaniem techniki RFID przodują kraje zagrożone terroryzmem. Na amerykańskich lotniskach działają systemy rozpoznawania twarzy, których wzorce są zawarte w radiowym chipie RFID BIKBBiŁI stanowiącym część paszportu (dokumenty zawierają także odciski palców). Podobny system działa w australijskich portach lotniczych i stanowi alternatywę dla tradycyjnej odprawy celnej - skanowanie twarzy trwa kilka sekund, jest szybsze i wygodniejsze niż tradycyjne okazywanie paszportu. Na granicy palestyńsko-izraelskiej Palestyńczycy posługują się specjalnymi kartami identyfikacyjnymi, które oprócz zdjęcia, odcisków palców oraz kształtu twarzy zawierają także kształt dłoni. Niemiecki rząd zamierza wzbogacić biometryczne paszporty obywateli tego kraju o wzór tęczy oka [11].

Zwiększający się zakres zastosowań sprawia, że produkty charakteryzujące się podwyższonym poziomem zabezpieczeń nie ograniczają się do dokumentów tożsamości. Papierowe lub plastikowe karty

z elektronicznym układem scalonym znajdują zastosowanie w weryfikacji uprawnień dostępu do kont bankowych, bibliotek, usług (np: medycznych, ubezpieczeniowych), pomieszczeń, urzędów, środków transportu, oraz monitoringu obiektowego. Laboratoria naukowe intensywnie rozwijają prace nad technikami zapisu, odczytu i transmisji danych biometrycznych zawartych w identyfikatorach elektronicznych, np.: zawierających układy RFID [9, 10]. Równie istotne są działania zmierzające do zwiększenia trwałości, wytrzymałości mechanicznej i fizycznej odporności na nieautoryzowane dokonywanie zmian w obszarze informacji graficznych i alfanumerycznych naniesionych technikami drukarskimi w celu dodatkowej personalizacji graficznej dokumentów z zabezpieczeniem elektronicznym. Prowadzone prace badawcze obejmują nowe rodzaje materiałów konstrukcyjnych, barwników, pigmentów, technik wydruku i zabezpieczeń mechanicznych chroniących informacje drukowane.

Realizacja prac badawczo – rozwojowych zmierzających do poprawy poziomu zabezpieczeń elektronicznych i fizycznych musi być weryfikowana doświadczalną produkcją prototypowych identyfikatorów RFID prowadzoną w warunkach zbliżonych do produkcji wielkoseryjnej. Do tego celu konieczne jest stosowanie specjalnych, niskonakładowych, elastycznych systemów wytwórczych umożliwiających swobodne wykorzystanie opracowanych innowacyjnych technologii, konstrukcji, komponentów, receptur i procedur. Elastyczna i wielowariantowa struktura musi zapewniać szybką, powtarzalną produkcję krótkoseryjną, umożliwiającą tanie prototypowanie nowych generacji produktów z udoskonalonymi technikami zabezpieczeń w ilościach umożliwiających prowadzenie badań z wykorzystaniem analizy statystycznej [12].

W Instytucie Technologii Eksploatacji - PIB w Radomiu opracowano ciąg technologiczny do wytwarzania wyrobów o zróżnicowanych formatach (do A4) i kształtach w warunkach niskonakładowej produkcji eksperymentalnej. Produktem ciągu technologicznego są wielowarstwowe (łączone różnymi technikami klejenia) wyroby zawierające niespersonalizowany układ RFID [13, 14]. Powstałe rozwiązanie umożliwia prototypowanie identyfikatorów RFID w obszarze połączeń klejowych, stosowanych materiałów konstrukcyjnych oraz geometrii produktu. Wyrobem końcowym uzyskiwanym w ramach funkcjonującego systemu jest niespersonalizowany identyfikator z chipem RFID. Taki rezultat można traktować jako efekt końcowy jedynie w przypadku gdy nie są wymagane specjalne warunki ochrony danych zaś identyfikator może podlegać oprogramowaniu u finalnego odbiorcy.

Istnieje jednak szereg zastosowań, w których „surowe” identyfikatory z zabezpieczeniem elektronicznym muszą podlegać dalszemu procesowi obróbki w ramach jednolitego systemu wytwarzania zapewniającego odpowiedni poziom bezpieczeństwa przechowywanych danych oraz zwiększającego trwałość mechaniczną i odporność fizyczną. W takim przypadku wyrób - półprodukt w postaci niespersonalizowanego identyfikatora musi podlegać kolejnym operacjom technologicznym mającym na celu:

- personalizację elektroniczną,
- personalizację graficzną,
- weryfikacja spójności danych elektronicznych i graficznych
- zabezpieczenie przed uszkodzeniem mechanicznym.

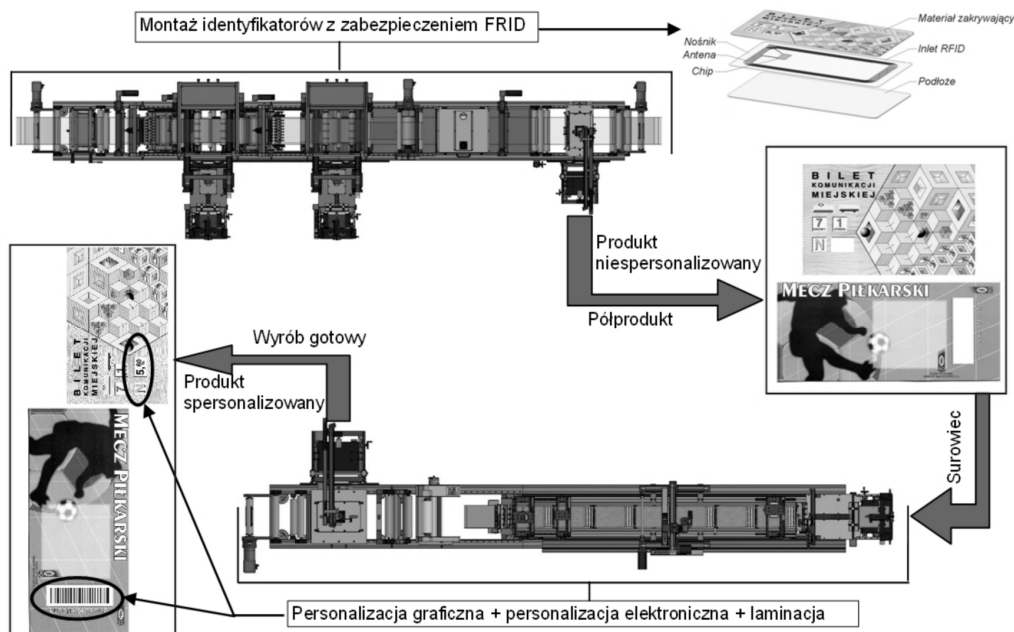
W celu dalszego rozwoju technologii wytwarzania prototypów kart i dokumentów zabezpieczonych elektronicznie w ITE-PIB opracowano koncepcję i model ciągu technologicznego stanowiącego uzupełnienie i przedłużenie istniejącego systemu przeznaczonego do prototypowania konstrukcji i połączeń identyfikatorów zawierających układy RFID. Prezentowany w artykule model systemu opracowano dla ciągu produkcyjnego realizującego proces graficznej i elektronicznej personalizacji z możliwością zwiększenia odporności fizycznej i poprawy stopnia ochrony mechanicznej. Wyrobem końcowym w ramach opracowanego systemu jest identyfikator z chipem RFID o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa przechowywanych danych.

STRUKTURA SYSTEMU WYTWARZANIA

Przyjęta koncepcja ciągu technologicznego do graficznej i elektronicznej personalizacji dokumentów zakłada, że komponentami wejściowymi do produkcji będą wielowarstwowe niespersonalizowane identyfi-

katory RFID. Ponadto ich budowa powinna umożliwiać zwiększanie poziomu odporności mechanicznej poprzez jednostronną lub dwustronną laminację powierzchni zewnętrznych.

Kompleksowy system wytwarzania prototypów wysoko zabezpieczonych kart identyfikatorów zawierających układy RFID zakłada współdziałanie ciągu technologicznego, którego produktem końcowym jest zmontowany lecz niespersonalizowany dokument, z ciągiem technologicznym realizującym procesy personalizacji elektronicznej i graficznej oraz laminacji zewnętrznych powierzchni gotowego produktu (rys. 1).



Rys. 1. Model systemu do wytwarzania laminowanych produktów z zabezpieczeniem RFID personalizowanych elektronicznie i graficznie

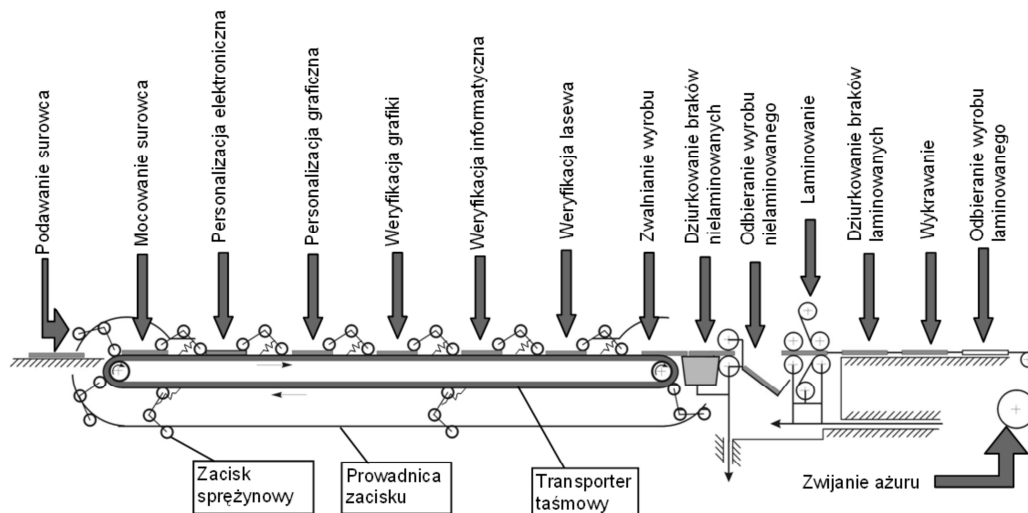
Opracowany model ciągu realizującego procesy personalizacji oraz laminacji zewnętrznych powierzchni stanowi integralne przedłużenie linii przeznaczonej do produkcji „surowych” identyfikatorów. Identyfikatory zmontowane w ramach pierwszego etapu cyklu produkcyjnego będą przekazywane do systemu personalizacji. Fizyczne rozdzielenie na dwa etapy produkcji umożliwia prowadzenie prac z identyfikatorami o innym źródle pochodzenia. Obie linie mogą pracować niezależnie lub jednocześnie. Wyroby pomiędzy liniami są buforowane w magazynkach dzięki czemu linia do personalizacji jest zasilana sekwencyjnie. Takie rozwiązanie umożliwia realizację różnych taktów wytwarzania na obu liniach produkcyjnych.

MODEL FUNKCJONALNY LINII DO GRAFICZNEJ I ELEKTRONICZNEJ PERSONALIZACJI

Koncepcja modułowego systemu personalizacji zakłada cykliczną, taktowaną i szeregową pracę układu technologicznego, z zatrzymywaniem w celu wykonania kolejnych zabiegów technologicznych. Moduły systemu stanowią odrębne zespoły funkcjonalne, przeznaczone do realizacji określonych zabiegów, zintegrowane w ramach ciągu technologicznego ze wspólnym układem sterującym. Procesy operacyjne realizo-

wane są jednocześnie w odpowiednich gniazdach technologicznych. Położenie poszczególnych modułów w układzie technologicznym regulowane jest w zależności od parametrów konstrukcyjnych produkowanych wyrobów. Modularyzacja stwarza możliwości elastycznej aranżacji, powielania, usuwania i przemieszczania modułów funkcjonalnych, wzdłuż linii tworzącej główną oś ciągu technologicznego (rys. 2).

Struktura ciągu technologicznego zakłada przemieszczanie materiału poddawanego odpowiednim zabiegom za pomocą transportera taśmowego zasilanego z układu podawania surowca. System transportu ciągu technologicznego zapewnia współpracę z materiałem o zróżnicowanych formatach od ID1 do A4. Pojedyncze półprodukty (użytki) przekazywane automatycznie z podajnika wejściowego podlegają samoczynnemu zamocowaniu na taśmie transportowej w celu uzyskania powtarzalnych współrzędnych położenia.

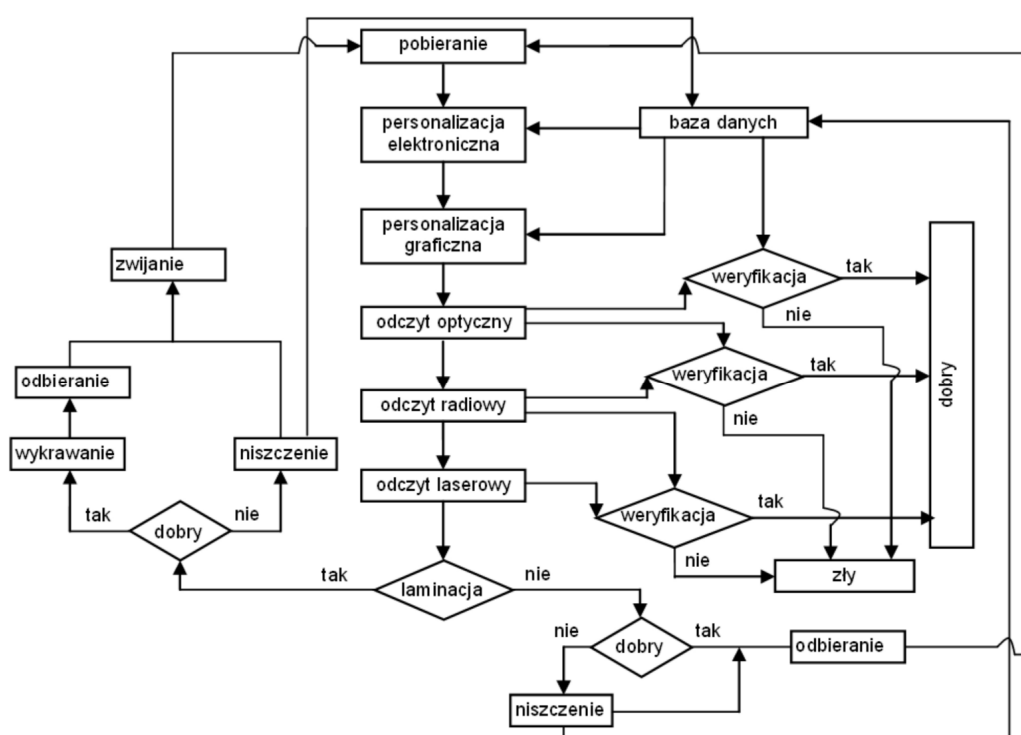


Rys. 2. Schemat procesu graficznej i elektronicznej personalizacji dokumentów RFID z laminowaniem ochronnym

Blokowanie użytku na taśmie transportera jest realizowane mechanicznie za pomocą dźwigniowych zacisków sterowanych za pomocą prowadnic krzywkowych. Detale znajdujące się na taśmie przekazywane są skokowo do kolejnych gniazd technologicznych w celu wykonania odpowiednich operacji. Proces wprowadzania zabezpieczeń rozpoczyna się personalizacją elektroniczną polegającą na zapisie odpowiednich informacji w pamięci mikroprocesora za pośrednictwem fal radiowych. Następnie użytek jest poddawany zabiegowi personalizacji graficznej, w którym odpowiednie pola na powierzchni detalu uzyskują nadruk alfanumeryczny i graficzny, właściwy dla wcześniej wprowadzonych do pamięci procesora danych w postaci elektronicznej. Kolejnym gniazdem technologicznym jest weryfikacja personalizacji graficznej za pomocą kamery wizyjnej pracującej w systemie automatycznej optycznej inspekcji. System inspekcji sprawdza czytelność wydruku oraz przekazuje informacje do systemu sterowania, który porównuje dane odczytane metodą optyczną z odpowiednim rekordem bazy przeznaczonym do zapisu w procesorze. Kolejnym poziomem zabezpieczeń jest proces weryfikacji informatycznej danych cyfrowych zapisanych w chipie RFID. Moduł weryfikacji elektronicznej radiowo odczytuje zapisane dane cyfrowe i porównuje zgodność odczytanych danych cyfrowych z danymi odczytanymi za pomocą systemu automatycznej optycznej inspekcji. Ostatnim zabiegiem kontrolnym jest proces weryfikacji kodu paskowego za pomocą czytnika laserowego. Podobnie jak poprzednio następuje porównanie danych zapisanych w procesorze z danymi odczytanymi z kodu paskowego.

Dalsza konfiguracja ciągu technologicznego jest wariantowa i zależy od wprowadzanego zabezpieczenia mechanicznego (rys. 3). Jeżeli w produkcji nie przewidziano zwiększenia odporności fizycznej i trwałości mechanicznej wówczas detale z transportera taśmowego przejmowane są przez układ odbierający produkty nielaminowane. W przypadku wykrycia przez procesy weryfikacyjne niezgodności we wprowadzonych danych wyrób brakowy, po przekazaniu z transportera taśmowego, jest trwale znakowany i jednocześnie niszczony poprzez wykonanie dziurkowania. W takiej sytuacji proces personalizacji jest realizowany powtórnie z użyciem innego półwyrobu. Wszystkie detale zarówno dobre jak i braki są automatycznie układane w pojemniku układu odbierającego produkty nielaminowane.

Jeżeli w produkcji będą wprowadzane dodatkowe zabezpieczenia zwiększające odporność mechaniczną, wówczas układ odbierający produkty nielaminowane jest zastępowany układem laminującym, dokowanym do odpowiedniego portu transportera taśmowego. W tej konfiguracji mechanizm laminatora płynnie przejmuje detale uwalniane z transportera taśmowego. Układ umożliwia dwustronne lub jednostronne laminowanie kart identyfikatorów. Po wykonaniu laminacji medium transportowe produktu końcowego stanowi wstęga folii zawierająca zalaminowane elementy.



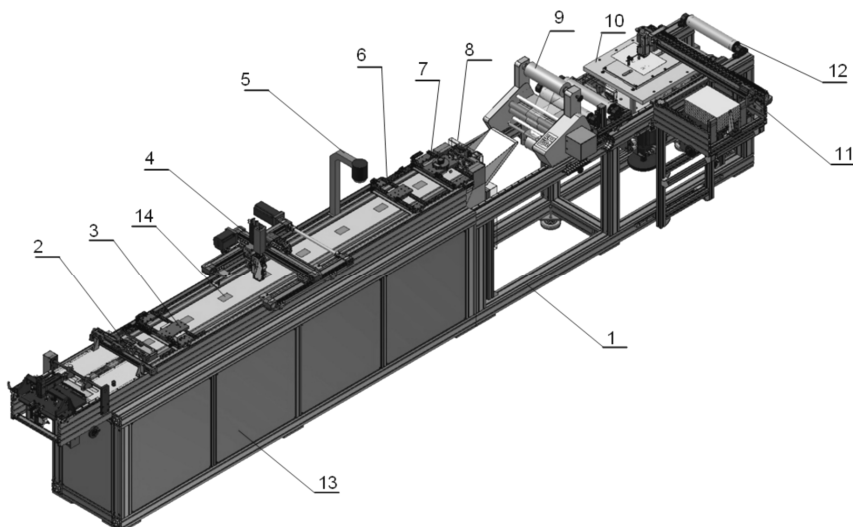
Rys. 3. Algorytm procesu graficznej i elektronicznej personalizacji dokumentów

Kolejnym zadaniem jest znakowanie braków, w którym podobnie jak poprzednio wadliwie spersonalizowany produkt jest znakowany i niszczony za pomocą dziurkowania. Produkt końcowy powstaje

w wyniku wykrawania prawidłowo spersonalizowanego identyfikatora ze wstęgi folii laminacyjnej. Wykrojone identyfikatory są automatycznie pobierane i usuwane z ażuru. Braki nie są wykrawane, pozostają we wstędze i są zwijane jako odpad razem z ażurem.

MODEL WIRTUALNY

Konstrukcja urządzenia została zaprojektowana jako struktura ramowa, do której zamocowano wszystkie moduły wykonawcze (rys. 4).



Rys. 4. Model systemu do graficznej i elektronicznej personalizacji dokumentów RFID z laminowaniem ochronnym: 1 – rama, 2 – moduł wejściowy, 3 – moduł personalizacji elektronicznej, 4 – moduł personalizacji graficznej, 5 – moduł automatycznej optycznej inspekcji, 6 – moduł inspekcji cyfrowej, 7 – moduł inspekcji laserowej, 8 – moduł odbierający produkty nielaminowane, 9 – moduł laminujący, 10 – moduł wykrawający, 11 – moduł odbierający produkty laminowane, 12 – zwijacz ażuru, 13 – szafa sterownicza, 14 – arkusz identyfikatora

Główne moduły systemu odpowiedzialne za realizację opracowanego modelu funkcjonalnego to:

- moduł wejściowy,
- moduł transportera taśmowego
- moduł personalizacji elektronicznej,
- moduł personalizacji graficznej,
- moduł automatycznej optycznej inspekcji
- moduł inspekcji radiowej danych cyfrowych
- moduł inspekcji laserowej
- moduł odbierający produkty nielaminowane,
- moduł laminujący,
- moduł wykrawający,
- moduł odbierający produkty laminowane,
- moduł zwijający ażur.

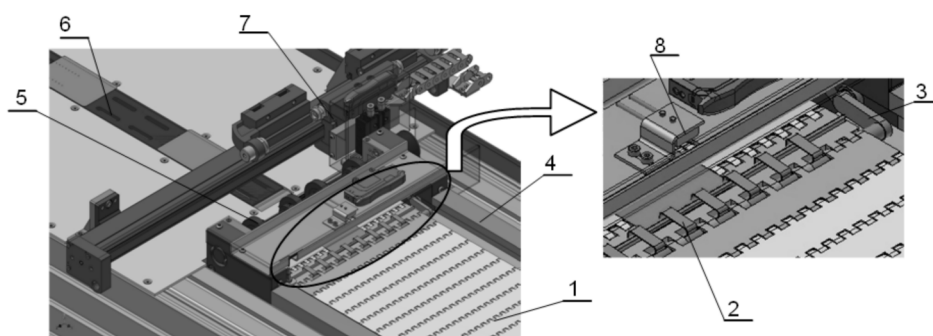
Wszystkie moduły są osadzone w ramie wykonanej w systemie profili aluminiowych. Wewnętrzne przestrzenie konstrukcji ramowej wykorzystano do zabudowy szaf sterowniczych zawierających elementy

systemu elektrycznego i podzespoły automatyki przemysłowej. Konstrukcja ramy umożliwia przemieszczanie modułu odbierającego produkty nielaminowane oraz modułu laminującego w sposób zapewniający wymienne dokowanie obu modułów do transportera taśmowego. Ponadto rama posiada system prowadnic liniowych umożliwiających precyzyjne pozycjonowanie każdego modułu w zależności od formatu wytwarzanego produktu.

Transporter taśmowy (rys. 5) jest zbudowany ze sztywnych, poliamidowych ogniw połączonych przegubowo. W celu zapewnienia stałej wysokości roboczej górna (robocza) część transportera posiada podparcie w postaci listwy ślizgowej. Ogniwa transportera posiadają wbudowane w odpowiedniej podziałce sprężynowe dociski mocujące obiekt transportowany.

Moduł wejściowy (rys. 5) zapewnia zasilanie transportera taśmowego ze stacjonarnego magazynka oraz płynne przekazywanie pojedynczych użytków na taśmę transportera. W obszarze modułu wejściowego następuje poprzeczne pozycjonowanie arkusza oraz blokowanie każdego użytku w ustalonej pozycji na taśmie transportera za pomocą docisków sprężynowych sterowanych mechanizmem krzywkowym. Pozycjonowanie jest realizowane za pomocą baz ustawczych.

Moduł do personalizacji graficznej (rys. 6) to system druku wysokiej rozdzielczości umożliwiający pozycjonowanie głowicy drukującej w czterech osiach. Głowica jest zamocowana do ruchomej karetki. Napędy liniowe pozycjonują karetkę głowicy w płaszczyźnie poziomej.



Rys. 5. Moduł wejściowy: 1 – taśma transportera, 2 – docisk sprężynowy, 3 – krzywka sterująca, 4 – prowadnica krzywki, 5 – rolki pobierające, 6 – stół spływowy podajnika półwyrobów, 7 – pozycjoner arkusza, 8 – czujnik obecności arkusza

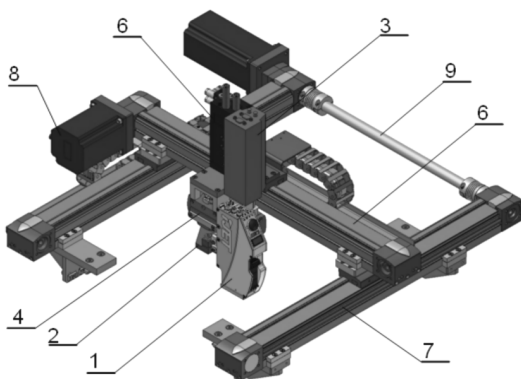
Napędy są skonfigurowane w układzie portalowym, w którym ruchomy trawers spoczywa na dwóch synchronicznie przemieszczanych wózkach stanowiących elementy podpór mocowanych do ramy ciągu technologicznego. Mechanizmy podpór są synchronizowane za pomocą wału napędowego. W zastosowanych napędach liniowych do przemieszczania wózków wykorzystywane są zębate przekładnie pasowe współpracujące z silnikami krokowymi. Karetka systemu posiada obrotową platformę pozycjonowaną za pomocą silnika krokowego zintegrowanego ze sterownikiem. Platforma obrotowa umożliwia zmianę pozycji katowej głowicy, dzięki czemu możliwe jest nanoszenie nadruku w różnych kierunkach ruchu oraz z mniejszymi marginesami bocznymi. Czwartą osią ruchomą karetki głowicy jest oś pionowa, w której ruch jest realizowany za pomocą pneumatycznego napędu liniowego. Unoszenie głowicy jest niezbędne w celu ominięcia sprężynowych zaczepów pozycjonujących detale przemieszczających się pod głowicą w czasie ruchu transportera liniowego. Omijanie zaczepów jest niezbędne, ponieważ odległości robocza głowicy od zadrukowanego arkusza wynosi ok. 1mm.

Moduł odbierający wyroby nielaminowane łączy funkcje niszczarki braków, podajnika rolkowego i zasobnika wyrobów gotowych. W korpusie modułu zabudowany jest pneumatyczny wykrojnik dziurkują-

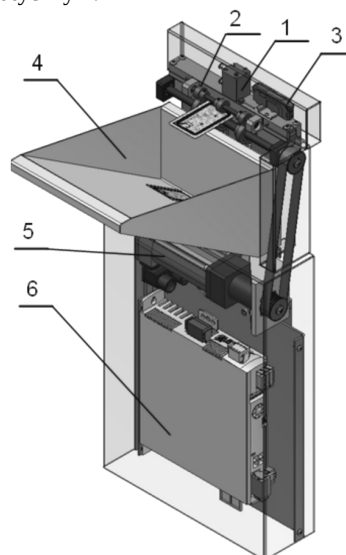
cy oraz rolki transportowe połączone pasem zębatym z serwosilnikiem napędowym. W celu dokowania do podajnika taśmowego moduł jest automatycznie przemieszczany w prowadnicach ramy w kierunku pionowym za pomocą siłownika pneumatycznego. Wyroby dobre są płynnie przejmowane przez układ rolek i przekazywane do pojemnika. W przypadku wykrycia braku, rolki są zatrzymywane, aby wykrojniki mógł wykonać zabieg dziurkowania. Po zapełnieniu magazynka operator musi dokonać manualnej selekcji polegającej na oddzieleniu wyrobów dobrych od braków posiadających widoczne przelotowe otwory.

Moduł laminujący umożliwia dwustronne lub jednostronne laminowanie wyrobu dostarczanego w formie pojedynczych arkuszy. Moduł posiada prowadnice liniowe umożliwiające poziome przemieszczanie układu w celu dokowania do podajnika taśmowego. Folia laminująca jest umieszczona na dwóch walcach biernych. Napęd folii jest realizowany ciernie za pomocą grzanych walców napędowych. Folia ulega laminacji po podgrzaniu i ściśnięciu pomiędzy walcami napędowymi. Walce napędowe posiadają pneumatyczny mechanizm rozsuwania zapobiegający grzaniu i laminowaniu folii w trakcie postoju. Autonomiczny system sterowania modułu umożliwia regulację prędkości pracy oraz temperatury walców.

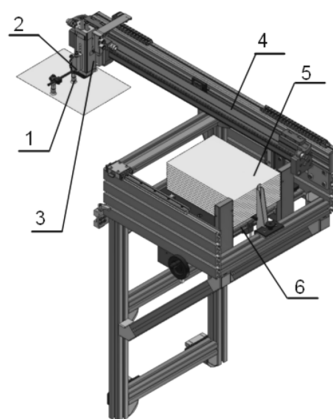
Moduł odbierający wyroby laminowane jest dwuosiowym manipulatorem pneumatycznym wyposażonym w podciśnieniowy układ chwytający oraz sterowany pneumatycznie magazyn wyrobów gotowych. Podłużny ruch poziomy jest realizowany za pomocą siłownika bez tłoczyskowego natomiast poprzeczny ruch pionowy realizuje tłoczyskowy napęd liniowy. Przyssawkowy, eżektorowy chwytak przejmuje detale z gniazda wykrojnika po wykonaniu operacji wkrawania. Wyroby gotowe są automatycznie układane na stosie w magazynie wyrobów gotowych. Magazyn posiada ruchome (podnoszone i opuszczane) dno, którego pozycja jest automatycznie dopasowywana do wysokości stosu wyrobów gotowych. Pozycjonowanie denka jest realizowane za pomocą mechanizmu z napędem pneumatycznym.



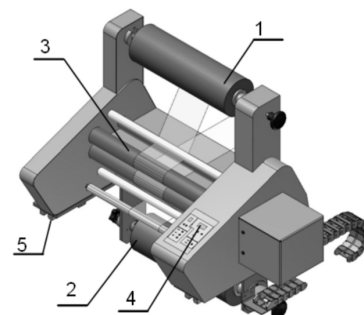
Rys. 6. Moduł do personalizacji graficznej: 1 – głowica drukująca, 2 – platforma obrotowa, 3 – silnik krokowy napędu platformy, 4 – karetki głowicy, 5 – pneumatyczny napęd liniowy, 6 – napęd liniowy poprzeczny, 7 – napęd liniowy podłużny, 8 – silnik krokowy napędu liniowego, 9 – wał synchronizujący



Rys. 7. Moduł odbierający wyroby nielaminowane: 1 – wykrojniki, 2 – rolki transportowe, 3 – czujnik obecności arkusza, 4 – pojemnik wyrobów gotowych, 5 – serwosilnik napędu rolek, 6 – sterownik serwosilnika



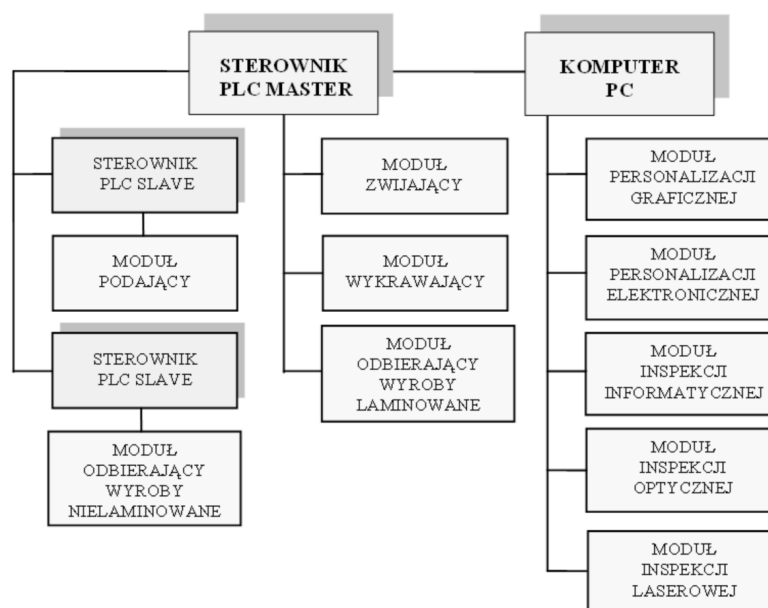
Rys. 9. Moduł odbierający wyroby laminowane:
1 – chwytak przyssawkowy, 2 – eżektor, 3 – siłownik napędu pionowego, 4 – siłownik bezłoczyskowy, 5 – stos wyrobów gotowych, 6 – ruchome dno



Rys. 8. Moduł laminujący: 1 – górna rolka folii, 2 – dolna rolka folii, 3 – rolka napędowa grzana, 4 – panel sterowania, 5 – prowadnica liniowa

SYSTEM STEROWANIA

System sterowania tworzy trzypoziomową hierarchię zarządzania procesem wytwórczym (rys. 10). Jednostką nadrzędną jest główny sterownik PLC master.



Rys. 10. Schemat struktury systemu sterowania

Na drugim poziomie znajdują się sterowniki PLC modułów funkcjonujących jako autonomiczne urządzenia, realizujące własne algorytmy. System sterowania wysyła jedynie rozkazy uruchamiające lub zatrzymujące tak zdefiniowany moduł. Moduły autonomiczne to: moduł podający oraz moduł odbierający produkty nielaminowane. Są one nadzorowane za pomocą sterowników PLC drugiego poziomu zdefiniowanych jako slave. Drugi poziom w hierarchii systemu sterowania to także moduły zarządzane za pomocą komputera PC współpracującego z głównym sterownikiem PLC master. Komputer uruchamia procesy oraz przesyła dane z bazy danych do modułów personalizacji graficznej i elektronicznej. Jest również odpowiedzialny za proces analizy i weryfikacji danych pochodzących z modułów inspekcji optycznej, elektronicznej i laserowej. Moduły personalizacji graficznej oraz inspekcji optycznej posiadają sterowniki zarządzające procesem rejestracji danych (moduł inspekcji) oraz funkcjami głowicy drukującej. Istotną rolą komputera jest proces decyzyjny w weryfikacji odczytanych danych, wprowadzanych podczas personalizacji graficznej i elektronicznej.

Trzeci poziom sterowania obejmuje moduł odbierający wyroby laminowane, moduł wykrawający oraz moduł zwijający. Elementy wykonawcze modułów trzeciego poziomu są kontrolowane bezpośrednio z poziomu sterownika master. W trzecim poziomie znajdują się także elementy wykonawcze modułu personalizacji graficznej.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony model ciągu technologicznego do graficznej i elektronicznej personalizacji dokumentów stanowi element kompleksowego systemu wytwarzania prototypów wysoko zabezpieczonych kart identyfikatorów zawierających układy RFID. Przyjęta koncepcja systemu wytwarzania zakłada, że komponentami wejściowymi do produkcji będą wielowarstwowe niespersonalizowane identyfikatory RFID. Prezentowany w artykule model systemu opracowano dla ciągu produkcyjnego realizującego proces graficznej i elektronicznej personalizacji z możliwością zwiększenia odporności fizycznej i poprawy stopnia ochrony mechanicznej. Wyrobem końcowym w ramach opracowanego systemu jest identyfikator z chipem RFID o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa przechowywanych danych. Moduły systemu stanowią odrębne zespoły funkcjonalne, przeznaczone do realizacji określonych zabiegów, zintegrowane w ramach ciągu technologicznego ze wspólnym systemem sterowania. Procesy operacyjne realizowane są jednocześnie w odpowiednich gniazdach technologicznych. Konfiguracja układu technologicznego jest ustalana w zależności od stawianych wymagań oraz parametrów konstrukcyjnych produkowanych wyrobów. Modularyzacja stwarza możliwości elastycznej aranżacji, powielania, usuwania i przemieszczania modułów funkcjonalnych, wzdłuż linii tworzącej główną oś ciągu technologicznego. Elastyczna i wielowariantowa struktura jest w stanie zapewniać szybkość, powtarzalną produkcję krótkoseryjną, umożliwiającą tanie prototypowanie nowych generacji produktów z udoskonalonymi technikami zabezpieczeń.

LITERATURA

1. Brewer A., Sloan N., Landers T.L.: Intelligent tracking in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing* Volume: 10, Issue: 3-4, September 1999.
2. Higuera A., Montalvo A.: RFID-enhanced multi-agent based control for a machining system. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. Vol: 19, Issue: 1, March 2007, pp. 41 – 61.
3. Penttilä K.; Keskilampi M.; Sydänheimo L.; Kivikoski M.: Radio frequency technology for automated manufacturing and logistics control. Part 2: RFID antenna utilisation in industrial applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol: 31, Issue: 1-2, November 2006, pp. 116 – 124.
4. Jeroen van Beek: ePassports reloaded. BlackHat USA 2008, Las Vegas. <http://www.blackhat.com/presentations/bh-jp-08/bh-jp-08-vanBeek/BlackHat-Japan-08-Van-Beek-ePassports.pdf>

5. Duc, D. N., Park, J., Lee H., Kim, K. Enhancing security of EPCglobal Gen-2 RFID tag against traceability and cloning. In Proc. Symposium on Cryptography and Information Security (2006)
6. Langheinrich M.: A survey of RFID privacy approaches. Personal and Ubiquitous Computing. Vol: 13, Issue: 6, August 2009, pp. 413 – 421.
7. Juels, A. Rfid security and privacy: A research survey. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 24, 2 (2006).
8. Neuby B.L., Rudin E.: Radio Frequency Identification: A Panacea for Governments? Public Organization Review. Vol: 8, Issue: 4, December 2008, pp. 329 – 345.
9. Danev B., Heydt-Benjamin T., Capkun S.: Physical-layer Identification of RFID Devices. Proceedings of the USENIX Security Symposium, 2009.
http://www.syssec.ethz.ch/research/usenixsec09_phyid_rfid.pdf
10. Rasmussen K., Capkun S.: Implications of Radio Fingerprinting on the Security of Sensor Networks, Proceedings of IEEE SecureComm, 2007. <http://www.syssec.ethz.ch/research/fingerprint2.pdf>
11. http://naftor.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=163&Itemid=123
12. Kozioł S., Zbrowski A., Samborski T., Wiejak J.: Koncepcja systemu testowania połączeń montażowych w dokumentach z zabezpieczeniem elektronicznym. Technologia i Automatyzacja Montażu 2010 nr 4, str. 6 – 9.
13. Samborski T, Zbrowski A., Kozioł S.: Model modułowego systemu implementacji inletów RFID. Technologia i Automatyzacja Montażu 2010 nr 4, str. 30 – 35.
14. Zbrowski A., Samborski T., Kozioł S.: Modułowy system wytwarzania prototypowych identyfikatorów z zabezpieczeniem elektronicznym. 3rd International Conference MANUFACTURING 2010. Contemporary problems of manufacturing and production management. 24-26.11.2010, Poznań. Proceedings abstracts, pp. 207-208

THE MODEL OF THE PRODUCTION LINE FOR GRAPHIC AND ELECTRONIC PERSONALISATION OF THE DOCUMENTS

Abstract. *The article presents the model of the modular system for graphic and electronic personalisation of the documents with implemented Radio Frequency Identification circuits. The concept and the structure of the technical system were presented using the computer model. Also the structure of the control system was described. The system presented is intended for production of prototypes of new type of documents with the electronic security elements. The industrial use of the system allows low-budget, flexible and short-series production of products in form of cards, identification cards, tickets, labels and other documents built of two layers of material (paper) with RFID chip in between, personalised electronically (record in the memory of the chip) and graphically (individual print on the surface).*

Bogusław REIFUR
Bartłomiej LEKKI
Politechnika Wrocławska
Wrocław

ANALIZA PRZEBIEGU PROCESU MONTAŻOWEGO KUCHENKI W ASPEKcie JEGO WYRÓWNOWAŻENIA

COOCKER ASSEMBLY PROCESS ANALYSIS IN ASPECT OF ITS BALANCING

Optymalizacja przebiegu procesu montażu produktu zwana problem balansowania - wyrównoważania jest kluczowym zagadaniem dla wydajności oraz dla kosztów ponoszonych przez systemy produkcyjne. W większości przypadków dotyczy podejmowania kilku różnych typów decyzji, takich jak: określenie czasu cyklu, liczby stacji roboczych, przypisanie zadań montażowych do stacji, wymiarów stacji, magazynów elementów, itp. Zatem logicznych powiązań wymienionych składników procesu montażu, celem uzyskania optymalnych wartości procesu a głównie jego kosztów [1,2,3].

Analiza przebiegu procesu montażowego w układzie funkcjonującej linii ma kluczowe znaczenie dla realizacji celów w systemach produkcyjnych wielkoseryjnej sprężu AGD. Konfiguracja gniazd montażowych obejmująca wszystkie zadania związane z ich wyposażeniem i dostosowaniem do realizacji i rozdziału zadań przebiega znacznie efektywniej w przypadku wykorzystania do analizy narzędzi programowych. Przedstawione wyniki i analizy przebiegu procesu z wykorzystaniem narzędzia programowego dla linii montażowej kuchenki potwierdzają zasadność stosowania tego typu narzędzi.

FLEXIBLE LINE BALANCING V.3

Program należy do grupy najtańszych i najprostszych programów umożliwiających balansowanie i grupowanie pojedynczych elementów, jak i całych procesów montażowych. Jest osobnym programem i nie wchodzi w skład bardzo drogiej i bardziej rozbudowanej aplikacji. Wykres wygenerowany w programie Flexible Line Balancing, przedstawia rys. 1.

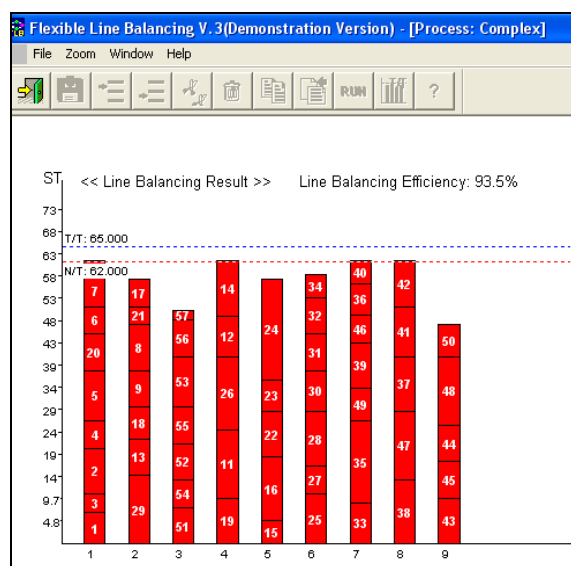
Flexible Line Balancing korzysta z algorytmu COMSOAL. Algorytm ten daje możliwość przeprowadzenia na zwykłym komputerze klasy PC, setek tysięcy operacji na sekundę, aż do uzyskania optymalnego rozwiązania [4]. Stosując Flexible Line Balancing, można określić optymalną metodę sekwencjonowania zadań, wybierając najbardziej efektywne i wydajne rozwiązanie. Program ten posłuży do obliczeń i analizy procesu technologicznego montażu kuchni gazowej, a jego najważniejsze funkcje opisano poniżej.

ZALETY I WADY PROGRAMU FLEXIBLE LINE BALANCING

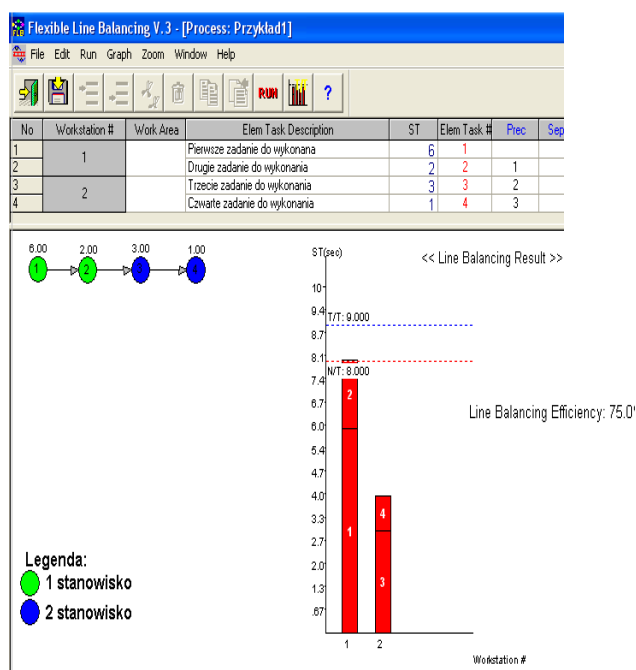
Flexible Line Balancing umożliwia wygenerowanie rozwiązania zależnie od maksymalnego czasu taktu, lub wymaganej liczby stacji roboczych. Jednak czasami program może proponować błędne rozwiązanie.

Na przykład: założono, że proces montażu ręcznego wyrobu składa się z czterech następujących po sobie zadań, z których każde trwa odpowiednio: 6, 2, 3, 1 sekundy. Nie ma dodatkowych ograniczeń w postaci grupowania, separacji zadań itp. Dla ustalonego wcześniej czasu taktu 9 sekund, program proponuje rozwiązanie przedstawione na rys. 2.

Program zaproponował rozmieszczenie zadań na dwóch stanowiskach, w których łączna efektywność linii wynosi 75%. Zadania na pierwszym stanowisku trwają 8 sekund, a na drugim 4 sekundy. Zgodnie z ideą równoważenia linii montażowych dąży się do tego, aby wszystkie stanowiska były równomiernie obciążone. Tak więc zadanie drugie na pierwszym stanowisku powinno być przeniesione do drugiego stanowiska.



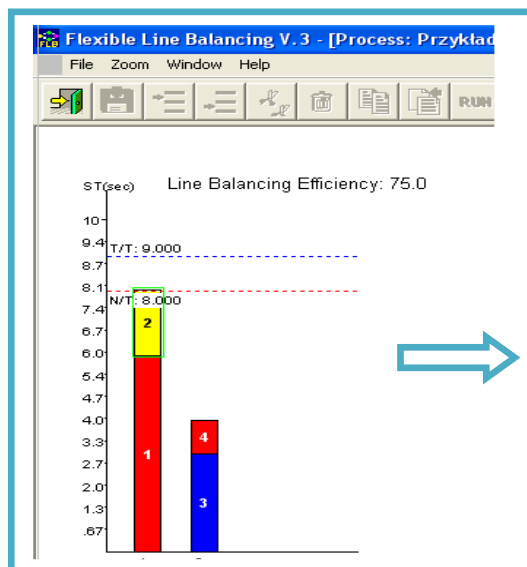
Rys. 1 Wykres wygenerowany w programie Flexible Line Balancing



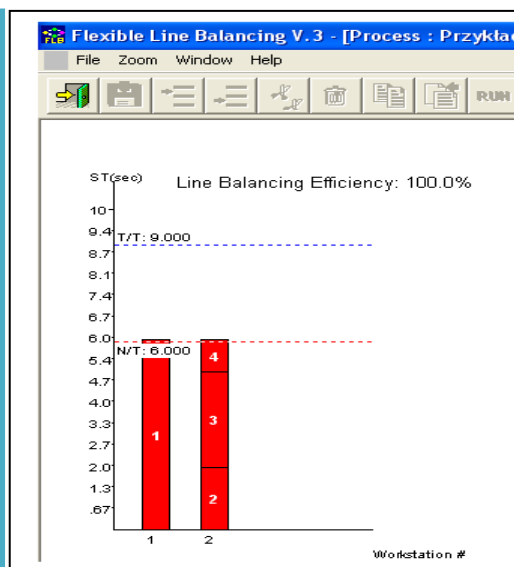
Rys. 2. Proponowane rozwiązanie przez Flexible Line Balancing dla ustalonego czasu taktu

Do zalet programu zaliczyć można możliwość edytowania rozwiązania na wykresie, w myśl zasady „przeciągnij i upuść”. Zadanie, które ma zostać przeniesione na inne stanowisko, po kliknięciu na nie myszką podświetli się na żółto, a zadanie, które będzie zadaniem następnym na niebiesko. Chwytając za zadanie podświetlone na żółto, należy je przeciągnąć na zadanie koloru niebieskiego. Flexible Line Balancing poprawi wykres i obliczy nową efektywność linii, tak jak na rys. 3 a, b i wtedy obliczona nowa efektywność wzrosła do 100%.

a)



b)



Rys. 3. Ręczne edytowanie wykresu w FFlexible Line Balancing

Kolejna zaleta to przyporządkowanie prawidłowej minimalnej liczby stanowisk dla zadanego czasu taktu. Przy ponownie dokonanych obliczeniach dla zadanej liczby stacji, w przypadku rys.3b dla dwóch stanowisk, program wyświetli prawidłowe rozwiązanie, w którym efektywność wyniesie 100%. Dlatego bardzo dobrą zasadą, w przypadku wykonywania obliczeń przy założonym czasie taktu, jest przeprowadzenie powtórnych obliczeń, dla zaproponowanej liczby stanowisk w pierwszym wyliczeniu programu.

Wadą programu jest to, że algorytm z którego korzysta, stara się obsadzić maksymalnie zadaniami daną stację roboczą nie biorąc pod uwagę ostatniej stacji. Jest to wina założeń algorytmu, a nie programu Flexible Line Balancing. Dlatego wyniki programu trzeba dokładnie analizować.

W rzeczywistych procesach na liniach montażowych często bywa tak, że każde stanowisko robocze ma takie same lub podobne pierwsze zadanie do zrealizowania (np. w linii montażowej analizowanego wyrobu - kuchni gazowej takim zadaniem jest „pobranie kuchni”). Niedogodnością programu Flexible Line Balancing jest to, że w nie ma możliwości zdefiniowania takiego ograniczenia, które wymuszałoby, aby każde pierwsze zadanie na danym stanowisku rozpoczynało się od określonego zadania. Wprawdzie formuła *Cont* umożliwia łączenia czasów poszczególnych zadań, to jednak nie rozwiązuje ona problemu, gdy pierwsze zadania na danych stanowiskach mają różne wartości czasowe.

W zautomatyzowanych, bądź zrobotyzowanych stanowiskach występujących w hybrydowych liniach montażowych, istnieje w wielu wypadkach możliwość regulacji czasu wykonania danego zadania (np. automat do napełniania silników spalinowych olejem). Niestety powyższy program nie oferuje możliwości wprowadzania określonych przedziałów czasowych do wykonania zadanego zadania.

ALGORYTM METODY COMSOAL ROZWIĄZUJĄCY PROBLEM RÓWNOWAŻENIA LINII MONTAŻOWYCH

COMSOAL - Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Line (komputerowa metoda sekwencjonowania operacji dla linii montażowych) jest proces iteracyjnym, rozwiązującym zadany scenariusz balansowania linii montażowej wiele razy, aż do osiągnięcia optymalnego rozwiązania. Flexible Line Balancing korzysta z tego algorytmu, wykonując tysiące obliczeń, których czas zależy od liczby stanowisk pracy i ograniczeń między zadaniami wprowadzonymi przez użytkownika.

COMSOAL jest metodą, która generuje dużą liczbę rozwiązań dla problemu balansowania linii w sposób losowy. Program wyszukuje najlepszą odpowiedź na obecny problem i zapisuje go w swoich wynikach wewnętrznych. Jeśli lepsze (o większym wskaźniku efektywności linii) rozwiązanie jest obliczone, staje się najlepszą odpowiedzią do następnego zestawu wewnętrznych obliczeń. Jeśli kolejne obliczenia, w których rozmieszczenie zadań będzie inne i osiągnięte zostanie rozwiązanie będzie mniej skuteczne niż wcześniejsze rozwiązania, to te ostatnie obliczenia będą odrzucone. Metoda *COMSOAL* rozwiązuje zadanie w kolejno realizowanych krokach. Do pierwszego stanowiska roboczego przeniesiona jest cała lista wszystkich możliwych zadań. Następnie, stanowisko robocze jest wypełniane zadaniami, aż cały dostępny czas na stacji roboczej będzie wypełniony. Biorąc pod uwagę ograniczenie pierwszeństwa, jeśli wszystkie zadania mogą być przypisane do jednej stacji roboczej, to zadanie jest zakończone. W innym wypadku tworzone jest kolejne stanowisko robocze, które również jest wypełniane zadaniami. Na każdym etapie algorytmu zbiór zadań, który może być wykonany i który dopasuje się do pozostałego czasu na obecnym stanowisku pracy jest określony. Każde zadanie jest wybierane losowo, a pozostałe zadania mają równe prawdopodobieństwo, że zostaną wybrane z uwzględnieniem ograniczeń określonych przez użytkownika.

Znając dokładną strukturę zadań, *COMSOAL* generuje rozwiązania w bardzo krótkim czasie i program Flexible Line Balancing zapewnia efektywne i rozsądne rozwiązanie. W złożonych problemach, które składają się z setek zadań, może istnieć więcej niż jedno dobre rozwiązanie. Ponieważ „najlepsze” rozwiązanie jest oparte na wskaźniku efektywności linii, dlatego może być możliwe więcej niż jedno rozwiązanie.

ANALIZA PROCESU MONTAŻU KUCHNI GAZOWEJ

Analiza procesu montażowego w aspekcie jego wyrównoważenia dotyczy kuchni gazowej wolnostojącej, produkowanej przez krajowego producenta sprzętu AGD p. rys.4.



Charakterystyka wyrobu:

1. Płyta kuchenna:

- cztery palniki gazowe
- ruszt emaliowany dwuczęściowy
- zaplecze elektroiskrowe palników w pokrętkach
- pokrywa szklana z zawiasem samohamownym

2. Piekarnik gazowy:

- zabezpieczenie przeciwwypływowe gazu w piekarniku
- minutnik
- opiekacz elektryczny i rożen obrotowy
- termoregulator
- oświetlenie piekarnika

Rys. 4. Kuchnia gazowa wolnostojąca

Czasy trwania poszczególnych zadań zostały przydzielone na podstawie analizy ruchów elementarnych i zdefiniowane dzięki analizie MTM. Operacje montażowe zostały zapisane w formie tabelarycznej, w której znajduje się podział na stanowiska robocze wzdłuż linii montażowej, numer czynności, opis czynności, czas trwania oraz częstotliwość i są wykorzystywane w programie obliczeniowym Flexible Line Balancing. Przykładowy przydział zadań dla stanowiska 1 przedstawiono w tab.1. Częstotliwość w technologii montażu jest parametrem określającym częstość występowania danej czynności. Na przykład: częstotliwość 1/5 oznacza, że w procesie montażowym dana czynność występuje co piąty cykl produkcyjny. Z kolei, jeśli częstotliwość wynosi 2/1, oznacza, że daną czynność należy powtórzyć dwa razy w jednym cyklu produkcyjnym.

ANALIZA 1

Wyjściowy dla analizy proces montażowy przebiega na 24 stanowiskach roboczych z określonymi przydziałami zadań do poszczególnych stanowisk. Podział na stanowiska wraz z czasami trwania czynności przedstawiono na automatycznie wygenerowanym grafie p.rys.5. Obliczony i wygenerowany wykres efektywności linii wraz z rozmieszczeniem czynności na dane stanowisko przedstawia rys.6 a wykres czasów stacji i czasów beczynności dla rzeczywistego procesu przedstawia rys.7. Parametry wyjściowe procesu zestawiono w tabeli 2.

Tab.1 Przydział zadań dla stanowiska 1

Stanow. 1	Montaż ścian bocznych		
Numer czynności	Opis czynności	Czas [s]	Częstotliwość
1.10	Pobrać piekarnik	2,335	1/1
1.20	Pobrać z wózka dwie grupy po 5 profili i odłożyć	1,435	1/5
1.30	Pobrać 2 profile i położyć je na piekarniku	2,082	1/1
1.40	Pobrać bok i położyć go na prawej stronie korpusu piekarnika	5,8	1/1
1.50	Przygotować profil na prawym boku	1,413	1/1
1.60	Pobrać wkrętak użyć i odłożyć	3,16	1/1
1.70	Dokręcić bok i kątownik wkrętami	4,149	2/1
1.80	Pobrać bok i założyć po lewej stronie korpusu piekarnika	6,618	1/1
1.90	Przygotować profil na lewym boku	1,413	1/1
1.100	Pobrać wkrętak użyć i odłożyć	3,16	1/1
1.110	Dokręcić bok i kątownik wkrętami	4,149	2/1

Dla ustalonego podziału czynności na poszczególne stanowiska, efektywność linii jest bardzo niska i wynosi zaledwie 47,5%. Z wykresu przydzielenia zadań do stanowisk wynika, że na trzy stanowiska (16-ste, 22-gie i 24-te) są zdecydowane bardziej obciążone zadaniami od pozostałych. Dlatego w analizie drugiej do tych stanowisk będą przydzieleni dodatkowi pracownicy. Wąskim gardłem jest stanowisko 22-gie, które determinuje czas cyklu na poziomie 88,611 sekundy.

Kolejno przeprowadzone cztery analizy, których wyniki przedstawiono w tabeli 3 przedstawiają kolejno zdecydowanie lepsze wyniki w porównaniu z wyjściowymi, zwiększając wydajność zmianową ponad dwukrotnie do 651 sztuk na zmianę oraz efektywności linii do wartości 86,9%, przy wzroście zatrudnienia o 20% tj. 5-ciu pracowników. Przedstawia to automatycznie wygenerowany graf procesu rys.8 i wykres czasów stacji i czasów beczynności dla procesu rys. 9.

Coraz krótsze cykle życia produktów spowodowały, że analiza wykorzystania stanowisk i linii montażowych wymaga wykorzystywania algorytmów obliczeniowych, które w krótkim czasie są w stanie rozwiązać skomplikowany problem. Do problemów tych należy optymalne przydzielenie zadań do danego stanowiska roboczego, a tym samym zapewnienie optymalnego zrównoważenia linii. W zależności od postawio-

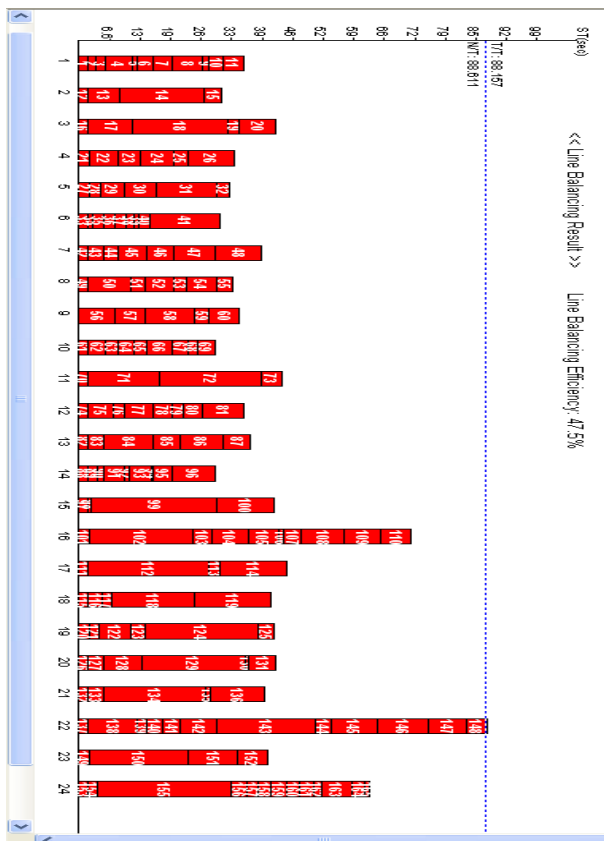
nych wymagań oraz stosowanych strategii rozwiązywania problemów balansowania, algorytmy takie jak COMSOAL czy RPW wykorzystywane są jako przydzielające i szeregujące zadania.

Tab. 2. Parametry wyjściowe analizy 1 procesu

Czas cyklu [s]	Analiza1	88,611
Czas przerw [s]: 2x10 min + 1x19 min		2340
Czas zmiany [s]: 8 h		28800
Wydajność godzinowa [szt./h]		40,63
Wydajność zmianowa [szt./zmianę]		298,□
Liczba pracowników		24
Liczba stanowisk roboczych		2□
Efektywność linii		47,5%

Tabela. 3. Parametry wyjściowe kolejnych analiz procesu

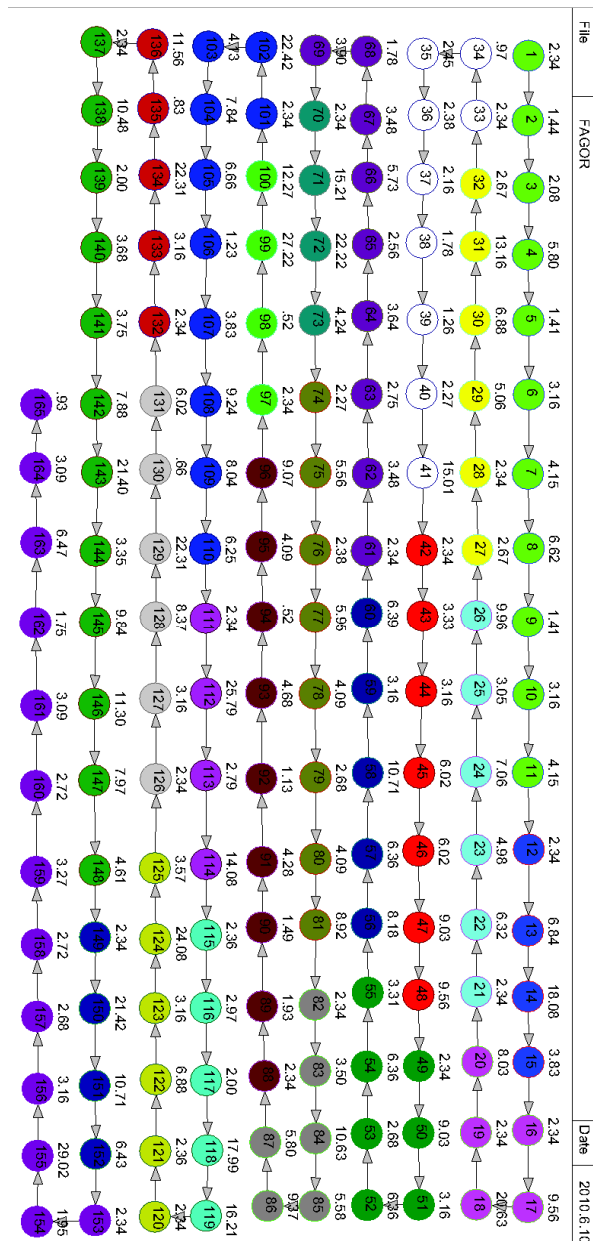
Czas cyklu [s]	Analiza 2	4□,988
Czas przerw [s]: 2x10 min + 1x19 min		2340
Czas zmiany [s]: 8 h		28800
Wydajność godzinowa [szt./h]		80,02
Wydajność zmianowa [szt./zmianę]		588,16
Liczba pracowników		27
Liczba stanowisk roboczych		24
Efektywność linii		83,1%
Czas cyklu [s]	Analiza 3	44,988
Czas przerw [s]: 2x10 min + 1x19 min		□340
Czas zmiany [s]: 8 h		28□00
Wydajność godzinowa [szt./h]		80,02
Wydajność zmianowa [szt./zmianę]		588,16
Liczba pracowników		27
Liczba stanowisk roboczych		24
Efektywność linii		83,1%
Czas cyklu [□]		40,64
Czas przerw [s]: 2x10 min + 1x19 min		2340
Czas zmiany [□]: 8 h		28800
Wydajność godzinowa [szt./h]		88,58
Wydajność zmianowa [szt./zmianę]		651,08
Liczba pracowników		29
Liczba stanowisk roboczych		29
Efektywność linii		86,9%



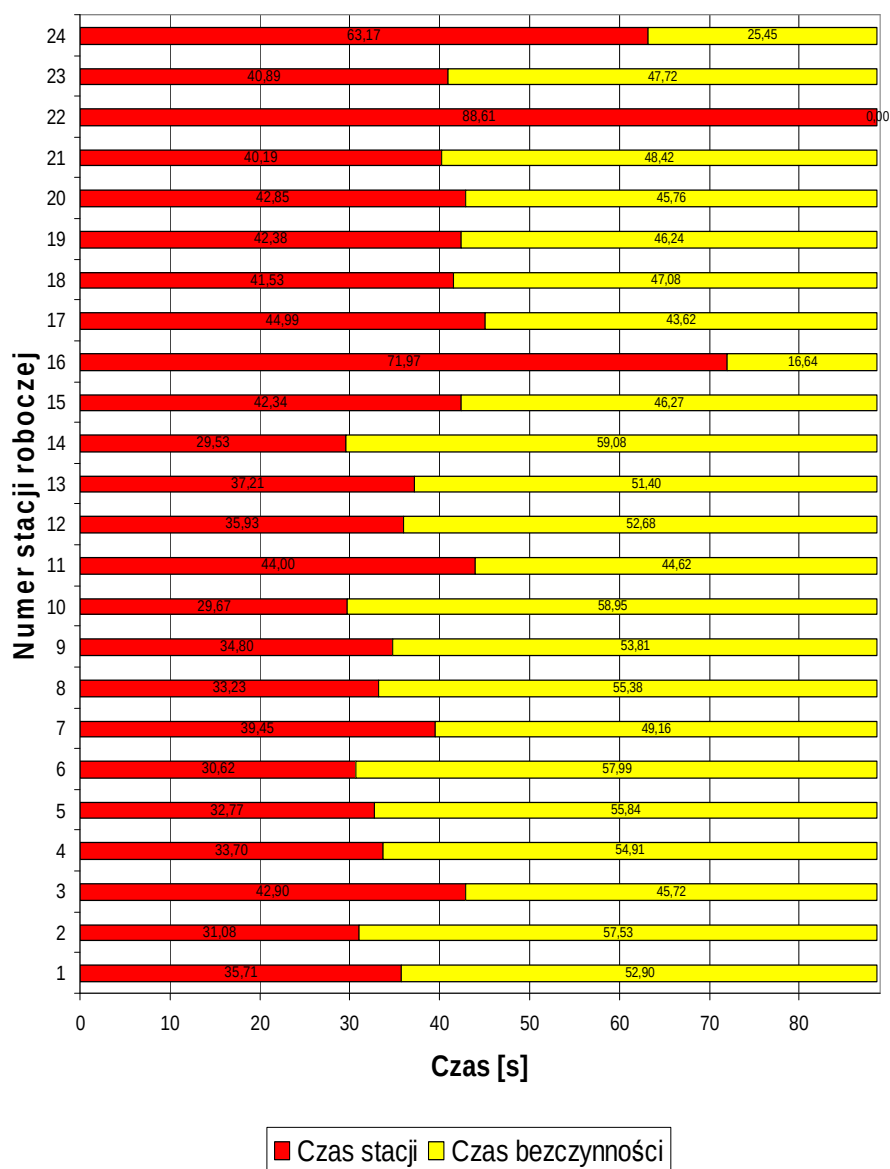
Rys. 6 Automatycznie wygenerowany wykres przydzielenia zadań do stanowisk montażowych

Te pierwsze, stosowane są zazwyczaj w istniejących liniach produkcyjnych, w których narzucona jest liczba stacji roboczych, do których należy odpowiednio przydzielić zadania tak było w przypadku rozwiązywania problemów balansowania linii kuchenki gazowej. Te drugie, przeważnie są stosowane w nowo

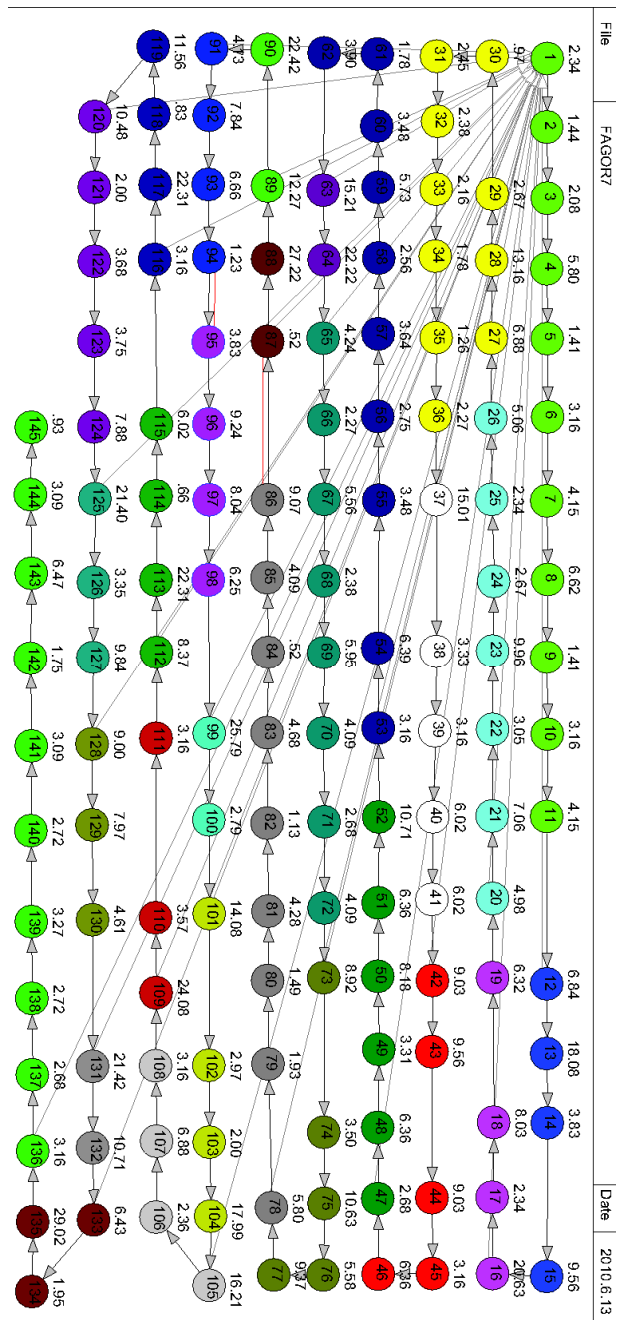
tworzonych liniach montażowych, w których na podstawie znanego czasu taktu określona zostaje minimalna liczba stanowisk zapewniających wymagany poziom produkcji.



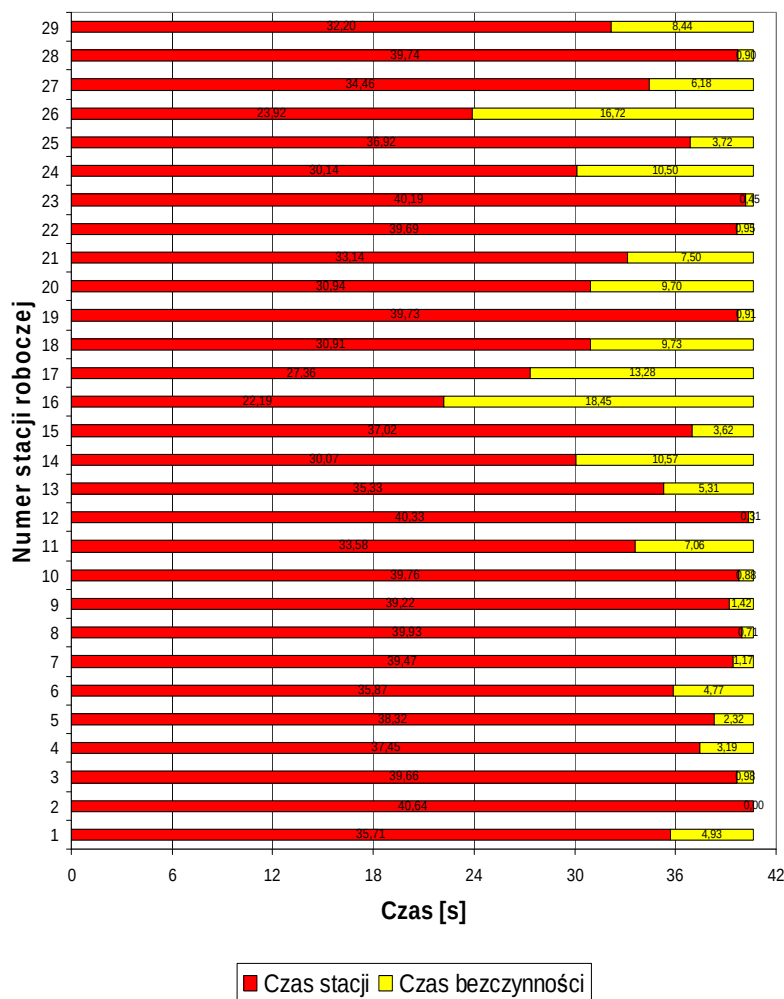
Rys. 5 Wygenerowany graf dla „analizy 1” procesu montażu



Rys. 7. Wykres czasów stacji i czasów bezczynności dla rzeczywistego procesu montażu



Rys. 8. Automatycznie wygenerowany graf „Analiza 4” procesu



Rys. 9. Wykres czasów stacji i czasów bezczynności „Analiza 4” procesu

WNIOSKI

Przeprowadzona z wykorzystaniem programu Flexible Line Balancing analiza potwierdziła wymienione wcześniej jego zalety a przy po poprawnym zdefiniowaniu procesu wraz z jego wszystkimi ograniczeniami, program prawidłowo dokonał balansu linii montażowej dla obu typów algorytmów: przydzielania i szeregowania.

W tabeli 4 zamieszczone zostały główne wyniki przeprowadzonych programem analiz.

Zgodnie z zaleceniami praktyków zajmujących się balansowaniem linii, należy zachować podejście zdroworozsądkowe, bowiem równoważenie linii nie występuje tylko przed jej sformowaniem, ale funkcjonuje raczej jako stała rekonfiguracja. Po realizacji równoważenia linii należy dokonać pomiarów czasów

trwania czynności montażowych w celu weryfikacji. Definiując proces zakłada się, że czasy wykonania poszczególnych zadań są deterministyczne, a w rzeczywistości takie nie są.

Tab. 4. Zestawienie wyników poszczególnych analiz

	Analiza 1	Analiza 2	Analiza 3	Analiza 4
Czas cyklu [s]	88,611	44,988	47,96	40,64
Efektywność linii [%]	47,5%	83,1	88,3	86,9
Wydajność zmianowa [szt./zmianę]	298,6	588,16	551,71	651,08
Liczba stanowisk	24	24	24	29
Liczba pracowników	24	27	24	29

Dlatego, że każda linia montażowa posiada swoje unikalne cechy i niemożliwe jest stworzenie programu do balansowania, który zaspokajałby potrzeby wszystkich jego użytkowników. Biorąc pod uwagę, że problemy projektowania, grupowania i balansowania linii montażowych są bardzo szerokim zagadnieniem obejmującym: ilość i różnorodność produktów, kontrolę linii, rozkład linii, podobieństwo prac montażowych, alternatywy dotyczące wyposażenia i przetwarzania, ograniczenia dotyczące przypisania, realizację celów. Każdy z tych problemów ściśle łączy się z kosztami, które występują w całym cyklu życia linii od projektowania poprzez balansowanie, aż do jej reorganizacji.

LITERATURA

1. Boysen, N., Fliender, M., Scholl, A., A classification of assembly line balancing problems. Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena 12/2006
2. Gu L., Hennequin S., Sava A., Xie X.: Assembly Line Balancing Problems Solved by Estimation of Distribution, Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, 2007, pp. 123-128
3. Reifur, B., Komputerowo wspomagany proces balansowania linii montażowej. EKONOMIKA NI ORGANIZACJA PRZEDSIĘBIORSTWA 9/2008
4. Flexible Line Balancing - LG Electronics distributed by Production Technology Engineering and Management Services Tampa USA

COOKER ASSEMBLY PROCESS ANALYSIS IN ASPECT OF ITS BALANCING

Abstract. *The optimization of product assembly process is a key matter for efficiency and for production systems costs. It concerns undertaking several different types of decision, such how to choice of assembly sequences, attributing the assembly tasks to the station, qualification of time of cycle, number of working stations, dimensions of station, store-houses of material etc. It encloses therefore the well-known in literature problem of balancing – the balancing of the assembly line, in other words logical connections of exchanged components of assembly process. The results of using of computer programme the Flexible Line Balancing for balancing the assembly line.*

Stanisław KOZIOŁ
Andrzej ZBROWSKI
Jan WIEJAK
Instytut Technologii Eksploatacji
-Państwowy Instytut Badawczy
Radom

KONCEPCJA URZĄDZENIA DO IMPLEMENTACJI CHIPÓW RFID

THE CONCEPT OF THE DEVICE FOR THE IMPLEMENTATION OF THE RFID CHIPS

Technika RFID służy do jednoznacznego identyfikowania przedmiotów za pomocą fal radiowych. Polega to na tym, że czytnik za pomocą nadajnika wytwarza zmienne pole elektromagnetyczne wokół anteny i dekoduje odpowiedzi znaczników [1]. Znaczniki pasywne zasilane są za pomocą tego pola – po zgromadzeniu przez kondensator zawarty w strukturze znacznika wystarczającej ilości energii, wysyłana jest odpowiedź. Zawarte w znaczniku informacje mogą opisywać poszczególne części na linii produkcyjnej, towary w czasie transportu, położenie przedmiotów, identyfikować pojazdy, zwierzęta, dokumenty lub osoby. Poprzez dołączenie do znacznika dodatkowych informacji można wzbogacić aplikacje o możliwości wspomagające jej działanie z uwzględnieniem specyficznych informacji o przedmiocie, do którego przynależy znacznik. W podstawowej konfiguracji system RFID składa się z:

- czytnika zawierającego nadajnik i dekodery;
- anteny;
- transponderów zwanych znacznikami lub tagami, które mogą być aktywne – wyposażone we własne źródło zasilania – lub pasywne (te mogą mieć rozmiary od $0,4 \times 0,4$ mm, co czyni je praktycznie niewidocznymi); znaczniki mogą mieć różnorodną postać – nalepki, żetony, nitu itp.

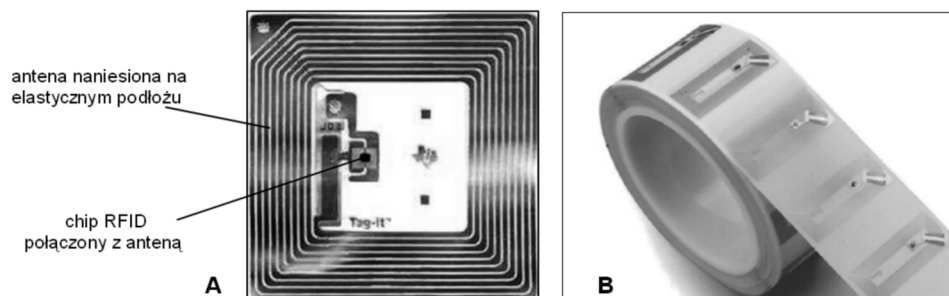
Czytnik zawiera moduł transmisji radiowej (jest to zarówno nadajnik i odbiornik), układ sterowania oraz element łączący ze znacznikiem. Dodatkowo wiele czytników zawiera interfejs łączący z komputerem PC, pozwalający na przesyłanie z i do PC wszelakich danych aplikacyjnych i systemowych. Znacznik zawiera mikroukład scalony oraz element łącznikowy z czytnikiem. Znacznik jest nośnikiem danych systemu RFID. Znacznik generalnie jest urządzeniem pasywnym, gdy znajduje się poza strefą oddziaływania czytnika. Aktywacja znacznika następuje z chwilą umieszczenia go w strefie oddziaływania czytnika. Energia wymagana do zasilenia znacznika jest przekazywana bezprzewodowo z czytnika poprzez element łącznikowy, antenę. W ten sam sposób przekazywany jest sygnał zegarowy - taktowanie oraz dane.

Szczególnym obszarem zastosowań systemów RFID jest autoryzacja dokumentów [2, 3]. Używane są do tego znaczniki, które w niezawodny sposób identyfikują i potwierdzają autentyczność dokumentów, do których są dołączone. Redukuje to możliwość fałszerstw oraz ogólnie podnosi poziom bezpieczeństwa i zapewnia szybszy i łatwiejszy dostęp do dokumentów osób zainteresowanych.

Aby opisane identyfikatory spełniały dobrze swoją rolę, muszą być nie tylko dobrze zabezpieczone przed podrabianiem i fałszowaniem, lecz także odpowiednio trwałe zarówno pod względem wytrzymałości fizycznej jak i przechowywania danych w postaci elektronicznej [6,7]. Na producentów paszportów i wszelkiego rodzaju kart identyfikacyjnych organizacje krajowe, międzynarodowe i unijne nakładają obowiązek zapewnienia odpowiedniej trwałości emitowanych dokumentów [4, 5].

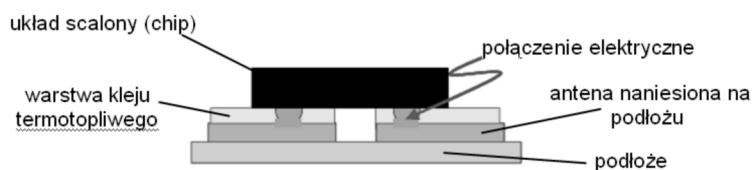
Spełnienie wymagań odbiorców paszportów i kart identyfikacyjnych oraz zapewnienie stałego, wysokiego poziomu jakości wyrobów wymaga od producentów prowadzenia badań wyrobów produkowanych, przygotowywanych do wdrożenia oraz opracowywania nowych, doskonalszych rozwiązań o coraz lepszych zabezpieczeniach. Niezbędne jest więc posiadanie przez producenta odpowiedniej aparatury przeznaczonej do doświadczalnego i niskonakładowego wytwarzania znaczników RFID w ramach prowadzonych prac doświadczalnych i rozwojowych.

Większość dokumentów zabezpieczonych elektronicznie pod względem konstrukcji jest do siebie zbliżona. Wynika to z jednej strony ze standaryzacji formatów, sposobów zapisu i odczytywania danych oraz formy użytkowania, z drugiej zaś z rozpowszechnienia produkowanych na skalę masową komponentów do ich wytwarzania, a szczególnie kompletnych układów RFID w postaci tzw. inletów przeznaczonych do wklejania pomiędzy warstwy materiałów tworzących dokument. Doświadczalne wytwarzanie inletów w postaci układu RFID umieszczonego na elastycznym podłożu takim jak folia lub papier syntetyczny jest niezbędne w pracach rozwojowych nad doskonaleniem tej techniki.



Rys. 1. Budowa inletu RFID: A – elementy składowe układu RFID,
B – inlety RFID na wstędze elastycznego podłoża

Na rysunku nr 1 przedstawiono budowę układu RFID oraz zdjęcie inletów gotowych do wklejenia do zabezpieczanego elektronicznie dokumentu. Ich wytwarzanie polega na wykonaniu nadruku kształtu anteny na podłożu za pomocą np. farby przewodzącej prąd elektryczny i trwałym przyłączeniu do niej poprzez klejenie, lutowanie lub zgrzewanie układu scalonego (chipa) [8]. Rysunek nr 2 przedstawia schemat takiego połączenia wykonanego metodą zgrzewania ultradźwiękowego.



Rys. 2. Schemat połączenia chipa z anteną w inlecie RFID wykonane metodą zgrzewania ultradźwiękowego

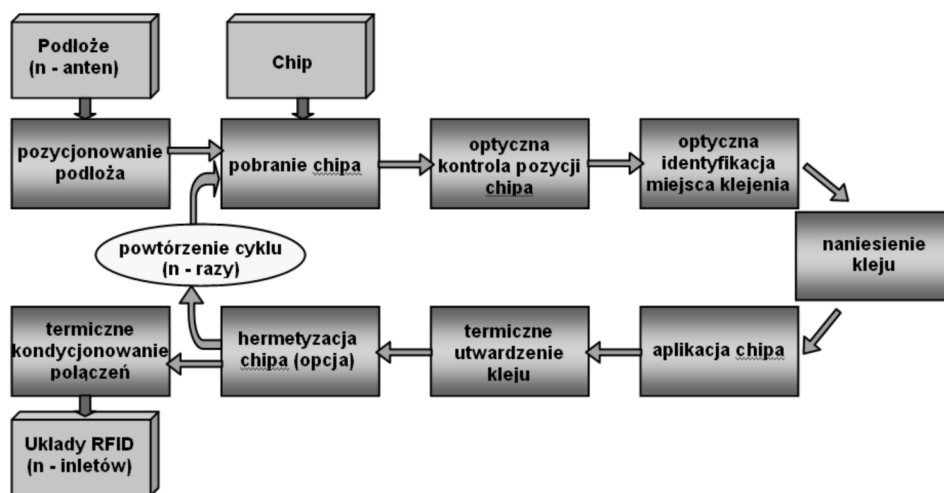
Inlety z układami RFID są produkowane przede wszystkim na skalę masową z wykorzystaniem bardzo sprawnych, zaawansowanych automatów, co wynika z ich szerokiego zastosowania i dążenia do obniżania kosztów produkcji. Wytwarzanie takich układów dla potrzeb działalności badawczo-rozwojowej wymaga zastosowania specjalnej, elastycznej technologii produkcji doświadczalnej i małoseryjnej pozwalającej na zmianę wymiarów anteny, metody łączenia, rodzaju i wymiarów chipa oraz parametrów poszczególnych zabiegów technologicznych.

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu realizuje przedsięwzięcie, którego celem jest opracowanie elastycznego urządzenia do implementacji chipów na podłożu elastyczne metodami klejenia głównie z zastosowaniem klejów anizotropowych. Będzie ono wykorzystywane do prac rozwojowych i produkcji doświadczalnej inletów RFID przeznaczonych do zabezpieczania elektronicznego dokumentów osobistych i dokumentów podróży [9, 10].

TECHNOLOGIA MONTAŻU CHIPÓW RFID NA PODŁOŻU ELASTYCZNYM

Opracowywane urządzenie jest przeznaczone do montażu chipów metodą klejenia. Materiał, na którym są montowane chipy stanowią arkusze lub wstęga z naniesionymi antenami układów RFID o dowolnych wymiarach pojedynczej anteny. Maszyna dzięki możliwości zgrubnego i dokładnego pozycjonowania wszystkich układów wykonawczych na całym obszarze stołu roboczego jest przeznaczona do pracy z arkuszami podzielonymi w dowolny sposób na pojedyncze użytki oraz z dowolnie umieszczonym miejscem implementacji chipa na użytku. Kształt i wymiary chipów mogą zmieniać się w zakresie od 0,5x0,5 do 10x10 mm dzięki zastosowaniu wymiennego zasobnika dostosowanego do montowanych elementów.

Technologia klejenia elementów przy takich założeniach musi składać się z kilku zabiegów realizowanych w sposób uwzględniający specyfikę operacji wynikającą z małych wymiarów chipów oraz braku możliwości bezpośredniej kontroli wizyjnej wykonywanych czynności. Na rysunku nr 3 przedstawiono schematycznie kolejność zabiegów wykonywanych w trakcie montażu kompletu układów RFID zajmującego arkusz lub obrabiany w trakcie jednej operacji fragment wstęgi.



Rys. 3. Schemat technologii montażu chipów RFID metodą klejenia

Arkusz, na którym są montowane chipy z naniesionymi uprzednio antenami układów RFID (np. metodami drukarskimi) jest płasko mocowany na stole roboczym przez układ podciśnieniowy. Jest umieszczony w określonym, powtarzalnym położeniu względem charakterystycznych elementów ustawczych (linie, listwy, itp.). Pozwala to na powtarzalne umieszczanie kolejnych arkuszy do montażu chipów, dzięki czemu miejsca implementacji znajdują się w określonych punktach układu współrzędnych X-Y maszyny.

Kolejne czynności są zgodnie ze schematem realizowane w następujący sposób:

- głowica robocza najeżdża nad zasobnik z chipami i ustawia się w takiej pozycji aby wybrany do montażu chip został oświetlony plamką światła wskaźnika laserowego lub znalazł się w polu widzenia kamery głowicy,
- na podstawie obrazu chipa widzianego przez kamerę następuje ustawienie zasobnika z chipami lub głowicy w taki sposób, aby przeznaczony do pobrania chip znajdujący się w zasobniku zajął położenie dokładnie określone przez markery widoczne na ekranie monitora; w wyniku tej czynności zostaje dokładnie określone położenie chwytaka podczas pobierania chipa,

- chwytak automatycznie pobiera chip za pomocą ssawki podciśnieniowej i unosi go na odpowiednią wysokość, a następnie najeżdża nad kamerę umieszczoną w stole maszyny, która obserwując chip od spodu porównuje zarejestrowany obraz z wzorcem określającym precyzyjnie położenie styków elektrycznych; następuje wprowadzenie korekcji położenia kąтового poprzez obrót ssawki oraz położenia liniowego przez wprowadzenie poprawek wzdłuż osi układu współrzędnych maszyny,
- głowicą roboczą z użyciem sterowania ręcznego lub automatycznego najeżdża nad arkusz z antenami układów RFID, tak aby wybrane miejsce montażu chipa zostało oświetlone plamką światła wskaźnika laserowego lub znalazło się w polu widzenia kamery; na podstawie analizy zarejestrowanego obrazu następuje precyzyjne określenie współrzędnych montażu chipa,
- uruchomiana jest automatycznie realizowana sekwencja czynności zaprogramowanych uprzednio w układzie sterowania maszyny, na którą składają się naniesienie kleju na podłoże w miejscu montażu chipa przez dozownik kleju, umieszczenia chipa na podłożu z klejem przez chwytak, utwardzenie kleju przez moduł termiczny i opcjonalnie hermetyzacja połączenia przez naniesienie dodatkowej ilości kleju pokrywającego cały chip; użycie poszczególnych modułów, ich pozycje i czasy działania wynikają z zaprogramowanych danych maszynowych zapisanych w układzie sterowania,
- opisana sekwencja czynności jest powtarzana dla każdego inletu RFID (użytku) znajdującego się na obrabianym arkuszu tak jak to przedstawia schemat na rysunku nr 3,
- arkusz lub fragment taśmy z gotowymi inletami jest transportowany przez chwytak i moduł transportu podłoża do tunelu grzejnego w celu przeprowadzenia termicznego kondycjonowania, a następnie odkładany do zasobnika lub zwijany na rolę z gotowymi wyrobami.

Urządzenie może pracować w sposób półautomatyczny, to jest z ręcznym wzajemnym pozycjonowaniem układów wykonawczych - chipa i podłoża oraz sterowaniem kolejnością i sposobem wykonania poszczególnych czynności. Realizacja samych czynności montażowych przebiega automatycznie. Dostępna jest również opcja automatycznego sterowania pracą maszyny po zaprogramowaniu cyklu zabiegów obejmującego wykonanie założonego zestawu gotowych wyrobów. Kolejne zabiegi stanowiące zamknięty cykl technologiczny obejmują całkowite wykonanie jednego inletu RFID. Cykl ten jest powtarzany osobno podczas wykonania każdego inletu.

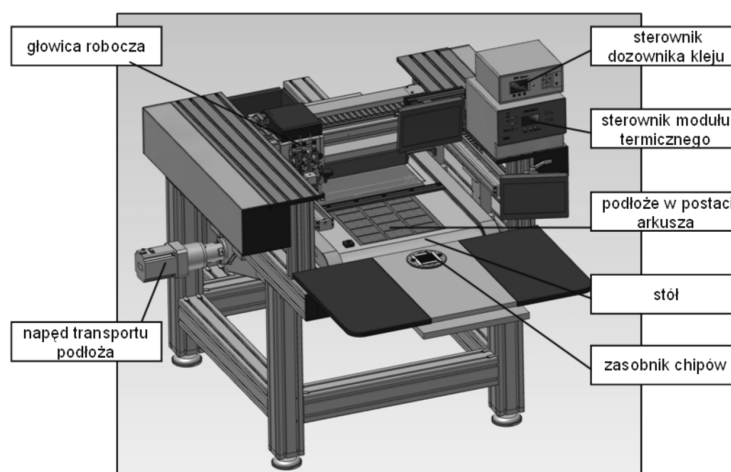
KONSTRUKCJA URZĄDZENIA DO MONTAŻU CHIPÓW RFID NA PODŁOŻU ELASTYCZNYM

Konstrukcja opracowywanego w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu urządzenia do montażu chipów RFID na podłożu elastycznym z wykorzystaniem metody klejenia, została przedstawiona na rysunkach nr 4 - 6.

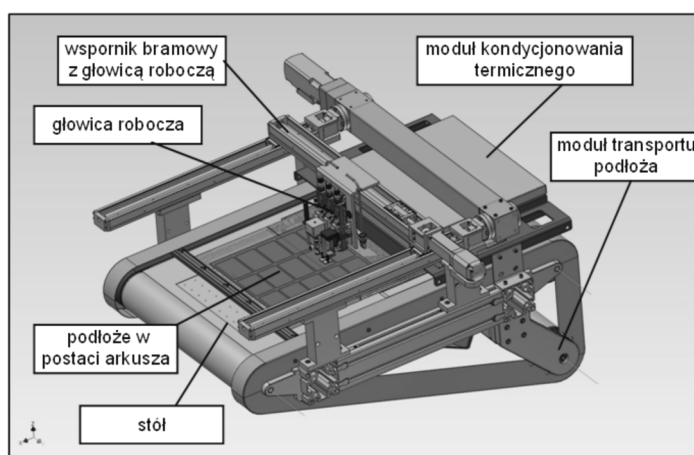
Stół roboczy maszyny (rys. 4 i 5) o wymiarach 400x500 mm jest zespołem nieruchomym i zajmuje stałą pozycję względem korpusu. Nad stołem znajduje się ruchomy wspornik bramowy manipulatorów i kamery. Wspornik jest oparty i ułożyskowany na tocznych prowadnicach liniowych zaopatrzonych w napęd ze śrubą toczną i enkoderem. Na belce poziomej wspornika, na prowadnicy tocznej z podobnym napędem śrubowym i enkoderem jest umieszczona głowica robocza ze wszystkimi modułami funkcjonalnymi odpowiedzialnymi za wykonanie czynności montażowych. Dzięki temu głowica może przyjmować dowolne położenia w układzie współrzędnych prostokątnych X-Y stołu w zakresie od 0 do 500 mm wzdłuż osi X i od 0 do 400 mm wzdłuż osi Y. Położenie głowicy w układzie współrzędnych jest identyfikowane za pomocą enkoderów z dokładnością 0,01mm. Enkodery i napędy osi X i Y są połączone z układem sterowania, dzięki czemu są możliwe:

- określenie współrzędnych aktualnego położenia głowicy, a tym samym każdego modułu funkcjonalnego,
- przesunięcie głowicy, a tym samym każdego modułu funkcjonalnego w położenie o określonych współrzędnych.

Układ ten pozwala na pozycjonowanie poszczególnych zespołów wykonawczych znajdujących się na głowicy roboczej, w ściśle określonych punktach układu współrzędnych X-Y związanego ze stołem z dokładnością 0,01 mm. Zespoły wykonawcze zajmują względem siebie stałe określone pozycje wprowadzone do układu sterowania jako stałe maszynowe.



Rys. 4. Konstrukcja urządzenia do montażu chipów RFID metodą klejenia



Rys. 5. Konstrukcja modułu stołu roboczego urządzenia do montażu chipów RFID metodą klejenia

Na nieruchomym stole maszyny jest umieszczony zasobnik chipów. Ma on postać „tacki” z zagłębieniami (gniazdami) o kształcie i wymiarach chipów. Zasobnik jest ładowany chipami poza urządzeniem, ręcznie z wykorzystaniem np. mikroskopu. W przypadku zasobnika z gniazdami do umieszczania poszczególnych chipów dokładnie dopasowanymi do wymiarów tych elementów, jest on umieszczony w ściśle określonym miejscu stołu. Chipy w zasobniku zajmują określoną pozycję kątową, a niejednoznaczność ich położenia wynika tylko z luzu w gnieździe. Dzięki określonej pozycji zasobnika na

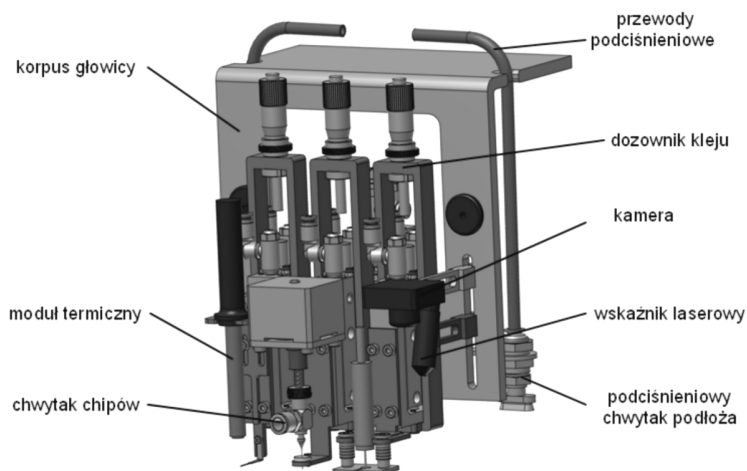
stole i określonym pozycjom gniazd chipów, ich położenie w układzie współrzędnych X-Y maszyny jest dokładnie określone. W przypadku zasobnika z luźnymi gniazdami na chipy, w których mogą one zajmować przypadkowe położenia, zasobnik spoczywa na płaszczyźnie stołu, ale nie jest z nim związany i może być przemieszczany (obracany wokół pionowej osi) ręcznie lub z wykorzystaniem manipulatora obrotowego w celu odpowiedniego pozycjonowania chipa.

Na ruchomej głowicy roboczej (rys. 6) przemieszczającej się po poziomym wsporniku bramowym są zainstalowane następujące moduły funkcjonalne:

- kamera,
- wskaźnik laserowy,
- dozownik kleju,
- chwytak chipów,
- moduł termiczny do utwardzania kleju.

Kamera służy do obserwacji i przekazywania obrazu chipa umieszczonego w zasobniku lub miejsca implementacji chipa na arkuszu do układu sterującego maszyną. Obraz rejestrowany przez kamerę jest obserwowany przez operatora na monitorze lub analizowany automatycznie w układzie sterowania. Na podstawie analizy obrazu przekazywanego przez kamerę jest pozycjonowany chip wraz z ruchomym zasobnikiem przed pobraniem go przez chwytak oraz są określone współrzędne w układzie X-Y punktu na arkuszu, w którym ma być on umieszczony. Operator lub układ sterowania maszyny poprzez odpowiednie ruchy głowicy doprowadza do zgodności obrazu widzianego przez kamerę z wymaganym wzorcem, a współrzędne tego położenia są określane automatycznie. Obraz rejestrowany przez kamerę jest wykorzystywany tylko do precyzyjnego określania współrzędnych głowicy roboczej maszyny względem pobieranego chipa i względem „anten”, na której ma on być umieszczony. Pozostałe czynności maszyna wykonuje automatycznie wykorzystując stałe maszynowe charakteryzujące wzajemne położenie modułów wykonawczych, bez bieżącej wizyjnej kontroli wykonania.

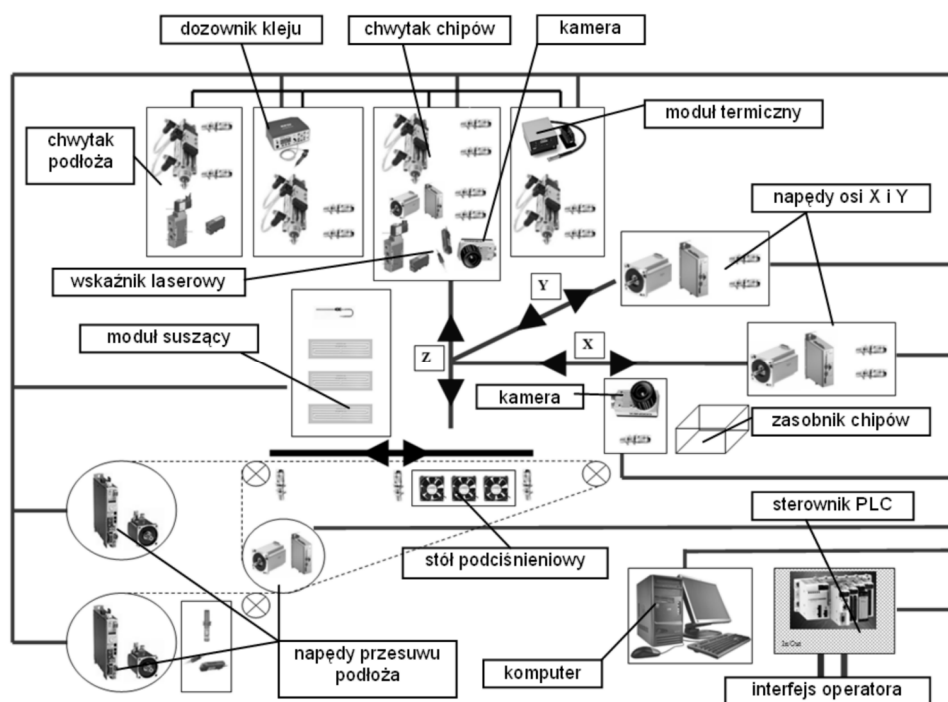
Wskaźnik laserowy służy do wstępnego „ręcznego” ustawienia kamery względem arkusza lub zasobnika z chipami, tak by wybrany obszar arkusza (np. miejsce montażu chipa) lub odpowiedni chip znalazły się w polu widzenia kamery. Jest to realizowane przez ręczne lub automatyczne sterowanie ruchami napędów wspornika głowicy (np. za pomocą przycisków) albo ręczne przesuwanie zasobnika przy jednoczesnej wzrokowej obserwacji położenia plamki światła wskaźnika na podłożu.



Rys. 6. Konstrukcja głowicy roboczej urządzenia do montażu chipów RFID metodą klejenia

Dozownik kleju służy do naniesienia odpowiedniej ilości kleju przeznaczonego do przyklejenia chipa na arkusz w odpowiednim miejscu określonym współrzędnymi w układzie współrzędnych X-Y maszyny. Dozownik jest zespołem umieszczonym na stałe na głowicy roboczej, a jego sterownik znajduje się na bocznej części korpusu (rys. 4). Przewidziano opcjonalne wykorzystanie dodatkowego dozownika kleju przeznaczonego do hermetyzacji wykonanego połączenia. Polega ono na naniesieniu kropli odpowiedniego materiału wiążącego na osadzony chip w celu zabezpieczenia go przed wpływami zewnętrznymi i oderwaniem. Zabieg ten przewidziano w technologii (rys. 3) jako opcję.

Zadaniem chwytaka chipów jest pobranie chipa z zasobnika i umieszczenie go na arkuszu, na uprzednio naniesionym kleju w określonym punkcie układu współrzędnych. Chwytnak posiada możliwość przemieszczania w pionie dyszy przysysającej chwytany chip oraz obrotu wraz z chipem o dowolny kąt wokół pionowej osi. Do obserwacji chipa przyssanego do chwytaka od dołu służy dodatkowa kamera umieszczona w stole.



Rys. 7. Schemat układu sterowania pracą urządzenia do montażu chipów RFID metodą klejenia

Zadaniem modułu termicznego do utwardzania kleju jest podgrzanie kleju z jednoczesnym dociskaniem chipa do arkusza w celu nadania pełnej wytrzymałości połączeniu i wysuszenia. Składa się on z dociskacza i dyszy nadmuchującej gorące powietrze na obszar połączenia klejowego. Zasada działania i budowa zespołu zaopatrzonego w programowany sterownik (rys. 4) pozwalają na regulację temperatury nadmuchiwanego powietrza i siły docisku oraz programowanie zmienności temperatur i strumienia powietrza w czasie.

Podciśnieniowy chwytak podłoży służy do przenoszenia arkusza z gotowymi wyrobami do modułu transportującego podłóżę, który umieszcza gotowe inletry na określony czas w module kondycjonowania

termicznego celem wysuszenia materiału hermetyzującego i nadania połączeniom pełnej wytrzymałości poprzez wygrzewanie w zaprogramowanych warunkach termicznych.

W konstrukcji prezentowanego urządzenia zastosowano rozwiązania modułowe dające możliwość zainstalowania na głowicy roboczej różnych zespołów funkcjonalnych odpowiednich do stosowanej technologii montażu chipów oraz wykorzystania dodatkowych, opcjonalnych modułów maszyny rozszerzających jej walory technologiczne.

Układ sterowania pracą urządzenia (rys.7) zrealizowano w trójpoziomowej hierarchii zarządzania. W poziomie pierwszym znajduje się sterownik PLC jako jednostka centralna układu. Drugi poziom układu, współpracujący bezpośrednio ze sterownikiem PLC obejmuje: komputer PC (zarządzający układem wizyjnym znajdującym się w trzecim poziomie), sterowniki silników krokowych i serwonapędy (odpowiedzialne za napędy w poziomie trzecim), panel operatorski (kontakt systemu z operatorem), moduł trzymający arkusz (realizujący unieruchomienie arkusza), głowica - chwytak chipów (realizujący pobieranie, przemieszczanie i odkładanie chipa na wskazane miejsce), głowica - dozownik kleju (nanosząca zadaną ilość kleju), głowica - modułu termicznego (odpowiedzialna za utwardzanie termiczne spoiwa nadmuchem gorącego powietrza), głowica podnosząca arkusz (realizująca jednostronne uniesienie arkusza) oraz moduł grzejny (spełniający rolę dodatkowego, wspomagającego stanowiska suszącego). Kolejny trzeci poziom stanowią silniki krokowe, serwosilniki oraz kamery układów wizyjnych.

Układ sterowania procesu przewiduje realizację pracy w trybie ręcznym lub automatycznym oraz z materiałem wejściowym w postaci arkusza z naniesionymi „antenami” lub wstęgi materiału.

PODSUMOWANIE

Dokumenty, karty, identyfikatory i inne wyroby zabezpieczone układami RFID znajdują coraz szersze zastosowanie w organizacji procesów technologicznych, logistyce, identyfikacji uprawnień, międzynarodowej wymianie towarowej i kontroli przemieszczania osób. Wymaga to opracowywania nowych, doskonalszych i lepiej zabezpieczonych rozwiązań w postaci układów RFID o innowacyjnej konstrukcji i parametrach. Powstawanie nowych rodzajów zabezpieczeń powoduje konieczność opracowania i wdrożenia aparatury pozwalającej na wytwarzanie prototypowych nowatorskich rozwiązań układów z wykorzystaniem nowoczesnych technologii stosowanych w przemyśle. W ramach opisanej pracy zostało podjęte zadanie opracowania urządzenia do półautomatycznego montażu układów scalonych (chipów) w układach RFID z wykorzystaniem techniki klejenia za pomocą klejów anizotropowych. Modułowa konstrukcja i sposób działania urządzenia pozwala na opcjonalne wykorzystywanie różnych zespołów funkcyjnych i wykonawczych, a tym samym do elastycznego modelowania technologii montażu prototypowych produktów z zabezpieczeniem w postaci układów RFID. Opisane urządzenie jest przeznaczone do prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w dziedzinie montażu miniaturowych układów elektronicznych oraz do niskonakładowej i doświadczalnej produkcji specjalnych układów RFID.

LITERATURA

1. Witschnig, H.; Merlin, E.: About history, basics and applications of RFID technology. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, Vol: 123, Issue: 3, March 2006, pp. 61 - 71
2. Neuby B.L., Rudin E.: Radio Frequency Identification: A Panacea for Governments? *Public Organization Review*. Vol: 8, Issue: 4, December 2008, pp. 329 – 345
3. RFID Smart Labels – A ‘How to’ guide to manufacturing and performance for the label converter. Tarsus E&L Publication, London 2007
4. Doc 9303 Machine Readable Travel Documents. ICAO Sixth Edition 2006
5. Machine Readable Travel Documents. Technical Report: Durability of Machine Readable Passports Version 3.2, ICAO 2006.
6. PN-ISO/IEC 7810:1997/Ap1:2002 Karty identyfikacyjne - Charakterystyki fizyczne.
7. PN-ISO/IEC 10373-1:2008 Karty identyfikacyjne -- Metody badań

8. Stęplewski W., Kozioł G.: Montaż elektroniczny nieobudowanych struktur półprzewodnikowych typu flip-chip. Elektronika - konstrukcje, technologie, zastosowania, 2009-7
9. Zbrowski A., Samborski T., Kozioł S.: Modułowy system wytwarzania prototypowych identyfikatorów z zabezpieczeniem elektronicznym. Referat wygłoszony na międzynarodowej konferencji MANUFACTURING 2010, 24-26.11, Poznań. Proceedings abstracts s. 207-208
10. Kozioł S., Zbrowski A., Samborski T., Wiejak J.: Koncepcja systemu testowania połączeń montażowych w dokumentach z zabezpieczeniem elektronicznym. Technologia i automatyzacja montażu, 4/2010, s. 6-9

THE CONCEPT OF THE DEVICE FOR THE IMPLEMENTATION OF THE RFID CHIPS

Abstract. *The Institute for Sustainable Technologies-NRI in Radom has started a project aiming at the development of the device for assembly of the miniature integrated circuits in RFID systems with use of gluing method. The modular construction and variable configuration of the machine allow flexible adaptation of the used assembly technique and application of the machine for research and development as well as for short-series production of the electronic security elements. At the current stage of works the concept of the device was developed and the construction documentation prepared for the mechanic modules and electronic control circuit.*

Petro MELNUCHYK
Valerii KYRYLOVYCH
Oleksandr PYSARCHUK
 Żytomirski Uniwersytet Technologiczny
 Żytomierz, Rosja

ZASTOSOWANIE TEORII KWATERIONÓW DO OPRACOWANIA FUNKcjONALNYCH MODELI UKŁADÓW MANIPULACYJNYCH ROBOTÓW PRZEMYSŁOWYCH

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ KWATERНИОНОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Предложено формализованно описывать манипуляционные системы промышленных роботов (МС ПР) так называемыми функциональными моделями (ФМ) МС ПР, базирующиеся на использовании теории кватернионов.

При решении ряда задач автоматизированного синтеза роботизированных механообрабатывающих технологий в условиях гибкого производства возникают проблемы, связанные с необходимостью представлять определенным образом условия функционирования промышленных роботов (ПР) [7]. Указанное особенно важно и актуально для отображения положения звеньев манипуляционной системы (МС) ПР, несовпадающих с осями предварительно выбранной системой координат (СК). Проведенный анализ формализованных (математических) описаний МС ПР однозначно указывает на отсутствие именно указанного компонента в их составе [1, 10, 13, 14, 15]. С другой стороны, существующий математический аппарат – теория кватернионов предполагает возможность отображения указанной информации. Поэтому при составлении функциональных моделей (ФМ) МС ПР в качестве теоретической базы предлагается использовать упомянутый математический аппарат. Кватернионы на сегодня уже достаточно широко используются для решения таких задач технологического содержания, как определение ориентации твердого тела в пространстве [4, 20], для решения задач кинематики и динамики ПР [22], для контроля камер наблюдения, в компьютерной графике [5, 6], при формализованном описании движений объектов роботизации автоматизированного выбора ориентирующих устройств механообрабатывающего производства [8, 9]. Кватернионы применяются в электротехнике, физике и других областях [2, 21, 23].

Важные для рассматриваемой проблемы положения алгебры кватернионов

Кватернион, за Гамильтоном [7], является системой гиперкомплексных чисел. Это расширение четырех комплексных чисел, одно из которых является действительной частью (s), три других – мнимой (V). Математическое представление кватерниона имеет вид:

$$Q = s + v = s + (xi + yj + zk), \quad (1)$$

где s – действительная часть (скаляр); $xi + yj + zk = v$ – мнимая часть (вектор); i, j, k называют мнимыми кватернионными единицами [4].

Правила их умножения имеют вид:

$$\begin{aligned} i^2 = j^2 = k^2 = -1; \quad 1 \cdot i = i \cdot 1 = i; \quad \dots \quad 1 \cdot j = j \cdot 1 = j; \quad 1 \cdot k = k \cdot 1 = i; \\ i \cdot j = -j \cdot i = k; \quad j \cdot k = -k \cdot j = i; \quad k \cdot i = -i \cdot k = j. \end{aligned} \quad (2)$$

Это означает, что умножение кватернионов не является коммутативным, что есть важным при анализе последовательно связанных звеньев МС ПР:

$$Q_1 \cdot Q_2 \neq Q_2 \cdot Q_1. \quad (3)$$

Кватернион можно представить как двойку S – скаляра и V – вектора:

$$Q = (s; v). \quad (4)$$

Умножения для кватернионов по выражению (4) $Q_1 = (s_1; v_1)$ и $Q_2 = (s_2; v_2)$ имеет вид [9, 22]:

$$Q_1 \cdot Q_2 = (s_1 \cdot s_2 - v_1 \cdot v_2; v_1 \cdot v_2 + s_2 \cdot v_1 + v_1 \times v_2), \quad (5)$$

где $v_1 \cdot v_2$ – скалярное произведение векторов v_1 и v_2 , $v_1 \times v_2$ – векторное произведение. Все остальные произведения являются обычными (число на число, число на вектор).

Суммирование кватернионов осуществляется по составляющим, то есть:

$$Q_1 + Q_2 = (s_1 + s_2; v_1 + v_2). \quad (6)$$

Угловой кватернион $Q(s; v)$ описывается совокупностью параметров, определяющих положение относительно абсолютной системы координат X, Y, Z с учетом обозначений по [15]:

$$Q(s; v) = \alpha = [\alpha_x(A), \alpha_y(B), \alpha_z(C)], \quad (7)$$

где $\alpha_x(A), \alpha_y(B), \alpha_z(C)$ – параметры, описывающие поворот тела относительно осей X, Y, Z абсолютной СК на углы A, B, C соответственно.

Параметры, формирующие общую функцию $Q(s; v)$ можно представить соответствующими кватернионами [9, 22]:

$$\begin{aligned} \alpha_x(A) &= \cos \frac{A}{2} + i \cdot \sin \frac{A}{2}; \\ \alpha_y(B) &= \cos \frac{B}{2} + j \cdot \sin \frac{B}{2}; \\ \alpha_z(C) &= \cos \frac{C}{2} + k \cdot \sin \frac{C}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Результатом угловых перемещений в абсолютной системе координат X, Y, Z является поворот тела на некоторый угол $\omega = f(A, B, C)$ относительно оси, коллинеарной единичному вектору (рис.1, а) в новое положение СК, т.е. X', Y', Z' .

Линейный кватернион $Q(s; v)$ описывается совокупностью параметров, определяющих положение относительно абсолютной системы координат X, Y, Z :

$$Q(s; v) = S = [l; x; y; z], \quad (9)$$

где x, y, z – величины линейных перемещений относительно осей X, Y, Z абсолютной СК;

l – длина вектора V , отображающего новое положение СК X', Y', Z' после перемещений X, Y, Z
(см. рис.1, б), $l = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

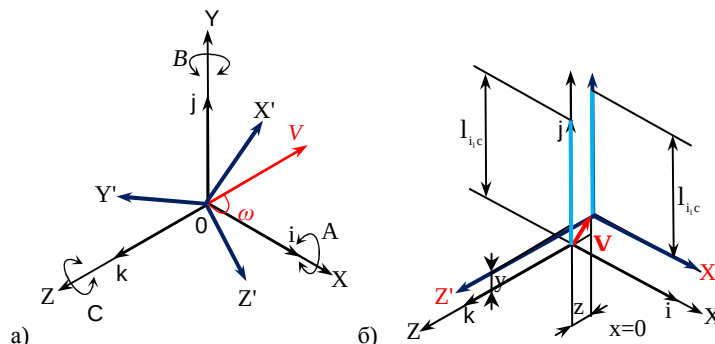


Рис.1. Графическое отображение перемещений математическим аппаратом кватернионов при изменении первоначальной СК из начального X, Y, Z в конечное положение X', Y', Z' :
а) угловые перемещения; б) линейные перемещения

Rys. 1. Graficzne odwzorowanie przemieszczeń za pomocą aparatu matematycznego kwaterniów przy zmianie początkowej СК (układ współrzędnych) z [początkowego X, Y, Z w końcowe położenie X', Y', Z' :
а) przemieszczenie katowe, б) liniowe

Математический аппарат кватернионов используется для представления вращения вектора:

$$V' = Q \cdot V \cdot Q^{-1}, \quad (10)$$

где V' – вектор, возникший после вращения; Q – кватернионное представление вращения; Q^{-1} – сопряженный кватернион к Q , $Q^{-1} = v - x \cdot i - y \cdot j - z \cdot k$.

Сферическая линейная интерполяция (SLI) с использованием кватернионов является наиболее эффективной, когда интерполяция определяется использованием вращающихся движений или траекторией с видом дуги. Все другие виды интерполяции вносят погрешности. Например, при линейной интерполяции (LI) точки, спроектированные с прямой P_1 на круг или дугу P_s , не соответствуют действительным точкам с заданным шагом при сферической линейной интерполяции (рис. 2, а).

Сферическая линейная интерполяция определяется выражением:

$$SLI(Q_1, Q_2, t) = (Q_1 \cdot \sin((1-t) \cdot \omega) + Q_2 \cdot \frac{\sin(t \cdot \omega)}{\sin(\omega)}), \quad (11)$$

где Q_1, Q_2 – вектора, принадлежащие 4-D сфере, пересекающейся плоскостью P_s образованной данными векторами и центром круга, $P \supset (Q_1, Q_2, O)$ (рис.2, б). Очевидно, что искомые при интерполяции точки будут принадлежать данной плоскости P ; ω – угол между векторами Q_1 и Q_2 ; t – локальное время.

Выражение (11) можно применять для решения задачи определения промежуточного положения звеньев МС ПР в трехмерном пространстве при известных значениях их угловых перемещений.

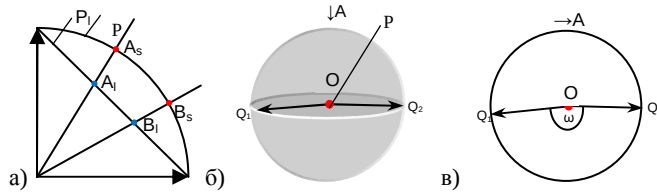


Рис.2. Сферическая линейная интерполяция:

а) несовпадение точек при линейной (LI) и сферической линейной интерполяции (SLI);

б) 4-D сфера и плоскость, образованная векторами u и v и центром круга;

в) вид A в рис.2, б

Rys. 2. Sferyczna liniowa interpolacja: a) brak pokrycia punktów przy liniowej (LI) i sferycznej liniowej interpolacji (SLI); b) 4-D sfera i płaszczyzna utworzone wektorami u i v i środkami okręgu; c) widok A z rys. 2b

Применение SLI при решении данной задачи позволяет найти точное промежуточное положение i -го звена без погрешностей, возникающих при других видах интерполяции. Положение i -го звена, рассчитанное с использованием выражения (11) в промежутках между двумя позициями звена, представляет собой множество положений звена:

$$M_{i_l} = \{Q_{t_0}, Q_{t_0+\tau}, Q_{t_0+2\tau} \dots Q_{t_0+n\tau}, Q_{t_k}\} \quad (12)$$

где Q_{t_0} – исходное положение i -го звена, заданное в виде положения вектора, $t_0 = 0$; Q_{t_k} – конечное положение i -го звена, заданное в виде положения вектора, $t_k = 1$; $Q_{t_0+\tau}, Q_{t_0+2\tau} \dots Q_{t_0+n\tau}$ – промежуточные положения i -го звена, заданные в виде положений вектора, $t_0 < \tau, 2\tau, \dots, n\tau < t_k, n \in 1, \infty$.

Данное свойство можно использовать при обработке информации, внесенной в ФМ ПР, которая упрощенно отображает кинематическую схему ПР с использованием геометрических примитивов, описывающих размеры i -го звена. Таким образом, можно сформировать множество положений i -го звена по выражению (12), значения которого можно проверять на принадлежность зоне запрета, например, с использованием R-функции [14].

Важным функциональным параметром ПР является достижимость [12], или принадлежность точки множеству точек рабочей зоны ПР. Имея ФМ МС ПР с использованием математического аппарата кватернионов и положения звеньев МС ПР относительно формального начального положения (ФНП) [13] в кватернионной форме, можно найти достижимость точки по следующей формуле [4]:

$$H(Q) = \prod_{i=1}^{n_1} 4 \cdot \frac{(Q_{i_{\max}} - Q_{i_l}) \cdot (Q_{i_l} - Q_{i_{\min}})}{(Q_{i_{\max}} - Q_{i_{\min}})^2}, \quad (13)$$

где n_1 – количество степеней подвижности ПР; $Q_{i_{\max}}, Q_{i_{\min}}$ – максимальный (положительный) и минимальный (отрицательный) углы соответственно в кватернионном представлении, которые

способно отрабатывать i -ое звено относительно ФНП; Q_{i_i} – кватернионная запись текущего положения i -го звена МС ПР относительно ФНП в трехмерном пространстве принятой системы координат.

При этом функция достижимости $H(Q)$ для некоторого положения звеньев МС ПР находится в пределах $H(Q) \in [0;1]$. При условии, если ее значение выходит за данные рамки, точка недостижима для рассматриваемой модели ПР.

Функция достижимости $H(Q)$ принимает значение 1, если анализируемая точка наиболее отдалена от границ возможных углов отработки, значение 0 – когда анализируемая точка находится на границах возможных минимальных или максимальных углов отработки звеньев.

Пусть ПР мод. Fanuc M710iC/20L отработал следующие движения звеньев относительно ФНП (на рис.3 конечное положение отражено пунктиром):

$$C_2 = 90^\circ \text{ при } C_{2 \max} = +216^\circ, C_{2 \min} = -216^\circ.$$

Функция достижимости в т. А для активного звена приобретет значение

$$H(Q_3) = 4 \cdot \left(\frac{((\cos \frac{C_{2 \max}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \max}}{2}) - (\cos \frac{C_2}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_2}{2}))}{((\cos \frac{C_{2 \max}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \max}}{2}) - (\cos \frac{C_{2 \min}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \min}}{2}))^2} \cdot \frac{((\cos \frac{C_2}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_2}{2}) - (\cos \frac{C_{2 \min}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \min}}{2}))}{((\cos \frac{C_{2 \max}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \max}}{2}) - (\cos \frac{C_{2 \min}}{2}; 0; 0; \sin \frac{C_{2 \min}}{2}))} \right) =$$

$$= 4 \cdot \left(\frac{((-0.309017; 0; 0; 0.951056) - (0.707106; 0; 0; 0.707106)) \cdot ((0.707106; 0; 0; 0.707106) - (-0.309017; 0; 0; -0.951056))}{(((-0.309017; 0; 0; 0.951056) - (-0.309017; 0; 0; -0.951056))^2 + ((0.707106; 0; 0; 0.707106) - (-0.309017; 0; 0; -0.951056))^2)} \right) = 0.447217.$$

Кватернионы в функциональных моделях промышленных роботов

Ниже представлено рассмотрение некоторых из практических задач, для решения которых использованы указанные преимущества математического аппарата кватернионов.

Вращения тела в трехмерном пространстве вокруг осей координат может быть задано следующим образом [6, 11, 12, 18, 20]:

- матрицами вращения;
- углами Эйлера;
- углом поворота θ и единичным вектором оси вращения $v = (X, Y, Z)$;
- кватернионами.

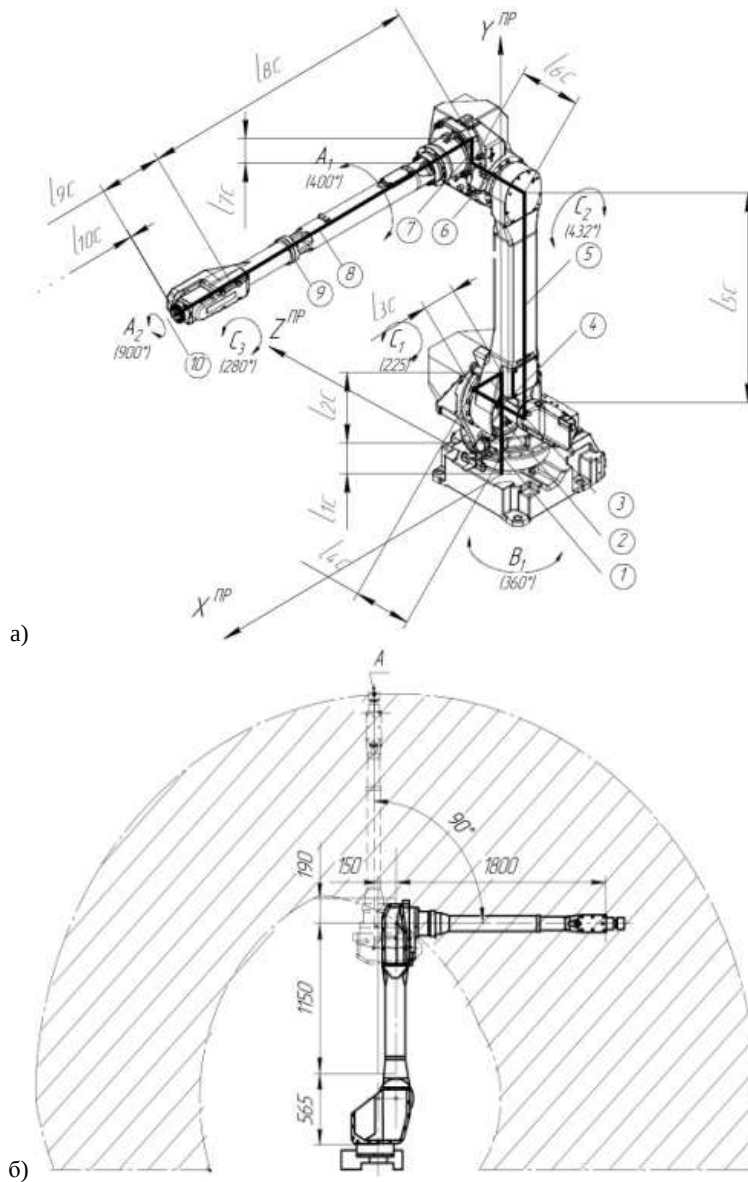


Рис.3. Положение звеньев МС РР мод. Fanuc M710iC/20L иллюстрирующее работоспособность вычислений функции достижимости: а) общий вид РР; б) положение анализируемой точки А, принявшей свое положение в результате перемещений активного звена 7

Rys. 3. Położenie ogniw układu manipulacyjnego RP mod. Fanuc M710iC/20L ilustrujące przydatność obliczeń funkcji osiągalności: а) ogólny widok RP, b) położenie analizowanego punktu А, który zajął swoje położenie w wyniku przemieszczenia aktywnego ogniwа 7

Для правой положительной системы координат вращение на некоторые углы в трехмерном пространстве может быть записано матрицами вращения M_x , M_y , M_z вокруг трех осей СК:

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A \\ 0 & \sin A & \cos A \end{pmatrix}, M_y = \begin{pmatrix} \cos B & 0 & \sin B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B \end{pmatrix}, M_z = \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C & 0 \\ \sin C & \cos C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где A , B , C – углы вращения вокруг осей системы координат X , Y , Z соответственно.

Углы Эйлера определяются как углы вращения вокруг осей СК X , Y , Z . При этом СК движется с объектом, что приводит к так называемому шарнирного замка, когда при повороте на некоторый угол, например, 90° вокруг оси Y , ось вращения Z фактически заменяет ось X и т.д. Для осуществления вращения данные углы следует конвертировать в матрицу, что усложняет обработку представленной информации.

При задании вращения тела в трехмерном пространстве углом поворота θ и единичным вектором оси вращения $V=(X, Y, Z)$ не возникает недостатков, связанных с подвижной системой координат при использовании углов Эйлера. Для осуществления вращения данное представление положения объекта в трехмерном пространстве также следует конвертировать в матрицу. Может осуществляться интерполяция по отдельной формуле.

Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что теория кватернионов является лучшим математическим аппаратом для отображения положения тела в пространстве и его вращающихся и линейных перемещений.

Итак, определив основные преимущества и возможности математического аппарата кватернионов на основе анализа приведенной информации и литературы [4, 6, 16, 19, 20], следует отметить целесообразность и обоснованность его использования в робототехнике в целом и для создания ФМ МС ПР в частности. МС ПР является совокупностью тел (звеньев), перемещающихся друг относительно друга вращательно или линейно, чтобы показать положение и ориентацию схвата ПР [17]. Приведем некоторые примеры применения математического аппарата кватернионов при формировании ФМ МС ПР, представленных на рис.4, 5 (правила формирования ФМ МС ПР здесь не рассматриваются, т.к. представляют отдельную научную задачу).

ФМ МС ПР типа SCARA мод. KUKA KR10 R850 Z400 (рис.4), представленная с использованием кватернионов приобретет следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{ФМ МС ПР} = \langle Q_{i_1} \rangle = & l_{1c}(0) \vee l_{2c} \alpha(0.130526; 0; 0.991445; 0)(0.130526; 0; -0.991445; 0) \vee \\ & \vee l_{3c} \alpha(0.284015; 0; 0.95882; 0)(0.284015; 0; -0.95882; 0) \vee l_{4c}(0) \vee l_{5c} S(350; 350) \vee \\ & \vee l_{6c} \alpha(0.999848; 0; 0.017452; 0)(0.999848; 0; -0.017452; 0), \end{aligned}$$

где $l_{1c} - l_{6c}$ – порядковые номера звеньев при их рассмотрении в направлении от неподвижной основы к схвату; B_1 – вращение звена l_{2c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП; B_2 – вращение звена l_{3c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП; $x = 350$ – перемещение звена l_{5c} относительно втянутого его положения при ФНП; B_3 – вращение звена l_{6c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП.

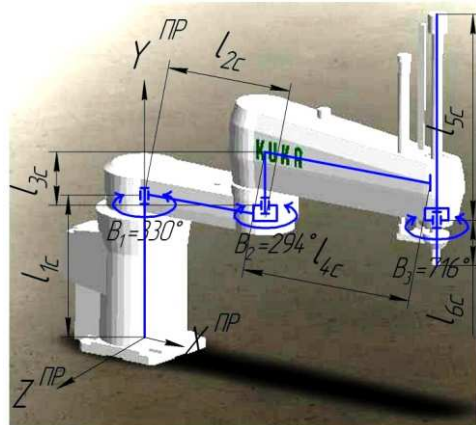


Рис.4. Обицый вид ИП типа SCARA мод. KUKA KR10 R850 Z400

Rys. 4. Ogólny widok RP typu SCARA mod. KUKA KR10 R850 Z400

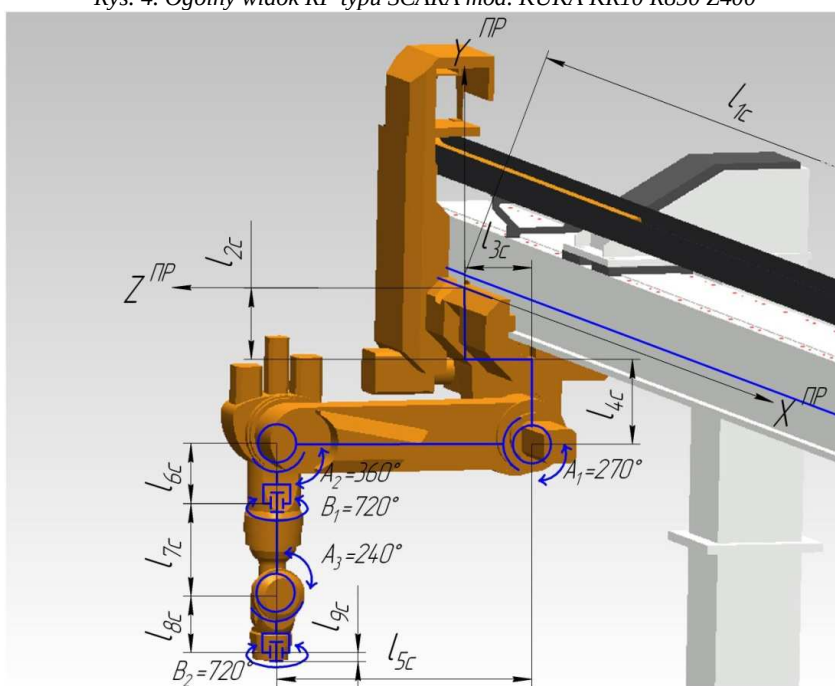


Рис.5. Обицый вид портального ИП мод. GUDEL RF-4 210

Rys. 5. Ogólny widok bramowego RP mod. GUDEL RF-4 210

ФМ МС ПР портального типа мод. GUDER RF-4 210 (рис.5), описанная математическим аппаратом кватернионов, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \text{ФМ МС ПР} = \langle Q_{i_1} \rangle = & l_{1c}(0) \vee l_{2c}(1000; 1000; 0; 0) \vee l_{3c}(0) \vee l_{4c}(0) \vee \\ & \vee l_{5c} \alpha(0.382683; 0.92388; 0; 0)(0.382683; -0.92388; 0; 0) \vee l_{6c} \alpha(0.707107; 0.707107; 0; 0) \\ & (-0.707107; -0.707107; 0; 0) \vee l_{7c} \alpha(-1; 0; 0; 0)(-1; 0; 0; 0) \vee l_{8c} \alpha(0.5; 0.866025; 0; 0) \\ & (0.5; -0.866025; 0; 0) \vee l_{9c} \alpha(-1; 0; 0; 0)(-1; 0; 0; 0), \end{aligned}$$

где $l_{1c} - l_{9c}$ – порядковые номера звеньев; $x = 1000$ – перемещение звена l_{2c} относительно его положения при ФНП; A_1 – вращение звена l_{5c} вокруг оси ОХПР относительно ФНП; A_2 – вращение звена l_{6c} вокруг оси ОХПР относительно ФНП; B_1 – вращение звена l_{7c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП; A_3 – вращение звена l_{8c} вокруг оси ОХПР относительно ФНП; B_2 – вращение звена l_{9c} вокруг оси ОУПР относительно ФНП.

Таким образом, использование теории кватернионов позволяет описывать посредством ФМ МС ПР положение звеньев кинематических пар преимущественно с их линейными и вращающимися относительными перемещениями ПР. Указанное преимущество после автоматизированной обработки позволяет использовать ФМ МС ПР при решении реальных задач инженерной практики гибкого роботизированного механообрабатывающего производства [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналіз методів опису багрегатно-модульних промислових роботів для їх автоматизованого вибору / В. А. Кирилович, І. В. Сачук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2000. – № 1 (13, т. II). – С. 3–10.
2. Березин А.В., Курочкин Ю.А., Толкачев Е.А. Кватернионы в релятивистской физике. – Минск. Наука и техника. 1989. – 211 с.
3. Гамильтон У. Р. Избранные труды: Оптика. Динамика. Кватернионы. – М.: Наука, 1994. – 560 с.
4. Ефремов А. П. Кватернионы: алгебра, геометрия, и физические теории. Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. – №1. – с.119. <http://hypercomplex.ru>.
5. Кватернионы.–18.01.2011. – <http://algolist.manual.ru/graphics/3dfaq/articles/77.php>.
6. Кватернионы и 3-х мерные повороты. – 18.01.2011. – <http://karataev.nm.ru/quater3rot/file1.html>.
7. Кирилович В. А. Умови функціональної реалізованості роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках // Технологічні комплекси – Луцьк. – 2010. – № 1. – С.136–145
8. Кирилович В. А. Формалізований опис рухів об'єктів роботизації на основі теорії кватерніонів: междунар. научн.–техн. конф. студ., асп. и молодых ученых., 16 – 20 мая 2005 г. Севастополь: Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – С. 163–164.
9. Кирилович В. А. Формалізований опис орієнтуючих рухів об'єктів роботизації на основі теорії кватерніонів / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович // Вісник національного університету „Львівська політехніка”. – 2006. – № 551. – С. 114 – 122.
10. Кирилович В. А., Сачук І. В. Формализованное описание кинематических структур агрегатно-модульных ПР// Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Машиностроение. – 2003. – Выпуск 2. – С. 12–16
11. Лурье А. И. Аналитическая механика – М.:Физматлит – 1961 г. – 824 с.
12. Манипуляционные системы роботов/ А. И. Корендясев, Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес и др.; Под общ. Ред. А. И. Корендясева – М.; Машиностроение, 1989. – 472с.

13. Математическое описание и моделирование на ЭВМ манипуляционных роботов/ И. Ф. Кириченко, Р. А. Сорока, Ю. В. Крак. – Киев, 1985. – 25с. – Препринт/ АН УССР, Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова.
14. Методика автоматизованого кінематичного формування траєкторії переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій / М. В. Богдановський, В. А. Кирилович, М. О. Ковбаса, Т.С. Нужда // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2004. – № 4 (31, т. II). – С. 92–101.
15. Механика промышленных роботов : в 3-х кн.: учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. – М. : Высшая школа, 1988.
16. Робототехника: пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли ; пер. А. А. Сорокин, А. В. Градецкий, М. Ю. Рачков ; ред. В. Г. Градецкий. – М. : Мир, 1989. – 621 с.
17. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. - 4-е изд., перераб. И доп. – М. : Наука, 1988. – 639 с.
18. Шахинпур М. Курс робототехники: Пер. с англ.–М.: Мир, 1990. – 527 с.
19. Claus Haetinger, Marcelo Malheiros, Eduardo Dullius, Marcio Kronbauer. A quaternion application to control rotation movements in the three dimensional space of an articulate mechanical arm type robot built from low cost materials as a supporting tool for teaching at the undergraduate level// Global Congress on Engineering and Technology Education. – March 13 – 16, 2005, São Paulo, Brazil. – 4 p.
20. Exploiting Quaternions to Support Expressive Interactive Character Motion Michael Patrick Johnson – Thesis (Ph. D.) – Massachusetts Institute of Technology, School of Architecture and Planning, Program in Media Arts and Sciences. – 2003. – 266 p.
21. Honig William M. Quaternionic Electromagnetic Wave Equation and a Dual Charge-Filled Space// Lettere al Nuovo Cimento, Ser. 2 19. – No.4. (28 Maggio 1977). – p. 137–140
22. Quaternion Based Robust Tracking Control of Kinematically Redundant Manipulators Subject to Multiple Self-Motion Criteria/ Husnu Turker Sahin, Ufuk Ozbay and Erkan Zergeroglu// Decision and Control. – 2006. – 45th IEEE Conference. – 6 p.
23. Maxwell James Clerk A Treatise on Electricity & Magnetism. – 1893. – Dover Publications, New York ISBN 0-486-60636-8 (Vol. 1) & 0-486-60637-6 (Vol. 2)

QUATERNION THEORY USAGE IN FUNCTIONAL MODELS FORMATION OF MANIPULATIVE SYSTEMS OF INDUSTRIAL ROBOTS

Abstract. Formalized description manipulative systems of industrial robots (MS IR) also called functional model (FM) MS IR is suggested. FM MS IR based in usage of quaternion theory and its advantages.

Mark KRISTAL
Aleksey DROBOTOV
Dmitry CHERNYSHEV
Wołogradzki Uniwersytet Techniczny
Wołogograd, Rosja

AUTOMATYCZNE URZĄDZENIA OBROTOWE Z TURBINOWYM NAPĘDEM DO MONTAŻU

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОВОРОТНЫЕ УСТРОЙСТВА С ТУРБОПРИВОДОМ ДЛЯ СБОРКИ

При сборке изделий по методу групповой взаимозаменяемости детали собираемого узла предварительно сортируют на размерные группы с последующим комплектованием их в сборочные комплекты заданного качества. В качестве устройств, обеспечивающих перемещение деталей от позиций контроля до сортировочного отсека при их сортировке, или, наоборот, от групповых накопителей к позиции формирования сборочного комплекта при комплектовании, используют автоматические сортировочные устройства различного конструктивного исполнения.

Среди всего многообразия изделий, требующих выполнения описанных выше вспомогательных операций для их сборки, следует выделить шариковые и роликовые подшипники, номенклатура и программа выпуска которых достаточно велики. Это обуславливает необходимость повышения быстродействия средств сортировки (комплектования), а также их грузоподъемности при перемещении габаритных и массивных деталей. Обычно, для этой цели используют поворотные устройства (поворотные столы). Известные конструкции поворотных столов (ПС) содержат: поворотную часть с планшайбой, неподвижное основание, с установленным на нем приводом, делительные и фиксирующие механизмы, систему управления того или иного типа с датчиками обратной связи, информирующими о состоянии устройства. Наличие холостых ходов в делительных и фиксирующих механизмах ограничивают их быстродействие. Кроме того, в большинстве конструкций ПС поворот на угол больший углового шага, выполняют с промежуточными остановками. Также имеются ограничения по реализации реверсивных движений.

Для компенсации указанных недостатков, предложены новые конструктивные схемы ПС [1, 2], где в качестве механизмов поворота и фиксации использованы фрикционные или кулачковые муфты, включение и отключение которых выполняют попеременным созданием между их рабочими поверхностями разрежения и воздушной прослойки. При этом поворот подвижных частей ПС выполняют на создаваемой воздушной прослойке турбинным приводом.

На рис. 1. представлены этапы работы поворотного устройства, выполненного на основе зубчатой муфты. Подвижная часть (ПЧ) поворотного стола соединена с верхней полумуфтой 2 зубчатой муфты, а нижняя неподвижная 1 – с основанием. Нижняя полумуфта содержит силовые каналы 4 питания устройства, обеспечивающие поворот и фиксацию, и каналы 3 включения (отключения) зубчатой муфты. В положении «а» между рабочими поверхностями зубчатой муфты создают разрежение, обеспечивающее фиксацию планшайбы ПС. На этапе «б» между рабочими поверхностями муфты образуют воздушную прослойку, подав в канал 3 сжатый воздух, а, затем, на этапе «в», в канал 4 подают сжатый воздух для поворота ПЧ поворотного устройства. По завершению поворота на угловой шаг система управления, получив сигнал от датчика обратной связи, дает команду на подключение канала 4 к источнику вакуума, что приводит к этапу «г» обратного движения ПЧ на воздушной прослойке и замыканию полумуфт по боковым поверхностям зубьев. По окончании этого этапа, завершается процесс фиксации ПЧ созданием разрежения на

несущей поверхности нижней полумуфты, то есть поворотное устройство переходит в начальное состояние (рис.1 – а).

Достаточно проста реализация рассмотренного алгоритма работы поворотного устройства, а создание воздушной прослойки существенно повышает его быстродействие и грузоподъемность, что особенно целесообразно при сортировке и комплектовании габаритных деталей.

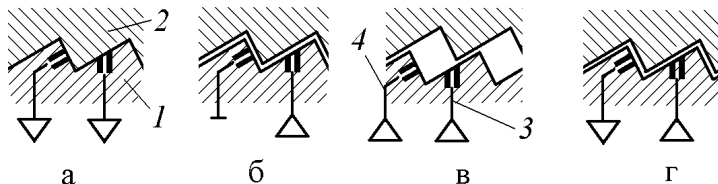


Рис. 1. Зубчатое поворотное устройство: а – исходное положение - рабочие поверхности зафиксированы созданным между ними разрежением; б – всплытие подвижной части на воздушной прослойке; в – прямой поворот ПЧ на воздушной прослойке; г – обратный поворот ПЧ на воздушной прослойке

Rys. 1. Zębate obrotowe urządzenia: a) początkowe położenie – powierzchnie robocze unieruchomione utworzonym między nimi podciśnieniem; b) wypływanie ruchomej części na powietrzną poduszkę; c) prosty obrót ruchomej części na poduszce powietrznej; d) powrotny obrót ruchomej części na poduszce powietrznej

По аналогии с включением (отключением) зубчатой муфты созданием между рабочими поверхностями разрежения (воздушной прослойки), предложена реализация поворотного устройства на основе фрикционных муфт. Рассмотрено два варианта. В первом - использована двухсторонняя муфта (поворот на заданный угловой шаг ограничен жесткими регулируемыми упорами). Во втором - применяют одностороннюю муфту (поворот на произвольный задаваемый системой управления угол).

В первом случае (рис. 2) основание 1 и поворотную часть 2 с планшайбой, попеременно соединяют (разъединяют) с промежуточным элементом 3, совершающим возвратно-поступательное движение углового поворота. При этом на начальном этапе «а» ПЧ 2 находится в исходном положении, зафиксированном разрежением, созданным между ПЧ 2 и несущей поверхностью основания 1, соплами 8. Здесь промежуточный элемент 3 находится в положении ограниченным упором 4. На этапе «б» между рабочими поверхностями основания 1 и, соответственно, ПЧ 2 и промежуточным элементом 3 соплами 8 и 9 одновременно создают воздушные прослойки, подготавливая тем самым переход к этапу «в». На этом этапе, соединенные друг с другом подвижная часть 2 и промежуточный элемент 3 под действием струй сжатого воздуха из силовых сопел 5 начинают перемещаться от упора 4 к упору 6, который и достигают в положении «г», переместившись на заданный угловой шаг. На этапе «д» между поворотной частью 2 и промежуточным элементом 3 соплами 10 также создают воздушную прослойку. А на заключительном этапе «е», под действием струй сжатого воздуха из силовых сопел 7, воздействующих на лопатки турбины турбинного привода, установленной на промежуточном элементе 3, возвращают последний в положение до упора 4, соответствующее исходному положению. Затем цикл движения может быть повторен. Для реверса система управления меняет приоритеты положений у соответствующих упоров. То есть начальное положение промежуточного элемента 3 будет находиться у упора 6.

Использование воздушной прослойки так же, как и в предыдущем случае, позволяет повысить грузоподъемность и быстродействие поворотных устройств. Точность углового перемещения обеспечивает настройка упоров 4 и 6.

Во втором случае (рис. 3), перемещение поворотной части 2 относительно неподвижного основания 1 на создаваемой воздушной прослойке также осуществляют под действием струй сжатого воздуха из силовых сопл 4, воздействующих на лопатки, установленной на поворотной части, турбины. А торможение и остановка поворотной части 2 выполняют струи сжатого воздуха из сопл 6, также воздействующих на лопатки турбины. Величину углового перемещения поворотной части устройства и его точность определяет точность датчика угла поворота и временная погрешность срабатывания электропневмопреобразователей.

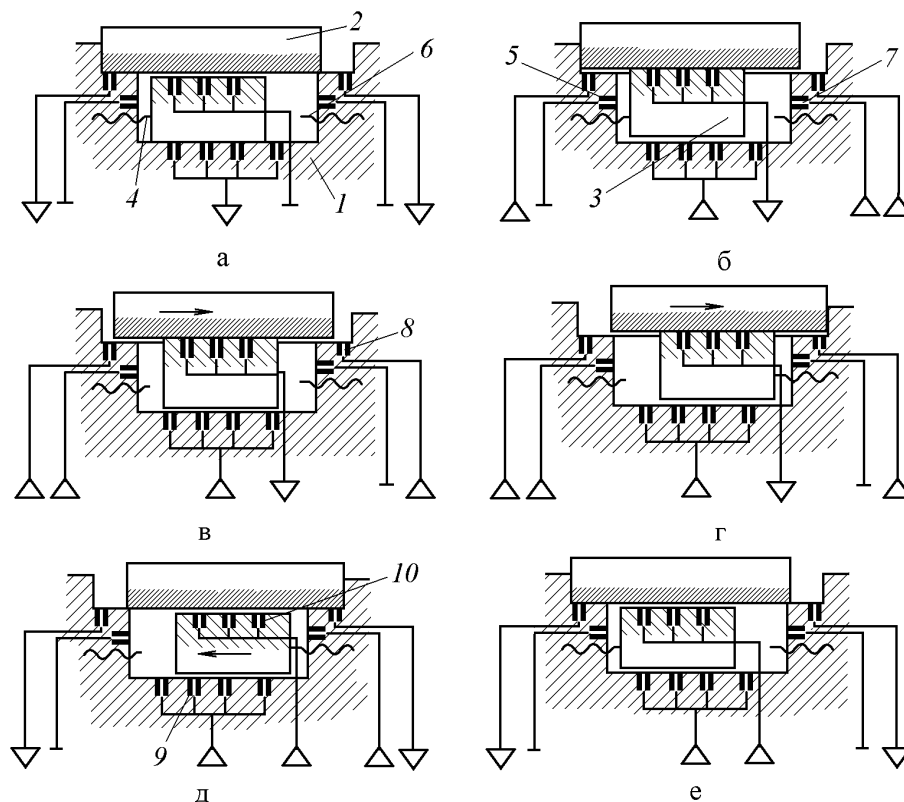


Рис. 2. Поворот подвижной части на угол заданный расположением упоров: а – исходное положение; б – совместное всплытие на воздушной прослойке поворотной части и промежуточного элемента; в – этап перемещения ПЧ между упорами; г – завершение перемещения ПЧ к противоположному упору; д – фиксация ПЧ и отсоединение промежуточного элемента от ПЧ и всплытие его на рабочих поверхностях основания; е – перемещение промежуточного элемента к упору исходного положения

Rys. 2. Obrót ruchomej części o kąt zadany położeniem zderzaków: a) położenie początkowe, b) wspólne wypłynięcie na poduszce powietrznej części obrotowej i pośredniego elementu; c) etap przemieszczenia części ruchomej między zderzakami; d) zakończenie przemieszczenia części ruchomej do przeciwnego zderzaka; e) unieruchomienie ruchomej części i odłączenie od niej pośredniego elementu i jego wypłynięcie na roboczych powierzchniach podstawy; f) przemieszczenie pośredniego elementu do zderzaka początkowego położenia

Последняя схема предусматривает поворот на любой задаваемый системой управления угол, включая и реверсивные движения. Величину требуемого угла поворота задает система управления в зависимости от команды, поступающей от устройства измерения параметра сортировки, либо от команды, определяющей требования комплектования для комплектующих устройств.

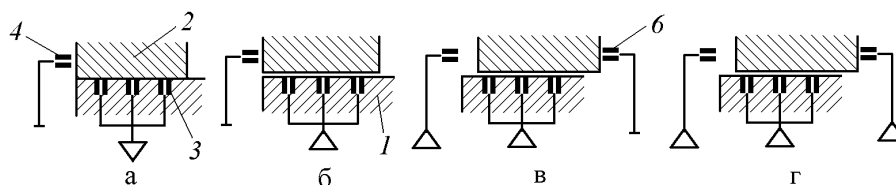


Рис. 3. Управление движением поворотной части на воздушной прослойке:
 а – исходное положение; б – всплытие на воздушной прослойке поворотной части устройства;
 в – поворот под действием турбинного привода; г – этап торможения поворотной части
 по достижению углового поворота

Rys. 3. Sterowanie ruchem obrotowej części na poduszce powietrznej: a) położenie początkowe,
 b) wypływna na poduszce powietrznej części obrotowej; c) obrót pod działaniem turbinowego napędu;
 d) etap hamowania części obrotowej po wykonaniu kątownego obrotu

Общим для рассмотренных устройств являются процессы всплытия на воздушной прослойке и углового перемещения подвижных частей. Для оценки быстродействия этих устройств авторами предложены модели динамики всплытия (фиксации) на воздушной прослойке (разрежении) подвижных масс, а также модели динамики [3] их углового перемещения под действием струй сжатого воздуха воздействующего на лопадки турбин привода.

Результаты теоретических расчетов проверены на адекватность экспериментальным исследованием специально разработанной установки с использованием скоростной видеосъемки видеокамерой VS-FAST/G06 (рис. 4). Установлено, что теоретические данные качественно хорошо согласуются с экспериментальными, а относительная погрешность расчетов с учетом принятых при выводе этих зависимостей допущений, не превышает 30 %.

Рассмотренные схемы поворотных устройств реализованы в конструкциях поворотных столов [1, 2], управление работой которых осуществляется от компьютера на базе микропроцессора AMD Sempron 3600+ через LTP-порт.

ВЫВОДЫ

Таким образом, представленные поворотные устройства позволяют реализовывать различные технологические схемы автоматической многодиапазонной сортировки крупногабаритных (массивных) деталей с повышенным быстродействием при сборке изделий по методу групповой взаимозаменяемости. Эти устройства могут также применяться при комплектовании собираемых узлов из подобных деталей.

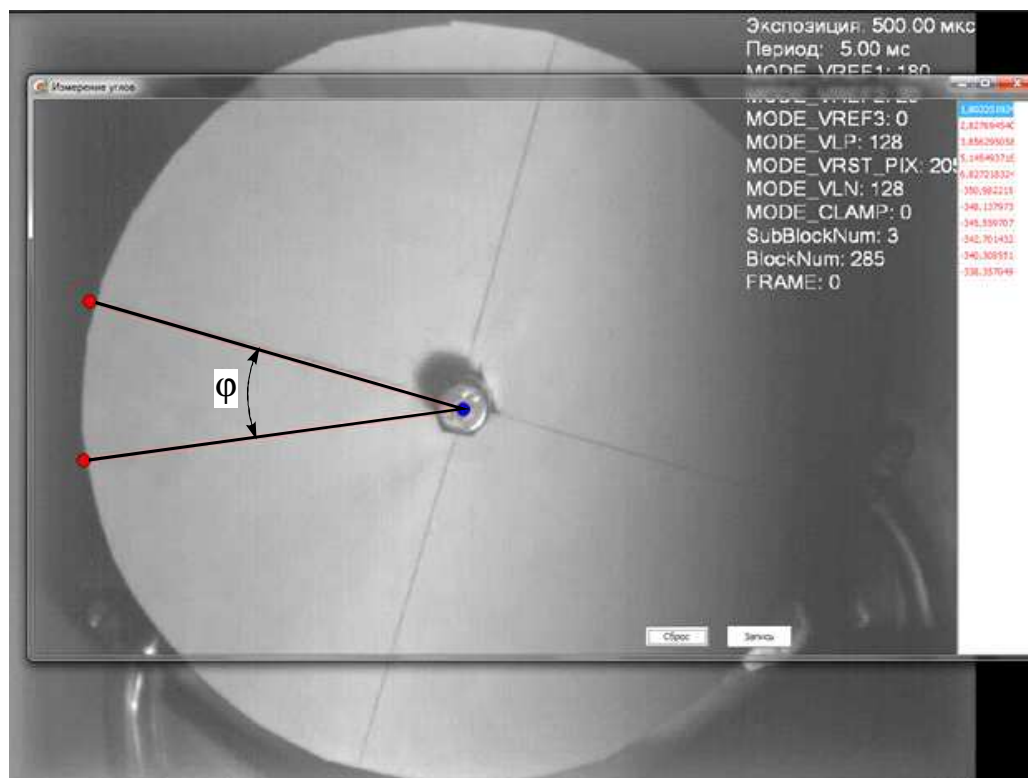


Рис. 4. Обработка результатов кадров скоростной видеосъемки

Rys. 4. Opracowanie wyników z klatki szybkiego filmowania

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2 376 123, МПК В23Q 16/10. Поворотный стол / Кристаль М.Г., Дроботов А.В., Стегачев Е.В., Астапенко А.А., Чувилин И.А. // Б.И. 2009, №35.
2. П.м. 74847 РФ, МПК В 23 Q 16/10. Поворотный стол / Кристаль М.Г., Дроботов А.В., Астапенко А.А., Стегачев Е.В., Чувилин И.А. // Б.И. 2008, № 20.
3. Особенности управления работой струйных поворотных устройств/А.В. Дроботов, М.Г. Кристаль//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. - № 3. – С. 13 — 16.

AUTOMATIC ROTATORS WITH TURBODRIVES FOR ASSEMBLY

Abstract. New constructions of rotary tables for automated assembly, picking and sorting parts. At the heart of these devices use the changes of friction between the rotating and fixed parts by introducing a layer of compressed air and a vacuum. Advantage compared to known designs is to improve performance and capacity with low structural complexity.

Robert JASTRZĘBSKI**Paweł OSÓWNIAK****Anna SZEPKA**

Centrum Badawczo-Konstrukcyjne

Obrabiarek sp. z o.o., Warszawa

Tadeusz KOWALSKI

Politechnika Warszawska

WYKRYWANIE BŁĘDÓW MONTAŻU PRECYZYJNYCH SZYBKOOBROTOWYCH WRZECION OBRABIAREK**DETECTION OF MISTAKES IN ASSEMBLY OF PRECISE QUICK-ROTARY MACHINE SPINDLES****WYBÓR METOD WYKRYWANIA BŁĘDÓW MONTAŻU WRZECION**

Mówiąc o wykrywaniu błędów montażu zakładamy, że badamy nowe wrzeciona o znanej konstrukcji, z łożyskami o znanej klasie dokładności i przetwornikami kąta obrotu o znanej dokładności pozycjonowania i rozdzielczości. Wykluczamy występowanie błędów obróbki wynikających ze zużycia maszyny lub narzędzia skrawającego - diagnozujemy tylko jakość i poprawność montażu wrzeciona w odniesieniu do mogących wystąpić problemów dokładności obróbki.

Wrzeciono jest jednym z najważniejszych zespołów obrabiarki, realizujących ruch obrotowy narzędzia lub przedmiotu. Jego łożyska decydują o dokładności położenia osi obrotu, ustaleniu elementu wirującego i przenoszą siły skrawania. Rosnące wymagania dokładności i wydajności obróbki wymuszają stosowanie coraz wyższych prędkości obrotowych przy jednoczesnym wzroście dokładności obrotu. Wymaga to zwiększania dokładności łożysk i sztywności wrzeciennika. O dokładności obróbki zaczyna coraz mocniej decydować dynamika ruchu obrotowego, a nie dokładność geometryczna, a więc metody badań wrzecion szybkoobrotowych powinny uwzględniać nie tylko dokładność geometryczną, lecz także dynamikę ruchu. Wrzeciona stają się zespołem, którego koszt jest znaczący, dlatego powinno się od razu przy badaniach odbiorczych wiedzieć, czy możliwa jest zakładana dokładność obróbki. Podstawową metodą sprawdzenia są próby obróbki. Problem pojawia się, gdy próby te nie dają oczekiwanych rezultatów. Jak ocenić, co jest przyczyną występujących błędów obróbki, które metody badań zastosować?

Znane są następujące metody badań, które można stosować do wrzecion obrabiarek:

1. Pomiary położenia wrzeciona względem innych elementów obrabiarki (równoległość, prostopadłość, współosiowość) [5]
2. Pomiary bicia osiowego i promieniowego wrzecion [5]
3. Pomiary dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi obrotowej „C” (pracującej w trybie pozycjonowania) [4] i [6]
4. Pomiary sztywności wrzeciona [10]
5. Pomiary drgań korpusów wrzecion [9]
6. Wyznaczanie dryftów temperaturowych osi wrzeciona [7]
7. Pomiary prędkości obrotowej [4]
8. Pomiary błędnych ruchów wirujących osi [3] i [8].

Nie wszystkie z wymienionych metod badań wrzecion są jednakowo przydatne, gdyż wyznaczone wskaźniki trudno powiązać z konkretnymi błędami obróbki.

Porównując możliwości wymienionych metod badań w tym zakresie można stwierdzić, że:

Ad. 1) Pierwszą z wymienionych metod można bezpośrednio zastosować, jeśli błędy dotyczą bezpośrednio nieprostopadłości, nierównoległości, niewspółosiowości w wykonaniu detali.

Ad. 2) Pomiary bicia promieniowego lub osiowego są sumą różnych błędów geometrycznych (mimośrodowości powierzchni mierzonej względem przejętego położenia osi obrotu, błędów okrągłości powierzchni pomiarowej, błędów okrągłości powierzchni ustalających położenie osi obrotu) i na ich podstawie trudno ocenić, co jest przyczyną błędów lub problemów obróbki.

Ad. 3) Jeśli występują błędy obróbki dotyczące podziału kąowego, należy wykonać pomiary dokładności pozycjonowania osi obrotowej i porównać z deklarowaną dokładnością zastosowanego przetwornika – jeśli błędy są znacznie większe, przyczyn należy szukać w błędnym montażu w zależności od konstrukcji i rodzaju błędu pozycjonowania – niewspółosiowości przetwornika i osi obrotu wyznaczonej przez łożyska, napięcia pasów przekładniowych itp.

Ad. 4) i 5) Metody te są metodami oceny właściwości maszyny i przy błędnych połączeniach montażowych lub niewyważeniu występuje problem z drganiami, jednak są to metody wtórne, pośrednie. Aby na ich podstawie ocenić problem, należy znać poziomy odniesienia,

Ad. 6) Podobnie jak dla p.4) i 5), także dla metody oceny dryftów temperaturowych, jeśli odkształcenia cieplne są wyższe niż zakładany poziom, można podejrzewać zbyt mocne napięcie wstępne łożysk, za ciasne pasowania montażowe, problem z chłodzeniem przy elektrowrzecionie.

Ad. 7) Odpowiednio zastosowana metoda pomiaru prędkości obrotowej (pomiar prędkości chwilowej, równomierności prędkości na obrót, odchyłki od prędkości nastawionej) daje ważne informacje o błędach montażu dotyczących dynamiki ruchu, mającej znaczenie przy obróbce synchronicznej lub ruchów skojarzonych – interpolowanych, błędy nadążania tu wykryte wpływają bezpośrednio na kształty obrabianych powierzchni. Przyczyn należy szukać, w zależności od konstrukcji: w różnicach rzeczywistego przełożenia względem założonego konstrukcyjnie przy napędach pasem, w zmianach chwilowych przełożenia, wynikających z bicia osi obrotowych, będącego następstwem błędów geometrycznych montażu lub nieprawidłowych naciągów pasów, ewentualnie w źle dobranych wzmocnieniach układu regulacji prędkości obrotowych. Jest to jedna z ważniejszych metod pomiaru dla błędów obróbki wynikających z dynamiki ruchu obrotowego.

Ad. 8) Ostatnia z wymienionych metod jest w mniemaniu autorów jedną z najlepszych do oceny i analizy błędów montażu wrzecion. Pozwala na ocenę błędów geometrycznych, dynamicznych i dryftów temperaturowych pracy wrzecion, dlatego też poświęcono jej największą uwagę. Wdrożono w Laboratorium CBKO metodę badań dynamiki ruchów wrzecion opracowaną przez profesora Tlustý'ego, która została uwzględniona w normie ISO 230-7:2006 [8]. Szersze zastosowanie tej metodyki umożliwił znaczny postęp w stosowanych obecnie komputerowych systemach akwizycji danych w zakresie dokładności i szybkości działania bezstykowych czujników przemieszczeń oraz rozdzielczości i szybkości działania przetworników analogowo-cyfrowych.

OPIS METODYKI POMIARÓW BŁĘDNYCH RUCHÓW WIRUJĄCYCH OSI WRZECION

Przy określaniu osi obrotu elementów wirujących można wyznaczyć obliczeniowo statyczne osie poszczególnych powierzchni walcowych jako prostą określoną przez minimum sumy kwadratów odległości punktów powierzchni walcowej od tej prostej. Reprezentuje ona wtedy teoretyczną oś obrotu dla określonej powierzchni walcowej. Natomiast oś obrotu wrzeciona określona przez osie czopów łożysk jest wyznaczana najczęściej przez różne powierzchnie walcowe. Odchyłki kształtu tych powierzchni powodują, że oś ta przyjmuje różne położenia chwilowe w zależności od pozycji kątowej i prędkości obrotowej.

Dodatkowo powstające przy obrotach siły (tarcia, niewyważenia, itp.) powodują drgania korpusu, w którym osadzone jest wrzeciono. Wskutek tego, podczas ruchu, nawet w tym samym położeniu kątowym, oś chwilowa może nie być w tym samym położeniu względem przyjętej bazy – najczęściej przedmiotu obrabianego. Chwilowe zmiany położenia osi podczas obrotu nazywane dalej błędnymi ruchami osi są trudne do wyodrębnienia, gdyż nakładają się na nie błędy geometrii (wykonania i montażu poszczególnych elementów). Mierząc bicie promieniowe mierzymy sumę różnych błędów, w tym geometrycznych, jak mimośrodowość powierzchni pomiarowej względem osi obrotu, błędy nieokrągłości powierzchni pomiaro-

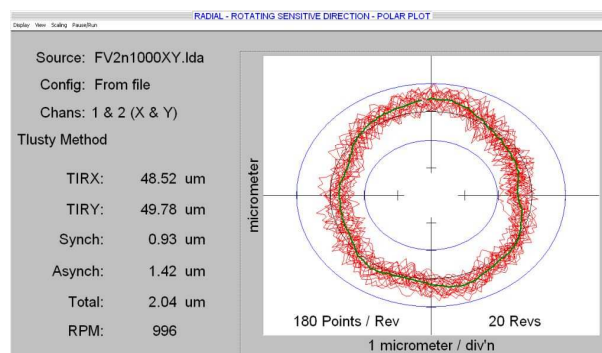
wej oraz zmiany statyczne położenia osi obrotu na kierunku pomiaru bicia, podczas ustawiania wrzeciona w różnych pozycjach kątowych.

Opisywana metodyka polega na takim sposobie pomiaru całkowitych ruchów promieniowych i osiowych wirującej osi, który eliminuje błędy geometryczne oraz pozwala na pomiar tych ruchów dla różnych prędkości obrotowych. Mierzone są całkowite przemieszczenia promieniowe i osiowe w wybranym punkcie wzdłuż osi obrotowej w trzech prostopadłych kierunkach. Pomiaru dokonuje się bezstykowymi czujnikami przemieszczeń o dużej szybkości działania, względem wirującego trzpienia wzorcowego.

Aby określić błędne ruchy osi wrzeciona w czasie obrotu, należy wyeliminować z pomiaru błędy geometryczne, których głównymi składnikami są nieokrągłość powierzchni, względem której wykonujemy pomiary i mimośrodowość tej powierzchni względem osi obrotu. Nieokrągłość powierzchni pomiarowej eliminowana jest przez stosowanie trzpieni wzorcowych o wysokiej okrągłości. Błąd okrągłości kulistej końcówki trzpienia wzorcowego, widocznej na rys. 1, wynosi 18nm, co redukuje błąd nieokrągłości powierzchni do wartości w praktyce pomijalnych. Natomiast mimośrodowość powierzchni pomiarowej względem osi obrotu jest eliminowana obliczeniowo – wynikiem pomiaru błędu mimośrodu osi powierzchni pomiarowej względem osi obrotu jest sinusoida – każda odchyłka od tej sinusoidy, pomijając błędy techniki pomiarowej, oznacza zmianę pozycji osi obrotu wrzeciona, dla danego położenia kątowego. Rys. 2 przedstawia przykładowe chwilowe położenia osi obrotu w funkcji kąta obrotu we współrzędnych biegunowych dla zadanej prędkości obrotowej (zawarte są pomiędzy okręgiem opisanym zewnętrznym i wewnętrznym względem wyznaczonego środka metodą minimum kwadratów odchyłek).



Rys. 1 Rozmieszczenie czujników pomiarowych względem trzpienia wzorcowego zamocowanego we wrzecionie



Rys. 2 Chwilowe zmiany położenia osi wrzeciona

Algorytm postępowania przy eliminacji mimośrodu i wyznaczaniu błędów ruchu osi jest następujący:

1. Z wyników wskazań czujników (X' , Y') (jako wektorów X' i Y') wyznaczany jest okrąg odpowiadający średniemu ruchowi osi wrzeciona w ten sposób, by suma kwadratów odchylen punktów od okręgu była minimalna (tzw. okrąg najmniejszych kwadratów):

$$\sum_{i=1}^N [(x'_i - x_0)^2 + (y'_i - y_0)^2 - r_0^2] = \min \quad (1)$$

gdzie:

r_0 – promień okręgu odpowiadający mimośrodowości powierzchni pomiarowej,

x_0, y_0 – współrzędne środka okręgu,

x'_i, y'_i – wyniki kolejnych pomiarów (wskazania czujników przeliczone na μm).

Współrzędne środka okręgu wynikają z ustawienia czujników i nie są błędem, lecz wyznaczają rzeczywisty środek układu współrzędnych, względem którego zostają przeliczone wyniki pomiarów.

$$X = X' - x_0 \quad Y = Y' - y_0$$

gdzie:

X' – wektor wskazań czujnika w osi x,

Y' – wektor wskazań czujnika w osi y,

X – wektor przemieszczeń osi wrzeciona w kierunku x,

Y – wektor przemieszczeń osi wrzeciona w kierunku y.

Na rys.2 środek okręgu reprezentowany jest przez środkowy okrąg. Przy bezbłędnym ruchu obrotowym wrzeciona (i braku błędów wynikających z techniki pomiarowej) wykres ruchów promieniowych osi pokrywałby się z wyliczonym okręgiem, reprezentującym mimośród powierzchni pomiarowej względem teoretycznej osi obrotu. Skalę wykresu dobiera się tak, aby uwidocznili odchyłki od tego okręgu – przy rzeczywistych pomiarach mimośród jest najczęściej znacznie większy od występujących błędów ruchów osi. Podstawą do wyznaczania promieniowych błędów ruchu osi jest kołowy wykres chwilowych odchył odległości osi wrzeciona od środka układu współrzędnych. (Warto zwrócić uwagę, że odchylenia prostopadłe do chwilowego promienia powinny być ignorowane, jako nie mające wpływu na dokładność obróbki, a zakłócające obraz przebiegu ruchów promieniowych).

2. Po określeniu środka układu współrzędnych reprezentującego teoretyczną oś obrotu, sposób wyznaczania błędnych ruchów promieniowych wirującej osi jest następujący:

Dla każdego pomiaru wyznaczana jest odległość osi wrzeciona od środka układu, mierzona wzdłuż aktualnego promienia:

$$r_{ij}(\varphi_i) = X_{ij}(\varphi_i) \cos \varphi_i + Y_{ij}(\varphi_i) \sin \varphi_i \quad (2)$$

gdzie:

$i = 1..i_{\max}$ - numer położenia kąowego w danym obrocie,

$j = 1..j_{\max}$ - numer obrotu dla ilości obrotów $j_{\max}$, φ_i - kąt obrotu wrzeciona (reprezentuje chwilowe położenie wrzeciona podczas ruchu względem przyjętego zera położenia kąowego),

$X_{ij}(\varphi_i)$ - wskazanie czujnika x w i-tym położeniu kąowym, w j-tym obrocie,

$Y_{ij}(\varphi_i)$ - wskazanie czujnika y w i-tym położeniu kąowym, w j-tym obrocie.

Wzór (2) opisuje tzw. biegunowy wykres chwilowych położen osi powierzchni pomiarowej względem wyznaczonego wg wzoru (1) środka okręgu, reprezentującego położenie „idealne” osi. Różnica promieni okręgu opisanego na tym przebiegu i okręgu wpisanego w ten przebieg, wykreślone na rys. 2 jako okrąg zewnętrzny i wewnętrzny definiowana jest jako Błąd Całkowity Ruchów poprzecznych osi (Total Error Motion). Błąd ten reprezentuje maksymalną różnicę chwilowych odchył odległości osi wrzeciona od środka układu współrzędnych zdefiniowanego w (1). Różnica promieni eliminuje mimośród. Na rys. 2 wartość tego błędu wynosi $2,04\mu\text{m}$.

3. Określenie błędu asynchronicznego. Metodyka zakłada ocenę powtarzalności chwilowych położen osi, stąd wynik jest uśredniany z co najmniej kilku obrotów. Jeśli dla każdego położenia kąowego (φ_i) obliczymy maksymalną i minimalną wartość promienia: $r_{\max}(\varphi_i)$, $r_{\min}(\varphi_i)$, otrzymamy minimalne i maksymalne odchylenia osi wrzeciona odpowiadające każdemu położeniu kąowemu. Linie poprowadzone przez zbiory tych odchył w każdym położeniu kąowym mają pewien rozrzut od $r_{\min}(\varphi_i)$ do $r_{\max}(\varphi_i)$ (Na rys. 2 widoczne jako rozrzut cienkich linii, stanowią chwilowe położenia ruchów asynchronicznych –

nie związanych z obrotami wrzeciona). Maksymalna szerokość tego rozrzutu jest definiowana jako Błąd Asynchroniczny Ruchów promieniowych osi (Asynchronous Error Motion). Można go też interpretować jako maksymalną amplitudę drgań poprzecznych wirującej osi odniesioną do położenia kąowego. Na rys. 2 wartość tego błędu wynosi $1,42\mu\text{m}$.

4. Określenie błędu synchronicznego. Jeśli dla każdego położenia kąowego (φ_i) obliczymy średnią wartość promienia $r_s(\varphi_i)$, to zbiór tych wartości określi synchroniczne (skorelowane z obrotami) przemieszczanie się osi wrzeciona. Na rys. 2 wykreślono je grubą linią. Różnica promieni okręgów opisanego i wpisanego na średniej wartości odległości osi wrzeciona od środka układu, definiowana jest jako Błąd Synchroniczny Ruchów promieniowych osi (Synchronous Error Motion). Na rys. 2 jego wartość wynosi $0,93\mu\text{m}$. Podobnie wyznaczane są błędy ruchów wzdłużnych osi.

5. Przy pomiarach błędów ruchu osi bezpośrednio mierzony jest parametr nazywany TIR (Total Indicator Reading), na podstawie którego wyznaczamy błędy ruchu. Pomocny jest on także do sumarycznej analizy dokładności i diagnostyki wrzecion. Reprezentuje maksymalne zarejestrowane przemieszczenia na kierunku ustawienia czujnika przemieszczeń. Wyznaczony parametr TIR zawiera w sobie:

- mimośród powierzchni pomiarowej względem wyliczonej osi wrzeciona;
- błędy geometryczne powierzchni pomiarowej;
- błędy ruchów osi, na kierunku pomiaru;
- przemieszczenia dynamiczne korpusu wrzeciennika wynikające z niewyważenia, sztywności, właściwości dynamicznych (częstotliwość drgań własnych);
- szумы pomiarowe.

Przy odpowiedniej analizie i znajomości niektórych składników TIR (np. stosując trzpienie wzorcowe o znanej geometrii), można uzyskać informacje o przemieszczeniach końcówki narzędzia, błędach geometrycznych oprawek, a także wykorzystać TIR do pomiaru prędkości obrotowej.

WYTYCZNE DO WYKRYWANIA BŁĘDÓW MONTAŻU WEDŁUG OPISYWANEJ METODYKI BŁĘDNYCH RUCHÓW

Wyznaczane błędy pozwalają powiązać błędy pracy wrzeciona z dokładnością obróbki oraz z problemami źródłowymi mogącymi powodować błędy obróbki. Wytyczne przedstawiono w tab.1. Jakość obrabianej powierzchni rozumiana jest najczęściej jako chropowatość.

Tabela.1. Wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki

Wyznaczane parametry ruchu wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe pracy wrzecion
Błąd synchroniczny promieniowy	Błąd okrągłości obrabianej powierzchni	Błąd okrągłości: - bieżni łożysk - obsady łożysk Błąd ustawienia obsady łożysk
Błąd asynchroniczny promieniowy	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy niektórych prędkościach	Niedostateczna sztywność lub niewyważenie, częstotliwości rezonansowe maszyny, luzy promieniowe
Błąd synchroniczny osiowy	Błąd jakości obrabianej powierzchni	Niewłaściwe napięcie wstępne łożysk, błędy ustawienia obsady łożysk
Błąd asynchroniczny osiowy	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy niektórych prędkościach	Niedostateczna sztywność lub niewyważenie, częstotliwości rezonansowe maszyny, luzy osiowe

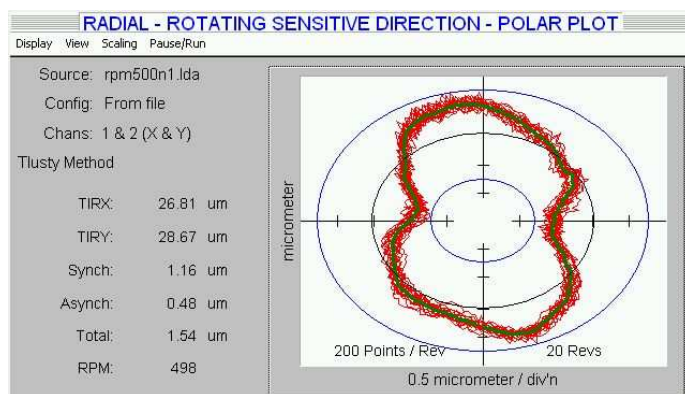
Tabela.1. cd.

Wyznaczane parametry ruchu wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe pracy wrzecion
Całkowite mierzone przemieszczenie promieniowe lub osiowe (TIR)	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni, błędy dokładności obróbki	Znaczna mimośrodowość oprawek lub szczęk uchwytów względem osi obrotu wrzecion
Znaczne zmiany całkowitego mierzonego przemieszczenia promieniowego lub osiowego (TIR) w funkcji obrotów	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni, szybsze zużycie płytek skrawających, błędy dokładności obróbki	Luzy osiowe i promieniowe w obsadach łożysk
Zmiana w czasie pozycji osi wrzeciona względem przedmiotu obrabianego	Błędy dokładności i powtarzalności obrabianych powierzchni od odkształceń cieplnych	Za duże napięcie wstępne łożysk, za ciasne pasowania łożysk, zbyt mała efektywność chłodzenia elektrowrzecion

Kierując się wymienionymi w tabeli 1 wytycznymi przedstawiono dwa przykłady wykrywania błędów wrzecion.

Przykład 1. Badania odbiorcze wrzecion

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wyniki badań dwóch wrzecion tokarek zmontowanych z tych samych komponentów – dobrze i źle zmontowanego.

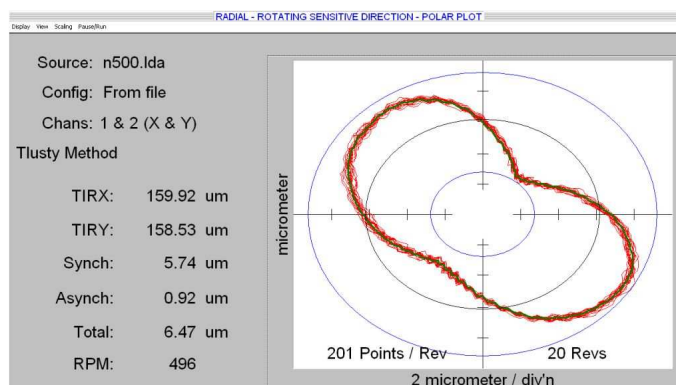


Rys. 3. Poprawnie zmontowane wrzeciono tokarki

W tokarce wg rys. 3 stwierdzono poprawność montażu i niewielkie błędy ruchów osi, spełniające wymagania WOT. Wyniki badań były podobne w całym zakresie sprawdzanych prędkości obrotowych. Z wykresu na rys.3 wynika, że błąd owalności np. wytaczanych otworów wynikający z dokładności osi obrotu wrzeciona (błąd synchroniczny) nie powinien znacznie przekraczać ok. $1\mu\text{m}$ (praktycznie wynika z błędów geometrycznych zastosowanych łożysk $\approx 1\mu\text{m}$), a uzyskiwana chropowatość powierzchni powinna być wysoka (niewielki błąd asynchroniczny). Parametr TIR wskazuje na niewielki błąd mimośrodowości szczęk uchwytu względem uśrednionej wartości na poziomie ok. $25\mu\text{m}$.

W tokarce wg rys. 4 stwierdzono około pięciokrotnie wyższy błąd synchroniczny, niż wynika z zastosowanych łożysk, co będzie powodować błąd owalności toczonych powierzchni. Jednocześnie stwierdzono znaczne bicie nowych szczęk uchwytu (TIR), co przy większych prędkościach obrotowych może powodować drgania od niewyważenia i problemy z odpowiednią chropowatością powierzchni, szyb-

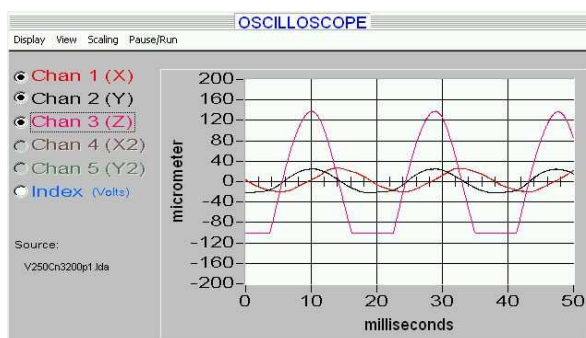
sze zużywanie płytek skrawających – występuje prawie dwukrotnie większy błąd asynchroniczny niż w przykładzie z rys.3. Prawdopodobna przyczyna zniekształcenia bieżni łożysk to owalność obsad lub błąd montażowy powodujący przekoszenie obsad łożysk (błąd wymiarowy, napięcia wstępnego).



Rys. 4. Niepoprawnie zmontowane wrzeciono tokarki

Przykład 2. Błędy jakości obróbki i wzrost drgań przy wzroście obrotów w tokarce

Próby obróbki wykazały znaczny wzrost drgań wrzeciona przy wzroście prędkości oraz znacznie szybsze zużywanie się płytek skrawających, niż wcześniej, kłopoty z utrzymaniem odpowiedniej jakości powierzchni obrabianej. Przy wolnych obrotach błędy obrotu wrzeciona były niewielkie, przy wzroście prędkości stwierdzono (max. dla prędkości ok. 3200obr/min) nawet stukrotny wzrost ruchów wzdłużnych osi wrzeciona, z 3 do ok. 300µm, z częstotliwością obrotów wrzeciona. Po analizie konstrukcji wrzeciona stwierdzono, że przyczyną wzrostu drgań wrzeciona może być luz wzdłużny na zewnętrznym pierścieniu oporowym łożyska. Pierścień odkształcił się i wgniół częściowo w miękką korpus wrzeciennika – użyto zbyt dużych sił przy montażu -powodem był błąd konstrukcyjny, podcięcie technologiczne szersze niż pierścień oporowy łożyska, co w tym przypadku spowodowało złe ułożenie się pierścienia w montażu. Błąd ujawniał się dopiero przy znacznym wzroście sił dynamicznych przewyższających masę wrzeciona i opory tarcia w obudowie, czyli przy wzroście obrotów powyżej 2000obr/min. Nie było potrzeby wymiany łożysk, wystarczyło wymienić pierścień na grubszy i odpowiednio napiąć łożyska. Na rys. 5 przedstawiono wykresy rejestrowanego parametru TIR dla n=3200obr/min (na osi Z przekroczony ustawiony zakres pomiarowy czujnika – 0,25mm).



Rys. 5. Ruch wzdłużny osi Z z częstotliwością obrotów przekraczający zakres pomiarowy czujników – objawiający się znacznymi drganiami przy obróbce

Metody pomiarów drgań korpusu nie wykrywały przyczyny powstających błędów obróbki i szybkiego zużywania się płytek skrawających, a pomiary bicia geometrycznego nie pokazywały błędów.

OPIS METODYKI POMIARÓW BŁĘDÓW ZADANEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ I WYTYCZNE DO WYKRYWANIA BŁĘDÓW MONTAŻU

Odpowiednia metoda pomiaru prędkości obrotowej jest niezbędna dla oceny błędów i zjawisk zachodzących dla niektórych rodzajów obróbki wymagających synchronizacji prędkości i ruchów interpolowanych, np:

- błędów synchronizacji prędkości (np. przy pracy z przechwytem),
- dokładności obróbki metodą skojarzonego ruchu przedmiotu i narzędzia (np. przy „toczeniu” wielokątów na tokarkach),
- błędów obróbki kształtowej skojarzonego ruchu obrotowego osi „C” wrzeciona i osi posuwowej (np. toczenie gwintów falistych).

Wyznaczane parametry to prędkość chwilowa, równomierność prędkości nastawionej, odchyłka od prędkości zadanej. Problem dokładnego pomiaru prędkości chwilowej wynika z dwóch przyczyn technicznych – wymagania bardzo dokładnego pomiaru drogi i bardzo krótkich odcinków czasu.

Przykładowo: dla 1000obr/min i tylko dla 60pkt/obr, czas pomiaru 1/60obr wynosi 1ms. Dla zachowania dokładności 0,1obr/min przy 1000obr/min czas 1/60obr. należy zmierzyć z dokładnością 0,5ns! Przy wyższych prędkościach i np. 360pkt/obr czasy zmniejszają się do pikosekund, a wymagana dokładność pomiaru będzie zachowana przy odmierzaniu także bardzo dokładnych odcinków drogi.

Rozwiązano to poprzez wprowadzenie standardowego sygnału z enkodera na wejście licznikowe karty pomiarowej taktowanej częstotliwością 80MHz i zliczaniu ilości impulsów pomiędzy kolejnymi sygnałami z enkodera o bardzo dokładnie odmierzanych odcinkach drogi. Dokładne enkodery najczęściej mają zbyt dużą rozdzielczość, odcinki czasu są przy większych prędkościach za krótkie przy dysponowanej częstotliwości 80MHz, aby zapewnić odpowiednią dokładność z pomiaru prędkości pojedynczych impulsów - konieczna jest dodatkowa obróbka sygnałów zarejestrowanych, polegająca na uśrednieniu prędkości z dowolnie wybieranej ilości kolejnych próbek. Zastosowano enkoder z pomiarem optycznym bezstykowym o 11840imp/obr, o dokładności 7” i rozdzielczości impulsów na drodze co 0,1μm dla wolnych obrotów do 50obr/min i co 20 μm dla stosowanych prędkości do 2000obr/min.

Opracowana w Laboratorium CBKO metoda [4] pozwala na ocenę średniej odchyłki prędkości od prędkości zadanej oraz ocenę równomierności prędkości. Pozwala wykryć w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego błędy montażu związane z dokładnością ustalonego przełożenia obrotów silnika na obroty wrzeciona, błędnym napięciem pasów, biciem osi wrzeciona i silnika, powodującą zmiany chwilowe przełożenia i nierównomierność prędkości, ewentualnie błędy ustawień układu regulacji prędkości. Błędy należy diagnozować w odniesieniu do rozwiązania konstrukcji napędu. Przykładowo, jeśli występuje napęd z silnika na wrzeciono pasem z przełożeniem różnym od jedności, to niewielki błąd rozstawu osi nawet o ułamki % powoduje błąd nastawy, a bicie osi wałów silnika i wrzeciona powoduje nierównomierność prędkości na obrót. W tabeli 2 przedstawiono wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki pomiarów.

Kierując się w/w wytycznymi przedstawiono 2 przykłady wykrywania błędów wrzecion.

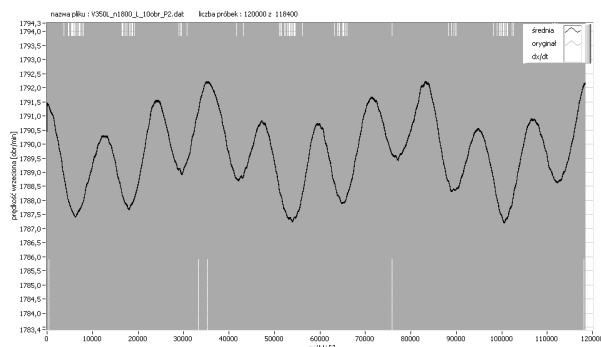
Na rys.6 przedstawiono przykład występowania wymienionych błędów dla nastawionej prędkości 1800obr/min. Występuje błąd średniej prędkości ok. 10obr/min i błąd nierównomierności prędkości ok. 5obr/min. Wykres przedstawia zmiany prędkości w czasie 10 obrotów. Główna częstotliwość zmian to częstotliwość wynikająca z obrotów. Przyczyn należy szukać w błędach rozstawu i bicia osi lub zbyt dużym napięciu pasa powodującego odkształcenia geometrii osi obrotu, ewentualnie błędów współosiowości przetwornika kąta i osi wrzeciona montowanego na jednej osi. Widoczne są także zmiany powtarzalne co ok. 3 obroty - mogą wynikać z ustawień regulatora obrotów. Błędy te przekładają się na znaczne błędy obróbki związane z synchronizacją obrotów.

Na rys. 7. przedstawiono przykład błędów nastaw prędkości przy obróbce wykorzystującej ruchy skojarzone obrotowe i posuwowe. Widoczny znaczny błąd nastawy (ok. 9%) może prowadzić do dużych błędów kształtu obrabianych powierzchni i może wynikać ze źle dobranych nastaw regulatora prędkości. Błąd nierównomierność prędkości, przy tak wolnych obrotach, może wynikać z błędów pozycjonowania zastosowanego przetwornika kąta obrotu, lub zmian oporów ruchu, które przy źle dobranych nastawach regulatorów prędkości może powodować błędy nadążania objawiające się nierównomiernością prędkości.

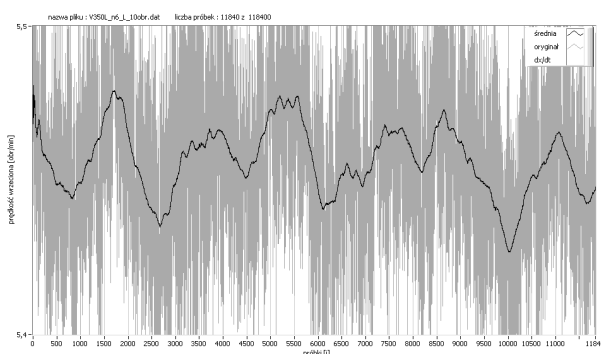
Na opisanych przykładach widać, że metoda pozwala wykrywać prawdopodobne przyczyny błędów obróbki wynikające z dokładności ruchu obrotowego i wskazuje dalszy tok postępowania dla usunięcia problemów. Np. jeśli stwierdzone błędy nierównomierności są duże, to pomiar pozycjonowania osi obrotowej powinien wyjaśnić, czy źródła błędów należy szukać w dokładności pozycjonowania, czy w nastawach układu sterowania.

Tabela.2. Wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki

Wyznaczane wskaźniki dokładności ruchu obrotowego wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe montażu wrzecion
Błąd średniej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie nastawionych obrotów	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu obrotowego przedmiotu i narzędzia	- Błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi lub średnic kół - Błąd nadążania wynikający z za niskich wzmocnień regulatora prędkości
Błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie nastawionych obrotów	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu przedmiotu i narzędzia Błędy podziału kąтового obrabianych przedmiotów przy stosowaniu obróbki z synchronizacją prędkości dwóch osi obrotowych	- Błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub osi silnika napędowego - Zbyt duże lub zbyt małe napięcie pasów przekładniowych - Błąd współosiowości przetwornika obrotów i osi wrzeciona - Zbyt mała prędkość działania układu regulacji prędkości
Błąd nastawionej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie pozycjonowania kąowego	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonych ruchów osi posuwowych i obrotowej	- Błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi lub średnic kół - Błąd nadążania wynikający z za niskich wzmocnień regulatora prędkości lub za dużych oporów ruchu
Błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie pozycjonowania kąowego	Błędy kształtu i falistość obrabianych powierzchni metodami skojarzonych ruchów osi posuwowych i obrotowej	- Zbyt duże lub zbyt małe napięcie pasów przekładniowych - Błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub osi silnika napędowego - Błędy pozycjonowania przetwornika kąta obrotu - Zmienne opory ruchu (wynikające np. z ustawionego zbyt dużego napięcia wstępnego łożysk)



Rys. 6. Wykres rzeczywistej prędkości (z 10 obrotów) dla nastawy 1800obr/min



Rys. 7. Wykres rzeczywistej prędkości (1 obrót) dla nastawy 6 obr/min

PODSUMOWANIE

- Najbardziej efektywne z punktu widzenia dokładności obróbki i analizy błędów montażu są opisane szerzej w p.2 i 4 dwie metody badań, inne wymienione metodyki mogą być stosowane jako pomocnicze do dalszej diagnostyki.
- Przedstawiona metodyka badań i oceny dokładności wirujących wrzecion, poza bezpośrednią oceną dokładności jest wyjątkowo przydatna do diagnostyki problemów związanych z pracą wrzecion, a w porównaniu z diagnostyką wibracyjną związaną z analizą drgań korpusów ułatwia wnioskowanie, gdyż uzyskiwane wyniki bezpośrednio przekładają się na wzajemne przemieszczenia przedmiotu i narzędzia. Na podstawie uzyskiwanych wyników można wnioskować o spodziewanej dokładności i jakości obróbki, przy zadanej prędkości obrotowej wrzeciona.
- Przedstawiona metoda pomiarów prędkości chwilowych uzupełnia metodę pomiarów błędnych ruchów wirujących osi pozwalając diagnozować błędy obróbki wynikające ze sterowania i regulacji obrotów oraz ich przyczyny, co jest bardzo istotne z punktu widzenia niektórych rodzajów obróbki.
- Przedstawione metodyki przeznaczone są do oceny pracy precyzyjnych wrzecion obrabiarek, ale nie wyklucza to innych podobnych zastosowań w zakresie diagnostyki ruchu obrotowego (np. stołów obrotowych lub diagnostyki innych rodzajów maszyn).

LITERATURA

1. Jastrzębski R. (2006), Metodyka badań elektrowrzeciennika zabudowanego na obrabiarce, Sprawozdanie NH/B-05-2006, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek
2. Jastrzębski R., Szepke A. (2009), Badanie wpływu wybranych czynników na dokładność i stabilność pracy elektrowrzeciennika na przykładzie centrum obróbkowego frezarskiego DIANA 1000, Sprawozdanie NH/B-01-2009, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek Sp. z o.o.
3. Jemielniak K. (2004), Analiza błędnych ruchów wrzecion szybkoobrotowych, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska, Vol. 24, Nr 2
4. Jastrzębski R., Welk A. (2006), Badanie dokładności obrabiarek sterowanych numerycznie. Badanie synchronizacji prędkości obrotowej wrzecion napędzanych silnikiem przez przekładnie pasowe we wrzeciennikach głównym i przechwytyjącym zainstalowanych w tokarce Venus 350/750, Sprawozdanie NH/B-03-2007, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek
5. PN-ISO 230-1:1998 – Przepisy badania obrabiarek. Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej
6. PN-ISO 230-2:1999 – Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie
7. ISO 230-3:2007 – Test code for machine tools – Part 3: Determination of thermal effects
8. ISO 230-7:2006 – Test code for machine tools – Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation
9. Marchelek K. (1997) Dynamika obrabiarek, WNT, Warszawa 1997
10. Wysocki P. (1998), Opracowanie metody pomiarów sztywności statycznej w oparciu o tory pomiarowe przemieszczeń liniowych, Sprawozdanie NB-30-1998, Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek
11. Cempel Cz. (1982), Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa 1982

„Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy”.

DETECTION OF MISTAKES IN ASSEMBLY OF PRECISE QUICK-ROTARY MACHINE SPINDLES

Abstract. *The increase of competitiveness of companies is possible through production of goods of higher quality and of tighter tolerances. This is related to higher demands of accuracy of technological machines, which include CNC machine tools. From a certain level of accuracy, it is not enough to use most precise parts in assembly, it is also necessary to assemble them precisely in components and to be able to evaluate the assembly quality. In machine tools, one of main components that influence machining accuracy is the spindle. In this article, presented are procedure and possible utilization of various test methods used to evaluate the spindle work, that influence the machining quality in terms of such assembly errors as accuracy of bearing rotation, backlash, errors of set rotational speed, accuracy of clamping of tool or workpiece, sources of excessive vibrations and heat induced displacement of tool or workpiece. Capabilities of various spindle test methods are compared as used for diagnostics of assembly errors. Examples are given of CNC machine tools spindle tests and detected assembly errors that are the cause of improper machining.*

Katarzyna ANTOSZ
Jerzy ŁUNARSKI
Politechnika Rzeszowska

OCENA KONKURENCYJNOŚCI SYSTEMU MASZYN TECHNOLOGICZNYCH W PROCESACH MONTAŻU

THE ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL MACHINES SYSTEM COMPETITIVE IN ASSEMBLY PROCESSES

WPROWADZENIE

Posiadany SMT powinien realizować cały portfel technologii wykorzystywanych przez organizację do wytwarzania swoich wyrobów za wyjątkiem tych technologii, którymi dysponują kooperanci będący dostawcami organizacji. SMT powinien być dobrany nie tylko pod kątem realizowanych technologii, lecz również przewidywanych zmian asortymentowych i ilościowych produkcji. Ponieważ popyt na wytwarzane wyroby może ulegać zmianom, to zmienia się również wewnętrzne zapotrzebowanie na posiadane zdolności produkcyjne powodujące ich nierównomierne obciążenie w czasie [1].

Zadanie to łatwiej jest realizować w ustabilizowanej produkcji seryjnej, a trudniej w nieustabilizowanej małoseryjnej, zmiennej asortymentowo produkcji, koniecznym jest przy tym stałe bilansowanie zdolności produkcyjnej SMT i popytu na te zdolności w postaci produkcji wyrobów potrzebnych na rynku. Trudność takiego bilansowania polega na tym, że zdolności produkcyjne są stałe a zmienia się zapotrzebowanie na te zdolności, przy czym to zapotrzebowanie może być różne na poszczególne grupy maszyn lub pojedyncze maszyny. Powoduje to, że tam gdzie zapotrzebowanie jest duże a zdolności ograniczone, pojawiają się zatory produkcyjne zwane „wąskimi gardłami” tzw. zasoby krytyczne. Istniejące w organizacji zasoby krytyczne limitują jej zdolności produkcyjne – produktywność maszyn [3].

Jeszcze jednym czynnikiem utrudniającym opracowanie metodyki oceny lub samooceny przydatności konkurencyjnej SMT są zróżnicowane sposoby grupowania poszczególnych maszyn i urządzeń w komórkach organizacyjnych takich jak: gniazda, oddziały, linie, elastyczne systemy wytwarzania, wydziały i in. Wszystkie wymienione wyżej czynniki powodują, że przeprowadzenie dokładnej oceny przydatności konkurencyjnej całego SMT jest trudne. Istnieje natomiast potrzeba dokonywania określonych ocen tej przydatności np. w trakcie przeglądów zarządzania, przeglądów strategii, technologii, konkurencyjności itp. W celu ukierunkowania procesów decyzyjnych skierowanych na doskonalenie struktury SMT dla lepszego wykorzystania tkwiących w nim potencjalnych możliwości.

MODEL OCENY KONKURENCYJNOŚCI SYSTEMU MASZYN TECHNOLOGICZNYCH

W celu umożliwienia przeprowadzenia samooceny przydatności konkurencyjnej SMT w sposób uproszczony, który byłby przydatny dla celów porównawczych i decyzyjnych, proponuje się następujący tok postępowania:

1. W pierwszym etapie oceny określić odpowiedni wskaźnik przydatności konkurencyjnej poszczególnych maszyn i urządzeń zgrupowanych w konkretnej komórce organizacyjnej w oparciu o przyjęte kryteria i zdefiniowaną skalę oceny (dla ułatwienia proponowana jest skala 1 ÷ 5, przy czym 1 oznacza słabą lub złą przydatność, a 5 – bardzo dobrą przydatność).
2. W drugim etapie dokonuje się oceny zgrupowania maszyn i urządzeń znajdujących się w określonej komórce organizacyjnej, wykorzystując ocenę poszczególnych jednostek oraz

posługując się kryteriami i skalami ocenowymi (od 1 do 5) adekwatnymi dla danej komórki i stosując odpowiednio dobrane współczynniki wagowe.

3. W trzecim etapie przeprowadza się obliczenia uśrednionej przydatności wszystkich ocenianych komórek organizacyjnych wprowadzając, w razie potrzeby, współczynniki wagowe różnicujące znaczenie dla organizacji jej szczególnie ważnych, ze względów strategicznych, komórek produkcyjnych.

Dla oceny poszczególnych maszyn lub urządzeń zgrupowanych w poszczególnych komórkach wskazanym jest przyjąć następujące kryteria ocenowe:

M 1. Przydatność serwisowa urządzenia i stopień doskonałości zorganizowanej obsługi.

M 2. Stopień zautomatyzowania urządzenia zwiększający jego wydajność.

M 3. Bezpieczeństwo pracy i bezpieczeństwo ekologiczne, które sformułowano w [4]

M 4. Stopień wyeksploatowania i postępującego zużycia

M 5. Zdolność maszyny. Szczegółowa charakterystyka kryteriów ocenowych została zaprezentowana w publikacji [6].

Etap pierwszy podsumujemy wyznaczając dla każdego urządzenia średnią wartość jego przydatności przy rozpatrywanych pięciu kryteriach (w określonych przypadkach w celu uproszczenia można wybrane kryterium pominąć). Traktując je jako równorzędne tzn. dla dowolnego urządzenia ocenę oblicza się wg wzoru:

$$PM_i = \frac{M1 + M2 + M3 + M4 + M5}{5} \quad (1)$$

gdzie: za $M1 \div M5$ podstawia się wartości punktowe dla każdego kryterium ustalone w oparciu o przytoczone skale.

Wyznaczone wartości PM_i dla poszczególnych maszyn i urządzeń wskazują na ich potencjalną przydatność w prowadzonej działalności produkcyjnej. W podobny sposób uśredniając można obliczyć potencjalną przydatność grupy urządzeń usytuowanych w rozpatrywanej komórce organizacyjnej jako:

$$GPM = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m PM_i \quad (2)$$

gdzie: m – liczba maszyn i urządzeń ocenianych w rozpatrywanej komórce organizacyjnej.

Celem drugiego etapu oceny jest wyznaczenie konkretnej przydatności (a nie potencjalnych możliwości jak w etapie poprzednim) rozpatrywanej grupy maszyn i urządzeń w istniejących warunkach funkcjonującej produkcji. W tym celu można posłużyć się dwoma kryteriami:

K 1 – kryterium kategoryzacji maszyn i urządzeń w rozpatrywanej grupie wskazujące na realnie istniejące zapotrzebowanie na jego zdolności produkcyjne [5].

Dla rozpatrywanej komórki organizacyjnej kategorię przydatności produkcyjnej rozpatrywanej grupy maszyn można obliczyć w sposób następujący:

$$GPK = \frac{n_5 \cdot 5 + n_4 \cdot 4 + n_3 \cdot 3 + n_2 \cdot 2 + n_1 \cdot 1}{m} \quad (3)$$

gdzie: n_1 – liczba maszyn i urządzeń zaliczana do kategorii 1,

n_2 – liczba maszyn zaliczonych do kategorii 2 itd.

$m = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5$ – łączna liczba maszyn i urządzeń w rozpatrywanej komórce.

K 2. Drugim kryterium oceny zespołu maszyn w rozpatrywanej komórce jest średni czas pracy wyrażony w procentach czasu dysponowanego GPC (przy przyjętej zmianowości, 1- lub 2-zmianowa praca). Obliczamy go w ten sposób, że sumujemy rzeczywiste czasy pracy poszczególnych urządzeń i dzielimy przez iloczyn czasu dysponowanego i liczby urządzeń w rozpatrywanej komórce i wyrażamy ten stosunek w procentach.

Na ostateczną ocenę przydatności grupy maszyn zlokalizowanych w rozpatrywanej komórce organizacyjnej złożą się następujące oceny cząstkowe:

- średnia ocena potencjalnych możliwości i cech sprzyjających przydatności tych maszyn GPM z wagą $W=1$,
 - średnia ocena kategoryzacji maszyn ze względu na ich możliwości i ich wykorzystywanie w bieżącej produkcji GPK z wagą $W_2 = 3$,
 - średnia ocena wykorzystania w czasie grupy maszyn przy realizacji bieżących zadań produkcyjnych GPC z wagą $W_3 = 2$.
- Wówczas ostateczna ocena przydatności i konkurencyjności OPK grupy maszyn i urządzeń usytuowanych w rozpatrywanej komórce wyniesie:

$$OPK = \frac{GPK \cdot 3 + GPC \cdot 2 + GPM}{6} \quad (4)$$

Obliczona wg powyższej zależności wartość OPK może się znajdować w przedziale wartości od 1 (zły i słabo przystosowany SMT do potrzeb konkurencyjności) do 5 (optymalnie przystosowany system do potrzeb konkurencyjności). Ocena ta uwzględnia nie tylko cechy poszczególnych maszyn i urządzeń, lecz również umiejętności i kompetencje organizacji w racjonalnym wykorzystywaniu tego SMT do potrzeb produkcyjnych.

Trzeci i ostatni etap oceny polega na obliczeniu wartości OPK w poszczególnych komórkach produkcyjnych i obliczenie wartości uśrednionej. Jeśli poszczególne komórki są w przybliżeniu równorzędne, może to być średnia arytmetyczna. Jeśli natomiast niektóre komórki spełniają szczególnie ważną rolę, to ich wartość OPK można pomnożyć przez odpowiednio dobrany współczynnik wagowy ($w = 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$), zaś obliczoną średnią podzielić przez sumę użytych współczynników wagowych, aby ostateczny wynik mieścił się w przedziale wartości od 1 do 5.

W przybliżeniu można przyjąć, że gdy obliczone wartości przytoczonych wskaźników (GPM, GPC, GPK i OPK) mieszczą się w przedziale wartości 1 – 2,5, to wskazuje to na brak cech konkurencyjności SMT lub też brak umiejętności jego właściwego wykorzystania (projektowanie wyrobu, planowanie produkcji, organizacja obsługi, marketing i in.). Wartości tych wskaźników w przedziale 2,5 – 3,5 wskazują na średnią konkurencyjność posiadanego SMT oraz średnie umiejętności i kompetencje personelu przy jego użytkowaniu. Natomiast wartości tych wskaźników w przedziale 3,5 – 5,0 wskazują na dużą konkurencyjność organizacji, umiejętnie wykorzystującej swój SMT przez zapewnienie zgodności wyrobów ze strukturą SMT, właściwą obsługą i odnowę oraz racjonalne planowanie zadań realizowanych w SMT. Na rys. 1 przedstawiono algorytm postępowania przy ocenie parku maszyn technologicznych z wykorzystaniem modelu oceny przydatności konkurencyjnej.

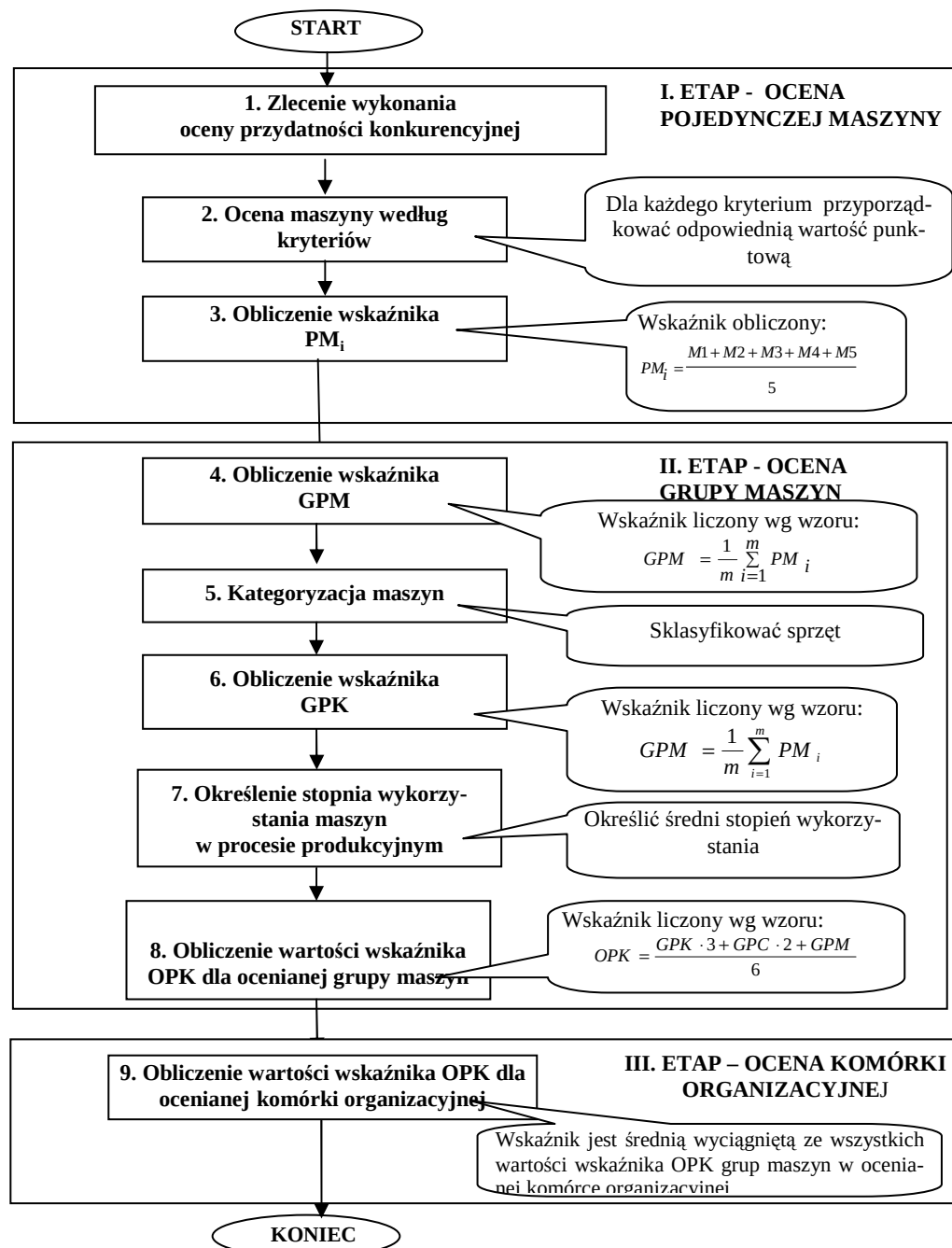
WERYFIKACJA PRZEMYSŁOWA OPRACOWANEGO MODELU

Weryfikacji modelu oceny przydatności konkurencyjnej parku maszyn technologicznych dokonano dla pięciu wybranych losowo liniach produkcyjnych przedsiębiorstwa, w którym prowadzone były działania wdrożeniowe w zakresie metody wartościowania procesowego. Na ocenianych liniach produkcyjnych wytwarzane były części składowe wyrobu finalnego.

Przy przeprowadzaniu oceny uczestniczył mistrz linii oraz operator poszczególnej obrabiarki, a jej wyniki posłużyły do oceny przydatności konkurencyjnej grupy maszyn.

Średni stopień wykorzystania grupy maszyn w rozpatrywanej komórce oszacowany został na podstawie informacji dotyczących planowanego obciążenia maszyn oraz ich rzeczywistego wykorzystania w procesie produkcyjnym.

W tab. 1 przedstawione zostały wyniki z przeprowadzonych ocen przydatności konkurencyjnej dla wybranej linii produkcyjnej. W tabeli umieszczone zostały następujące kryteria ocenowe: przydatność serwisowa, stopień zautomatyzowania, bezpieczeństwo pracy i ekologia, stopień wyeksploatowania, współczynnik zdatności oraz ich wartości punktowe dla każdej maszyny z linii uzyskane w trakcie badań, jak również ich wartości średnie dla ocenianej grup maszyn.



Rys. 1. Model oceny przydatności konkurencyjnej – algorytm postępowania

Ponadto dla każdego stanowiska przedstawiono wartość wskaźnika PM. W dolnej części tabeli umieszczone zostały obliczone wartości pozostałych wskaźników: GPK, GPC, GPM. W prawnym dolnym rogu przedstawiono wartość miernika OPK dla rozpatrywanej linii produkcyjnej.

Tab. 1. Wskaźniki przydatności konkurencyjnej dla wybranej linii produkcyjnej.

Kryteria	Maszyna																	Wartość średnia
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Przydatność serwisowa	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	5	5	5	4	4,29
Stopień automatyzacji	1	4	4	4	4	1	3	1	1	4	4	1	4	4	4	4	1	2,88
Bezpieczeństwo pracy i ekologia	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	n/d	5	4	5	5	4,81
Stopień wyeksploatowania	1	1	1	1	2	1	1	2	1	5	5	1	n/d	5	5	5	1	2,38
Współczynnik zużycia	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
PM	2,75	3,5	3,5	3,5	3,75	2,75	3,25	3	2,75	4,75	4,25	2,5	4,5	4,75	4,5	4,75	2,75	
Wartości wskaźników																		
GPM	3,54	GPC				4,35		GPK			3,0			OPK				3,54

Wszystkie oceniana linia osiągnęły wartość wskaźnika OPK z najwyższego przedziału wartości. Najniższą wartość wskaźnika uzyskano w przypadku linii piątej i wyniósł on 3,54, a najwyższy był w przypadku linii pierwszej i osiągnął poziom 4,07. Taki przedział wartości wskaźnika świadczy o dużej konkurencyjności ocenianego parku maszyn technologicznych. Niemniej jednak nie jest to wartość maksymalna, możliwa do osiągnięcia, dlatego warto byłoby przeanalizować wartości poszczególnych mierników częstotliwości dla całej linii produkcyjnej (GPM, GPK, GPC). Ponadto istotnym elementem analizy powinna być prześledzenie kształtowania się wartości przy poszczególnych kryteriach ocenowych. Przykładowo w przypadku linii 5 bardzo niską średnią wartość uzyskano przy kryterium stopień wyeksploatowania – 2,38, co świadczy, że w procesie produkcyjnym wykorzystywane są maszyny przestarzałe, w których okres amortyzacji został wykorzystany, w 100%, czego efektem mogą być nagłe zmiany ich stanu technicznego, a w rezultacie nieplanowane przestoje, nieoczekiwane zmiany parametrów obróbki oraz związane z tym straty produkcyjne. W takim przypadku należałoby się zastanowić nad możliwością wymiany poszczególnych maszyn na nowsze lub przeprowadzeniu na wybranych z nich prac remontowych połączonych z modernizacją. Niską wartością wskaźnika na tej linii charakteryzuje się stopień zautomatyzowania – osiąga wartość 2,88. W przypadku tego kryterium należałoby przeanalizować rodzaj wykonywanych prac na poszczególnych stanowiskach roboczych, co ułatwiłoby identyfikację możliwości wymiany wykorzystywanych maszyn na bardziej zautomatyzowane. Pozostałe kryteria uzyskały bardzo wysokie oceny powyżej 4.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzenie weryfikacji przemysłowej opracowanego modelu oceny przydatności konkurencyjnej miało na celu uzyskania dwóch typów informacji. Po pierwsze przydatności oraz możliwości wykorzystania zaprezentowanego modelu w warunkach produkcyjnych. Po drugie natomiast czy uzyskiwane informacje dają podstawę do dalszego doskonalenia procesu zarządzania systemem maszyn technologicznych w przedsiębiorstwie. Na podstawie przedstawionych wyników oraz doświadczeń zdobytych w trakcie prowadzonych badań oceniono bardzo wysoką przydatność opracowanego modelu, czego dowodem jest:

– Akceptacja oraz bardzo wysoka ocena ze względu, na jakość oraz ilość uzyskiwanych informacji ze strony kierowników oraz menedżerów poszczególnych komórek organizacyjnych, czego dowodem jest

propozycja powszechnego wykorzystania opracowanego modelu jako jednego z narzędzi benchmarkingu wewnętrznego,

– Uznanie ze strony osób wypełniających ankietę, którzy podkreślali jej prosty i czytelny sposób, co nie sprawiało im trudności w jej realizacji oraz nie było pracą zbyt czasochłonną,

Ponadto zaprezentowane sklasyfikowanie sprzętu ma ogromne znaczenie przy organizacji odpowiedniego procesu nadzorowania szczególnie w realizacji procesu usuwania awarii, oraz planowania działań prewencyjnych (przeglądy, okresowe kontrole wybranych parametrów eksploatacyjnych) Te elementy systemu obsługi i nadzoru będą miały zastosowanie do wszystkich grup maszyn, w pierwszej jednak kolejności dla maszyn kategorii pierwszej i drugiej.

Zastosowanie takiego podejścia pozwoli na wyeliminowanie dwóch przyczyn nieefektywności funkcjonowania obszaru działalności remontowej w przedsiębiorstwach, a mianowicie różnorodność procedur służb utrzymania ruchu w odniesieniu do podobnych lub identycznych maszyn i urządzeń, jak również wykonywanie przez Służby Utrzymania Ruchu niepotrzebnych prac oraz wykorzystywanie zbyt konserwatywnych metod.

W przedsiębiorstwach o specyficznych cechach parku maszyn technologicznych możliwe jest wprowadzenie odmiennych kryteriów od proponowanych lub odmienne scharakteryzowanie pięciostopniowych skal ocenowych w celu uwzględnienia uzyskania wyników wiarygodnych dla tej organizacji. Ponadto przy poszczególnych wskaźnikach możliwe jest wprowadzenie współczynników wagowych uwzględniających aktualne lub też wynikające ze strategicznych założeń rozwojowych priorytety organizacji.

Zaprezentowany model oceny przydatności konkurencyjnej przedsiębiorstwa jest narzędziem przydatnym zarówno w małych, średnich jak również dużych przedsiębiorstwach.

LITERATURA

1. Downarowicz O.: System eksploatacji . Zarządzanie zasobami techniki. ITE radom, Gdańsk – Radom, 2000.
2. Kaźmierczak J.: Eksploatacja systemów technicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000.
3. Łunarski J., Antosz K.: Niektóre problemy polepszania efektywności eksploatacyjnej systemu maszyn technologicznych (SMT). Materiały. Konferencyjne – Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych., Radom – Stare Jabłonki, 2005.
4. Łunarski J., Antosz K.: Ecological, technical, and organizational aspects of machine tools repair and modernization, Acta Mechanica Slovaca. Koszyce 2002.
5. Łunarski J., Antosz K.: Operation of system automatized technological machinery with quantification price input, , Acta Mechanica Slovaca, 2-A/2006, Ročník 10.
6. Łunarski J., Antosz K.: Uproszczony model oceny przydatności konkurencyjnej maszyn technologicznych , TiAM 3/2007.

THE ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL MACHINES SYSTEM COMPETITIVE IN ASSEMBLY PROCESSES

Abstract. *In this work the model of the technological machines system assessment is presented. This model was elaborated in Department of Manufacturing Processes and Production Organization of the Technical University in Rzeszów. Self - assessment concerns systems three levels of the technological machines system: a single machine, the group of machines (production line) and an organization cell. Presented model was verified in the company.*

III
PROBLEMY PROJEKTOWANIA
I MONTAŻU POŁĄCZEŃ

Mariusz KŁONICA
Józef KUCZMASZEWSKI
Politechnika Lubelska
Lublin

BADANIA PORÓWNAWCZE WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE ZAKŁADKOWYCH POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH PO OCZYSZCZANIU MECHANICZNYM I OZONOWANIU

COMPARATIVE RESEARCHES OF SHEARING STRENGTH OF SINGLE-LAP ADHESIVE BONDED JOINTS AFTER MECHANICAL CLEANING AND OZONIZATION

WSTĘP

Rozwój klejenia konstrukcyjnego znacznie przyspieszył kilkadziesiąt lat temu, wraz z opracowaniem tzw. klejów wzmocnionych lub klejów konstrukcyjnych, choć oczywiście klejenie jest znane od wieków i jest uważane za jedną z najstarszych technik łączenia. Ze względu na ciągły rozwój inżynierii materiałowej oraz inżynierii powierzchni [1] zagadnienie klejenia konstrukcyjnego jest nadal aktualne i stawiane ciągle przed nowymi problemami [9, 10, 12-14]. Połączenia klejowe są aktualnie bardzo często stosowane w budowie maszyn, przede wszystkim jako połączenia nierozłączne, choć znane są także połączenia klejowe, zwłaszcza w elektronice, o podwyższonej elastyczności, które mogą być traktowane jako rozłączne. Połączenia adhezyjne wykorzystuje się ze względu na możliwość łączenia materiałów o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych, możliwość jednoczesnego łączenia i uszczelniania konstrukcji, dobrych właściwości tłumiących kleju, możliwości łączenia elementów o bardzo małych i bardzo dużych rozmiarach a także zróżnicowanych cechach geometrycznych.

Bardzo ważny i aktualny jest aspekt ochrony środowiska w przygotowaniu materiałów konstrukcyjnych dla technologii gdzie dominujące znaczenie odgrywa zjawisko adhezji. Obecnie stosowane w przemyśle metody przygotowania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych dla „technologii adhezyjnych” wykorzystują w dużej mierze kąpiele o odczynie kwaśnym lub zasadowym, co negatywnie wpływa na stan środowiska naturalnego [15]. Olbrzymi problem stanowią związki chemiczne zużyte podczas procesu klejenia oraz sposób ich utylizacji. Nowoczesna produkcja wymaga stosowania innowacyjnych rozwiązań w całym procesie powstawania produktu począwszy od projektowania a skończywszy na technologii wykonania ze szczególnym uwzględnieniem ochrony środowiska.

Stosunkowo niewiele publikacji poświęcono zagadnieniom wytrzymałości zmęczeniowej oraz wytrzymałości długotrwałej konstrukcyjnych połączeń klejowych [3, 4]. Z przeprowadzonych badań [7, 8] wynika, że modyfikacja warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych w atmosferze ozonu [6] wpływa na wzrost składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej [2], co może mieć znaczenie w konstituowaniu wytrzymałość długotrwałej połączeń klejowych.

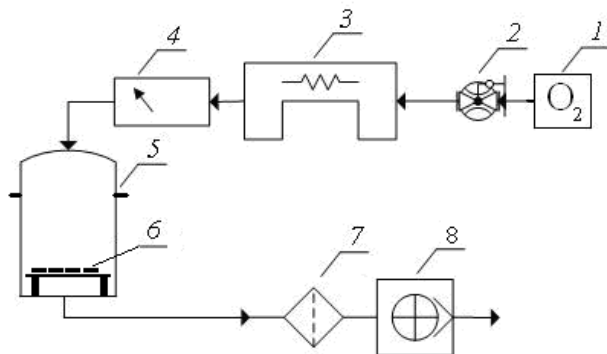
Celem prowadzonych badań jest porównanie wytrzymałości statycznej zakładkowych połączeń klejowych, wykonanych z jednego materiału, bez ozonowania i po ozonowaniu. Wiemy z relacjonowanych w [7, 8] naszych badań, że ozonowanie zwiększa wartość swobodnej energii powierzchniowej, nie jest to jednak warunek wystarczający do stwierdzenia, że spowoduje to wzrost wytrzymałości. Zależy to również od tego jak „wysokoenergetyczne” tlenki na powierzchni po ozonowaniu są silnie związane z podłożem.

STANOWISKO BADAWCZE

Do pomiarów kąta zwilżania na badanej powierzchni stopu aluminium oraz do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej użyto goniometru PGX wraz z oprogramowaniem. Zastosowane ciecze do pomiarów kąta zwilżania były наносzone na badaną powierzchnię w sposób automatyczny, w postaci kropli

o stałej objętości 4 μl , przez mechanizm goniometru. Pomiary odbywały się na płycie pomiarowej po uprzednim sprawdzeniu poziomu za pomocą poziomicy optycznej, w temperaturze otoczenia wynoszącej (20-22) $^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej (35 – 42)%.

Do pomiaru chropowatości zastosowano profilografometr firmy Taylor Hobson Surtronic3+.



Rys. 1 . Schemat stanowiska do ozonowania: 1 – koncentrator tlenu, 2 – przepływomierz z regulacją, 3 – generator ozonu, 4 – miernik stężenia ozonu, 5 – komora reakcyjna, 6 – próbki poddawane modyfikacji warstwy wierzchniej, 7 – destruktor ozonu, 8 – pompa ssąca

Na rysunku 1 schematycznie przedstawiono stanowisko laboratoryjne [11] do syntezy ozonu i modyfikacji warstwy wierzchniej badanych próbek. Badane próbki umieszczone były w szklanej komorze reakcyjnej (5).

Przepływ ozonu podczas ozonowania próbek wynosił 0,90 dm^3/min . Do pomiaru stężenia ozonu użyto miernika ozonu Ozone ANALYZER BMT 964.

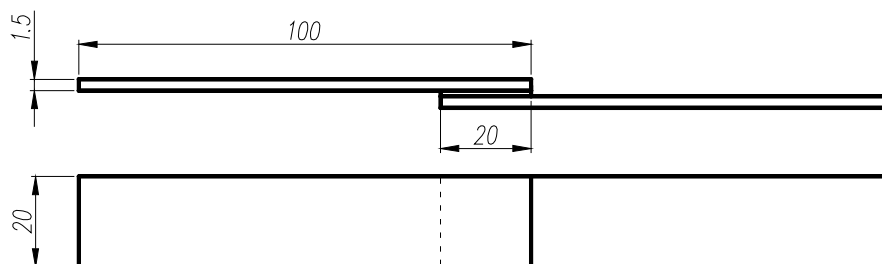
Badania wytrzymałościowe na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z 100. Siła wstępna obciążająca badane połączenia klejowe wynosiła 400 N, prędkość jej ustawienia 40 mm/min, natomiast prędkość odkształcenia podczas próby niszczącej wynosiła 5 mm/min.

METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były próbki wykonane jako jednozakładkowe połączenie klejowe blach ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6). Wymiary geometryczne próbek oraz połączenia klejowego wynosiły: długość łączonych elementów $l=100$ mm, szerokość $b=20$ mm, grubość łączonych blach $g_b=1,5$ mm, grubość warstwy kleju $g_k=0,1$ mm oraz długość zakładki spoiny klejowej $l_z=20$ mm. Graniczną długość zakładki połączenia klejowego przyjęto na podstawie zależności przedstawionej w literaturze [3,4,9]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat jednozakładkowego połączenia klejowego.

W badaniach wykorzystano klej Epidian 57 utwardzony trietylenotetraaminą (utwardzaczem Z1) w temperaturze otoczenia wynoszącej 18 - 20 $^{\circ}\text{C}$, przy wilgotności względnej (35 – 42)%. Czas utwardzania ustalono na poziomie 72 godzin.

Badania przeprowadzono w trzech seriach. W pierwszej serii jako sposób przygotowania powierzchni badanych próbek zastosowano czyszczenie chemiczne środkiem odtłuszczającym Loctite 7063. Dla drugiej i trzeciej serii również użyto Loctite 7063 przed aktywowaniem energetycznym warstwy wierzchniej w atmosferze ozonu. Dla drugiej serii badanych próbek stężenie ozonu wynosiło 2 g/m^3 , natomiast dla trzeciej serii stężenie ozonu wynosiło 12 g/m^3 . Czas ekspozycji próbek w komorze reakcyjnej był stały i wynosił 0,25h.



Rys. 2. Próbką jednozakładkowa – schemat połączenia klejowego

Przed przystąpieniem do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej oraz wykonania połączenia klejowego, dokonano pomiarów chropowatości badanych próbek. Długość odcinka elementarnego przyjęto wg tabeli [5] na poziomie $L_c = 0,8\text{mm}$.

Wartości swobodnej energii powierzchniowej, wyznaczono na podstawie pomiarów wartości kąta zwilżania cieczami pomiarowymi: wodą destylowaną i diiodometanem. Jest to najczęściej spotykany w literaturze [2, 6, 15] sposób wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej dla materiałów konstrukcyjnych. Jedną z metod, która wykorzystuje pomiar kąta zwilżania cieczami pomiarowymi jest metoda Owensa – Wendta w której przyjęto, że swobodna energia powierzchniowa jest sumą dwóch składowych: dyspersyjnej i polarnej. Przyjęto następujące wartości swobodnych energii powierzchniowych cieczy pomiarowych oraz ich składowych polarnej i dyspersyjnej: swobodna energia powierzchniowa wody $\gamma_w = 72,8 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody $\gamma_w^p = 51,0 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody $\gamma_w^d = 21,8 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, swobodna energia powierzchniowa diiodometanu $\gamma_d = 50,8 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu $\gamma_d^p = 2,3 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$, składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu $\gamma_d^d = 48,5 \text{ [mJ/m}^2\text{]}$ [8, 9, 18, 21]. Pomiar kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną jak i diiodometanem był wykonany minimum dziesięć razy na każdej z badanych próbek.

Badania wytrzymałościowe na ścinanie połączeń klejowych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z 100, zgodnie z normą PN-69/C-89300.

WYNIKI BADAŃ

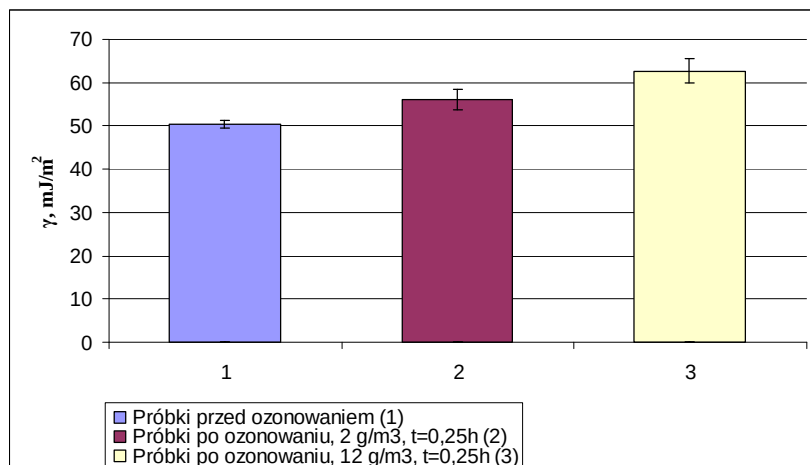
W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości dla próbek wykonanych ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6). Dla każdej serii badań analizowano po siedem próbek.

Tabela 1. Chropowatość powierzchni badanych próbek wykonanych ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6)

Nr próbki	Ra	Rq	Rz	Rt	Ry	Sm
1	0,61	0,87	4,00	6,77	6,60	83,67
2	0,63	0,85	4,33	5,93	5,93	85,00
3	0,50	0,63	3,47	4,60	4,30	77,00
4	0,53	0,69	3,60	4,47	4,23	68,00
5	0,65	0,83	4,00	5,07	5,07	89,00
6	0,59	0,79	4,00	5,93	5,73	78,67
7	0,54	0,75	4,00	6,30	6,07	71,33

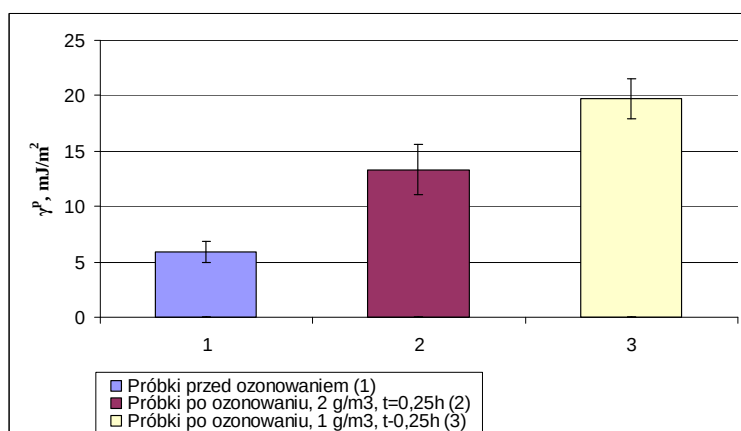
Badane próbki przed pomiarem chropowatości były poddane obróbce mechanicznej – „szorstkowaniu” za pomocą narzędzia nasypowego o ziarnistości P320 w celu usunięcia warstwy fizysorpcyjnej i istniejących tlenków oraz nadania chropowatości struktury nie ukierunkowanej. W każdej serii badań analizowano po siedem próbek. Wyniki przedstawione w tabeli 1 wskazują na dużą powtarzalność cech geometrycznych powierzchni po obróbce ścierniej.

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ stężenia ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6) w komorze reakcyjnej.



Rys. 3. Wpływ stężenia ozonu na wartość swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6) przy stałym czasie ozonowania (0,25h)

Na rysunku 4 przedstawiono wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej (SEP) po ozonowaniu stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6).

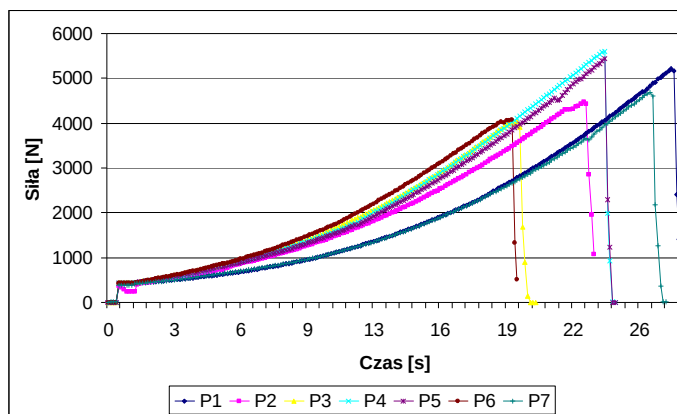


Rys. 4. Wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej po ozonowaniu stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6)

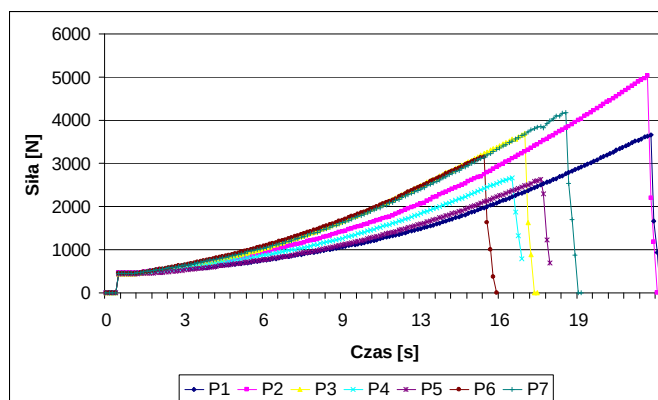
Składowa polarna SEP może mieć duże znaczenie w konstituowaniu wytrzymałości długotrwałej konstrukcyjnych połączeń klejowych. Składowa ta, można przypuszczać, sprzyja powstawaniu wiązań chemicznych pomiędzy klejem i podłożem. W drugiej serii badań zaobserwowano ponad dwukrotny wzrost wartości składowej polarnej, a w trzeciej serii ponad trzykrotny wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej badanych próbek ze stopu EN-AW-2017A.

Na rysunku 5 i 6 przedstawiono przykładowe przebiegi sił niszczących jednozakładowe połączenie klejowe w funkcji czasu do zniszczenia. Połączenie zakładkowe wykonano z blachy poddanych oczyszczaniu chemicznemu środkiem odtłuszczającym Loctite 7063 przed aktywowaniem energetycznym warstwy wierzchniej w atmosferze ozonu.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi sił niszczących jednozakładowe połączenie klejowe w funkcji czasu do zniszczenia. Próbkę użytą do wykonania połączenia zakładkowego zostały poddane ozonowaniu o stężeniu ozonu 12 g/m^3 w czasie 0,25h.



Rys. 5. Przebiegi sił niszczących jednozakładowych połączeń klejowych – próbki przed ozonowaniem



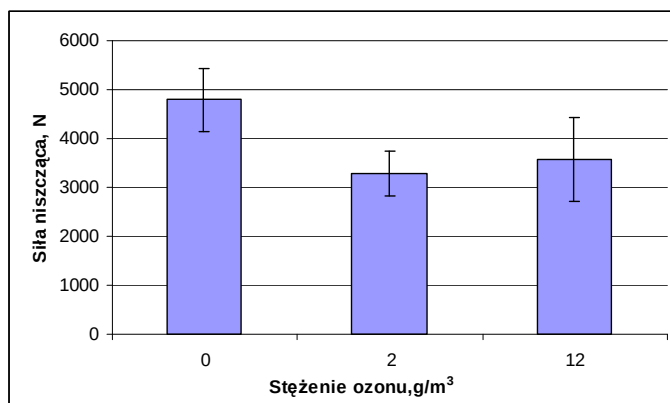
Rys. 6. Przebiegi sił niszczących jednozakładowych połączeń klejowych – próbki po ozonowaniu w stężeniu ozonu 12 g/m^3 w czasie 0,25h

W tabeli 2 przedstawiono uśrednione wartości sił niszczących uzyskanych w badaniach eksperymentalnych oraz wartości odchylenia standardowego. Jednozakładowe połączenia wykonano z blachy ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6) przed i po ozonowaniu. Czas ozonowania wynosił 0,25h.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć spadek wartości siły niszczącej próbki po ozonowaniu w stosunku do próbek przed ozonowaniem. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 2. Wartość siły niszczącej uzyskanej w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stopu aluminium EN-AW-2017A (PA6)

	Przed ozonowaniem	Po ozonowaniu - 2g/m ³	Po ozonowaniu - 12g/m ³
Wartość siły niszczącej [N]	4790	3293	3570
Odchylenie standardowe	637	462	856



Rys. 7. Wartości sił niszczących jednozakładkowych połączeń klejowych

Wydłużenie czasu ozonowania nie powodowało dalszego spadku wytrzymałości, wprost przeciwnie zaobserwowano trend wzrostowy, zwiększyła się także wartość odchylenia standardowego. Jest to interesująca obserwacja, wymaga jednak bliższego rozpoznania zmian zachodzących w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej, a zwłaszcza topografii powierzchni.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ich wyników można sformułować następujące wnioski o charakterze ogólnym.

1. Stopy aluminium to bardzo ważna grupa materiałów konstrukcyjnych, stosowanych zwłaszcza w przemyśle samochodowym, lotniczym i kosmicznym, budownictwie i innych, aktywowanie energetyczne warstwy wierzchniej tych materiałów w atmosferze ozonu może być alternatywą dla stosowanych obecnie metod chemicznych, zwłaszcza jeżeli funkcją celu jest podniesienie wartości swobodnej energii powierzchniowej.

2. Znaczny przyrost wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stopu EN-AW-2017A (PA6) uzyskano stosując wyższe stężenie ozonu, przy tym samym czasie ekspozycji, wskazuje to na możliwość skracania tej operacji.

3. Szczególnie istotnym efektem ozonowania jest znaczący wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, może to mieć istotne znaczenie w konstytuowaniu wytrzymałości długotrwałej konstrukcji połączeń klejowych.

4. Po przeprowadzonych badaniach niszczących jednozakładkowe połączenie klejowe zauważono spadek wartości siły niszczącej, może to być spowodowane powstaniem tlenków słabo związanych z podłożem.

5. Ozonowanie może być proekologiczną technologią wykorzystywaną w przemyśle, wszędzie tam gdzie adhezja odgrywa ważną rolę, jednak zastosowanie tej metody w przemyśle musi być poparte dalszymi badaniami, zwłaszcza w zakresie właściwości fizykochemicznych i cech geometrycznych warstwy wierzchniej poddanych ozonowaniu materiałów.

LITERATURA

1. Blicharski M. Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009. ISBN 978-83-204-3421-7.
2. Cataldo Franco: Stability of polyynes in air and their degradation by ozonolysis. *Polymer Degradation and Stability* 91 (2006) 317 – 323.
3. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
4. Godzimirski Jan, Komorek Andrzej: Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny* nr 12/2008, s. 40 – 44.
5. Humienny Z. (red.): Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych. Oficyna wydawnicza PW, 2001, s. 540.
6. Jańczuk Bronisław, Białopiotrowicz Tomasz.: Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów. *Polimery*. 32 (1987) 269-271.
7. Kłonica Mariusz, Kuczmazewski Józef: Analiza energetyczna warstwy wierzchniej po ozonowaniu materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym. Inżynieria powierzchni. Wybrane zagadnienia. Monografie, Studia, Rozprawy M17 pod redakcją Bogdana Antoszewskiego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2011 PL ISSN 1897-2691, s. 171-180.
8. Kłonica Mariusz, Kuczmazewski Józef, Ozonek Janusz: Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu. *Inżynieria materiałowa*. Nr 5 (171) 2009 s. 396-399.
9. Kuczmazewski J.: Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
10. Majda Paweł: Metoda elementów skończonych w analizie zakładkowych połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny* nr 1/2008, s. 14 – 19.
11. Ozonek J., Fijałkowski S.: Energetyczne i procesowe aspekty produkcji i zastosowań ozonu w technice., Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2007.
12. Rams Beata: Zastosowanie klejenia w połączeniach zgrzewanych metodą FSW. *Przegląd Spawalniczy* nr 3/209, s. 33 – 38.
13. Rudawska A., Kuczmazewski J.: Klejenie blach ocynkowanych. Monografia. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 2005.
14. Rudawska Anna, Dębski Hubert: Modelowanie procesu zniszczenia spoiny klejowej w jednozakładkowym połączeniu klejowym blach aluminiowych. *Mechanik* nr 2/2010, s. 118 – 121.
15. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

Badania realizowane w ramach Projektu "Wykorzystanie ozonowania jako ekologicznej metody modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych", Nr 2965/B/T02201039.

COMPARATIVE RESEARCHES OF SHEARING STRENGTH OF SINGLE-LAP ADHESIVE BONDED JOINTS AFTER MECHANICAL CLEANING AND OZONIZATION

Abstract. *The article presents results of comparative research of shearing strength of aluminum alloys single-lap adhesive bonded joints. Application in aerospace industry was the main criterion of material selection. Results of static shearing strength of single-lap adhesive bonded joints for different variations of material preparing (mechanical cleaning and ozonization) were analyzed. The paper ends with conclusions.*

Anna RUDAWSKA
Michał BŁAZIAK
Politechnika Lubelska
Lublin

ANALIZA PORÓWNAWCZA SIŁY NISZCZĄCEJ POŁĄCZENIA KLEJOWE, KLEJOWO-NITOWE ORAZ NITOWE STOPU TYTANU

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESTRUCTIVE FORCE FOR ADHESIVE, ADHESIVE-RIVETED AND TITANIUM ALLOY RIVETED JOINTS

WSTĘP

Klejenie jest jedną z wielu metod wykonywania połączeń nierozłącznych części maszyn. Postęp w dziedzinie doskonalenia jakości klejów, pozwala na coraz szersze stosowanie tych połączeń w wielu odpowiedzialnych konstrukcjach. Połączenia klejowe posiadają wiele zalet (tłumienie drgań, możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów, uszczelnianie połączenia itp.), chociaż obarczone są różnymi wadami między innymi małą odpornością na naprężenia normalne, rozciągające [1,2].

Wytrzymałość jest jednym z parametrów charakteryzujących połączenia klejowe, która zależy od wielu czynników technologicznych i konstrukcyjnych [1-5]. Najważniejszymi czynnikami konstrukcyjnymi decydującymi o wytrzymałości połączeń klejowych są: wymiary spoiny, wymiary, kształt i symetria połączenia oraz sposób obciążenia. Do czynników technologicznych można zaliczyć: stan warstwy wierzchniej klejonych powierzchni, dokładność przygotowania masy klejowej, dobór właściwego kleju do projektowanej konstrukcji oraz warunki utwardzania spoiny klejowej (temperatura, czas i nacisk).

Istnieje wiele sposobów zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych, zarówno konstrukcyjnych (np. zmiana konstrukcji połączenia, czy sposobu obciążenia), jak i technologicznych (np. zastosowanie innego rodzaju kleju lub też innego sposobu przygotowania powierzchni). Jednym z wielu sposobów znacznego poprawienia wytrzymałości połączeń klejowych, jest zastosowanie jako dodatkowego łącznika – nitów [1,6-8]. Tego typu połączenia nierozłączne, gdzie występuje zarówno klejenie jak i nitowanie, nazywamy połączeniem klejowo – nitowym. Połączenia klejowo – nitowe mogą zwiększyć wytrzymałość połączeń oraz zmniejszyć ciężar konstrukcji poprzez zmniejszenie liczby nitów oraz zastąpienie połączeń nakładkowych – zakładkowymi.

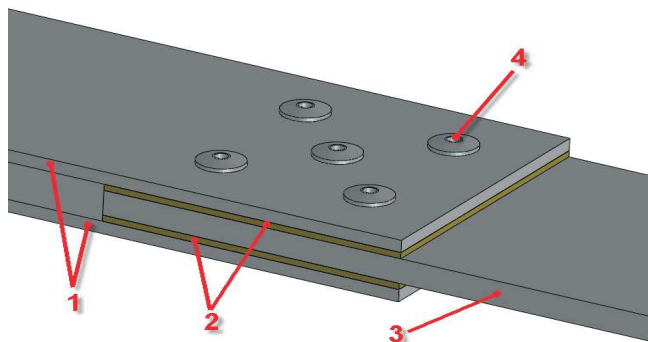
Celem artykułu jest porównanie siły niszczącej połączenia klejowe, nitowe oraz klejowo – nitowe blach tytanowych CP3 wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, przy zastosowaniu szwów nitowych jednorzędowych oraz wielorzędowych.

POŁĄCZENIA KLEJOWO-NITOWE

W połączeniach klejowych zakładkowych, na skutek nieosiowego przyłożenia sił występują obok naprężeń stycznych dodatkowe naprężenia rozciągające, skierowane prostopadle do warstwy kleju. Naprężenia te mogą znacznie obniżyć nośność konstrukcyjną połączenia. Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie nitów jako elementów dociskających klejone powierzchnie i przenoszących część obciążenia, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie szkodliwych naprężeń odrywających (normalnych).

Połączenia takie charakteryzują się większą wytrzymałością statyczną i dynamiczną, zwłaszcza w warunkach nierównomiernego odrywania. Zapewniają większą niezawodność i żywotność podczas długotrwałej eksploatacji. Jest to rezultatem rozdzielenia naprężeń pomiędzy nity i warstwę kleju oraz zmniejszenie koncentracji naprężeń wokół nitów. Dodatkowa warstwa kleju znajdująca się pomiędzy łączonymi

elementami wypełnia szczeliny połączenia zabezpieczając wewnętrzne powierzchnie przed korozją i uszczelnia je.



Rys. 1. Przykładowe połączenie dwunakładkowe klejowo - nitowe: 1 – dwie nakładki, 2 – dwie warstwy kleju, 3 – wewnętrzna wkładka, 4 - nit [9]

Tego typu połączenie posiada jeszcze kilka dodatkowych zalet, do których możemy zaliczyć: możliwość łączenia różnego rodzaju materiałów, sztywniejszą strukturą połączenia, dwuetapowy proces pęknięcia przed całkowitym zniszczeniem [1,6]. Do wad połączeń klejowo-nitowych możemy zaliczyć: stosunkowo wysokie koszty wykonania połączenia (które związane są ze złożonym procesem technologicznym klejenia oraz nitowania, przyczyniającym się do zwiększenia czasu wykonania tego typu połączenia) oraz zwiększenie ciężaru połączenia.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

• Charakterystyka połączeń klejowych

Do badań wykorzystano połączenia klejowe jednozakładkowe wykonane z blachy ze stopu tytanu CP3, obciążone na ścinanie, którego schemat zamieszczono na rys. 2.

Wymiary łączonych elementów (wykonanych z analizowanych blach) były następujące:

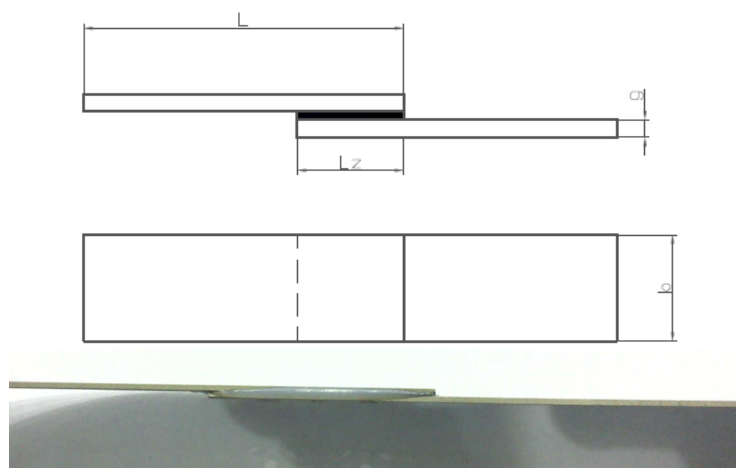
- długość: $l = 100 \text{ mm}$,
- szerokość: $b = 25 \text{ mm}$,
- grubość: $g = 1,016 \text{ mm}$

Do badań wykonano dwa rodzaje połączeń klejowych różniących się długością zakładki spoiny klejowej, wynikającą przede wszystkim z zastosowanych długości zakładki w połączeniach nitowych. Przyjęto długość zakładki wynoszącą $l_z = 16 \text{ mm}$ i $l_z = 32 \text{ mm}$.

Podczas wykonywania połączeń klejowych zastosowano następujące operacje technologiczne:

1) sposób przygotowania powierzchni blach tytanowych:

- płukanie w wodzie bieżącej o temperaturze 55°C ,
- suszenie,
- płukanie w wodnym roztworze Emulsolu RN – 1 (według zaleceń zakładowych);
- suszenie,
- trawienie (skład kąpieli - kwas solny HCl (1,19) o stężeniu 170 ml/l oraz fluorek sodu NaF 45g/l), temperatura kąpieli wynosiła 25°C , czas trawienia około 12 minut,
- kilkakrotne płukanie w bieżącej wodzie,
- suszenie,
- odtłuszczenie;



Rys. 2. Schemat i widok połączenia klejowego przyjętego do badań

- 2) przygotowanie masy klejowej – w doświadczeniu został użyty klej dwuskładnikowy epoksydowy Loctite 9466. Po odmierzaniu odpowiednich proporcji składniki zostały wymieszane, powstała jednorodna masa klejowa;
- 3) powlekanie powierzchni klejem – klej był наносzony na próbki szpachelką z tworzywa polimerowego, w taki sposób, aby na całej powierzchni zakładki była jednakowa grubość nakładanego kleju;
- 4) łączenie klejonych elementów – przeprowadzono zgodnie z ustaloną długością zakładki oraz wywarcie nacisku ok. 0,2 MPa,
- 5) kondycjonowanie (sezonowanie) przez 72 godziny;
- 6) obróbka wykańczająca – mechaniczne usunięcie nadmiaru kleju;
- 7) kontrola jakości.

• Charakterystyka połączeń nitowych

Do badań wykorzystano połączenia nitowe jednorzędowe, wykonane za pomocą dwóch nitów, o długości zakładki wynoszącej 16 mm, przedstawione na rys. 3 oraz wielorzędowe o długości zakładki 32 mm, wykonane z użyciem 5 nitów, zaprezentowane na rys. 4.

Połączenia zostały zaprojektowane zgodnie z wytycznymi przedstawianymi w literaturze [10-12]. Podczas wykonywania połączeń nitowych przyjęto średnicę nitu wynoszącą $d_n = 2,4$ mm, a średnicę otworów pod nity: $d = 2,5$ mm. Do łączenia użyto nitów monelowych MS20615-3M3R firmy Hardware. Długość nitu została obliczona na podstawie wzoru 1:

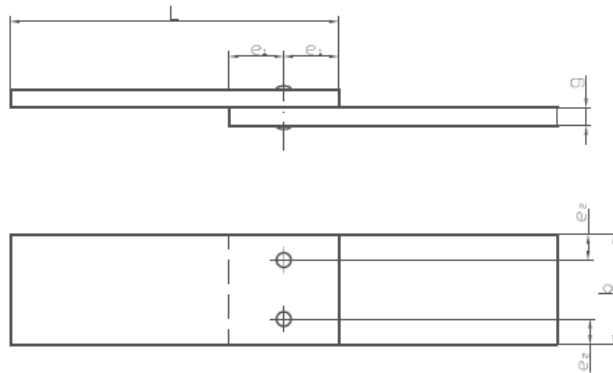
$$l = k \sum g_i + l_0 \quad (1)$$

gdzie:

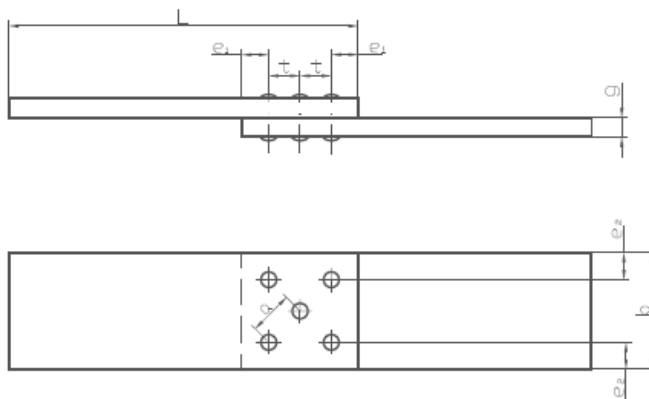
l_0 – nadatek na ukształtowanie zakuwki, dla nitów soczewkowych $l_0 = 0,9d_n$,

k – współczynnik uwzględniający spężanie nitu w otworze (przyjmuje się dla nitów zamykanych na zimno $k=1$, a dla zamykanych na gorąco $k = 1,2 \div 1,05$ (większa wartość odpowiada, mniejszej średnicy nitu),

g_i – grubość łączonych części.



Rys. 3. Schemat połączenia nitowego – szew nitów jednorzędowy



Rys. 4. Schemat połączenia nitowego - szew nitów wielorzędowy

Do obliczeń przyjęto: $k=1$, $\sum g_i=2,032$ mm, $l_0=2,16$ mm, a na podstawie obliczeń długość nitu wyniosła $l=5,2$. Przyjęto długość 6 mm.

Podziałka rozmieszczenia nitów „t” w połączeniu jednorzędowym (rys. 3) została ustalona ze wzoru 2:

$$3d \leq t \leq 9d \quad (2)$$

gdzie:

d – średnica otworu pod nit, t – podziałka rozmieszczenia nitów.

Po podstawieniu minimalna odległość pomiędzy nitami wynosi 7,5 mm, a maksymalna 22,5 mm, w próbkach do badań została przyjęta 8 mm. Odległość minimalną od krawędzi łączonych elementów przyjęto, w kierunku działania obciążenia: $e_1 \geq 2d$ oraz w kierunku prostopadłym do działania obciążenia: $e_2 \geq 1,5d$. Do badań zostały przyjęte następujące odległości: $e_1=8$ mm oraz $e_2=8$ mm.

Podziałkę rozmieszczenia nitów „t” w połączenia wielorzędowych (rys. 4) przyjęto taką samą, jak w połączeniach nitowych jednorzędowych i wynosi 8 mm. Odległość minimalną od krawędzi łączonych elementów wynosiła $e_1=8$ mm oraz $e_2=8$ mm.

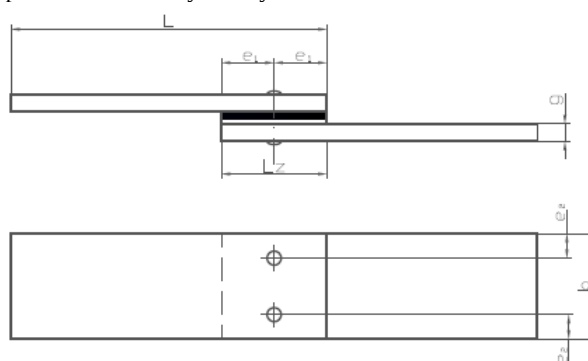
Odległość między rzędami $a \approx 2,6d = 2,6 * 2,5 = 6,5 \approx 8$ mm.

Zarówno dla połączeń ze szwem jednorzędowym, jak i wielorzędowym, technologia wykonywania połączeń była identyczna i składała się z następujących operacji:

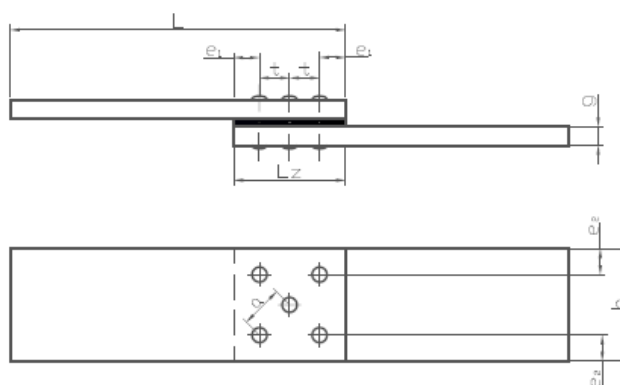
- 1) trasowanie otworów oraz zakładki zgodnie z wymiarami konstrukcyjnymi, napunktowanie rozmieszczenia otworów pod nity;
- 2) ustalenie położenia oraz połączenie dwóch próbek za pomocą ścisków;
- 3) wstępne wiercenie otworów $\varnothing 2$ mm;
- 4) rozwiercenie otworów pod nity $\varnothing 2,5$ mm;
- 5) demontaż zespołu;
- 6) gratowanie wszystkich otworów, wykonanie fazek na krawędziach otworów każdej części;
- 7) ustalenie łączonych detali za pomocą ścisków sprężynowych;
- 8) nitowanie za pomocą praski pneumatycznej;
- 9) kontrola jakości.

• **Charakterystyka połączeń klejowo-nitowych**

Do badań zostały wykonane dwa rodzaje połączeń klejowo-nitowych, uwarunkowanych konstrukcją połączeń nitowych, czyli połączenie klejowo-nitowe ze szwem nitowym jednorzędowym (rys. 3) oraz połączenie klejowo-nitowe ze szwem nitowym wielorzędowym (rys. 4). Zakładka klejowa w połączeniach klejowo-nitowych jednorzędowych równa jest $l_{z1} = 16$ mm, a w wielorzędowych wynosi $l_{z2} = 32$ mm. Rozmieszczenie nitów jest przedstawione na rys. 5 i rys. 6.



Rys. 5. Schemat połączenia klejowo-nitowego: szew nitów jednorzędowy



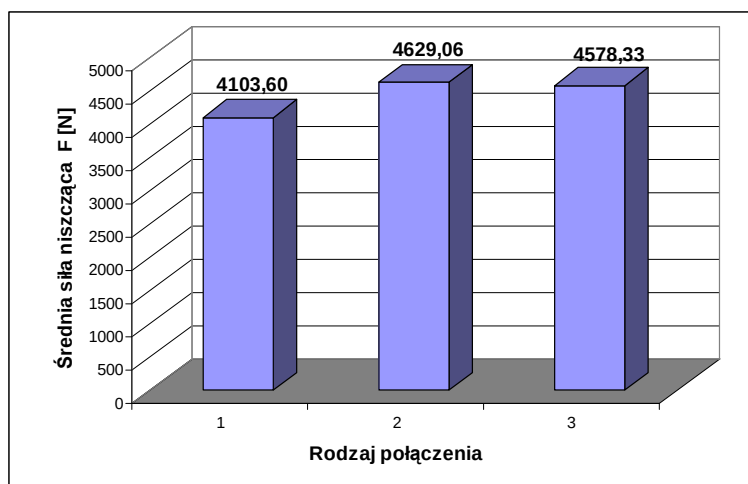
Rys. 6. Schemat połączenia klejowo-nitowego - szew nitów wielorzędowy

Technologia klejenia została wykonana w taki sam sposób, jak w przypadku połączeń klejowych. Po 72 godzinach sezonowania, połączenie zostało zanitowane. Połączenia nitowe powstały według technologii przedstawionej dla połączeń nitowych.

Po wykonaniu analizowanych rodzajów połączeń, poddano je badaniom wytrzymałościowym, pozwalającym na określenie i porównanie siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe.

WYNIKI BADAŃ

Porównanie otrzymanych wyników siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopów tytanu CP3, w przypadku długości zakładki wynoszącej $l_z=16$ mm i szwu jednorzędowego przedstawiono na rys. 7. Na rys. 8 natomiast zamieszczono wyniki badań analizowanych rodzajów połączeń, ale charakteryzujących się długością zakładki równą 32 mm.

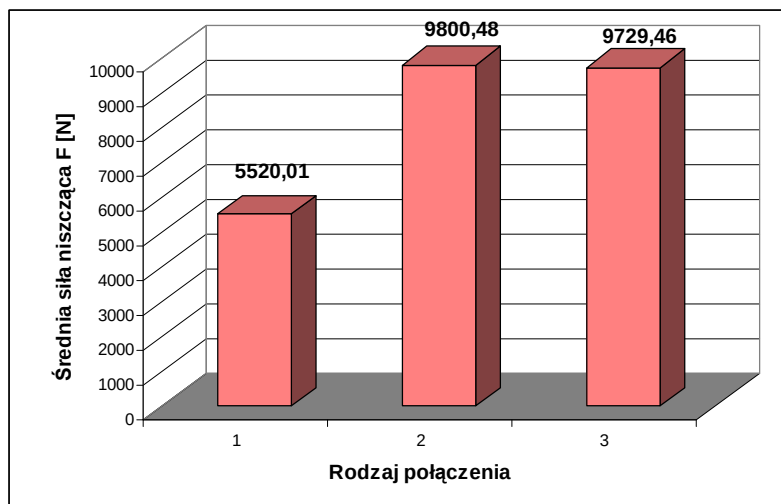


Rys. 7. Średnia wartość siły niszczącej połączeń z zakładką $l_z=16$ mm: 1 – połączenie klejowe, 2 – połączenie nitowe jednorzędowe, 3 - połączenie klejowo – nitowe

Otrzymane wyniki badań doświadczalnych poddano analizie statystycznej, na podstawie której stwierdzono, że otrzymano statystycznie istotne różnice w analizowanych wartościach siły niszczącej we wszystkich badanych połączeniach na poziomie istotności $\alpha=0,05$.

Na podstawie rys. 7 można zauważyć, że w grupie połączeń z zakładką równą $l_z=16$ mm, najmniejszą wartość siły niszczącej otrzymano w przypadku połączenia klejowego i wyniosła ona 4103,60 N. Największa wartość została uzyskana w połączeniu nitowym (4629,06 N) i była wyższa o 12% od najmniejszej wartości. Po dodaniu dwóch nitów do połączenia klejowego, została podwyższona wartość siły niszczącej o około 11%, w stosunku do połączenia klejowego, w przypadku połączenia nitowego natomiast dodanie warstwy kleju zmniejszyło nieznacznie – 2% tę wartość w stosunku do połączenia nitowego.

Dwukrotne zwiększenie zakładki w połączeniach klejowych z 16 mm na 32 mm, zwiększyło jego wytrzymałość o około 24% (rys. 8). W przypadku połączeń nitowych zwiększenie ilości nitów z dwóch na pięć, spowodowało wzrost wartości siły niszczącej o około 110%, natomiast w połączeniach klejowo-nitowych identyczne zwiększenie zakładki oraz ilości nitów zwiększyło wartość siły o około 112%.



Rys. 8. Średnia wartość siły niszczącej połączeń z zakładką $l_z=32$ mm: 1 – połączenie klejowe, 2 – połączenie nitowe jednorzędowe, 3 – połączenie klejowo – nitowe



Rys. 9. Widok zniszczonej próbki klejowo-nitowej: szew nitów wielorzędowy

Na rys. 9 przedstawiono widok zniszczonego połączenia klejowo-nitowego wielorzędowego o długości zakładki wynoszącej $l_z=32$ mm. Można zauważyć znacznie większe zniszczenie skrajnych nitów oraz odkształcenie łączonego materiału.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy statystycznej wyników tych badań można zauważyć, że:

- największa siła niszcząca wystąpiła w połączeniach nitowych wielorzędowych, najmniejsza zaś w połączeniach klejowych z zakładką $l_z=16$ mm;
- wzmocnianie połączenia klejowego zakładkowego poprzez wprowadzenie nitów wpłynęło na poprawę wytrzymałości i sztywności połączenia, w przypadku połączenia klejowego z zakładką $l_z=32$ mm wartość siły niszczącej wzrosła prawie dwukrotnie, przy połączeniu z zakładką $l_z=16$ mm był to znacznie mniejszy wzrost, w granicach 11%;
- analizując odchylenia standardowe wszystkich połączeń można zauważyć że, w przypadku połączeń klejowych była najmniejsza powtarzalność wyników, natomiast największą została uzyskana w połączeniach nitowych oraz klejowo-nitowych. W przypadku połączenia nitowego wielorzędowego oraz przy połączeniu klejowo-nitowym uzyskano powtarzalność w granicach 1% w stosunku do średniej arytmetycznej siły niszczącej.

Według dostępnej literatury połączenia klejowo-nitowe powinny posiadać największą siłę niszczącą, można zauważyć, że połączenie klejowo-nitowe z zakładką $l_z=16$, ma mniejszą wartość od połączenia nitowego jednorzędowego z tą samą zakładką, ten sam przypadek (rys. 8) występuje w połączeniu z zakładką $l_z=32$ mm. Prawdopodobnie spowodowane jest to dwoma względami. Po pierwsze, utwardzona warstwa kleju Loctite 9466 charakteryzuje się znaczną sztywnością (moduł sprężystości postaciowej tego kleju równy jest $G_k=1718$ MPa). Fakt ten powoduje, że warstwa kleju jest bardzo wrażliwa na uszkodzenia w trakcie zamykania nitów, a część siły potrzebnej do uformowania zakuwki jest przenoszona na warstwę kleju. Powoduje to lokalne (wokół łba nitu) uszkodzenia utwardzonej warstwy kleju, co z kolei obniża wytrzymałość spoiny. Dowodem na to są widoczne na rys. 9 pierścienie wokół nitu wielkość średnicy łba nitu. Rozwiązaniem tego problemu może być np. zmiana sposobu nitowania, standardowe nitowanie prasą pneumatyczną zamienić na nitowanie radialne. Drugi czynnik, który być może wpłynął na ten fakt, to wysokość zakuwki. W połączeniach klejowo-nitowych była ona większa o 1 mm od zakuwki w połączeniach nitowych. Fakt zwiększenia zakuwki był spowodowany problemem rozwarstwiania się próbek klejowych podczas nitowania.

Podsumowując można zauważyć, że wytrzymałość połączeń klejowych, nitowych, oraz klejowo-nitowych uwarunkowana jest konstrukcją i technologią ich wykonania. W przeprowadzonych badaniach połączenia nitowe zostały zaprojektowane zgodnie z literaturą, natomiast długość zakładki w połączeniach klejowych została przyjęta zgodnie z zakładką w połączeniach nitowych, niewątpliwie fakt ten również miał wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych. Ze względu na specyfikę połączeń klejowych stosowanie różnych rodzajów klejów, ma wpływ na wytrzymałość tych połączeń. W połączeniu klejowo-nitowym klej pełni dodatkową rolę, chroniąc materiał przed korozją oraz pełniąc funkcję uszczelniacza, co jest istotne w wielu konstrukcjach.

LITERATURA

1. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
2. Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika, Praca zbiorowa pod red. Ch. V. Cagle'a, WNT, Warszawa, 1977.
3. Czaplicki J i in.: Klejenie tworzyw konstrukcyjnych, WKŁ, Warszawa, 1987.
4. Kuczmazewski J.: Technologia Śmigłowców. Teoria i technika klejenia. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 1990.
5. Rudawska A., Kuczmazewski J.: Klejenie blach ocynkowanych. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 2005.
6. Perłowski R.: Ocena wytrzymałości statycznej montażowych, zakładkowych połączeń klejowych i klejowo-nitowych. Technologia i Automatyzacja Montażu, 1/2002, s. 33-37.
7. Perłowski R.: Technologia i właściwości połączeń klejowo – nitowych. Technologia i Automatyzacja Montażu, 02/2007, s. 124-127
8. Gomez S., Onoro J., Pecharroman J.: A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint. Int. J. Adhesion and Adhesives (27) 2007, 263-267.
9. www.pkaero.prz.edu.pl/sprawozdania/KONF-28-29-06-2010/plakaty/ZB-15-2.pdf 09/2010.
10. Dietrich M.: Podstawy konstrukcji maszyn tom II. WNT, Warszawa 1999.
11. Porębska M., Skorupa A.: Połączenia spójnościowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
12. Rutkowski A.: Części maszyn. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna, Warszawa 1994.



Praca realizowana w ramach projektu nr POIG. 01.01.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DESTRUCTIVE FORCE FOR ADHESIVE, ADHESIVE-RIVETED AND TITANIUM ALLOY RIVETED JOINTS

Abstract. The article presents comparative analysis of destructive force values for adhesive, adhesive-riveted and titanium alloy riveted joints, widely applied in aircraft industry. The analysis was conducted for three types of assembly joints: adhesive, adhesive-riveted and riveted. The two joints variants considered differed in the length of the lap, the number and the distribution of rivets. The riveted and adhesive-riveted joints tested included two or five rivets. Moreover, two lap lengths were applied for all the tested joint types (adhesive, adhesive-riveted, riveted), 16 and 32 mm. In the case of single-riveted joints (2 rivets) the lap length was 16mm, while for the other sample (5 rivets) – 32 mm. The results of the tests led to observe the increase of the destructive force value in the case of adhesive joints with the increase of the lap length. The observation was not dissimilar for the riveted and adhesive-riveted joints. The comparison of the three joint types of equal lap length indicated that the destructive force value for adhesive-riveted and riveted joints difference was negligible, while lower values could be observed in the case of adhesive joints.

Ivan OBORSKIY
Kijowski Uniwersytet
Technologii i Projektowania
Kijów, Ukraina

TECHNOLOGICZNE I NAUKOWE PODSTAWY REALIZACJI MONTAŻU POŁĄCZEŃ WCISKANYCH SPOSOBEM TERMICZNYM (TKSS)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ СПОСОБОМ КТСС

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время до ряда ответственных изделий машиностроения (многоэлементных изделий колесных пар подвижного состава железнодорожного транспорта, соединений тонкостенных втулок подшипников скольжения с корпусными деталями машин горных разработок и строительной техники, валов с зубчатыми колесами несущих узлов редукторов, направляющих втулок и седел клапанов с головками блоков двигателей внутреннего сгорания, веретен кольцепрядильных машин легкого и текстильного машиностроения и др.), включающих соединения деталей с натягом, предъявляются повышенные требования по прочности и эксплуатационной надежности [1-3]. Для решения этой важной проблемы, как правило, увеличивают сборочные натяги, применяют дополнительные элементы крепления деталей в соединениях.

Для формирования таких посадок широкое применение получили технологии с использованием термических способов с нагреванием или охлаждением сопрягаемых деталей. При этом следует отметить, что эти способы зачастую являются энергоемкими и не позволяют качественно собирать соединения с относительно большими натягами (например, для деталей из конструкционных сталей более 2-3 мкм/мм). Наряду с этим увеличение сборочных натягов приводит к росту напряженно-деформированного состояния изделий. Применение дополнительных элементов крепления деталей в соединениях, как правило, приводит к повышению металлоемкости изделий и не всегда обеспечивает их необходимую надежность при эксплуатации.

Особенно большой интерес представляет перспектива использования для качественного формирования соединений с натягом комбинированного термического способа сборки (КТСС) – с одновременным пониженным неравномерным нагревом и низкотемпературным охлаждением сопрягаемых деталей. При этом за счет понижения температуры термовоздействия на каждую из сопрягаемых деталей повысится качество соединения, представится возможность исключить изменение физико-механических свойств материалов, снизить величину сборочного натяга, напряженно-деформированное состояние деталей, тепловые потери, энергетические и временные затраты. Также КТСС позволит увеличить термический сборочный зазор, что откроет перспективы использования новых видов и топологии микрорельефа и макрорельефа, различных прослоек для повышения фактической площади и плотности зоны их контакта, что обеспечит повышение прочности соединений. Увеличение сборочного зазора упростит операцию ориентирования и совмещения сопрягаемых деталей без непосредственного их контакта, что даст возможность сохранить исходный микрорельеф контактных поверхностей сопрягаемых деталей, использовать при этом более простые сборочные устройства.

Однако, термическая сборка выполняется зачастую при достаточно высоких температурах нагревания или глубокого охлаждения сопрягаемых деталей, что делает ее достаточно энергоемким технологическим процессом и продолжительным по времени. Поэтому необходимо изыскание путей, обеспечивающих снижение энергозатрат, например, за счет применения регулярного

микро рельефа, обеспечивающего повышенную прочность посадок и возможность снижения величины сборочного натяга, снижение уровней нагрева и охлаждения сопрягаемых деталей перед сборкой. Это позволит сократить продолжительность цикла сборки, тепловые потери, уменьшить время нагрева и охлаждения сопрягаемых деталей. Эти преимущества позволят эффективно использовать этот технологический процесс в массовом производстве.

В связи с изложенным повышение качества соединений с натягом, снижение энергоемкости и временных затрат путем создания технологического обеспечения сборки на этапах термовоздействия - взаимное совмещение деталей с использованием комбинированного термического способа сборки является актуальной задачей при создании машин и механизмов.

СУЩНОСТЬ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой исследований является системный подход к изучению исследуемого объекта – технологии формирования соединений с натягом с использованием комбинированного термического способа сборки, специальной топологии микро рельефа на сопрягаемых поверхностях деталей и промежуточных прослоек в зоне контакта. Для решения поставленных задач использованы фундаментальные положения технологии машиностроения, теории пластичности, упругости и теплопроводности, методов оптимизации, теории вероятности, математической статистики и МКЭ, а также компьютерного программирования.

Обсуждение результатов исследований. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили предложить методологию и получить расчетные зависимости для определения технологических параметров, обеспечивающих энергосберегающую сборку соединений с натягом КТСС.

Установлено, что для качественной реализации технологии КТСС возможна совокупность различных технологических вариантов КТСС, при которых предварительное термовоздействие на сопрягаемые детали и сочетания в них температур в момент начального контакта может быть полным, неполным, частичным или местным. Обоснованы принципы направления подвода тепла или холода к сопрягаемым деталям (изнутри или снаружи) при неравномерном на них термовоздействии и определения температуры нагревания $T_{\text{нагр}}$ охватывающих и низкотемпературного охлаждения $T_{\text{охл}}$ охватываемых деталей с учетом их распределения в зависимости от толщины их стенок и типа производства.

Следует отметить, что при разработке структуры технологии КТСС очень важно знать, какое значение должны иметь увеличение посадочного диаметра Δd_a охватывающей детали при ее нагревании и уменьшение Δd_b охватываемой при ее низкотемпературном охлаждении, которые необходимы для создания требуемого временного теплового сборочного зазора S для качественной реализации сборки соединений с натягом. В процессе выполнения технологии КТСС сопрягаемые детали терпят тепловые потери, с которыми взаимосвязаны энергетические затраты при КТСС. Предложено выразить потери (затраты) тепла и холода сопрягаемыми деталями через коэффициент $\kappa_{\text{сб}}$ условий реализации сборки (тепловых потерь). Принято, что этот коэффициент учитывает: геометрические параметры сопрягаемых деталей и физико-механические свойства их материалов; температуры сопрягаемых деталей и их тепловые потери во времени выполнения технологических операций сборочного цикла; режимы выполнения технологических операций во времени с помощью используемой сборочной оснастки или без нее.

На основании выполненных комплексных теоретических исследований получены расчетные зависимости, позволяющие определить при подводе тепла (или холода) снаружи или изнутри тонкостенного и толстостенного цилиндра (соответственно при линейном и логарифмическом законах распределения температуры по толщине его стенок при заданном времени термовоздействия) соотношение температур на наружной T_n ($T_{n,\text{лин}}$, $T_{n,\text{лог}}$) и внутренней T_v ($T_{v,\text{лин}}$, $T_{v,\text{лог}}$) его поверхностях, соответственно

$$T_{н.лин} = T_{в.лин} \frac{3+m}{3+2m} \quad (1) \quad \text{и} \quad T_{н.лог} = T_{в.лог} \frac{m \cdot (2+m) - \ln(1+m)^2}{\ln(1+m)^2 \cdot (1+m)^2 - m(2+m)}, \quad (2)$$

где $m = r_n/r_v - 1$, где r_n и r_v – наружный и внутренний радиусы цилиндра.

Анализ полученных зависимостей (1, 2) показал, что для получения, например, равной величины изменения внутреннего диаметра при нагревании детали следует подводить тепло по наружной ее поверхности с температурой T_n , которая будет ниже температуры T_v в случае подвода тепла к внутренней поверхности цилиндра.

Рассмотрим (рис. 1, 2) законы линейного и логарифмического распределения температуры при КТСС соответственно в тонкостенных (рис. 1) и толстостенных (рис. 2) деталях: а – при нагревании охватывающей; б – при низкотемпературном охлаждении охватываемой.

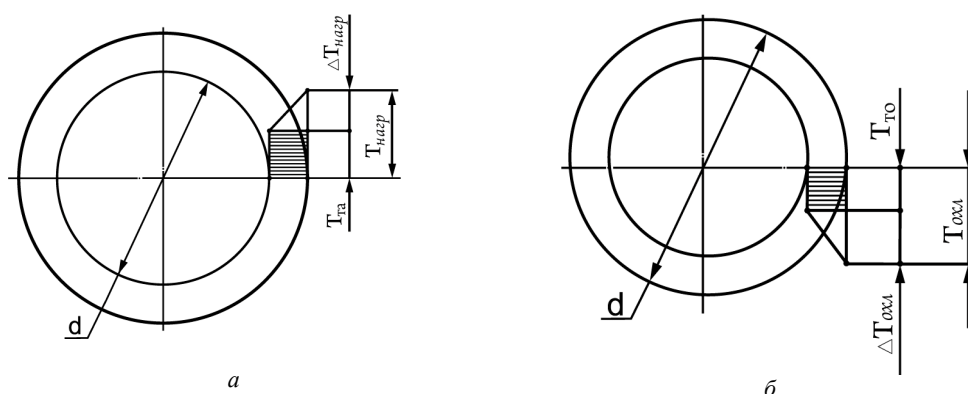


Рис. 1. Линейное распределение температуры при КТСС тонкостенных деталей: а – при нагревании охватывающей; б – при низкотемпературном охлаждении охватываемой

Rys. 1. Liniowy rozkład temperatur przy KTSS w cienkościennych elementach;
a) przy nagrzewaniu części obejmującej; b) przy chłodzeniu części obejmowanej

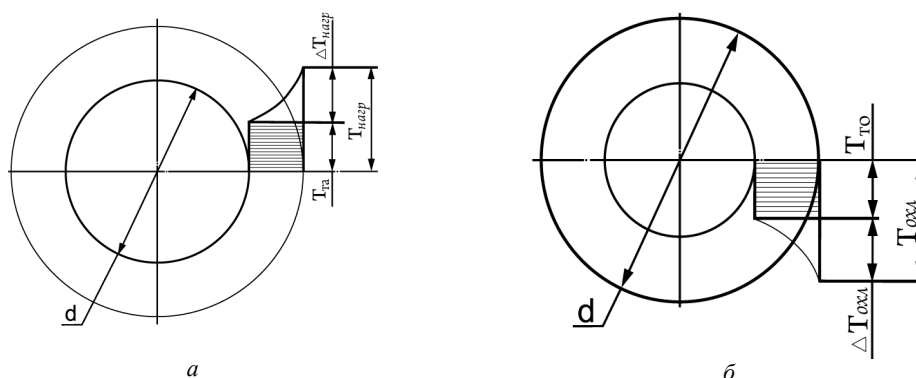


Рис. 2. Логарифмическое распределение температуры при КТСС толстостенных деталей: а – при нагревании охватывающей; б – при низкотемпературном охлаждении охватываемой

Rys 2. Logarytmiczne rozkłady temperatur przy KTSS grubościennych części;
a) przy nagrzewaniu części obejmującej; b) przy chłodzeniu części obejmowanej

Приняв, что $T_{\text{нагр}} = \Delta T_{\text{нагр}} + T_{\text{та}}$, $T_{\text{охл}} = \Delta T_{\text{охл}} + T_{\text{то}}$, где $T_{\text{та}}$ и $T_{\text{то}}$ – температуры, установившиеся в охватывающей детали при ее нагревании и в охватываемой при ее низкотемпературном охлаждении, $\Delta T_{\text{нагр}}$ и $\Delta T_{\text{охл}}$ – перепады температур между наружной и внутренней поверхностями сопрягаемых деталей для заданных распределений температуры по толщине стенок и подвода тепла, в частности, по наружной поверхности для заданных значений величины теплового зазора, в работе получены зависимости для определения рациональных температур.

Для тонкостенных деталей (рис.1) предложены зависимости для расчета рациональных температур (для линейного закона их распределения) полного нагрева $T_{\text{нагр}}$ охватывающей детали и полного низкотемпературного $T_{\text{охл}}$ охлаждения охватываемой, соответственно

$$T_{\text{та}} + \Delta T_{\text{нагр}} \frac{3 + 2m_a}{6 + 3m_a} = \frac{\Delta d_a}{d \cdot \alpha_p} \quad (3) \quad \text{и} \quad T_{\text{то}} + \Delta T_{\text{охл}} \frac{3 + 2m_b}{6 + 3m_b} = \frac{\Delta d_b}{d \cdot \alpha_{\text{ск}}}, \quad (4)$$

где α_p и $\alpha_{\text{ск}}$ – коэффициенты линейного расширения для материала охватывающей и сжатия для охватываемой деталей; $m_a = r_{\text{на}}/r_{\text{ва}} - 1$, где $r_{\text{на}}$ и $r_{\text{ва}}$ – наружный и внутренний радиусы для охватывающей детали; $m_b = r_{\text{нв}}/r_{\text{вв}} - 1$, где $r_{\text{нв}}$ и $r_{\text{вв}}$ – наружный и внутренний радиусы для охватываемой детали.

Предложены зависимости, позволяющие определить рациональные температуры (для логарифмического закона распределения) полного нагревания $T_{\text{нагр}}$ охватывающей детали при подводе к ней тепла по наружной поверхности (рис. 2) и охлаждения $T_{\text{охл}}$ охватываемой детали, соответственно

$$T_{\text{та}} + \Delta T_{\text{нагр}} \left[(1 + m_a)^2 - \frac{m_a(2 + m_a)}{\ln(1 + m_a)^2} \right] = \frac{\Delta d_a}{d \alpha_p} m_a(2 + m_a), \quad (5)$$

$$T_{\text{то}} + \Delta T_{\text{охл}} \left[(1 + m_b)^2 - \frac{m_b(2 + m_b)}{\ln(1 + m_b)^2} \right] = \frac{\Delta d_b}{d \alpha_{\text{ск}}} m_b(2 + m_b). \quad (6)$$

На основании выполненных автором исследований установлены возможные варианты сборки соединений с натягом способом КТСС и сочетания температур в сопрягаемых деталях (с полным, неполным, частичным и местным термовоздействием на сопрягаемые тонкостенные и толстостенные детали) при подводе к ним тепла как снаружи, так и изнутри. На основании этих данных установлены соотношения температуры неравномерного термовоздействия и температуры $T_{\text{ст}}$ условно равномерного термовоздействия на сопрягаемые детали для обеспечения требуемого изменения посадочного диаметра.

Таким образом полученные аналитические зависимости позволяют определять изменения $\Delta d_{\Sigma \text{лин}}$ и $\Delta d_{\Sigma \text{лог}}$ диаметра d посадки сопрягаемых деталей (охватывающей Δd_a и охватываемой Δd_b), а также уровни температур их нагревания и низкотемпературного охлаждения, в которых в отличие от существующих методов расчета учтено влияние толщины стенок сопрягаемых деталей, режимов нагревания и низкотемпературного охлаждения, направления подвода к ним тепла и холода при линейном и логарифмическом законах распределения температур по толщине деталей, что позволило создать методику выбора рациональных значений технологических параметров сборки, обеспечивающих снижение энергетических, временных затрат и оптимальный выбор технологического оборудования и теплоносителей.

Зная суммарное значение Δd_{Σ} увеличения Δd_a диаметра посадки охватывающей детали при ее нагревании и уменьшения Δd_b охватываемой при охлаждении, величину теплового зазора $S = \Delta d_{\Sigma} - N_{\text{макс}}$, а также коэффициент условий сборки $k_{\text{сб}}$, в работе предложены зависимости для определения

угла γ перекося осей сопрягаемых деталей для вертикальной и горизонтальной схем сборки с учетом временного характера изменения величины теплового зазора и геометрических параметров сопрягаемых деталей в процессе их взаимного ориентирования и совмещения.

Что бы установить закономерности процесса ориентирования при КТСС и его параметры, были рассмотрены условия равновесия в момент начала контакта деталей при вертикальной и горизонтальной схемах сборки и получена система уравнений. Решение этих уравнений позволило найти допустимый угол перекося осей сопрягаемых деталей для вертикальной (7) и горизонтальной (8) схем сборки с учетом взаимосвязи во времени и пространстве, соответственно

$$\gamma_b \leq \arctg \left(\frac{d - \Delta d_a - \Delta d_b + N - S_{\min}}{L} \right), \quad (7) \quad \gamma \leq \arccos \frac{d_b - \Delta d_b + N_{\max} - S_{\min}}{d_a + \Delta d_a}, \quad (8)$$

$$\text{где} \quad \Delta d_{\text{уад}} = \Delta T_{\text{уад}} \cdot \alpha_p \cdot d \cdot e^{A_a B_a \tau_y}, \quad \Delta d_{\text{увд}} = \Delta T_{\text{увд}} \cdot \alpha_{сж} \cdot d \cdot e^{A_b B_b \tau_y},$$

$$\Delta d_{\text{уат}} = \Delta T_{\text{уат}} \cdot \alpha_p \cdot d \cdot e^{A_a B_a \tau_y}, \quad \Delta d_{\text{увт}} = \Delta T_{\text{увт}} \cdot \alpha_p \cdot d \cdot e^{A_b B_b \tau_y}, \quad (9)$$

$\Delta T_{\text{уад}}$, $\Delta T_{\text{увд}}$ и $\Delta T_{\text{уат}}$, $\Delta T_{\text{увт}}$ – перепады температур между сопрягаемыми деталями, мехду отдельными деталями и технологической сборочной оснасткой; A_a , A_b , B_a , B_b – усредненные величины, которые характеризуют соответственно свойства материалов сопрягаемых деталей и их геометрические параметры.

Полученные аналитические зависимости (7) – (9) позволяют определять не только допустимые углы перекося осей деталей при сборке, но и характер временного их изменения при КТСС. Такой подход к определению углов перекося позволит определиться с видом и конструктивным исполнением модулей ориентирования и взаимной сборки многоэлементных соединений деталей, методикой расчетов взаимосвязанных во времени и пространстве конструктивных размеров сборочного устройства.

На основании выполненных теоретических исследований также научно обосновано возможность использования схем бесконтактного совмещения и окончательного ориентирования нагретых и охлажденных сопрягаемых деталей и на этой основе разработаны новые способы выполнения этих операций и устройства для их реализации.

В работе установлено, что соединения с натягом имеют широкую номенклатуру осе симметричных деталей с относительно малыми, средними и большими размерами диаметров посадки и длины, внешними размерами, а также различной массы. Решение задачи сборки каждой номенклатура деталей имеет свою специфику, связанную с продолжительностью операций сборки. Поэтому в работе были рассмотрены технологические решения, связанные с разработкой структуры затрат времени $\tau_{сб}$ и получены аналитические зависимости для определения времени предварительного низкотемпературного охлаждения и нагревания, транспортирования, взаимного ориентирования и установки, начального контакта и скрепления деталей с заданным натягом. При этом установлено, что расчет времени выполнения технологических операций сборки в условиях неравномерного термовоздействия и определение изменения при этом посадочного диаметра необходимо проводить по условно установившейся температуре деталей.

Уменьшение временных затрат также существенно зависит от продолжительности процесса формирования соединения с внедрением микрорельефа и создания при этом промежуточной динамичной прочности, изменяемой во времени. Зачастую соединение нет смысла выдерживать на сборочной позиции до окончательного формирования зоны контакта, а снимать его в какой-то промежуток внедрения микрорельефа и достижения промежуточной прочности. Поэтому в работе разработаны зависимости для определения временных параметров с учетом формирования зоны

контакта. В отличие от существующих методов научно обоснован новый подход по определению допустимых затрат времени на выполнение технологических операций КТСС и выбор его структуры, позволяющих оптимизировать технологию формирования посадок с натягом при незначительных тепловых и энергетических затратах. Выполненные теоретические исследования позволили создать методологию определения всего комплекса конструктивно-технологических параметров технологии, обеспечивающих КТСС соединений с натягом, с учетом теплофизических и механических характеристик материалов сопрягаемых деталей, изменения их конструктивных параметров, снижения временных и энергетических затрат. На этой основе предложена новая методика выбора и проектирования типовых устройств, обеспечивающих нагрев, охлаждение, транспортирование, ориентирование, совмещение и непосредственную сборку.

Для оперативного использования полученных результатов при проектировании технологии и технологической оснастки и оборудования для сборки разработаны специальные графоаналитические способы определения технологических параметров для качественной реализации энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом способом КТСС. Предлагаемые графоаналитические способы созданы с учетом технологических параметров, которые гарантируют прочность соединений с натягом и условия осуществления их бесконтактной сборки при вертикальной и горизонтальной схемах ориентирования деталей.

ВЫВОДЫ

Разработана методология определения технологических параметров, обеспечивающих качественную реализацию сборки и создание методики проектирования технологии формирования соединений с натягом способом КТСС (комбинированным термовоздействием – нагревом и низкотемпературным охлаждением на сопрягаемые детали с учетом теплофизических и механических характеристик их материалов, изменения конструктивных параметров, снижения временных и энергетических затрат).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И. Л., Андреев А.Г., Щепкин А.В., Дворжак В.М. Разработка технологии сборки и конструкции составного колеса электровагона. //Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: Сборник научных работ. Тематический выпуск: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 36. – С. 147–153.
2. Оборский И.Л. Определение технологических параметров рациональной энергосберегающей технологии формирования соединений с натягом при КТСС / И.Л. Оборский // 10-я Международная научно-практическая конференция с действующими семинарами "Качество, стандартизация, контроль: Теория и практика. Крым, г. Ялта. 27 сентября – 01 октября 2010 г. – С. 108-110.
3. Оборский И.Л. Выбор технологических параметров рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом, осуществляемой термическими способами / И.Л. Оборский // Сб.: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции "Качество технологий–качество жизни". 15 – 19 сентября 2010, г. Судак, Украина. – 2010. – С. 74 – 76.

TECHNOLOGICAL AND SCIENTIFIC BASES OF THE GUARANTEE OF REALIZATION OF ASSEMBLING CONNECTIONS WITH THE STRAINING BY METHOD KTSS

Abstract. *There are given the results of the theoretical and experimental studies, which made possible to propose methodology and to get calculated dependences for determination of the technological parameters, which guarantee the realization of the energy-saving assembling of connections with the straining by method KTSS.*

Ivan OBORSKIY
Artiem OBORSKIY
Anatolij ZENKIN
Anna KOSZEL
Kijowski Uniwersytet
Technologii i Projektowania
Kijów, Ukraina

PROJEKTOWANIE ENERGOOSZCZĘDNEJ TECHNOLOGII MONTAŻU POŁĄCZEŃ WCISKANYCH SPOSOBEM TERMICZNYM

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ ТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных научно-технических проблем технологии машиностроения является создание соединений с натягом с минимальными энергозатратами. Успешное решение этой задачи требует при проектировании технологии сборки учета множества входных факторов и нормированных технологических сборочных параметров, взаимосвязанных во времени и пространстве. В частности, при сборке соединений с натягом способом КТСС (с использованием нагрева и низкотемпературного охлаждения сопрягаемых деталей) необходимо определить нормированные величины необходимого увеличения посадочного диаметра нагреваемой охватываемой детали и его уменьшение для охватываемой при низкотемпературном охлаждении. Правильный выбор этих параметров позволит обеспечивать временно образованный зазор при взаимном соединении деталей без непосредственного контакта их сопрягаемых поверхностей. Использование такого подхода к выбору методологии определения нормированных сборочных параметров и проектировании технологии позволит производителям при минимальных затратах создавать современные изделия с соединениями с натягом при минимальных энергетических и временных затратах [1, 2, 3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости, которые позволят производить разработку рациональной структуры технологического процесса сборки, обеспечивающего энергосбережение при КТСС.

Для решения этой задачи изначально принят коэффициент соотношения увеличения посадочного диаметра d охватываемой детали при ее неравномерном нагревании Δd_a к уменьшению посадочного диаметра d охватываемой при ее неравномерном низкотемпературном охлаждении Δd_g

$$k_{\Delta d} = \frac{\Delta d_a}{\Delta d_g}. \quad (1)$$

Приняв при исследованиях затраты на нагрев охватываемой и низкотемпературное охлаждение охватываемой деталей, необходимое суммарное Δd_{Σ} увеличение посадочных

диаметров охватывающей детали при ее нагревании и уменьшение для охватываемой при ее низкотемпературном охлаждении Δd_a и Δd_b , которые обеспечат требуемый временной тепловой сборочный зазор для качественной реализации сборки соединений с натягом, теплоемкость материалов сопрягаемых деталей C_a и C_b , удельную плотность их материалов ρ_a и ρ_b , объемы охватывающей и охватываемой деталей V_a и V_b , коэффициенты линейного расширения и сжатия материалов сопрягаемых деталей α_p и α_b , скрытую теплоту E_N испарения жидкого азота, при погружении детали в ванну, себестоимость 1-го кВт·часа электрической энергии w_3 , себестоимость 1кг массы жидкого азота w_N , КПД нагревателя η_3 , коэффициент мощности $\cos\beta$ можно установить коэффициент K соотношения затрат на нагрев охватывающих деталей и на охлаждение охватываемых

$$K = \frac{\Delta d_a \cdot w_3 \cdot \alpha_{сж} \cdot V_a \cdot E_N \cdot \rho_a}{\Delta d_b \cdot w_N \cdot \alpha_p \cdot V_b \cdot \eta_3 \cdot \cos\beta \cdot \rho_b} \quad (2)$$

Если коэффициент затрат будет превышать 1, то целесообразно при сборке больше охлаждать охватываемую деталь, а если же он ниже 1, то целесообразно больше нагревать охватывающую деталь. Наиболее оптимальным КТСС будет технологический процесс с равно затратной технологией с коэффициентом $K = 1$.

Зная входные в зависимость (2) параметры можно просчитать значения коэффициента $k_{\Delta d}$ и определиться с вариантом рациональной технологии КТСС.

При этом для обеспечения качественной сборки соединений с временным зазором отношение необходимого увеличения посадочного диаметра охватывающей детали к его уменьшению для охватываемой будет

$$k_{\Delta d} = \frac{\Delta d_a}{\Delta d_b} = \frac{w_N \cdot \alpha_p \cdot V_b \cdot \eta_3 \cdot \cos\beta \cdot \rho_b \cdot C_b}{w_3 \cdot \alpha_{сж} \cdot V_a \cdot E_N \cdot \rho_a \cdot C_a} \quad (3)$$

Определив из зависимости (3) коэффициент соотношения $k_{\Delta d}$, решаем задачу по разработке зависимостей для определения необходимых значений Δd_a и Δd_b , температурных уровней и температур неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения сопрягаемых деталей для получения величин Δd_a и Δd_b с учетом направления подвода тепла и холода. По полученным значениям температур неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения сопрягаемых деталей определим затраты времени на выполнение технологических операций.

С учетом (3) и выбрав значение коэффициента $k_{\Delta d}$, получим зависимость для определения, например, необходимого уменьшения посадочного диаметра охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении Δd_g

$$\Delta d_b = \frac{(1 + k_{сб}) N_{\max}}{1 + k_{\Delta d}}, \quad (4)$$

где $k_{сб}$ – коэффициент условий реализации сборки соединений с натягом, который принимается в интервале 0,1 – 0,34.

Зная уменьшение посадочного диаметра Δd_b охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении можно определить увеличение посадочного диаметра охватываемой детали при ее нагревании Δd_a

$$\Delta d_a = \Delta d_\Sigma - \Delta d_b. \quad (5)$$

Таким образом использование зависимостей (1) – (5) позволит с учетом сокращения энергетических затрат осуществлять выбор следующих технологических параметров КТСС: необходимых значений Δd_a и Δd_b , температурных уровней и температур неравномерного нагрева и неравномерного охлаждения сопрягаемых деталей для получения величин Δd_a и Δd_b с учетом направления подвода тепла и холода, затрат времени на выполнение технологических операций.

Следует при этом отметить, что для решения задачи проектирования технологии КТСС с учетом энергосбережения обязательным также условием должно быть согласование по времени всех технологических операций на промежутке от начала совмещения деталей с временным зазором до начала нагрева охватываемой детали и низкотемпературного охлаждения охватываемой. При этом установлено, что возможны различные варианты сборки.

Если предположить, что структура временных затрат выбрана с учетом минимизации потерь тепла и холода деталями, то далее очень важно определиться с характером запаса ими энергии, полученной при их неравномерном нагреве и неравномерном охлаждении, и законом распределения в них температуры.

Примем, что КТСС соединений с натягом выбран с учетом минимизации временных затрат и тепловых потерь (например, проводится в автоматизированном цикле), нагрев и охлаждение обеих деталей или одной из них осуществляется неравномерно, а выдержка после термовоздействия не происходит.

В этом случае в обеих деталях или одной из них будет сохраняться характер неравномерного распределения температуры, который они приобрели в процессе термовоздействия над ними.

На основании анализа и синтеза известных технологий сборки установлено, что при выполнении технологических операций термовоздействия на детали при КТСС возможны 36 основных вариантов распределения температуры в толстостенных и тонкостенных деталях с учетом направления подвода к ним тепла или холода.

Для оперативного применения предложенной методики расчета при проектировании рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом КТСС разработан новый графоаналитические способы.

На основании выполненных те разработаны графоаналитические способы, позволяющие при проектировании оперативно определять рациональные технологические параметры реализации технологии формирования соединений с натягом способом КТСС. Предлагаемые графоаналитические способы созданы с учетом технологических параметров, которые гарантируют прочность соединений с натягом и условия осуществления их бесконтактной сборки при вертикальной и горизонтальной схемах ориентирования деталей.

Для оперативного применения методики расчета при проектировании рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом КТСС разработан с использованием программного комплекса MatCAD новый графоаналитический способ, который представляет две номограммы (рис. 1 и 2). Способ позволяет определить рациональное соотношение необходимого увеличения посадочного диаметра охватываемой детали при ее нагреве и уменьшения для охватываемой детали при ее низкотемпературном охлаждении. Полученные номограммы разработаны на основе аналитического решения зависимости (3).

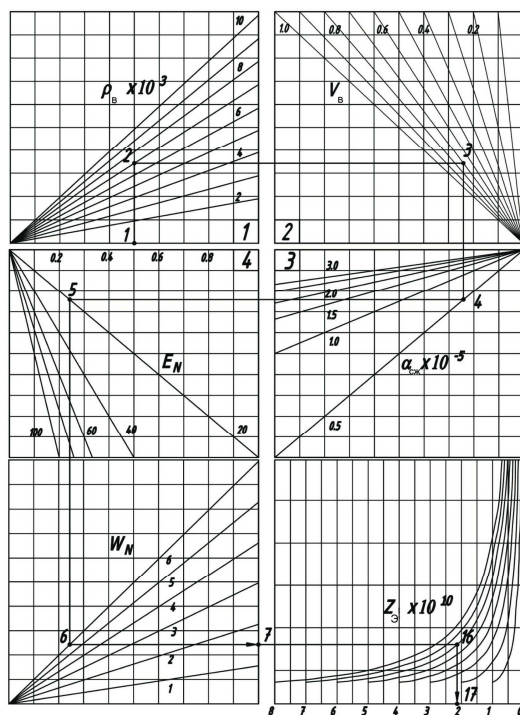
На рис. 1 представлена номограмма для определения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающей детали, а на рис. 2 – номограмма для определения параметра $Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при охлаждении охватываемой детали и коэффициента $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b .

Номограмма (рис. 1) включает 6 квадрантов. По оси абсцисс 1-го квадранта отложены значения теплоемкости материала охватываемой детали C_e , а на его лучах значения удельной плотности ρ_e , на лучах во 2-м квадранте – значение объема V_e охватываемой детали, на лучах в 3-м квадранте – значение коэффициента линейного сжатия материала, на лучах в 4-м квадранте – значение скрытой теплоты E_N испарения жидкого азота при погружении детали в ванну, на лучах в 5-м квадранте – значение себестоимости 1-го кг жидкого азота, на лучах в 6-м квадранте отложены значения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающей детали, которые будут определяться по номограмме, представленной на рис. 2. По оси абсцисс 6-го квадранта также отложена шкала определяемого значения коэффициента $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b . Номограмма (рис. 2) включает 6 квадрантов. По оси абсцисс 1-го квадранта отложены значения теплоемкости материала охватывающей детали C_a , а на его лучах значения удельной плотности ρ_a , на лучах во 2-м квадранте – значение объема V_a охватывающей детали, на лучах в 3-м квадранте – значение коэффициента линейного сжатия материала α_e , на лучах в 4-м квадранте – значение КПД нагревателя η_j , на лучах в 5-м квадранте – значение коэффициента мощности $\cos \beta$, на лучах в 6-м квадранте отложены значения себестоимости 1 кВт.час электрической энергии на нагрев охватывающей детали, по оси абсцисс 6-го квадранта также отложена шкала определяемого значения параметра $Z_a = Z_a \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающих деталей.

Решение задачи по определению коэффициента относительных затрат на нагрев охватывающих деталей и низкотемпературное охлаждение охватываемых деталей, а также отношение необходимого увеличения посадочного диаметра охватывающей детали к его уменьшению для охватываемой следует проводить в следующей последовательности.

Вначале по номограмме (рис. 2.) по оси абсцисс 1-го квадранта находим значения теплоемкости C_a материала охватывающей детали (т.8), с которой проводим перпендикуляр до пересечения с лучом (т.9) для заданного значения удельной плотности ρ_a . Затем с т.2 проводим горизонталь во 2-й квадрант до пересечения с лучом (т.10), соответствующим значению объема V_a охватывающей детали. Далее с т.10 проводим вертикаль вниз в 3-й квадрант до пересечения с лучом (т.11), соответствующим значению коэффициента линейного расширения α_p материала. С т.11

проводим горизонталь в 6-й квадрант до пересечения с лучом (т.12), соответствующим η , значению кпд нагревателя.



$$k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$$

Рис. 1. Номограмма для определения параметров

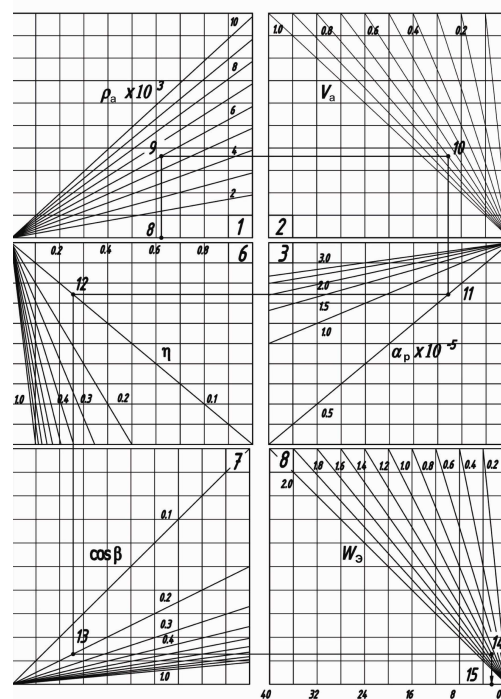
$$Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3 \text{ [грн/мм]}$$

$$\text{и } k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$$

Rys. 1. Nomogram dla wyznaczenia parametrów

$$Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3 \text{ [°C/mm]}$$

$$\text{і } k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$$



$$Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$$

Рис. 2. Номограмма для определения параметра $Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающей детали

Rys. 2. Nomogram dla wyznaczenia parametrów

$$Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3 \text{ [°C/mm]} \text{ przy nagrzewaniu części obejmującej}$$

С т.12 проводим вертикаль в 7-й квадрант до пересечения с лучом (т.13), соответствующим значению коэффициента мощности $\cos \beta$. С т.13 проводим горизонталь в 8-й квадрант до пересечения с лучом (т.14), соответствующим значению себестоимости W_o 1 кВт.час электрической энергии. Проведя с т. 14 вертикаль вниз до абсциссы квадранта (т.15) определим значение параметра $Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при нагреве охватывающих деталей. Затем переходим к номограмме, представленной на рис. 1. Вначале по оси абсцисс 1-го квадранта находим значения

теплоемкости материала охватываемой детали C_g (т.1), с которой проводим перпендикуляр до пересечения с лучом (т.2) для заданного значения удельной плотности ρ_g . Затем с т.2 проводим горизонталь во 2-й квадрант до пересечения с лучом (т.3), соответствующим значению объема V_g охватываемой детали. Далее с т.3 проводим вертикаль вниз в 3-й квадрант до пересечения с лучом (т.4), соответствующим значению коэффициента линейного сжатия α_g материала. С т.4 проводим горизонталь в 4-й квадрант до пересечения с лучом (т.5), соответствующим значению скрытой теплоты E_N испарения жидкого азота при погружении детали в ванну. С т.5 проводим вертикаль в 5-й квадрант до пересечения с лучом (т.6), соответствующим значению себестоимости 1 кг жидкого азота. По ординате квадранта (т.7) определим значение параметра $Z_b = Z_o \cdot \Delta d_b / d \cdot 10^3$ [грн/мм] при охлаждении охватываемой детали. Затем с учетом полученного значения параметра $Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$ определим коэффициент $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b . Для этого вначале с т. 7 проведем горизонталь в квадрант 9 до пересечения с лучом (т.16), соответствующим значению определенного параметра $Z_a = Z_o \cdot \Delta d_a / d \cdot 10^3$, а затем с т. 16 проводим вертикаль вниз до оси абсцисс (т.17) и находим значение $k_{\Delta d} = \Delta d_a / \Delta d_b$ соотношения изменения диаметра посадки при нагреве охватывающих деталей Δd_a и при низкотемпературном охлаждении охватываемых Δd_b .

ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование разработанной методологии позволяет с достаточной для технологии машиностроения точностью с учетом сокращения энергетических затрат производить выбор оптимальных параметров технологии формирования соединений с натягом комбинированным термическим способом сборки (КТСС).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И. Л. Определение параметров энергосбережения при сборке соединений с натягом КТСС // "Современные проблемы подготовительного производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте". 22–26 февраля 2010 г. Сб.: – К., Материалы 10-го международного научно-технического семинара, 26 – 28 февраля 2010 г., г. Свалява: – К.: АТМ Украины, 2010. – С.194 – 197.
2. Оборский И.Л. Технологическое обеспечение сборки соединений с натягом комбинированным термическим способом. // "Современные проблемы подготовительного производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте". 26–28 февраля 2008 г. Сб.: – К., Материалы 8-го международного научно-технического семинара, 26 – 28 февраля 2008 г., г. Свалява: – К.: АТМ Украины, 2008. –С. 190 – 192.

3. Оборский И.Л. Выбор условий для качественной реализации процесса формирования соединений деталей с натягом КТСС.// "Человек–технологии–среда. Теория и практика". 15 – 19 сентября 2009 г. Сб.: Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции, 15 – 19 сентября 2009 г., г. Судак, Украина. – 2009. – С. 83 – 85.

DESIGN OF THE RATIONAL ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF ASSEMBLING CONNECTIONS WITH THE INTERFERENCE, ACHIEVED BY THE THERMAL METHODS

Abstract. *On the basis executed theoretical and experimental studies are developed dependences and is created methodology, that make it possible to determine the rational assembly-line parameters and to develop the rational structures of the technological process of assembling, which ensures energy-economy with KTSS.*

Ivan OBORSKIY
Aleksandr DEMKOWSKIY
Nina OBORSKA
Dmitrij CHOMENKO
Kijowski Uniwersytet
Technologii i Projektowania
Kijów, Ukraina

WYZNACZANIE PARAMETRÓW KONSTRUKCYNO-TECHNOLOGICZNYCH I PROJEKTOWANIE RACJONALNEJ TECHNOLOGII MONTAŻU POŁĄCZEŃ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

ВВЕДЕНИЕ

Для выбора рациональной структуры технологического процесса, обеспечивающего прочностные характеристики, необходимо установить множество входных факторов [1-3]. К основным из них следует отнести: условия эксплуатации соединения; конструктивные размеры соединяемых деталей (диаметр посадки, длина сопряжения, толщина стенок деталей); физико-механические свойства используемых материалов (коэффициенты линейного расширения и сжатия, удельная теплоемкость, теплопроводность, коэффициент теплопередачи, механические характеристики материалов деталей и промежуточных прослоек в зоне контакта); предельно допустимые уровни температур нагрева и охлаждения при КТСС; условия отверждения клеевой прослойки. Следует также отметить, что существенное и, зачастую, определяющее влияние на характеристики прочности цилиндрических соединений с натягом оказывает технологическая подготовка сопрягаемых поверхностей сопрягаемых деталей. В докладе приводятся технологические методы качественной подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей нанесением регулярного микрорельефа и сборки соединений с натягом. При известных выше параметрах и условиях определены рациональные методы формирования посадок деталей. Для решения этой задачи выполнен выбор параметров соединений для заданной их прочности и применительно к исследуемым методам их формирования. С этой целью разработано соответствующее программное обеспечение по определению параметров сборки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации задачи вычисления оптимальных параметров и способа сборки соединений с натягом создан программный комплекс, позволяющий определять технологические сборочные параметры для разных способов сборки, а именно:

- с нагревом охватывающей детали;
- с низкотемпературным охлаждением охватываемых деталей;
- с низкотемпературным охлаждением охватываемых деталей и с нагревом охватывающей;
- с нагревом охватывающей и гальваническим покрытием;
- с низкотемпературным охлаждением охватываемых деталей и гальваническим покрытием;
- с низкотемпературным охлаждением, нагревом и гальваническим покрытием;
- с нагревом охватывающей детали и клеем;
- с нагревом, охлаждением и клеем.

Для работы программного комплекса создана база данных значений констант, свойств материалов деталей, конструктивных и технологических параметров, влияющих на прочность посадок с натягом. На рис.1 представлена структурная схема программного комплекса выбора метода сборки высокопрочных малонапряженных соединений с натягом.

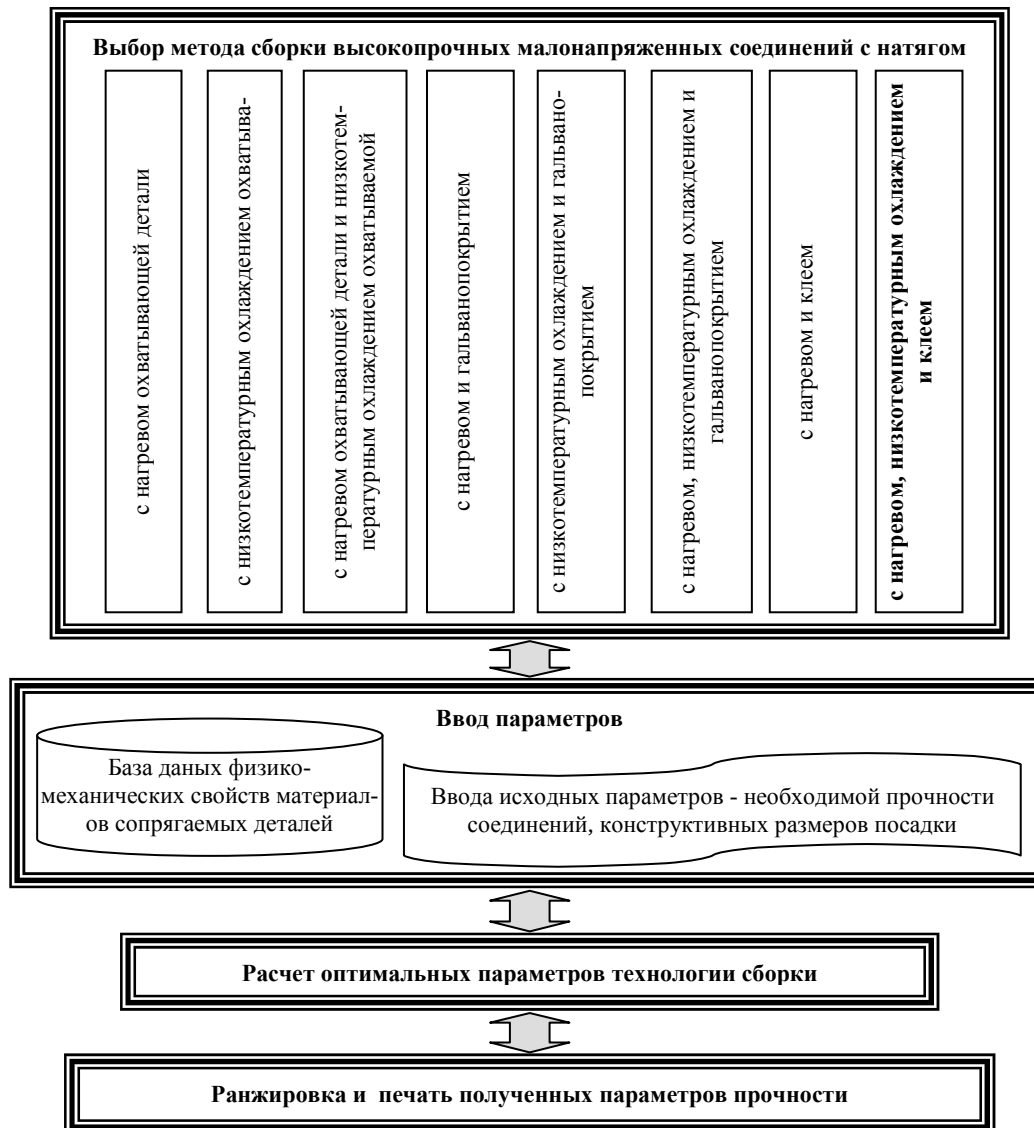


Рис.1. Структурная схема программного комплекса выбора метода сборки высокопрочных малонапряженных соединений с натягом

Rys. 1. Strukturalny schemat systemu oprogramowań dla wyboru sposobu montażu wytrzymałych i z małymi naprężeniami połączeń wciskanych

Установлено, что для формирования соединений с натягом целесообразно использовать следующие способы: 1 – с нагревом охватывающей детали; 2 – с низкотемпературным охлаждением охватываемой детали; 3 – КТСС; 4 – с нагревом и гальванопокрытием; 5 – с низкотемпературным охлаждением и гальванопокрытием; 6 – с нагревом, низкотемпературным охлаждением и гальванопокрытием; 7 – с нагревом и клеем; 8 – КТСС и с клеем.

Сущность методологии выбора технологических параметров сборки различными способами заключается в следующем.

Решение поставленной задачи сводится с ввода исходных параметров: необходимой прочности P соединений, конструктивных размеров (диаметра наружного охватывающей детали, посадки и внутреннего отверстия охватываемой детали), длины посадки, физико-механических свойств материалов сопрягаемых деталей, клеевых композиций и гальванических покрытий.

После ввода данных проводится расчет оптимальных параметров технологии сборки.

Следует отметить, что существенное влияние на прочность посадок оказывают параметры микрорельефа в зоне контакта деталей, особенно параметры регулярного микрорельефа. Для выбора таких параметров предлагается методика и новый графоаналитический способ, включающий специально созданные номограммы (рис. 2 – 4). По первой номограмме (рис. 2) можно определить прочность соединения с натягом, формируемых способом КТСС, с учетом конструктивных параметров соединений, физико-механических характеристик материалов и промежуточных параметров технологии подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей. Вторая номограмма (рис. 3) предназначена для определения промежуточных параметров прочности соединений с натягом при КТСС с учетом технологии подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей нанесением на их сопрягаемую поверхность специальной топологии регулярного микрорельефа. По третьей номограмме (рис. 4) представлена возможность окончательно определить параметры топологии регулярного микрорельефа для обеспечения прочности соединений с натягом при их сборке способом КТСС с учетом конструктивных параметров соединений и физико-механических характеристик материалов сопрягаемых деталей. Номограмма (рис. 2) состоит с 6-ти квадрантов. На абсциссе 1-го квадранта отложены значения посадочных диаметров d в мм. Кривые первого квадранта соответствуют значениям $m = d_2 / d_1$ отношения наружного диаметра d_2 охватывающей детали и внутреннего диаметра d_1 охватываемой. Во втором и третьем квадрантах нанесены наклонные линии, соответствующие соответственно значениям длины L посадки (соединения с натягом) в мм и модуля упругости E для материала деталей в единицах МПа. В четвертом квадранте нанесена наклонная линия, учитывающая частное $\pi^2 / 96$ от отношения квадрата числа $\pi = 3,14$. В пятом квадранте нанесены наклонные лучи, соответствующие произведению πd (мм) числа $\pi = 3,14$ на диаметр посадки d в мм. В пятом квадранте нанесены наклонные, соответствующие части $X = X \cdot 2$ (мм) длины L соединения, выполненной без регулярного микрорельефа на сопрягаемой поверхности охватываемой детали. На оси абсцисс шестого квадранта отложены значения прочности соединения P_t (кН) со стороны торцов, то есть на двух участках X , где нет регулярного микрорельефа.

Вторая номограмма (рис. 3) состоит с 4-х квадрантов. На оси абсцисс седьмого квадранта отложены значения прочности соединения P_t (кН) со стороны торцов, в самом квадранте нанесены наклонные линии, соответствующие прочности P_c соединения в средней части на длине $L-2x$ с регулярным микрорельефом.

В квадранте 8 нанесены лучи, соответствующие значениям произведения πd в мм, а в квадранте 9 наклонные линии, соответствующие соответственно значениям длины L_c посадки (соединения с натягом) в мм в средней части на длине $L-2x$ с регулярным микрорельефом. В квадранте 10 нанесены лучи, соответствующие значениям напряжений при сдвиге τ_a для материала охватывающей детали в единицах МПа. Третья номограмма (рис. 4) состоит с 4-х квадрантов.

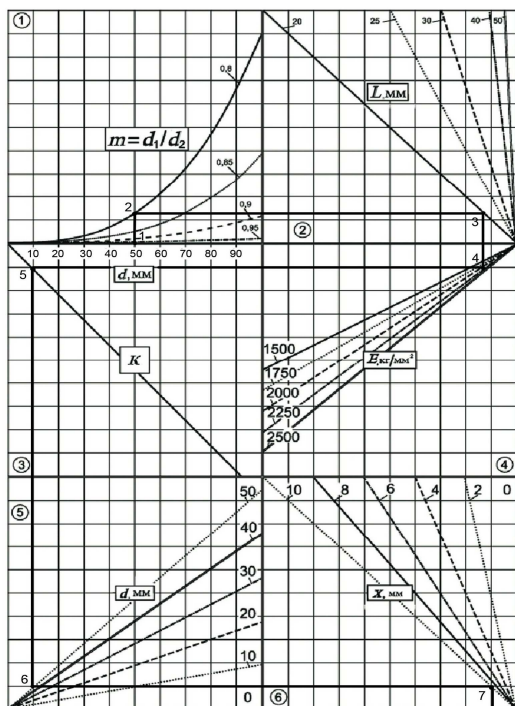


Рис. 2. Номограмма для определения прочности соединения с натягом с учетом конструктивных параметров соединений, физико-механических характеристик материалов

Rys. 2. Nomogram dla wyznaczenia wytrzymałości połączenia wciskanego z uwzględnieniem konstrukcyjnych parametrów połączenia oraz fizyko-mechanicznych właściwości materiałów

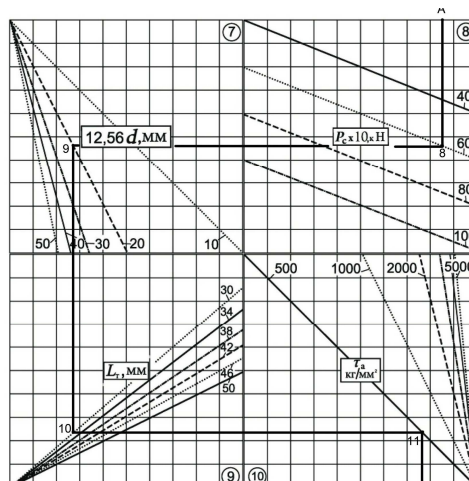


Рис. 3. Номограмма для определения промежуточных параметров прочности соединений с натягом при КТСС.

Rys. 3. Nomogram dla wyznaczenia pośrednich parametrów wytrzymałości połączeń wciskanych sposobem termicznym

В двенадцатом квадранте нанесены наклонные линии, соответствующие шагу S (мм) выполнения регулярного микрорельефа, а в квадранте 13 – лучи, соответствующие значениям тангенса $\tan \alpha$ угла профиля микрорельефа при его вершине. В квадранте 14 нанесены наклонные параллельные линии, соответствующие значениям в мм произведения контактного давления p_N на параметр A .

На оси абсцисс квадранта 14 отложены значения высоты регулярного микрорельефа R_b (мм).

Примем конструктивные параметры соединения и деталей: диаметр посадки d , отношение наружного диаметра d_2 охватываемой детали и внутреннего диаметра d_1 охватываемой равным $m = d_2 / d_1 = 2$, длину посадки L , модуль упругости, число $\pi = 3,14$, длины соединения по торцам $X = L \cdot 2$ и нанесения регулярного микрорельефа на поверхность охватываемой детали $L_c = L - X$, заданную прочность соединения P_c , напряжения среза микрорельефа при сдвиге для материала охватываемой детали τ_a и охватываемой τ_b , шаг нанесения микрорельефа на сопрягаемую

поверхность охватываемой детали S , углы α при вершине и наклона стороны $\beta_y = 85-90^\circ$, стороны воспринимающей нагрузку, и контактное давление p_N , создаваемое сборочным натягом.

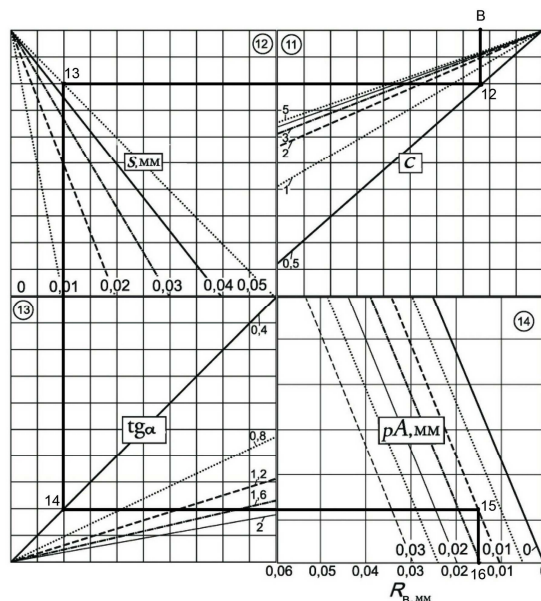


Рис. 4. Номограмма для определения параметров технологии подготовки сопрягаемых поверхностей охватываемых деталей для обеспечения заданной повышенной прочности соединений с натягом при КТСС

Rys. 4. Nomogram dla wyznaczenia parametrów technologii przygotowania złączanych powierzchni części obejmujących celem zapewnienia zadanej podwyższonej wytrzymałości połączeń wciskanych sposobem termicznym

Рассмотрим решение задачи применительно к соединению деталей, изготовленных, например, из стали 45. Последовательность решения следующая. Примем конструктивные параметры соединения и деталей: диаметр посадки d , отношение наружного диаметра d_2 охватывающей детали и внутреннего диаметра d_1 охватываемой равным $m = d_2 / d_1 = 2$, длину посадки L , модуль упругости Юнга, число $\pi = 3,14$, длины соединения по торцам $X = X \cdot 2$ и нанесения регулярного микрорельефа на поверхность охватываемой детали $L_c = L - X$, заданную прочность соединения P_c , напряжения среза микрорельефа при сдвиге для материала охватывающей детали τ_a и охватываемой τ_b , шаг нанесения микрорельефа на сопрягаемую поверхность охватываемой детали S , углы α при вершине и наклона стороны $\beta_y = 85-90^\circ$, стороны воспринимающей нагрузку, и контактное давление p_N , создаваемое сборочным натягом.

Затем рассматриваем номограмму на рис. 2. С т.1 (квадрант 1), соответствующей выбранному диаметру посадки $d=50$ мм проводим вертикаль вверх до пересечения с кривой в т.2, соответствующей отношению наружного диаметра d_2 охватывающей детали и внутреннему d_1 равным $m = d_2 / d_1 = 2$. С т.2 проводим горизонталь во второй квадрант до пересечения в т.3

с кривой, соответствующей длине посадки $L=200$ мм, а с т.3 опускаем вертикаль вниз в квадрант 3 до пересечения в т.4 с наклонной, соответствующей модулю упругости Юнга для материалов деталей $E = 2,2 \times 10^4$ МПа. Далее с т.4 проводим горизонталь в квадрант 4 до пересечения в т.5 с наклонной, соответствующей отношению $\pi^2/96$. С т.5 опускаем вертикаль вниз в квадрант 5 до пересечения в т.6 с наклонной, соответствующей диаметру посадки 50 мм. С т.6 проводим горизонталь в 6 квадрант до пересечения в т.7 с наклонной, соответствующей длине соединения со стороны торцов без регулярного микрорельефа на поверхности охватываемой детали $X = 10$ мм. С т.7 проводим вертикаль до пересечения с абсциссой квадранта 6 (т. А), соответствующей прочности соединения по торцам при заданном контактном давлении. Затем переходим к номограмме (рис. 3). С точки А ставим перпендикуляр к наклонной, соответствующей заданной прочности соединения $P_c = 600$ кН (т.8). Далее зная параметры $12,56d$ (т.9) и L_t (т.10), напряжения среза $\tau_a = 500$ МПа (т.11) при сдвиге для материала охватывающей детали, находим на абсциссе квадранта 10 т.В. Переходим к номограмме, представленной на рис. 4. С точки В опускаем перпендикуляр до пересечения в т. 12 с наклонной, соответствующей параметру C (отношение напряжения среза τ_b охватывающей детали к напряжению среза τ_a охватываемой детали). Далее задавшись из практики шагом S (т.13) нанесения регулярного микрорельефа, углами α ($\tan \alpha$ т.14) при вершине и $\beta_y = 85-90^\circ$ наклона стороны, воспринимающей осевую нагрузку, к его основанию, параметр $pA=15$ (т.15), определяющий взаимосвязь влияния контактного давления (натяг принят 50 мкм) и геометрических параметров соединения), находим по оси абсцисс (т.16) высоту $R_b = 15$ мкм.). Параметр pA (квадрант 14, рис. 5.11) определяется расчетным методом по зависимости (3.38) с учетом принятого контактного давления p для сборки соединения с натягом. Для расчета параметров, обеспечивающих прочность соединений с натягом, и выбора рациональной технологии их формирования разработан алгоритм и программа для персонального компьютера.

Выводы: Приведенные структура применяемых способов сборки соединений с натягом, алгоритм и графоаналитический способ позволяют обеспечивать выбор рациональных конструктивно-технологических параметров соединений с натягом с учетом условий эксплуатации, физико-механических свойств используемых материалов, микрорельефа и промежуточных прослоек в зоне контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборский И.Л. Технологические основы сборки соединений с натягом термическими способами с использованием регулярного микрорельефа в зоне контакта // ZESZYTY NAUKOWE Politechniki Rzeszowskiej 261. MECHANIKA z. 76. Modulowe technologie i konstrukcje w budowie maszyn. – Rzeszow (Польша). – 2009. – С. 229 – 234.
2. Оборский И.Л. Технологическое обеспечение качества соединений с натягом, формируемых КТСС с использованием регулярного микрорельефа в зоне контакта деталей // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr. 273. Mechanika, z. 79. Polaczenia montazowe. Rzeszow 2010 (Польша). – С. 115 – 120.
3. Патент України на корисну модель № 41759, МПК(2009) B23P19/02, B23P11/02. Спосіб з'єднання деталей, що охоплюють одна одну. Оборський І. Л., Ляшенко Б.А., Зенкін А.С., Шалай В.О. – №u200814207; Заявлено 10.12.2008; Опубл. 10.06.2009. Бюл. №11.
4. Оборский И.Л. Выбор технологических параметров рациональной энергосберегающей технологии сборки соединений с натягом, осуществляемой термическими способами. // Сб.: Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции "Качество технологий–качество жизни". 15 – 19 сентября 2010, г. Судак, Украина. – 2010. – С. 74 – 76.

**DETERMINATION OF THE CONSTRUCTION-ENGINEERING PARAMETERS
OF CONNECTIONS WITH THE INTERFERENCE AND THE DESIGN OF THE RATIONAL
TECHNOLOGY OF ASSEMBLING**

Abstract. *Is given the structure of the methods of assembling connections with the interference used and the algorithm of solution of problem by the selection of their rational construction-engineering parameters taking into account the operating conditions, physicommechanical properties of the utilized materials, microrelief and intermediate layers in the contact zone.*

Leonid A. RABINOVICH

Maria V. POLYAKOVA

Wołgogradzki Państwowy

Uniwersytet Techniczny

Wołgograd, Rosja

OPTIMALIZACJA PRECYZYJNEGO MONTAŻU PRZY NIEPEŁNEJ ZAMIENNOŚCI CZĘŚCI W POŁĄCZENIACH

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ СБОРКИ ПРИ НЕПОЛНОЙ ВЗАИМОЗАМЕ- НЯЕМОСТИ ДЕТАЛЕЙ В СОЕДИНЕНИЯХ

В машино- и приборостроении прецизионное производство отличается особой технологической сложностью. Это относится, в том числе, и к сборочным технологиям, строящимся, как правило, на принципах групповой взаимозаменяемости и требующих для образования сборочного комплекта выполнения процедур размерного подбора деталей.

Необходимость размерного комплектования деталей приводит к образованию недоукомплектованных изделий, называемому незавершенным производством. Его объем зависит от степени неидентичности распределений размеров сопрягаемых поверхностей и достигает значений, соизмеримых с объемами собираемой продукции.

Вместе с тем, незавершенное производство может быть существенно уменьшено соответствующей организацией размерной обработки сопрягаемых поверхностей. Рассмотрим, как это можно сделать для сборки с групповой взаимозаменяемостью гладких цилиндрических соединений.

Цилиндрические поверхности прецизионной пары, имея одинаковый номинальный размер, обрабатываются с неодинаковой точностью: вал изготавливается точнее отверстия на один или даже два квалитета [1]. Чтобы при этом в сборке участвовали все детали, изготовленные в пределах назначенных допусков, групповые допуски у отверстий $\Delta_A^{гр}$ будут протяженнее групповых допусков

вала $\Delta_B^{гр}$ в отношении:

$$\Delta_A^{гр} = \frac{\delta_A}{\delta_B} \cdot \Delta_B^{гр},$$

где δ_A и δ_B - поля допусков у диаметров сопрягаемых поверхностей отверстия и вала. В этом случае незавершенного производства не возникает, но точность соединений, образованных из одноименных групп деталей будет неодинаковой и будет выходить за допустимые пределы, т.е. появится дополнительная доля бракованных единиц, тем большая, чем выше требования точности сборки [2].

Чтобы не допустить появления брака из-за неодинаковых групповых допусков, более точно обрабатываемые детали соединения – валы, должны изготавливаться в пределах всего допуска менее точно обрабатываемых деталей – отверстий, т.е. сопрягаемые поверхности валов следует обрабатывать, производя размерную перенастройку оборудования. При этом партия изготавливаемых с несколькими k размерными перенастройками валов по распределению размеров должна «подгоняться» под распределение размеров отверстий.

Метод прецизионной сборки подгонкой известен в машиностроении для соединений с индивидуальной взаимозаменяемостью деталей, и в случае автоматизации называется сопряженной обработкой. Поэтому будем называть такую технологию изготовления деталей для последующей сборки с групповой взаимозаменяемостью **сопряженной обработкой партий деталей**.

Поясним назначение сопряженной обработки партий деталей показанными на рис. 1 распределениями размеров сопрягаемых поверхностей отверстий $f_A(x)$ и валов $f_B(x)$, изготавливаемых на k настроечных размерах D_{Hj} ($j = \overline{1, k}$), назначенных определенным образом относительно номинального диаметра $D_{ном}$ соединения.

Очевидно, что в каждую i -ую ($i = \overline{1, r}$) размерную группу валы будут изготавливаться от каждого из настроечных размеров в количествах, определяемых площадью под кривыми $f_B(x)$, ограниченной пределами i -ой размерной группы. Поэтому количество валов, изготавливаемых для i -ой размерной группы, суммируются по формуле:

$$\left\{ \frac{n_{B_i}}{N_A} = \sum_{j=1}^k g_j \cdot \left[F\left(\frac{BG_i - D_{Hj}}{\sigma_B} \right) - F\left(\frac{HG_i - D_{Hj}}{\sigma_B} \right) \right] \right\}, (i = \overline{1, r}), \quad (1)$$

где n_{B_i} - относительно количество валов в i -ой размерной группе; N_A - количество отверстий в партии деталей, поступивших на сборку прецизионного соединения; g_j - относительное количество валов, изготавливаемых на j -ой настройке; σ_B - средне квадратическое отклонение распределения точности изготовления валов; HG_i и BG_i - соответственно нижняя и верхняя границы i -ой размерной группы валов; $F(z)$ - функция Лапласа.

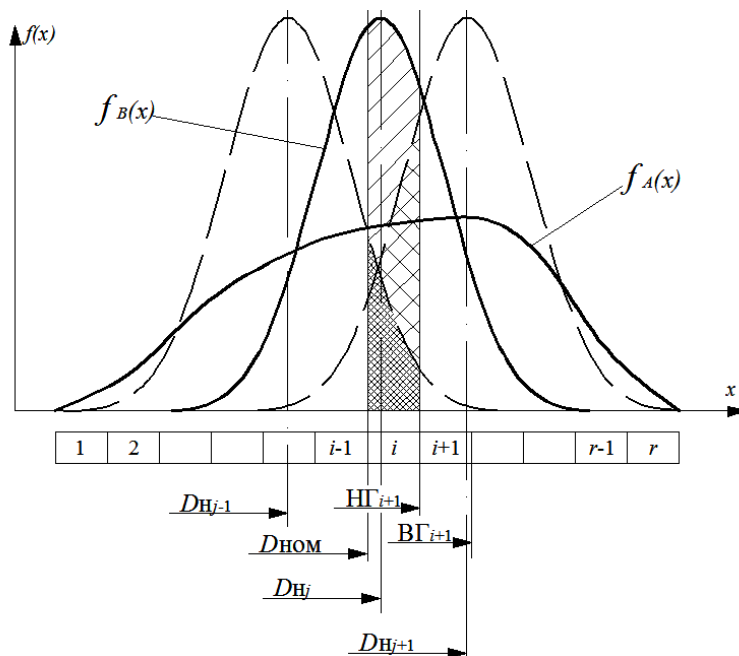


Рис. 1 Распределения размеров сопрягаемых поверхностей прецизионной пары

Rys. 1. Rozkłady wymiarów łączonych powierzchni precyzyjnego połączenia

В выражении (1) значения k , D_{nj} и g_j можно установить следующим образом: принимается значение k и назначаются D_{nj} ($j = \overline{1, k}$) и тогда из системы уравнений (1) берется k уравнений и рассчитываются величины g_j , задающие количественную программу изготовления валов на каждой настройке оборудования.

Для данного решения следует оговорить следующие условия. В уравнениях (1) количеству отверстий в селективных группах приравнивается сумма количеств валов с соответствующих настроек, попадающих в данную селективную группу. Поэтому число уравнений в системе (1) равно числу r селективных групп отверстий. Количество же перенастроек $k \ll r$. Таким образом возникает неопределенность в выборе условий для решения g_j . Однако, так как целью решения g_j является достижение минимума незавершенного производства, то и значение g_j следует выбрать из ряда возможных решений по образованию минимума незавершенного производства. Такой расчет можно произвести, например, в пакете *MathCAD*, где для приближенного решения системы уравнений предусмотрена функция *Minerr*, которая минимизирует невязку системы уравнений. Количество k настроечных размеров устанавливается таким, при котором незавершенное производство будет уменьшено до практически допустимого объема. С другой стороны, число перенастроек следует сделать наименьшим. Поэтому начальное значение k принимается равным двум.

Значения D_{nj} устанавливаются в пределах допусков наиболее насыщенных размерных групп парных деталей так, чтобы при настройке на размер валы обрабатывались пропорционально для двух смежных наиболее многочисленных групп отверстий. То есть со сдвигом δ_j , относительно границы допуска между выбранными группами отверстий, в сторону большей по численности группы (рис. 2) при котором будет удовлетворяться условие:

$$\frac{n_{A_{i+1}}}{n_{A_i}} = \frac{F\left(\frac{\Delta_B^p}{\sigma_B}\right) + F\left(\frac{\delta_j}{\sigma_B}\right)}{F\left(\frac{\Delta_B^p}{\sigma_B}\right) - F\left(\frac{\delta_j}{\sigma_B}\right)},$$

откуда:

$$F\left(\frac{\delta_j}{\sigma_B}\right) = \frac{n_{A_{i+1}} - n_{A_i}}{n_{A_{i+1}} + n_{A_i}} \cdot F\left(\frac{\Delta_B^p}{\sigma_B}\right), \quad (2)$$

где Δ_B^p - протяженность группового допуска в размерной группе валов; $\Delta_B^p = \Delta_A^p$. Тогда значение очередного настроечного размера D_{nj} будет:

$$D_{nj} = B\Gamma_i \pm \delta_j, \text{ или } D_{nj} = D + \xi_j, \quad (3)$$

где ξ_j - величина, корректирующая настроечный размер, относительно номинального.

Очевидно, что расстояние между двумя смежными значениями настроечных размеров D_{nj} и D_{nj+1} должно быть больше либо равно сумме двух значений групповых допусков вала, т.е.

$$D_{nj+1} - D_{nj} \geq 2\Delta_B^p.$$

Номера i и $i+1$ двух размерных групп отверстий могут быть назначены произвольно. Однако в последующих расчетах комбинации выбранных для расчета g_j номеров групп отверстий могут быть изменены и расчеты g_1 и g_2 повторены для оценки правильности полученных результатов.

Теперь при назначенных D_{n1} и D_{n2} и рассчитанных значениях g_1 и g_2 может быть выполнена сортировка валов на селективные группы, вычислены количества некомплектуемых валов и отверстий, т.е. объем незавершенного производства Q при данном варианте настройки для размерной обработки валов. Очевидно, что он уменьшится по сравнению с тем, который образуется

при изготовлении валов для всей партии отверстий при одной размерной настройке оборудования. Логично, однако, попытаться улучшить дополнительно результаты сборки, получаемые для двух настроек. Для этого следует увеличить разность настроечных размеров обработки вала сначала на одну величину Δ_B^{rp} , затем на два Δ_B^{rp} и т.д., и все расчеты повторять до тех пор, пока объем незавершенного производства будет уменьшаться. Рассчитанная таким образом величина незавершенного производства покажет технологическую возможность повысить собираемость прецизионных пар при двух настройках оборудования.

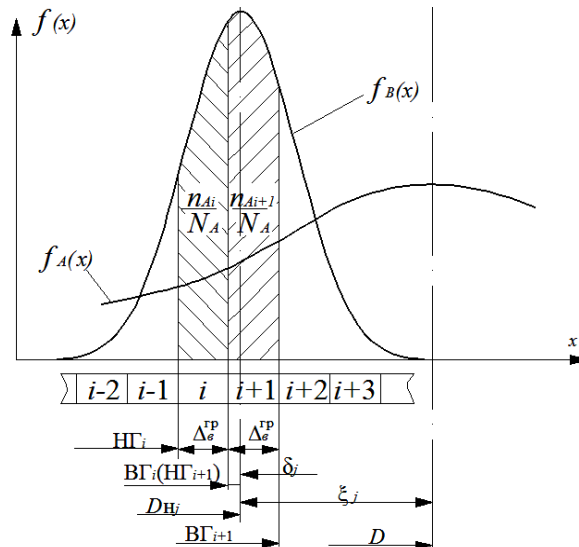


Рис. 2 Схема к расчету D_{Hj}

Rys. 2. Schemat dla obliczenia D_{Hj}

Аналогичные расчеты должны быть продолжены при трех, четырех и т.д. перенастройках D_{Hj} до тех пор, пока объем незавершенного производства не достигнет минимального значения, либо не будет оптимизирован по минимуму затрат на селективное комплектование прецизионных пар. Оптимизация числа k перенастроек может быть решена следующим образом.

Необходимость периодической перенастройки уменьшает производительность при изготовлении валов и связана с дополнительными затратами на усовершенствование технологического оборудования, но с другой стороны, повышает собираемость прецизионных изделий в партиях поступающих на сборку деталей, т.е. улучшает экономические показатели сборочного производства. Компромисс между данными экономическими показателями может быть установлен решением задачи линейного программирования, представленной целевой функцией:

$$L = C1 \cdot k_j + C2 \cdot Q_j \rightarrow \min, \quad (4)$$

при ограничениях:

$$j \leq k; Q_j \leq 1,$$

где $C1$ и $C2$ – ценовые коэффициенты, т.е. стоимости одной перенастройки и одной единицы незавершенной продукции соответственно; k , Q_j , j – как и ранее, число настроечных размеров и вероятность образования некомплектных пар при j настройках оборудования. Решение функции (4) методом перебора всех вариантов покажет, при каком числе перенастроек и объеме

незавершенного производства экономические затраты на изготовление конкретного прецизионного изделия будут наименьшими.

Назовем данное расчетное число перенастроек оптимальным ($k_{\text{опт}}$), а соответствующий ему объем незавершенного производства допустимым ($Q_{\text{доп}}$).

Тогда в описанной выше процедуре расчета числа перенастроек следует заменить цель уменьшения объема незавершенного производства с минимального Q_{min} на допустимый $Q_{\text{доп}}$, оптимизирующий затраты на усложнение оборудования и технологию размерной обработки партий валов.

Применение описанной методики покажем на примере расчета параметров размерной настройки оборудования при изготовлении валов, обрабатываемых с одной установки точнее отверстий на один и два квалитета (рис. 3). Отклонение размеров сопрягаемых поверхностей примем с параметрами, определяемыми посадкой соединения.

Для таких соотношений точности сопрягаемых поверхностей с групповой взаимозаменяемостью без рассмотренной выше перенастройки оборудования образуется незавершенное производство в объеме, сравнимом с количеством собираемых прецизионных пар (до 50% и более). На графике, на рис. 3 его величина Q показана на оси OY при сборке соединений с участием валов, изготовленных с одной настройки ($k=1$): для кривой 1 – вал точнее отверстия на один квалитет, для кривой 2 – вал точнее отверстия на два квалитета. Для демонстрации возможностей изложенной выше методики расчета на рис. 3,б - показаны результаты аналогичного расчета, но для выборочного распределения диаметров в партии отверстий (задаваемого, например, таблицей). На графиках видно, что с увеличением числа настроек при заданной количественной программе изготовления валов, определяемой расчетом, количество некомплектных пар деталей уменьшается и достигает наименьшего (1,8%) при числе перенастроек $k = 5$ для условий, определяемых кривой 1 и (0,4%) при $k = 7$ – для кривой 2 (общий результат). То же имеет место и для выборочного распределения диаметров отверстий, но при $k = 6$ и $k = 5$, соответственно.

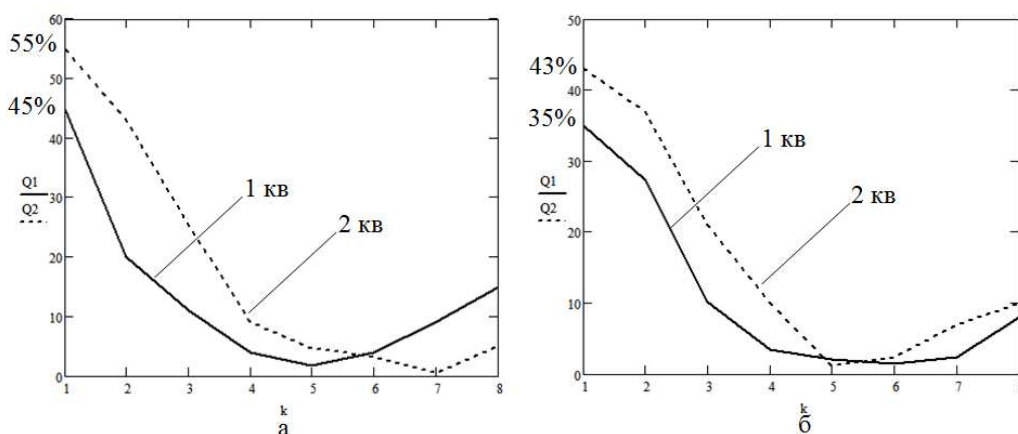


Рис. 3 Объем незавершенного производства в зависимости от числа перенастроек

Rys. 3. Liczność niewykorzystanych elementów w zależności od liczby przestawień

Зависимость, характеризующая уменьшение объема незавершенной продукции, показанная на рис. 3а, будет выдерживаться в производстве прецизионных соединений, когда объемы партий, поступающих на сборку деталей будут обладать устойчивыми нормальными распределениями (для крупносерийного и массового производств).

Для этого случая в качестве практических рекомендаций может применяться программа размерных настроек оборудования и количеств g_j обрабатываемых на них долей валов от общего объема изготавливаемой партии, приведенные в таблице в колонках 3 и 4.

Здесь значения величины ξ_j (колонка 3), корректирующей настроечный размер D_H (см. (3)) относительно номинального диаметра D соединения, приведены в единицах σ_A (σ_A – стандарт распределения диаметров отверстий, может быть установлен по допуску на диаметр отверстия).

В колонках 6, 7 и 8 приведена программа перенастроек и количества изготовления валов для оптимизированной по затратам сборки с групповой взаимозаменяемостью. В этом случае число перенастроек несколько уменьшается, их размеры меняются, а объем незавершенной продукции увеличивается.

Табл. 1. Расчетные параметры настроек оборудования для CO партии валов

Tabl. 1. Obliczeniowe parametry nastawień urządzeń dla optymalnego montażu partii wałów

Соот-е точности обработки валов и отверстий; вал точнее отверстия:	Для достижения минимума НП				Оптимизированные по минимуму затрат			
	Число настроек k	Значения ξ_j (в ед. σ_A)	Доля g партии валов	Величина Q (в %)	Число настроек k	Значения ξ_j (в ед. σ_A)	Доля g партии валов	Величина Q (в %)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
на один квалитет	5	-1,8	0,055	1,8	4	-1,8	0,196	4,0
		-0,8	0,247			-0,6	0,307	
		0,0	0,396			+0,6	0,307	
		+0,8	0,247			+1,8	0,196	
		+1,8	0,055					
на два квалитета	7	-2,2	0,09	0,4	5	-2,2	0,13	3,6
		-1,6	0,121					
		-0,8	0,17			-0,6	0,216	
		0,0	0,238			0,0	0,308	
		+0,8	0,17			+0,6	0,216	
		+1,6	0,121					
		+2,2	0,09			+2,2	0,13	

Однако эти рекомендации носят частный характер и пригодны для достижения минимальных затрат в случае, взятом для примера, когда затраты на перенастройку оборудования и соответствующие им потери производительности C_1 приравнены к стоимости C_2 одного прецизионного изделия. Более детальные исследования влияния соотношения ценовых коэффициентов показывают, что с увеличением серийности производства оптимальные условия перенастройки практически не зависят от их значений и приближаются к минимизирующим по объему незавершенной продукции и, соответственно наоборот, когда серийность производства прецизионной продукции уменьшается. В производствах малой серийности оптимизация программы изготовления валов приобретает решающее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Л.А., Кесоян А.Г. Научное обоснование точной прецизионной продукции при межгрупповой взаимозаменяемости деталей в соединениях. Наука – производству, 2000г, №1, стр. 27-32.
2. Бахтияров Н.И., Логинов В.Е., Лихачев И.И. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1972. – 200с.

OPTIMIZATION OF PRECISION ASSEMBLY AT INCOMPLETE INTERCHANGEABILITY OF DETAILS IN JOINTS

Abstract. *In precision joints complementarity of details is incomplete in most cases(usually group), that leads to essential complication of assembly process and it is accompanied by decline of productivity and work in progress occurrence. Values of these losses can be steered, but it is connected with additional complications of assembly technologies and expenses for their realization. There is a problem of optimization of technology of assembly of the precision joints, minimizing losses from a work in progress and decline of productivity of dimensional acquisition. In the present report the decision of the specified problems of optimization is resulted.*

Victor F. GROMOV
Dmitriy A. OVSYANNIKOV
Instytut Lotniczy MAI
Moskwa, Rosja
Aleksandr F. MAKAROV
Uniwersytet Przyrody,
Społeczeństwa i Człowieka
Dubna, Rosja

STAN NAPRĘŻEŃ I DEFORMACJI PRZY OBCIĄŻENIU ZESPOŁU PRZEGUBOWEGO Z WCIŚNIĘTĄ CIENKOŚCIENNĄ WТУЛКĄ

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ШАРНИРНОГО УЗЛА С ЗАПРЕССОВАННОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ВТУЛКОЙ

В изделиях машиностроения широко используются шарнирные узлы, работающие под воздействием циклических нагрузок высокого уровня в условиях присущей им концентрации напряжений. Усталостные разрушения элементов шарнирного узла, как показано на рис. 1 приводят к значительным экономическим потерям из-за простоя дорогостоящего оборудования и техники. Как при производстве отдельных деталей шарнирного узла, так и при ремонте детали после разрушения имеются достаточно эффективные технологические методы увеличения их выносливости. Одним из направлений в этом плане является использование напряженных посадок цилиндрических деталей вал-втулка.

В строительных и подъёмных машинах распространены подвижные шарнирные узлы. Для увеличения износостойкости в таких узлах применяют втулки из материала с более высокой твердостью. Втулка может быть установлена с радиальным натягом. Поэтому было исследовано влияние радиального натяга посадки втулки в отверстие на концентрацию напряжений в пластине.

Отверстие находится вблизи края пластины, что значительно изменяет напряженное состояние в пластине как при посадке с натягом, так и при нагружении соединения. Напряженно-деформированное состояние, создаваемое посадкой с натягом, в этом случае является неосесимметричным. Контактные радиальные напряжения натяга будут переменными по окружности отверстия, а напряжения в перемычке до края пластины значительно больше, чем при посадке в отверстие, в бесконечной пластине. Особый интерес представляет решение задачи для посадки тонкостенной втулки, стенка которой является гибкой и мало препятствует неосесимметричной деформации отверстия. В этом случае произойдет искажение сечения втулки, в том числе внутреннего диаметра, то есть появится овальность. Расчёт напряжённого состояния, возникающего при нагружении узла силой, осложняется, кроме влияния края пластины, необходимостью решать контактную задачу для трёх тел: пластины, втулки и оси. При посадке втулки с натягом необходимо совместно решать задачу о напряженной посадке и контактную задачу для трёх тел.

Решение задачи о напряженной посадке в деталь произвольной формы, в частности, в проушину или отверстие у края пластины, а также задачи о нагружении отверстия силой классическими методами теории упругости является громоздким и возможно только числовыми методами с использованием ЭВМ. Современные методы конечного элемента, реализованные, в частности в программах COSMOS или ANSYS, позволяют значительно упростить решение подобных задач. Применение односторонних контактных элементов между осью, втулкой и пластиной позволяют учитывать силы трения в контакте, взаимное проскальзывание деталей

и возникновение зазоров на части окружности отверстия, что исключено при применении аналитических методов расчета.

Напряженно-деформированное состояние, создаваемое посадкой с натягом втулки в детали некруглой формы исследовано методом конечного элемента (МКЭ) с использованием программы COSMOS. В качестве объекта исследования была выбрана пластина с эксцентрично расположенным отверстием.

Расчётная схема приведена на рис.2. Размеры пластины 100х100 мм. Диаметр отверстия $D=20$ мм. Диаметр отверстия во втулке $d=0.84D=16.8$ мм. Ось установлена во втулку без натяга, величина зазора принята равной нулю. Нагрузка равномерно распределена по сечению оси.

Расстояние (перемычка) от центра отверстия до края пластины 20 мм, то есть перемычка от края отверстия до края пластины равна 10 мм, что достаточно для обеспечения прочности перемычки на разрыв.

Конечные элементы – плоские двумерные TRIANG. Для контакта использованы односторонние контактные GAP-элементы, коэффициент трения принят равным $f = 0$. Задача решалась в нелинейной постановке.

Материал пластины – чугун с механическими свойствами: модуль упругости $E = 1,2 \cdot 10^{11}$ МПа (12000 кгс/мм²), коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$. Материал втулки – сталь с механическими свойствами: $E = 2 \cdot 10^{11}$ МПа (20000 кгс/мм²), $\mu = 0,3$. Материалы приняты упругими во всем диапазоне напряжений. Для удобства перехода к другим величинам натяга в числовых расчетах принята величина натяга, равная 1%. Абсолютная величина натяга посадки втулки в пластину равна 0,20 мм (1%) или 0,1 мм на радиус. Также выполнен расчёт для посадки втулки в отверстие пластины с нулевым натягом.

Напряжения смятия между втулкой и пластиной приняты равными

$\sigma_s = 24.5$ МПа (2.5 кг/мм²). Соответственно, между осью и втулкой напряжения смятия равны 29 МПа (3 кг/мм²).

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчёта для случая посадки втулки в пластину без натяга. Напряжения в этом случае создаются только приложенной нагрузкой. При переменной внешней нагрузки они будут переменными напряжениями. Напряжений от напряжённой посадки нет. Угол контакта между втулкой и отверстием равен $\approx 40^\circ$ от оси симметрии узла. Закон распределения окружных напряжений по сечению перемычки (рис.3а) показывает явно выраженный «рамный эффект» и принципиально отличается от случая пластины бесконечных размеров, то есть, при значительной величине перемычки. В бесконечной пластине окружные напряжения убывают при удалении от отверстия. В настоящем случае распределение напряжений соответствует изгибу перемычки, как стержня рамы, нагруженного в середине поперечной силой. Максимальные напряжения имеют место на наружном крае пластины. Эквивалентные напряжения по Мизесу (рис. 3б) также отражают «рамный эффект». Распределение окружных и эквивалентных напряжений по окружности отверстия в пластине показано на рис. 4а и б. Максимум напряжений находится на угле $50-60^\circ$, где обычно начинается усталостное разрушение (см. рис. 1). Коэффициент концентрации напряжений по отношению к величине напряжений смятия между втулкой и пластиной равен $K=2.4$ для окружных и эквивалентных напряжений.

При посадке втулки с радиальным натягом, равным 1 %, как показал расчёт, форма отверстия искажается вследствие влияния края пластины. По оси симметрии диаметр отверстия в пластине увеличился на 0.38 %, в поперечном направлении на 0.28 %. Напряжения при нагружении узла с втулкой, установленной с радиальным натягом, приведены на рис.5 и 6. На них приведены суммарные напряжения, вызванные внешней нагрузкой и посадкой с радиальным натягом. Как следует из предыдущих результатов, напряжения натяга значительно больше, чем вызванные нагрузкой. Но напряжения натяга постоянные, поэтому слабо влияющие на усталостное разрушение. Напряжения от нагрузки переменные и являются определяющими при усталостном разрушении.



Рис. 1. Характерное разрушение детали шарнирного узла

Rys. 1. Charakterystyczne zniszczenie części zespołu przegubu kulistego

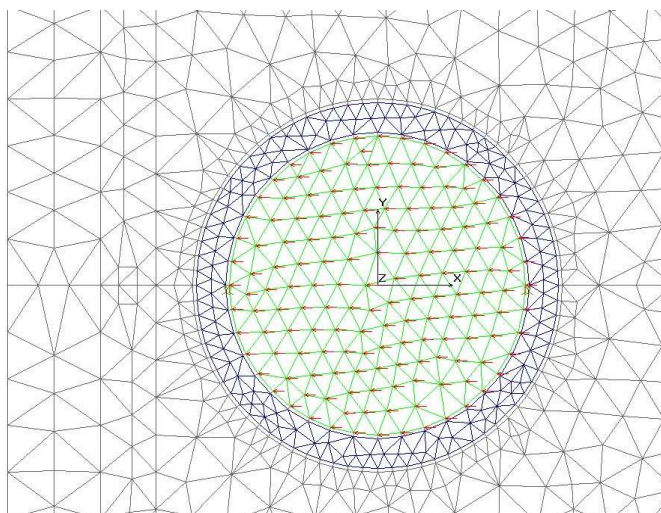


Рис. 2. Расчетная схема шарнирного узла

Rys. 2. Schemat obliczeniowy przegubu kulistego

Суммарные напряжения в перемычке (5а и б) показывают «рамный эффект» и для напряжений натяга. По окружности отверстия максимум окружных и эквивалентных напряжений находится также на угле $50-60^\circ$, рис. 6а и б.

Из суммарных напряжений были выделены напряжения, создаваемые нагрузкой. Путём сравнения с напряжениями от нагрузки при посадке без натяга получено следующее. Окружные и эквивалентные напряжения в перемычке уменьшились в 1.16-1.19 раза. На окружности отверстия в районе угла 50-60° окружные напряжения уменьшились в 1.13 раза, а эквивалентные в 1.32 раза. То есть, коэффициенты концентрации напряжений уменьшились в такое же число раз при переходе к посадке втулки с радиальным натягом.

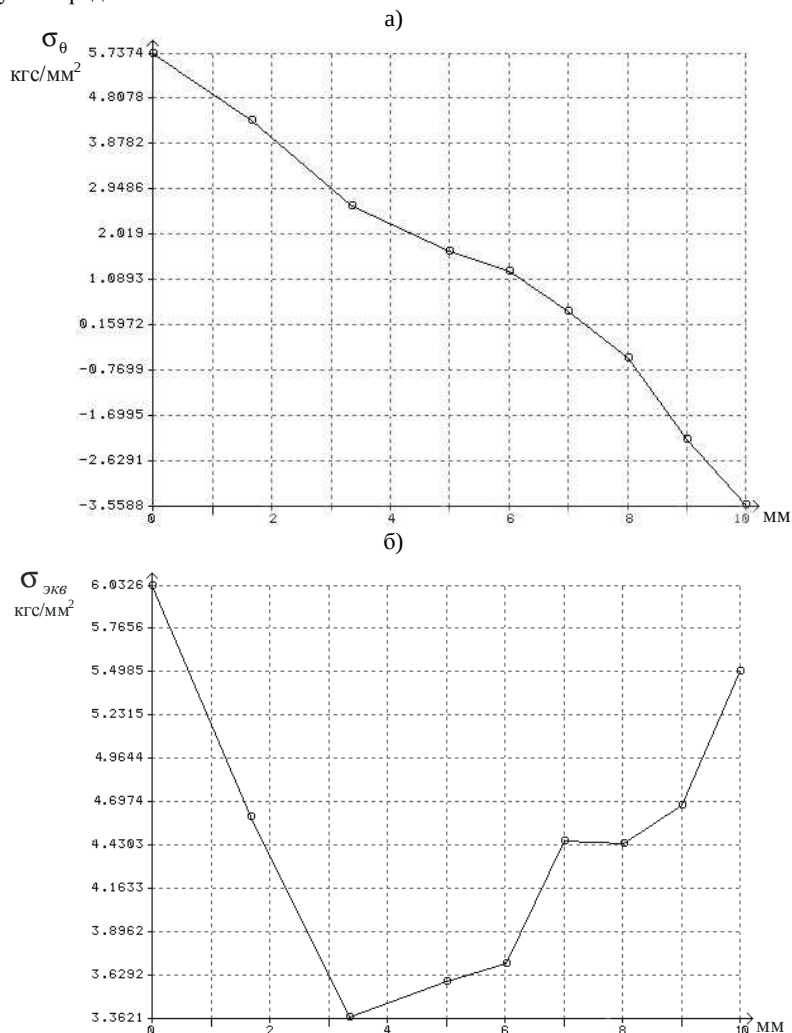


Рис. 3. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в перемычке при посадке втулки без натяга

Rys. 3. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia w łączniku przy pasowaniu tulei bez wciskania

При посадке втулки без натяга вся нагрузка с оси передаётся на перемычку, а затем проходит через пластину, создавая концентрацию напряжений. При посадке с натягом втулка начинает участвовать в передаче нагрузки, разгружая перемычку.

При посадке без натяга средние окружные напряжения во втулке при угле 90° равны нулю. При посадке с натягом при приложении нагрузки в том же сечении втулки создаются растягивающие напряжения (дополнительные к сжимающим напряжениям натяга). То есть, во втулке создаётся усилие, передаваемое на обратную сторону отверстия (угол более 90°), которое разгружает перемычку. В данном случае доля разгрузки составляет 18 %, а напряжения натяга на обратной стороне отверстия уменьшаются на 6 МПа (0.6 кгс/мм^2). Отсюда можно определить требуемую величину натяга, необходимую для его сохранения по всей окружности отверстия при действии нагрузки.

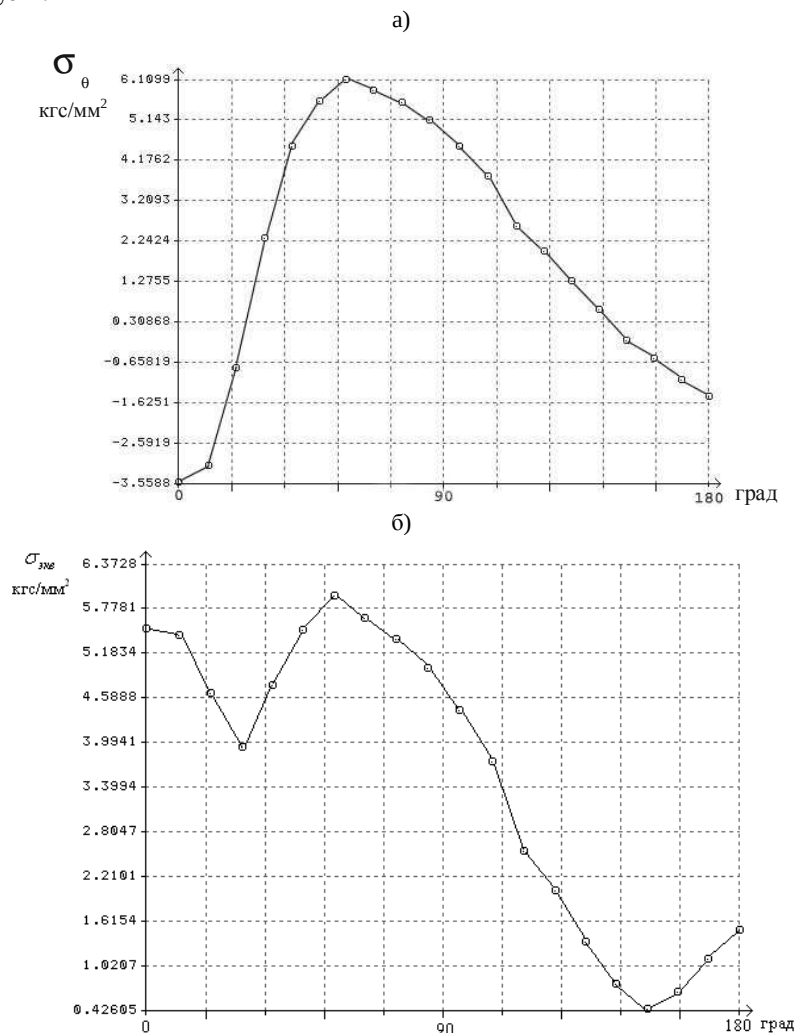


Рис. 4. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения по окружности отверстия в пластине на дуге 180° при посадке втулки без натяга

Rys. 4. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia na obwodzie otworu w płycie na łuku 180° przy pasowaniu tulei bez wciskania

Данные расчёты выполнены для случая, когда коэффициент трения между втулкой и пластиной в отверстии равен нулю. Если коэффициент трения больше нуля, эффект снижения концентрации напряжений будет выше.

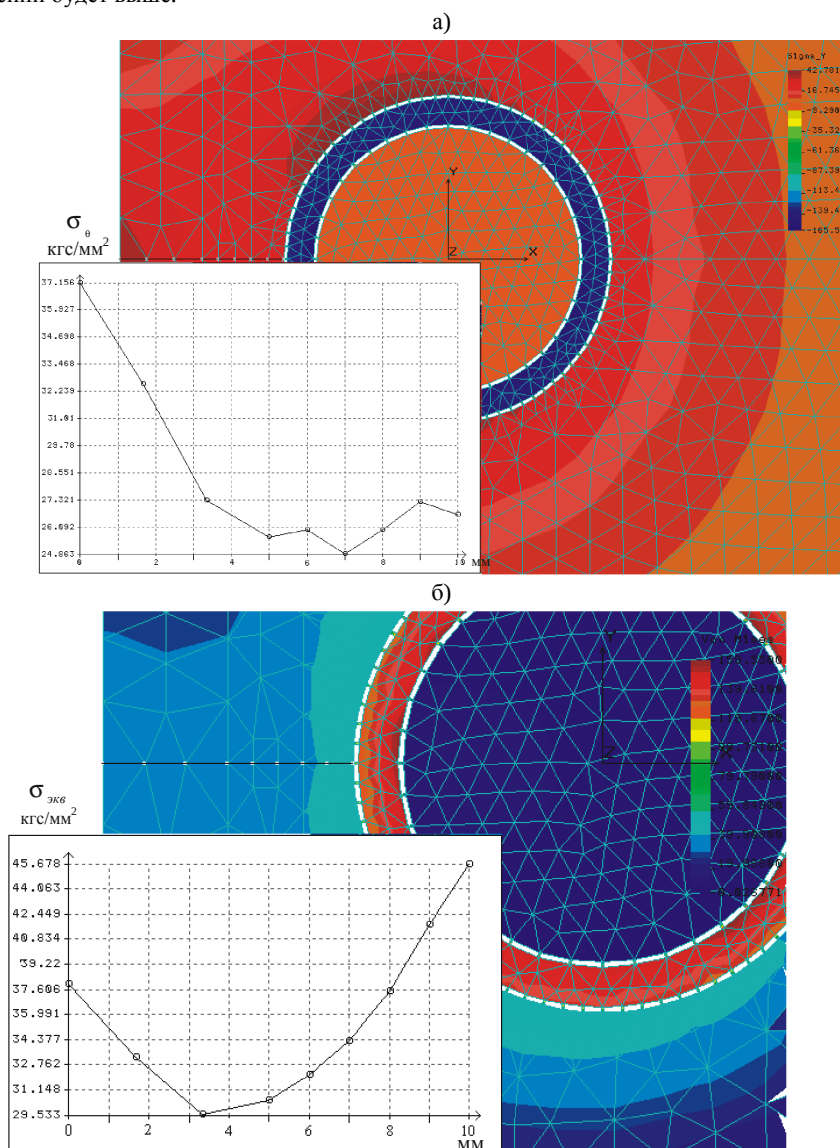


Рис. 5. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в перемычке при посадке втулки с натягом

Rys. 5. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia w łączniku przy pasowaniu tulei z wciskaniem

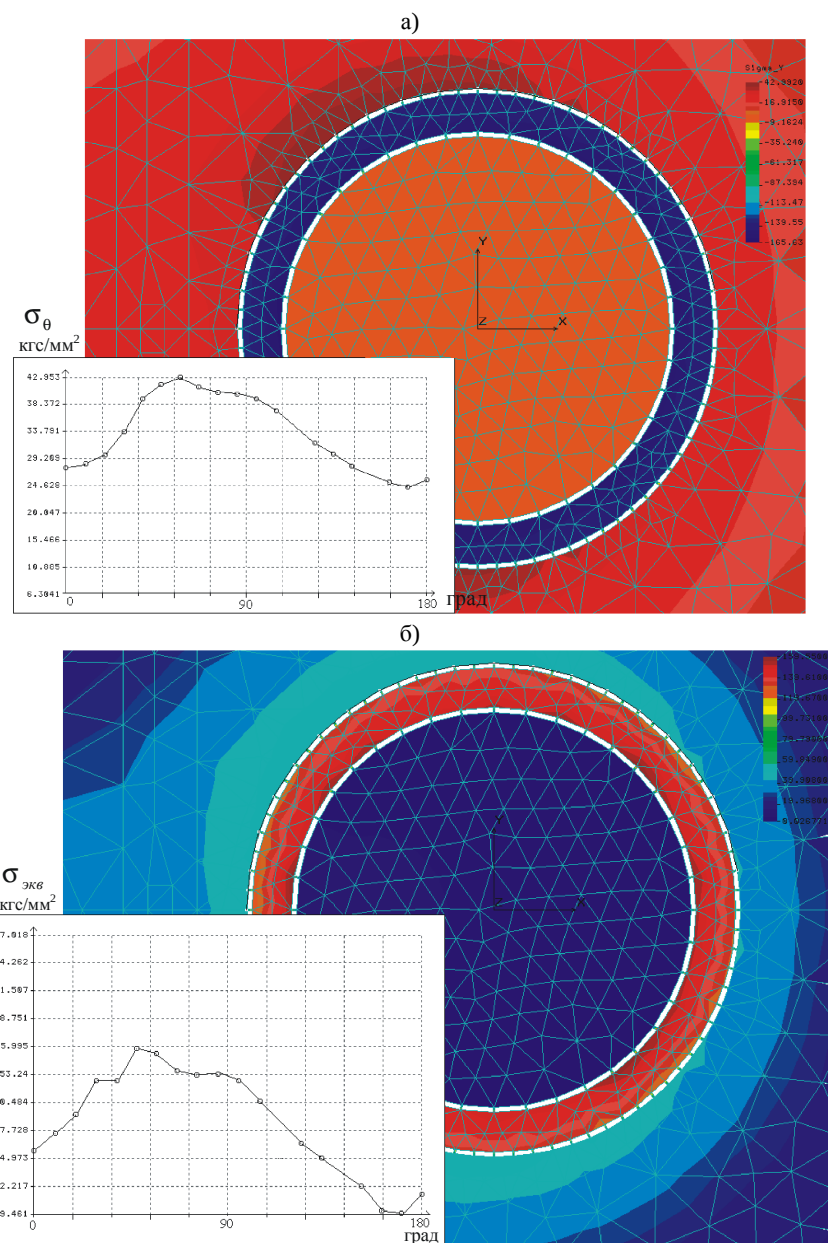


Рис. 6. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в по окружности отверстия в пластине на дуге 180° при посадке втулки с натягом

Rys. 6. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia na obwodzie otworu w płycie na łuku 180° przy pasowaniu tulei z wciskaniem

ВЫВОДЫ

1. Посадка втулки с радиальным натягом приводит к уменьшению концентрации переменных напряжений при нагружении шарнирного узла. Часть нагрузки при этом передаётся через втулку, приводя к разгрузке перемычки до края пластины. Напряжения натяга на обратной стороне отверстия уменьшаются.

2. Форма отверстия при посадке с натягом искажается вследствие влияния края пластины.

3. Метод конечных элементов позволяет рассчитать напряжения в шарнирном узле и оценить требуемую величину натяга для обеспечения его сохранения по всей окружности отверстия при нагружении.

STRESSED-DEFORMED STATE WHILE HINGE JOINT WITH EMBEDDED THIN-WALL PLUG IS LOADED

Abstract. Article covers stress-deformed analysis under load of hinge joint elements with embedded high-strength plug in comparison with slide fitted plug.

IV
PROBLEMY OGÓLNE
WYTWARZANIA I MONTAŻU

Marek MAGIERA
Akademia Górniczo-Hutnicza
Kraków

METODA SELEKCJI DOSTAWCÓW KOMPONENTÓW DLA ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW MONTAŻOWYCH

METHOD OF COMPONENT PARTS SUPPLIERS SELECTION FOR FLEXIBLE ASSEMBLY SYSTEMS

WPROWADZENIE

Coraz częściej zakłady produkcyjne, w których montuje się złożone wyroby, funkcjonują w ramach sieci dostaw. Sieć dostaw stanowi rodzaj konfiguracji łańcucha dostaw, w której niektóre ogniwa są zwielokrotnione w celu dostarczenia różnych produktów do punktów produkcji, dystrybucji, a także sprzedaży. Takie sieci dostaw nazywa się też łańcuchami dostaw o sieciowym charakterze – sieć dostaw jest traktowana jako zbiór pojedynczych łańcuchów dostaw.

Sieci dostaw buduje się również dla systemów montażowych. Charakterystycznymi grupami ogniwa dla takich sieci są dostawcy – producenci komponentów (części składowych), zakłady montujące złożone wyroby.

Sieci dostaw dla systemów montażowych, jako złożona struktura logistyczna, powinny spełniać następujące uwarunkowania [1]:

- wiele lokalizacji dostawców (komponentów) i odbiorców (np. zakładów montujących złożone wyroby);
- wiele jednoczesnych transakcji zakupu i sprzedaży;
- konieczność stosowania różnych rozwiązań transportowych, różnicowania produktów i ich dostosowania do potrzeb lokalnych rynków;
- złożone zależności pomiędzy przedsiębiorstwami, wynikające z ich odmienności: struktur organizacyjnych, technicznych, kultur organizacji, wymagań dotyczących poziomu obsługi.

Strategie budowane dla sieci dostaw obsługujących systemy montażowe, obejmują przepływy komponentów, zmontowanych produktów, informacji, niekiedy także pracowników. Koncepcje zarządzania zakładami, przypisanymi sieci dostaw są często kompromisem pomiędzy interesami poszczególnych przedsiębiorstw, a celem działania całej sieci. Podporządkowanie celów indywidualnych poszczególnych przedsiębiorstw wspólnemu celowi jest trudne. Wynika to z równoczesnej przynależności tych firm do innych łańcuchów lub sieci dostaw, a także z odrębnej kultury, organizacji, zasad funkcjonowania. Zarządzanie siecią dostaw dla systemów montażowych traktuje więc przepływy komponentów, zmontowanych produktów, informacji często w bardzo odmienny sposób niż ma to miejsce z punktu widzenia jednego zakładu.

Do wymagań, które stawia się sieciom dostaw dla systemów montażowych, zalicza się m. in. [1]:

- znajomość lokalizacji dostawców komponentów, zakładów montażowych;
- wiedza o stanie zapasów, zleceniach, prognozach dla poszczególnych zakładów;
- planowanie w czasie rzeczywistym z możliwością szybkiego reharmonogramowania – uaktualniania harmonogramów produkcji, przepływu produktów, dostosowując je do zmiennej rzeczywistości;
- sprawne funkcjonowanie systemu transportowego w celu terminowych dostaw komponentów i zmontowanych produktów.

Do najistotniejszych wymagań stawianych łańcuchom dostaw, umożliwiających uzyskanie przewagi konkurencyjnej należy elastyczność. Można rozpatrywać ją na różnych płaszczyznach [2]:

- elastyczność akcji – wielkość swobody działania;
- elastyczność procesu – szybkość działania, zaspokojenie szybko zmieniającego się popytu;
- elastyczność struktury – gotowość do działania.

Elastyczność może dotyczyć również struktury i organizacji produkcji dla poszczególnych zakładów montażowych, stanowiących grupę ogniw sieci. Metodę selekcji dostawców komponentów, przedstawioną w kolejnych rozdziałach pracy, opracowano dla elastycznych systemów montażowych – zespołów sterowanych numerycznie stanowisk montażowych, zintegrowanych przez zautomatyzowany transport i magazynowanie oraz wspólne sterowanie komputerowe, przeznaczonych do jednoczesnego montażu wielu różnych wyrobów w krótkich seriach [3]. Elastyczność oceniana jest za pomocą szybkości reagowania na zmiany oraz kosztów reagowania na zmiany.

Można wyróżnić kilka rodzajów elastyczności, charakteryzujących elastyczne systemy montażowe [4]:

- elastyczność maszyn, określającą podatność systemu na przeprowadzenie zmian przy montażu produktów;
- elastyczność asortymentu produkcji, określającą zdolność do szybkiego przejścia do montażu kolejnych typów produktów;
- elastyczność wielkości produkcji, stanowiącą zdolność systemu do rentownej produkcji przy różnych jej wielkościach;
- elastyczność procesu technologicznego, czyli zdolność produkowania danych wyrobów różnymi sposobami i przy użyciu różnych materiałów;
- elastyczność marszrut montażu – zdolność do kontynuowania montażu w warunkach awarii;
- elastyczność rozwoju systemu – zdolność do łatwej i modularnej rozbudowy systemu;
- elastyczność produkcji – określa ogół typów części, jakie system może produkować.

Wyszczególnione w tym rozdziale rodzaje elastyczności wykazują, że oprócz elastyczności na poziomie maszyny (stanowiska montażowego), istnieje drugi poziom elastyczności: elastyczność na poziomie zarządzania systemem produkcyjnym (zakładem montażowym lub całą siecią dostaw).

Efektywne funkcjonowanie elastycznych systemów montażowych uzależnione jest nie tylko od funkcjonowania zakładów montażowych, ale również od współpracy tych firm z dostawcami komponentów. Wybór dostawców komponentów uzależnia się od wielu czynników, do których zalicza się m. in. [1]:

- czas dostawy – czas od złożenia zamówienia na komponenty do ich dostarczenia;
- niezawodność – prawidłowość realizacji zamówienia;
- komunikację – sposób prowadzenia dialogu pomiędzy firmami – ogniwami sieci;
- otwartość w działaniu – równoczesna skłonność i zdolność dostawcy do spełnienia dodatkowych wymagań klienta, takich jak np. wielkość dostaw, wybór rodzaju środka transportu, sposób pakowania, częstotliwość dostaw.

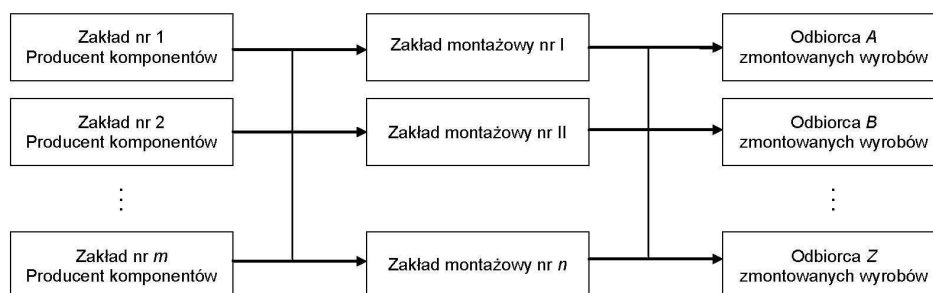
Wymienione powyżej czynniki, mające wpływ na wybór dostawców, powiązane są oczywiście z kosztami dostaw – często jednym z najważniejszych kryteriów w selekcji dostawców. Problem selekcji dostawców dla sieci dostaw został poruszony m. in. w pracach: [5], [6], [7], [8].

Niniejsza praca dotyczy przedstawionej tematyki i problematyki. Opracowana metoda umożliwia wybór dla poszczególnych zakładów montażowych, stanowiących grupę ogniw sieci, wybór tych dostawców komponentów, którzy w jak największym stopniu spełniają wymagane kryteria.

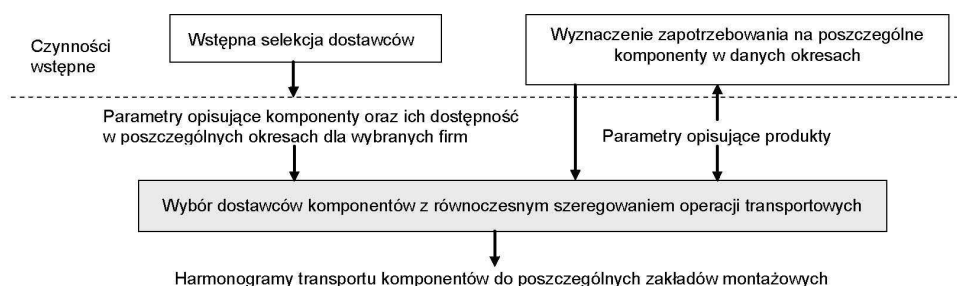
OGÓLNY OPIS METODY

Konfiguracja sieci dostaw, dla której opracowano metodę selekcji dostawców zilustrowana została na rys. 1. Dostawcami są producenci komponentów. Odbiorcami części składowych są zakłady montażowe, będące równocześnie dostawcami zmontowanych wyrobów.

Dla każdego zakładu montażowego wybierani są dostawcy. Ich liczbę można ograniczyć np. w celu uniknięcia zbyt dużej liczby partnerów. Jak widać na schemacie blokowym metody, zamieszczonym na rys. 2, selekcja dostawców jest dwuetapowa.



Rys. 1. Konfiguracja sieci dostaw dla systemów montażowych



Rys. 2. Schemat blokowy metody

Wybór dostawców komponentów poprzedzony jest rozwiązaniem 2 zadań. Wstępna selekcja komponentów ma na celu ograniczenie liczby danych, uwzględnianych w następnym etapie. Proponowana tu jest wielokryterialna analiza dostawców. Uwzględnia się tu czynniki omówione w rozdziale wprowadzającym (czas dostawy, niezawodność, komunikacja, otwartość w działaniu). Proponowane jest zastosowanie metody AHP (ang. Analytic Hierarchy Process), gdzie każdemu kryterium przypisana jest waga – metody przedstawionej m. in. w pracy [9]. Kilku dostawców, którzy otrzymali najwyższe wskaźniki, jest uwzględnianych na niższym poziomie opracowanej metody.

Drugim zadaniem, poprzedzającym wybór dostawców komponentów, jest wyznaczenie zapotrzebowania na poszczególne komponenty w danych okresach. Zbudowany w tym celu model matematyczny zamieszczony jest w następnym rozdziale. Służy on minimalizacji kosztów, ponoszonych w związku z nieterminowym wykonaniem operacji montażowych.

Do selekcji dostawców komponentów zbudowany również został liniowy model matematyczny zadania programowania całkowitoliczbowego. Zamieszczony jest on w kolejnym rozdziale pracy. Tu także przyjęte zostało kryterium kosztowe – minimalizowane są koszty, ponoszone w związku z dostarczeniem komponentów do zakładów montażowych. Wraz z wyborem dostawców równocześnie ma miejsce szeregowanie operacji transportowych, uwzględniające terminowość dostaw komponentów.

WYZNACZENIE ZAPOTRZEBOWANIA NA KOMPONENTY

Wyznaczenie zapotrzebowania na komponenty w poszczególnych zakładach montażowych jest niezbędne do ustalenia warunków dostaw – określenia liczby sztuk różnych części składowych, które mają być dostępne w poszczególnych okresach. W rozwiązaniu tego zadania należy uwzględnić m. in. następujące czynniki:

- konfigurację systemu (np. liczbę stadiów, maszyny równoległe, wykorzystanie buforów międzyoperacyjnych lub ich brak – blokowanie maszyn przez produkty oczekujące na wykonanie kolejnych operacji);

- organizację przepływu produktów (np. przepływ jednokierunkowy, przepływ z omijaniem, przepływ powrotny);

- rozmiary zadania - liczba zakładów montażowych, produktów ma swoje odzwierciedlenie w liczbie parametrów, zmiennych i ograniczeń. Dla zadań o stosunkowo małych rozmiarach można stosować podejście jednopoziomowe. W przypadku zadań o znacznej liczbie indeksów, parametrów wejściowych i zmiennych, zastosowanych w zależnościach matematycznych, wskazany jest podział zadania na kolejno rozwiązywane problemy cząstkowe, co charakteryzuje podejście wielopoziomowe (hierarchiczne).

Dla każdego zakładu montażowego – ogniwa sieci – może być dobrane odrębne narzędzie, umożliwiające wyznaczenie zapotrzebowania na komponenty. Każdy zakład montażowy traktowany jest jako odrębny moduł systemu.

Zbudowane przez autora artykułu liniowe modele matematyczne, uwzględniające powyżej wymienione czynniki, przeznaczone są do wyznaczania zapotrzebowania na komponenty dla poszczególnych zakładów montażowych – z równoczesną wstępną budową harmonogramów szeregowania operacji montażowych (ostateczny harmonogram buduje się po ustaleniu terminów dostaw komponentów). W pracy [10] przedstawione są m. in. modele dla jednokierunkowych, wielostadialnych systemów przepływowych bez buforów, uwzględniające różne rodzaje marszrut oraz podejście monolityczne. Modele dla podejścia hierarchicznego opisane są natomiast w pracy [11]. Dotyczą one systemów z buforami operacyjnymi oraz bez buforów.

W niniejszym rozdziale zamieszczony jest model dla jednokierunkowych, wielostadialnych systemów przepływowych z buforami międzyoperacyjnymi o ograniczonych pojemnościach. W elastycznym systemie równocześnie może być montowanych wiele różnych typów produktów. Każde stadium stanowi zbiór maszyn pracujących równoległe. Produkt, przepływający przez dane stadium, obciąża w nim tylko jedną maszynę. Istnieje możliwość pominięcia niektórych stadiów przez produkt.

Indeksy, parametry i zmienne, zastosowane w modelu zawierającym zależności (1) ÷ (18) zestawiono w tabeli 1. Operacja montażowa j polega na domontowaniu części składowej j – komponentu do uprzednio zmontowanych części. Wyjątek dotyczy pierwszej operacji, która polega na umieszczeniu części bazowej w uchwycie. Każdemu typowi operacji j musi być przypisany co najmniej jeden podajnik komponentów (przydzielony co najmniej jednej maszynie). Dla każdego produktu k , montowanego w systemie, znany jest przedział czasowy $[s_k, u_k]$, w którym powinno nastąpić zakończenie wykonywania operacji przypisanych temu produktowi.

Parametr α , stosowany w zależnościach matematycznych jest dowolną liczbą całkowitą, większą od oszacowanej długości uszeregowania. Do oszacowania długości uszeregowania, uwzględniającej planowane przestoje maszyn, wykorzystana została procedura zamieszczona w pracy [10].

Zastosowane zostało kryterium kosztowe [12]. Minimalizowane są koszty ponoszone w związku z nieterminowym wykonaniem produktów, matematycznie zdefiniowane w sumie (1). Zawarte są tu koszty wynikające ze zbyt wczesnego opuszczenia linii montażowej przez produkty (koszty magazynowania), koszty ponoszone ze zbyt późnym wykonaniem produktów, w tym kary umowne za przekroczenie najpóźniejszego dopuszczalnego terminu zmontowania poszczególnych produktów. Zależność (1) służy więc budowie takich harmonogramów montażu, w których uszeregowanie operacji jest jak najbardziej zbliżone planowi produkcji, uwzględniającemu terminy zleceń. Do budowy harmonogramów wykorzystywane są wartości zmiennych z_{ijkl} (tabela I), określających obciążenia poszczególnych maszyn montażowych przez operacje j wykonywane w czasie montażu produktów k w poszczególnych przedziałach l .

Tabela 1. Zestawienie indeksów, parametrów wejściowych i zmiennych dla zadania wyznaczenia zapotrzebowania na komponenty

Indeksy:	
i	- maszyna montażowa; $i \in I = \{1, \dots, M\}$;
j	- operacja montażowa; $j \in J = \{1, \dots, N\}$;
k	- produkt; $k \in K = \{1, \dots, W\}$;
l	- przedział czasowy; $l \in L = \{1, \dots, H\}$;
v	- stadium; $v \in V = \{1, \dots, \vartheta\}$;
Parametry wejściowe:	
a_v	- pojemność bufora międzyoperacyjnego, umieszczonego przed stadium v ;
b_i	- maksymalna liczba podajników, jakie można ustawić przy maszynie montażowej i ;
c_{1k}	- koszt ponoszony w ciągu jednej jednostki czasu (jeden przedział czasowy), wynikający z przyspieszenia wykonania operacji dla produktu k ;
c_{2k}	- koszt ponoszony w ciągu jednej jednostki czasu (jeden przedział czasowy), wynikający z opóźnienia wykonania operacji dla produktu k ;
c_{3k}	- jednostkowa kara (koszt) za przekroczenie najpóźniejszego terminu wykonywania operacji dla produktu k .
g_{ev}	- czas transportu produktu pomiędzy maszynami montażowymi, należącymi do stadiów: e, v ;
p_{jk}	- czas wykonywania operacji montażowej j dla produktu k ;
s_k	- termin zakończenia wykonywania wszystkich operacji montażowych dla produktu k ;
u_k	- najpóźniejszy termin zakończenia wykonywania wszystkich operacji dla produktu k , po przekroczeniu którego naliczana jest jednostkowa kara;
α	- dowolna liczba całkowita, większa od szacowanej długości uszeregowania;
μ_{il}	= 1, jeżeli maszyna i jest dostępna w przedziale czasowym l , inaczej $\mu_{il} = 0$;
η_{ij}	= 1, jeżeli maszyna i jest zdolna do wykonywania operacji typu j , inaczej $\eta_{ij} = 0$;
J_k	- zbiór operacji montażowych, wykonywanych dla produktu k ;
D	- zbiór uporządkowanych par (i, v) , takich, że maszyna i należy do stadium v ;
P_1	- zbiór par (k, j) , gdzie $k \in K, j \in J_k$ i j jest pierwszą operacją montażową dla produktu k ;
P_2	- zbiór par (k, j) , gdzie $k \in K, j \in J_k$ i j jest ostatnią operacją montażową dla produktu k ;
R_k	- zbiór par (r, j) , gdzie $r, j \in J_k$ - kolejno wykonywanych operacji montażowych dla produktu k (sekwencja montażowa).
Zmienne:	
d_k	- czas przyspieszenia w zmontowaniu produktu k ($d_k > 0$ oznacza przedterminowe zmontowanie produktu k);
e_k	- czas opóźnienia w zmontowaniu produktu k ($e_k > 0$ oznacza opóźnienie w wykonaniu operacji montażowych dla produktu k);
f_k	- moment zmontowania produktu k ;
v_k	= 1, jeżeli został przekroczony najpóźniejszy termin wykonania produktu k , inaczej $v_k = 0$;
y_{klv}	= 1, jeżeli bufor międzyoperacyjny znajdujący się przed stadium v jest obciążony przez produkt k w przedziale l , inaczej $y_{klv} = 0$;
z_{ijkl}	= 1, jeżeli na maszynie i wykonywana jest operacja typu j dla produktu k przedziale czasowym l , inaczej $z_{ijkl} = 0$.

Oto model M1 – szeregowanie operacji montażowych dla jednokierunkowych, wielostadialnych systemów montażowych z buforami międzyoperacyjnymi o ograniczonych pojemnościach:

$$\text{Zminimalizować: } \sum_{k \in K} (d_k c_{1k} + e_k c_{2k} + v_k c_{3k}); \quad (1)$$

Zależność (1) musi uwzględnić następujące ograniczenia:

–rozdział operacji montażowych pomiędzy maszyny zdadne do ich wykonania:

$$\sum_{i \in I: \eta_i = 1} \sum_{l \in L} z_{ijkl} = p_{jk}; \quad j \in J_k; \quad k \in K; \quad (2)$$

–wyznaczenie czasu opuszczania systemu montażowego przez poszczególne produkty:

$$f_k = \frac{\sum_{i \in J} \sum_{l \in L} l \cdot z_{ijkl}}{p_{jk}} + \frac{p_{jk} - 1}{2}; \quad (k, j) \in P_2; \quad (3)$$

–wyznaczenie nieterminowości (opóźnienia, przyspieszenia) w wykonaniu produktów oraz przyznanie jednostkowych kar za przekroczenie najpóźniejszych terminów zmontowania produktów;

$$e_k \geq f_k - s_k; \quad d_k \geq s_k - f_k; \quad f_k - u_k \leq \alpha \cdot v_k; \quad k \in K; \quad (4)$$

–wykonywanie w danym momencie co najwyżej jednej operacji montażowej dla danego produktu:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_k: \eta_j = 1} z_{ijkl} \leq 1; \quad k \in K; \quad l \in L; \quad (5)$$

–umieszczenie przy każdej maszynie dopuszczalnej liczby podajników komponentów:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{l \in L} \frac{z_{ijkl}}{p_{jk}} \leq b_i; \quad i \in I; \quad (6)$$

–obciążenie maszyny, dostępnej w danym przedziale czasowym, co najwyżej jedną operacją:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k: \eta_j = 1} z_{ijkl} \leq \mu_{il}; \quad i \in I; \quad l \in L; \quad (7)$$

–wykonywanie operacji zgodnie z daną sekwencją montażową:

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \frac{l \cdot z_{ijkl}}{p_{jk}} - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \frac{l \cdot z_{irkl}}{p_{rk}} - \frac{p_{jk} + p_{rk}}{2} \geq 0; \quad (r, j) \in R_k; \quad k \in K; \quad (8)$$

–obciążenie co najwyżej jednej maszyny (spośród maszyn równoległych) przez produkt, przepływający przez stadium:

$$z_{ijkl} + z_{\pi k f} \leq 1; \quad (i, v), (\tau, v) \in D: \tau \neq i; \quad j, r \in J: j \neq r; \quad k \in K; \quad l, f \in L \quad (9)$$

– niepodzielność wykonywania operacji montażowych – w przestrzeni oraz w czasie:

$$l \cdot \sum_{i \in I} z_{ijkl} - f \cdot \sum_{i \in I} z_{ijkf} \leq p_{jk} - 1 + \left(1 - \sum_{i \in I} z_{ijkf} \right) \cdot \alpha; \quad j \in J; \quad k \in K; \quad l, f \in L: l < f, p_{jk} > 1 \quad (10)$$

– zapewnienie czasu na transport produktów pomiędzy poszczególnymi stadiami:

$$l \cdot z_{ijkl} - f \cdot z_{\pi k f} - 1 \geq g_{ev} + \alpha(1 - z_{ijkl}); \quad (i, v), (\tau, \varepsilon) \in D; \quad (r, j) \in R_k; \quad k \in K; \quad l, f \in L: f < l \quad (11)$$

– bezpośrednie następstwo operacji wykonywanych na jednej maszynie dla tego samego produktu:

$$l \cdot z_{ijkl} - f \cdot z_{irkf} \leq p_{jk} + p_{rk} - 1 + \alpha(1 - z_{ijkl}) + \alpha(1 - z_{\pi k f}); \quad i \in I; \quad k \in K; \quad l, f \in L: f < l \quad (12)$$

– zachowanie przepływu jednokierunkowego (z możliwością omijania):

$$i \cdot z_{ijkl} \geq \tau \cdot z_{\pi kf} - \alpha \cdot (1 - z_{ijkl}); \quad i, \tau \in I; (r, j) \in R_k; k \in K; l, f \in L \quad (13)$$

– wyznaczenie obciążeń poszczególnych buforów międzyoperacyjnych przez dane produkty:

$$\sum_{l \in L} \frac{l z_{ijkl}}{p_{jk}} - \frac{p_{jk} + p_{rk}}{2} - \sum_{l \in L} \frac{l z_{\pi kl}}{p_{rk}} - g_{ve} = \sum_{l \in L} y_{klv}; \quad (i, v), (\tau, \varepsilon) \in D: v > \varepsilon; (r, j) \in R_k; p_{jk}, p_{rk} > 0; k \in K \quad (14)$$

– określenie przedziałów czasowych, w których produkty, oczekujące na wykonanie kolejnych operacji, obciążają bufory, umieszczone przed stadium, w którym będzie wykonana następna operacja – (15) i (16):

$$l \cdot y_{klv} \geq \sum_{f \in L} \frac{f \cdot z_{\pi kf}}{p_{rk}} + \frac{p_{rk} + 1}{2} + g_{av} - \alpha(1 - y_{klv}); \quad (\tau, \varepsilon) \in D; v \in V: \varepsilon < v; (r, j) \in R_k; k \in K; l \in L \quad (15)$$

$$l \cdot y_{klv} \leq \sum_{f \in L} \frac{f \cdot z_{ijkf}}{p_{jk}} + \frac{1 - p_{jk}}{2} + \alpha \cdot (1 - y_{klv}); \quad (i, v) \in D; \varepsilon \in V: \varepsilon < v; (r, j) \in R_k; k \in K; l \in L \quad (16)$$

– zachowanie ograniczonych pojemności buforów międzyoperacyjnych:

$$\sum_{k \in K} y_{klv} \leq a_v; \quad l \in L; v \in V \setminus \{1\}; \quad (17)$$

– zapewnienie odpowiednich typów zmiennych:

$$v_k, y_{klv}, z_{ijkl} \in \{0, 1\}; \quad d_k, e_k \geq 0; \quad i \in I; j \in J; k \in K; l \in L; \quad (18)$$

Komponenty dla danego produktu muszą być dostarczone przed wykonaniem pierwszej operacji dla tego produktu. Produkt k , opuszczający system w czasie f_k , zdefiniowanym matematycznie w równaniu (11), musi mieć dostarczone komponenty przed upływem czasu rozpoczęcia czynności montażowych t_k , który można wyznaczyć wg zależności (19), gdzie j jest pierwszą operacją montażową wykonywaną dla tego produktu:

$$t_k = \frac{\sum_{i \in J} \sum_{l \in L} l \cdot z_{ijkl}}{p_{jk}} - \frac{p_{jk} - 1}{2}; \quad (k, j) \in P_1; \quad (19)$$

WYBÓR DOSTAWCÓW KOMPONENTÓW I BUDOWA HARMONOGRAMU DOSTAW

Wyznaczone zapotrzebowania na komponenty w poszczególnych okresach oraz wstępnie wybrani producenci części składowych stanowią dane wejściowe do zadania selekcji dostawców. Wszystkie indeksy, parametry oraz zmienne przyjęte dla rozwiązania tego zadania zestawiono w tabeli 2.

Oznaczenia zamieszczone w tabeli II zastosowano w liniowym modelu matematycznym. Służy on minimalizacji sumy kosztów obsługi zakładów, montujących złożone wyroby. Do kosztów tych, wyszczególnionych w zależności (20), zalicza się:

- koszty zakupu części składowych przez zakłady montujące złożone wyroby, uwzględniające rabaty za zakupy określonej liczby sztuk komponentów;
- koszty transportu;

–koszty związane z nieterminowością dostaw komponentów, wśród których wyróżnia się koszty magazynowania produktów dostarczonych przedterminowo, kary za każdy umowny okres opóźnienia w dostawie części [13].

Tabela 2. Zestawienie indeksów, parametrów wejściowych i zmiennych dla zadania selekcji dostawców

Indeksy:	
i	– producent komponentów (części składowych); $i \in I = \{1, \dots, M\}$;
j	– zakład montażowy; $j \in J = \{1, \dots, N\}$;
k	– komponent; $k \in K = \{1, \dots, W\}$;
l	– okres (jednostkowy); $l \in L = \{1, \dots, H\}$;
Parametry wejściowe:	
a_{ijk}	– minimalna liczba komponentów k , sprzedawanych przez dostawcę i zakładowi j , upoważniająca do upustu;
b_{ijk}	– kwota upustu danego zakładowi montażowemu j przez dostawcę i w związku z jednorazową sprzedażą komponentów k w liczbie wynoszącej co najmniej a_{ijk} ;
c_{ik}	– cena komponentu k , sprzedawanego przez producenta i (bez uwzględnienia rabatu);
d_{ijl}	– cena usługi transportowej pomiędzy zakładami i, j wykonywanej w okresie l ;
e_{jk}	– kara za każdy dzień opóźnienia w dostawie części komponentu k do zakładu montażowego j ;
f_{jk}	– koszt magazynowania w okresie jednostkowym 1 sztuki komponentu k w zakładzie montażowym j ;
m_l	– maksymalna liczba dostawców, od których chce otrzymywać komponenty zakład montażowy j ;
p_{jkl}	– wielkość zapotrzebowania w zakładzie montażowym j na komponent k w okresie l ;
s_{ikl}	– podaż producenta i , dotycząca komponentu k w okresie l ;
v_k	– przestrzeń zajmowana przez komponent k w czasie jego transportu (z opakowaniem);
u_l	– przestrzeń ładunkowa środka transportu, dysponowanego w okresie l ;
ω_l	– minimalna wartość komponentów, jakie w okresie l można przetransportować;
A	– zbiór par (j, k) , gdzie komponent k jest wykorzystywany w montażu w zakładzie j ;
K	– zbiór par (i, k) , gdzie komponent k jest produkowany w zakładzie i ;
P	– zbiór trójek (i, k, l) , gdzie producent i ma dostępne do transportu komponenty k w okresie l ;
R	– zbiór trójek (j, k, l) , gdzie zakład montażowy j ma zapotrzebowanie na komponenty k w okresie l ;
T	– zbiór trójek (i, j, l) , określający okresy l , w których możliwy jest transport od producenta (dostawcy) i do zakładu j ;
U	– zbiór trójek (i, j, k) , gdzie producent i , dostarczający komponenty k do odbiorcy j , stosuje upusty, związane z zamówieniem odpowiedniej liczby komponentów k .
Zmienne:	
g_{jkl}	– liczba części składowych k będących w nadmiarze w zakładzie producenta j w okresie l ;
q_{jkl}	– liczba brakujących sztuk części składowych k w zakładzie producenta j w okresie l ;
x_{ijkl}	– liczba sztuk części k transportowanych w okresie l pomiędzy zakładami producentów: i, j ;
u_{ij}	– 1, jeżeli dostawca i dostarcza komponenty do zakładu montażowego j , inaczej $u_{ij} = 0$;
y_{ijk}	– 1, jeżeli zamawiana dla jednego transportu liczba części k , mającego miejsce pomiędzy zakładami producentów i, j wynosi co najmniej a_{ijk} , inaczej $y_{ijk} = 0$;
z_{ijl}	– 1, jeżeli w okresie l odbywa się transport pomiędzy zakładami producentów: i, j .

Oto model M2 – selekcja dostawców komponentów i budowa harmonogramu dostaw:
Zminimalizować:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} c_{ik} x_{ijkl} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} b_{ijk} y_{ijk} + \sum_{(i,j,l) \in T} d_{ijl} z_{ijl} + \sum_{(j,k) \in A} \sum_{l \in L} (e_{jk} q_{jkl} + f_{jk} g_{jkl}); \quad (20)$$

Optymalizowana wartość sumy (20) musi równocześnie uwzględniać następujące ograniczenia:

- dostarczenie wymaganej liczby komponentów do każdego zakładu montującego złożone wyroby:

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L: (i,j,l) \in T} x_{ijkl} = \sum_{l \in L: (j,k,l) \in R} p_{jkl}; \quad j \in J; k \in K; \quad (21)$$

- uwzględnienie rabatów za zamówienie odpowiedniej liczby sztuk poszczególnych typów części składowych:

$$\sum_{l \in L: (j,k,l) \in R} x_{ijkl} \geq a_{ijk} y_{ijk}; \quad (i,j,k) \in U; \quad (22)$$

- zbudowanie listy dostawców komponentów dla poszczególnych zakładów montażowych:

$$x_{ijkl} \leq u_{ij} \cdot \alpha; \quad i \in I; j \in J; k \in K; l \in L; \quad (23)$$

- ograniczenie liczby dostawców komponentów do poszczególnych zakładów montażowych:

$$\sum_{i \in I} u_{ij} \leq m_j; \quad j \in J; \quad (24)$$

- zakup tylko tych komponentów, które są dostępne u dostawców w poszczególnych okresach jednostkowych:

$$\sum_{j \in J: (i,j,l) \in T} x_{ijkl} \leq \sum_{\tau \in L: \tau \leq l \wedge (i,k,\tau) \in P} s_{jk\tau}; \quad i \in I; k \in K; l \in L; \quad (25)$$

- eliminacja dostaw komponentów w okresie niedostępności środków transportowych:

$$\sum_{k \in K} x_{ijkl} = 0; \quad (i,j,l) \notin T; \quad (26)$$

- miejsce na dostarczane komponenty w dyspozycyjnym w danym czasie środku transportu:

$$\sum_{k \in K: (i,k,l) \in P} v_k x_{ijkl} \leq v_l; \quad (i,j,l) \in T; \quad (27)$$

- wyznaczenie transportów komponentów w określonych okresach:

$$\sum_{k \in K} x_{ijkl} \leq \alpha \cdot z_{ij}; \quad (i,j,l) \in T; \quad (28)$$

- określenie nadwyżek komponentów u producentów złożonych wyrobów - w poszczególnych okresach:

$$\sum_{\tau \in L: \tau \leq l} \sum_{i \in I} x_{ijk\tau} - \sum_{\tau \in L: \tau \leq l \wedge (j,k,\tau) \in R} p_{jkl} \leq g_{jkl}; \quad j \in J; k \in K; l \in L; \quad (29)$$

- wyznaczenie niedoborów komponentów u poszczególnych odbiorców:

$$\sum_{\tau \in L: \tau \leq l \wedge (j,k,\tau) \in R} p_{jkl} - \sum_{\tau \in L: \tau \leq l} \sum_{i \in I} x_{ijk\tau} \leq q_{jkl}; \quad j \in J; k \in K; l \in L; \quad (30)$$

- wyznaczenie tylko tych transportów, które są rentowne (warunek kosztowy):

$$\sum_{k \in K: (i,k,l) \in P} (c_{ik} x_{ijkl} - b_{ijk} y_{ijk}) \geq \omega_l; \quad (i,j,l) \in T; \quad (31)$$

- zapewnienie odpowiednich typów zmiennych:

$$x_{ijkl}, z_{ijl} \in \{0,1\}; \quad i \in I; j \in J; k \in K; l \in L; \quad (32)$$

Przedstawiony model matematyczny umożliwia ograniczenie liczby dostawców komponentów do poszczególnych zakładów montażowych. Służy temu zależność (24). Ograniczenie to może być oczywiście pominięte – można badać wpływ liczby dostawców na terminy dostaw i ponoszone w związku z tym koszty. Zwiększenie liczby dostawców ma jednak często jedną wadę: przyczynia się do zmniejszenia rabatów, uzyskiwanych za zamówienie odpowiedniej liczby sztuk komponentów.

EKSPERYMENTY OBLICZENIOWE

Zaprezentowana metoda została przetestowana w eksperymentach obliczeniowych. Do obliczeń zastosowany został pakiet optymalizacji dyskretnej oraz język programowania matematycznego [14]. Celem eksperymentu było przede wszystkim zweryfikowanie zbudowanego modelu matematycznego M2, służącego selekcji dostawców komponentów.

W przeprowadzonych eksperymentach porównano problem sformułowany w modelu M2 (opisanym zależnościami (20) ÷ (32)) z jego modyfikacją – problemem oznaczonym M2a. Problem M2a różni się od M2 usunięciem ograniczenia (31). Oznacza to, że w zadaniu M2a nie jest uwzględniana rentowność poszczególnych transportów – dopuszczone są transporty, które mogą charakteryzować się małą liczbą przewożonych komponentów i ich koszty są stosunkowo duże. Przed zastosowaniem modelu M2 lub M2a wyznaczono zapotrzebowanie na komponenty, zgodnie z zależnościami przypisanymi modelowi M1. Porównań dokonano dla 3 grup testowych zadań – o różnych liczbach dostawców, typów komponentów, zakładów montażowych. Dla każdej z grup testowych zadań rozwiązano 10 przykładów. Parametry grup testowych zadań oraz średnie wyniki eksperymentów obliczeniowych zestawiono w tabeli 3.

W tabeli III podano wartości średnie następujących wskaźników:

– β – służący porównaniu długości harmonogramów przepływu produktów przez sieć:

$$\beta = (C_{\max}^{M2} - C_{\max}^{M2a}) / C_{\max}^{M2a}; \quad (33)$$

gdzie: $C_{\max}^{M2a}$, $C_{\max}^{M2}$ – długości uszeregowania dla problemów sformułowanych w modelach: M2a, M2.

– γ – przeznaczony porównaniu kosztów obsługi sieci dostaw:

$$\gamma = (K^{M2a} - K^{M2}) / K^{M2}; \quad (34)$$

gdzie: K^{M2a} , K^{M2} – koszty obsługi sieci dostaw, wyznaczone wg (20).

Tabela 3. Zestawienie parametrów grup zadań testowych i wartości średnich wyników eksperymentów w [%] – dla całej sieci

Gr.	Parametry grup testowych zadań							Wskaźniki porównania	
	M	N	W	R	H	P	T	α	γ
1	3	5	10	140	10	4	3	8,5	5,7
2	3	5	12	200	14	6	4	8,2	6,1
3	4	6	16	320	18	8	5	7,7	6,8

Liczby: M – producentów komponentów, N – zakładów montażowych, W – typów komponentów, R – wszystkich zamówionych komponentów (wielkość zapotrzebowania), H – okresów jednostkowych, P – typów produktów, T – środków transportowych.

Zamieszczone w tabeli 3 wartości średnie wskaźnika β wykazują wydłużenie długości harmonogramów w przypadku zastosowania zależności matematycznych przypisanych modelowi M2a (dla testowych danych o około 8%), w odniesieniu do problemu M2. Korzyść, wynikająca z zastosowania modelu M2, polegająca na budowie stosunkowo krótszych harmonogramów, została okupiona niewielkim wzrostem kosztów, wyznaczanych wg sumy (20). Jest to odzwierciedlone w postaci wartości wskaźnika γ którego wartość dla testowych zadań wynosiła 5 ÷ 7%. Na wzrost kosztów obsługi sieci dostaw wpłynęło zwiększenie liczby transportów, przy pewnym zmniejszeniu kosztów magazynowania oraz kar za nieterminowość. Wzrost liczby transportów przyczynił się oczywiście do zmniejszenia nieterminowości w dostawie komponentów.

Kolejne eksperymenty obliczeniowe służyły porównaniu dwóch przypadków, oznaczonych następującymi symbolami:

–P1 – równoczesnego uwzględnienia wszystkich odbiorców – zakładów montażowych (zbiór J zawiera wykaz wszystkich zakładów montażowych);

–P2 – uwzględnienie każdego zakładu montażowego oddzielnie (zbiór J jest jednoelementowy), przy rozwiązywaniu problemu kolejno dla poszczególnych odbiorców komponentów. Wzięto tu pod uwagę wszystkie możliwe permutacje uszeregowania zakładów montażowych. W danych dla każdego następnego zadania zmniejsza się nie tylko element zbioru J (tabela II), ale także elementy zbiorów: P (określającego dostępność komponentów u dostawców w poszczególnych okresach), T (zawierającego informacje, dotyczące możliwości środków transportowych w poszczególnych okresach).

Przypadek P1 odzwierciedla interesy całej sieci, problem P2 reprezentuje natomiast interesy pojedynczego zakładu montażowego – odbiorcy komponentów. Obliczenia przeprowadzono dla 3 grup zadań testowych. W przykładach testowych przyjęto założenia: jednakowe terminy wykonania wszystkich zleceń montażowych, takie same koszty magazynowania komponentów dostarczonych przedterminowo do poszczególnych odbiorców oraz takie same kwoty kar za opóźnione dostarczenie komponentów do zakładów montażowych, naliczane za każdy okres (przedział czasowy) nieterminowości.

Parametry grup zadań testowych oraz otrzymane wyniki zamieszczono w tabeli IV. Dla każdego testowego zadania rozwiązane zostały kolejno problemy sformułowane w modelach M1, M2. Testy przeprowadzono dla 3 odbiorców. Problem P2 musiał być więc rozwiązywany 6-krotnie (dla wszystkich permutacji). Do oceny porównania rozwiązań wykorzystano następujący wskaźnik:

– ϕ_j - służący porównaniu kosztów obsługi sieci dostaw, przypadających dla zakładu montażowego j :

$$\phi_j = K_j^{P2} / K_j^{P1}; \quad (35)$$

gdzie: ϕ_j^P - koszty obsługi sieci dostaw, obliczone dla odbiorcy j oraz problemu P (w oparciu o sumę (20)).

W tabeli 4 zamieszczono otrzymane minimalne oraz maksymalne wartości tego wskaźnika.

Tabela 4. Zestawienie parametrów grup zadań i wyników eksperymentów – porównanie problemów: P1, P2

Gr.	Parametry grup testowych zadań							Wskaźniki porównania	
	M	N	W	T	λ_1	λ_2	λ_3	$\min_{j \in J} \phi_j$	$\max_{j \in J} \phi_j$
1	3	3	12	4	600	1200	3000	0,91	1,11
2	3	3	14	6	1200	2400	4000	0,89	1,17
3	4	3	20	12	6000	6000	6000	0,84	1,23

Liczby: M – producentów komponentów, N – zakładów montażowych, W – typów komponentów, T – środków transportowych, λ_i – wszystkich sztuk komponentów, transportowanych do zakładu montażowego j .

Koszty obsługi łańcucha dostaw, porównane w tabeli IV dla problemów P1 i P2, są oczywiście związane z długością harmonogramów dostaw komponentów do zakładów montażowych. Nieterminowości dostaw przyczyniają się do generowania dodatkowych kosztów: magazynowania lub kar za opóźnienia. Największe skrócenie czasu wykonywania usług transportowych miało miejsce - zgodnie z przewidywaniami - w przypadku, gdy odbiorca, do którego miało być dostarczone zlecenie o dużych rozmiarach (znaczna liczba produktów), był rozpatrywany jako pierwszy w danej permutacji odbiorców. Wtedy też osiągnęte były mniejsze koszty – o około kilkanaście procent – niż w przypadku P1. Redukcja kosztów wynikała głównie ze zmniejszenia kar związanych z nieterminowością usług.

Porównanie problemów P1 i P2 jest istotne z punktu widzenia tzw. graczy, którzy na bieżąco chcą śledzić opłacalność swojej przynależności do sieci dostaw. Zaprezentowana metoda sprzyja przeprowadzaniu różnego rodzaju symulacji i dokonywania ocen – głównie ze względu na stosowane kryterium kosztowe. Każdy budowany harmonogram dostaw i związane z nim koszty oceniane są przez odbiorców komponentów. W rzeczywistości, oprócz kosztów uwzględniane są również inne czynniki, np. społeczne, związane z ryzykiem współpracy, doświadczenia we współpracy, perspektywy w dłuższym horyzoncie czasowym.

UWAGI KOŃCOWE

Opracowana metoda umożliwia nie tylko wybór dostawców komponentów, ale również harmonogramów dostaw oraz harmonogramów montażu. Selekcja dostawców dokonywana jest w oparciu o wiele czynników. Po wstępnej, wielokryterialnej selekcji dostawców ma miejsce wybór tych dostawców, którzy spełniają odpowiednie wymagania, dotyczące ich możliwości produkcyjnych, transportowych, a przede wszystkim kosztów.

Istotną cechą metody jest modułowe podejście do struktury całej sieci i narzędzi, wspomagających zarządzanie jej. Każdy zakład produkcyjny, niezależnie od tego, czy produkuje komponenty, czy montuje złożone wyroby, traktowany może być odrębnie – opisany innymi zależnościami matematycznymi, uwzględniającymi jego specyfikę: organizację przepływu produktów, sposób magazynowania (stosowanie buforów międzyoperacyjnych, blokowanie maszyn, czy tzw. szeregowanie dokładnie na czas).

Modułowa struktura systemu sprzyja elastyczności – nie tylko na poziomie maszyn, ale również na poziomie zarządzania systemem, zwłaszcza w przypadkach kryzysowych. Możliwość reharmonogramowania należy do zalet metody. W przypadku konieczności zmiany uszeregowania operacji (awaria w jednym z zakładów, pilne zlecenia, uwzględnienie zmian wymagań klientów, przerwanie produkcji z innych powodów, np. czynników społecznych) można ponownie rozwiązać problem, eliminując lub uaktualniając zależności matematyczne, dotyczące zasobów, z którymi związane są zmiany. Obliczenia prowadzone są wtedy niekoniecznie poczynając od pierwszego poziomu metody – punkt startowy ponownych obliczeń zależy od tego, w którym miejscu sieci dostaw zachodzi konieczność modyfikacji harmonogramu przepływu produktów.

Zbudowane do obsługi systemu montażowego modele matematyczne mogą być oczywiście zmodyfikowane, rozbudowane – dopasowane do zmieniającej się rzeczywistości. Zmieniony może być np. reguła upustów dawanych zakładom montażowym. W przypadku, gdy odbiorcy tworzą sieć należącą do jednego właściciela, upusty mogą być wyznaczane w odniesieniu do całej sieci, a nie tak jak w przedstawionych modelach, gdzie bonifikaty dotyczą poszczególnych odbiorców. Przydzielenie upustów całej sieci uniemożliwia jednak dokonywanie takich symulacji i porównań, jakie przedstawiono przy opisie przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych. Dla problemów o stosunkowo dużych rozmiarach zamieszczone modele matematyczne mogą stanowić punkt wyjścia do budowy algorytmów heurystycznych.

Jak wykazały eksperymenty obliczeniowe metoda może służyć do przeprowadzania różnego rodzaju symulacji – np. badania wpływu liczby dostawców na harmonogram dostaw i związane z tym koszty.

W rozwiązywaniu problemu selekcji dostawców poszukiwany był kompromis pomiędzy odmiennymi interesami poszczególnych przedsiębiorstw – ogniw sieci a wspólnym celem działania sieci. Interesy poszczególnych przedsiębiorstw były uwzględniane na etapie wyznaczania zapotrzebowania na komponenty. Selekcja dostawców związana była z interesami całej sieci odbiorców komponentów.

Zastosowanie programowania matematycznego gwarantuje odpowiednią jakość otrzymywanych rozwiązań. Obserwowany rozwój techniki komputerowej i oprogramowania sprzyja stosowaniu tego narzędzia.

LITERATURA

1. *Fechner I.*: Zarządzanie łańcuchem dostaw, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań 2007.
2. *Tarkowski J., Stefaniak R.*: Elastyczne zarządzanie łańcuchem dostaw w branży materiałów budowlanych; w: *Elastyczne łańcuchy dostaw – koncepcje, doświadczenia, wyzwania*. Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2002.
3. *Sawik T.*: Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
4. *Sawik T.*: Planowanie i sterowanie produkcji w elastycznych systemach montażowych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
5. *Aissaoui N., Haourai M., Hassini E.*: Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. *Computers & Operations Research*. 2007: 34; pp. 3516-3540.

6. Chopra S., Meindl P.: Supply Chain Management, Prentice Hall, New York 2001.
7. Demirtas E.A., Ustun O.: An integrated multiobjective decision making process for supplier selection and order allocation. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2008; 36; pp. 76-90.
8. Sawik T.: Multiple objective supplier selection in make-to-order environment. *Omega, The International Journal in Management Science*; 2010; 38; pp. 203-212.
9. Krawczyk S.: Zarządzanie procesami logistycznymi, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2001.
10. Magiera M.: Modele PLC szeregowania operacji dla wielostadialnego systemu wytwarzania dokładnie na czas; w: Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej. *Rocznik 2007. Polska Akademia Nauk - Komitet Transportu*, s. 152-159
11. Magiera M.: Hierarchiczna metoda wielokryterialnego planowania produkcji dla systemów z ograniczeniami czasowymi; w: Wybrane zagadnienia logistyki stosowanej, red. nauk. L. Bukowski. Wydawnictwa AGH, Kraków 2009, s. 128-136.
12. Magiera M.: Modułowy system wspomagania zarządzaniem łańcuchem dostaw. *Automatyka, półrocznik*, tom 13, zeszyt 2, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009, str. 429-441.
13. Magiera M.: Metoda wspomagania zarządzania przepływami w elastycznych sieciach dostaw; w: Automatyzacja procesów dyskretnych. *Teoria i zastosowania*, tom II pod red. A. Świerniaka i J. Krystek, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego. Gliwice 2010, str. 133-141.
14. Fourer R., Gay D., Kernighan B.: AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming. Boyd & Fraser Publishing Company 1993.

METHOD OF COMPONENT PARTS SUPPLIERS SELECTION FOR FLEXIBLE ASSEMBLY SYSTEMS

Abstract. The method is constructed for local supply network. The network consists of the manufactures of component parts, the assembly plants and the final customers. The method is used for selection of the manufactures of component parts – for all assembly plants. The linear mathematical models of mixed integer programming are used in the method. The minimization of supply chain service costs is regarded in the described method. The schedules of transport tasks are constructed for transport between the selected manufactures of component parts and the assembly plants. Results of computational experiments with the proposed method are compared. Two cases are compared: the first, where interests of all supply network are regarded, the second, where each assembly plant is treated separately.

Aleksander STREUBEL

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Legnicy

Iwona KUPROWSKA

Koncern MAHLE Stuttgart

Marek KURAN

Politechnika Wrocławska Wrocław

LOGISTYCZNE ZABEZPIECZENIE PRODUKCJI MONTAŻOWEJ

LOGISTICAL ENSURING OF THE ASSEMBLY PRODUCTION

WSTĘP

W historii rozwoju gospodarczego Europy po drugiej wojnie światowej można wyodrębnić trzy zasadnicze etapy [2, 3, 4].

- a) Pierwszy obejmuje okres do lat sześćdziesiątych XX wieku gdzie istotna była produkcja. Jednym z priorytetów zadań było likwidacja przestoi i wąskich gardeł produkcyjnych. Wszystko co wyprodukowano można było sprzedać i brak było produkcji na magazyn.
- b) Drugi etap obejmował lata siedemdziesiąte i osiemdziesiąte XX wieku. W tym czasie na pierwszy plan wysunęła się sprzedaż. Rozszerzał się asortyment produkcji, zaczęły znacznie wzrastać zapasy magazynowe, co w konsekwencji doprowadziło do wzrostu kosztów. Jednocześnie jednak obserwuje się skrócenie czasów dostaw.
- c) Ostatni okres charakteryzuje nasycenie rynku, zmniejsza się popyt na wyroby, wzrasta konkurencja na rynku.

Przedsiębiorstwa koncentrują się na dziedzinach wypracowujących największy zysk, preferują działania z wysoką specjalizacją – ograniczają produkcję tylko do części określonego rodzaju. Inne natomiast zajmują się ich montażem w gotowy wyrób. Przykładem jest tu przemysł motoryzacyjny.

Oprócz dużej niepewności aktualną sytuację charakteryzuje silna dynamika, zmuszająca przedsiębiorstwa do szybszych reakcji, przy czym czasy reakcji stają się coraz krótsze.

Rynek zarówno w sektorze dóbr konsumpcyjnych jak i w sektorze dóbr inwestycyjnych zmienił się z rynku sprzedającego w rynek kupującego. Powoduje to, że kupujący [2]:

- mają coraz więcej życzeń specjalnych,
- wymagają nowych produktów w coraz krótszych odstępach czasu,
- preferują coraz mniejsze wielkości zleceń,
- chcą, by dostawy były coraz szybsze,
- w coraz większym stopniu decydują jak, kiedy, czym i dokąd chcą dostać towary,
- stawiają coraz wyższe wymagania jakościowe.

Przedsiębiorstwa z reguły muszą dostosowywać się do wymagań kupującego. Jeżeli nie chcą stracić swych rynków, to muszą charakteryzować się dużą elastycznością, silną gotowością do reakcji, stałą gotowością do innowacji, dobrą organizacją.

Sytuacja cenowa na rynkach zaostrza się stale i prowadzi do nacisku kosztowego na prawie wszystkie działy przedsiębiorstwa. W wielu zakładach:

- zlecenia są bardzo długo realizowane,
- nowe produkty są zbyt wolno opracowywane i wykonywane,
- stopień wykorzystania zdolności produkcyjnych jest zbyt różny,
- technologie produkcji nie są zmieniane lub są zmieniane za późno,
- utrzymywane są duże stany magazynowe ze wszystkimi konsekwencjami kosztowymi.

W dziedzinie sprzedaży można często stwierdzić, że instrumenty marketingowe są nieskutecznie stosowane, występują braki w dystrybucji, obserwuje się zbyt późną dostawę towarów często o niewłaściwej jakości, dostawy realizowane są za pośrednictwem drogich systemów transportu.

Rozpatrując sytuację występującą w dziedzinie informatyzacji przedsiębiorstwa, można nierzadko dojść do wniosku, że [9], [10]:

- aktualny poziom informatyzacji poszczególnych części przedsiębiorstwa nie jest znany instancjom centralnym,
- dostępne źródła informacji nie są wykorzystywane,
- sprzęt i oprogramowanie zastosowane przy uzyskiwaniu, analizie i przesyłaniu informacji nie odpowiadają wymaganiom.

Odwzorowanie sytuacji w wymienionych dziedzinach pokazuje, że istnieje wiele słabych punktów, leżące zarówno po stronie zakładu, albo też są one uwarunkowane przyczynami pozazakładowymi. Oznacza to, że trzeba szukać metod i technik, przy pomocy których można unikać słabych punktów lub je usuwać. Logistyka może być traktowana jako jeden z takich instrumentów.

Przeprowadzona analiza [1] rozwoju gospodarczego pokazuje, że przedsiębiorstwa są poddane działaniu zmieniających się i stale rosnących wymagań. Do najważniejszych wymagań stawianych w stosunku do przedsiębiorstwa należy wymóg bezproblemowego kształtowania przepływów materiałowych, przepływów wartościowych i informacyjnych.

Obecnie w procesie wytwarzania bardzo istotna jest niezawodność produkcji. Stanowi ona nowe podejście do procesu wytwarzania. W dzisiejszych czasach jest niemożliwe by obiekt, zakład czy dział utracił zdolność do wypełniania wymaganych funkcji. Obecnie logistyka ma do spełnienia sześć zadań, polegających na dostarczeniu:

- wymaganej ilości,
- właściwych obiektów (towary, osoby, energia, informacje),
- we wskazanym miejscu (źródło lub ujście) w systemie,
- w ustalonym momencie,
- dobrej jakości,
- przy konkurencyjnych kosztach,

które muszą być połączone w jednolitą funkcję.

Systemy logistyczne, analogicznie do systemów ekonomicznych, obejmują swym zasięgiem całe łańczie i branże przemysłu i tworzą tzw. łańcuch logistyczny, który składa się z następujących ogniw: klient, stanowiska opracowania, zapytań ofertowych i zamówień, dyspozycji i sterowania, zaopatrzenie, dostawcy, odbiorcy, odbiór towarów, produkcja, wysyłka, montaż i wprowadzenie do produkcji [3].

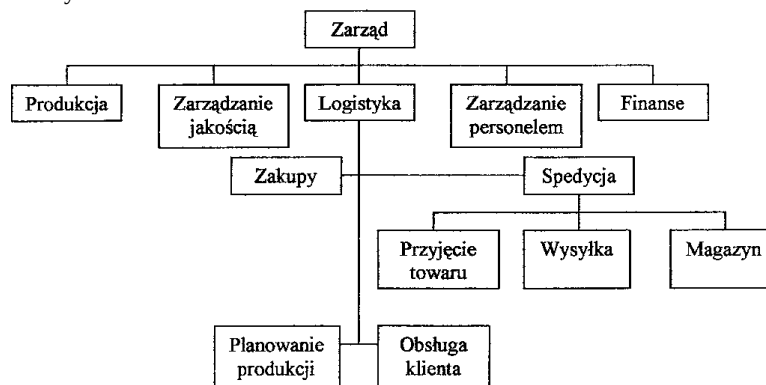
Spełnienie wymienionych zadań jest możliwe przy odpowiedniej strukturze organizacyjnej przedsiębiorstw. W przemyśle motoryzacyjnym często można spotkać strukturę organizacyjną firmy pokazano na rys. 1, z którego widać, że dział logistyki w Zakładzie jest bardzo rozbudowany. Dużą uwagę przywiązuje się do komórki planowania produkcji, bo tu ustala się sposoby zabezpieczenia dostaw (płynność produkcji). Ustala się tu również działania w sytuacjach awaryjnych.

Potrzeba nowego podejścia do logistyki wystąpiła zwłaszcza w przemysłach: motoryzacyjnym, lotniczym i elektronicznym, które rozwijały się dynamicznie przy stale rozbudowanej specjalizacji i kooperacji podmiotowej i technologicznej. Wielcy producenci samochodów (Volkswagen, Daewoo, Toyota, Fiat, General Motors), osiągający dzienną produkcję kilku tysięcy sztuk, stanęli przed ogromnymi problemami.

Po pierwsze - zapewnienie niezawodności dostaw materiałów do produkcji. Każdy materiał, komponent czy część musi znaleźć się na linii produkcyjnej lub montażowej w odpowiedniej ilości i odpowiednim czasie, przy możliwie najniższym poziomie zapasów. Utrzymanie np. miesięcznych zapasów stało się przy tych rozmiarach i tempie produkcji niewykonalne, zarówno ekonomicznie (koszty utrzymania i zamrożenia kapitału), jak i technicznie (powierzchnie magazynowe).

Po drugie - problemem narastającej synchronizacji dostaw materiałów od dostawców, częściowo wchodzących w skład danego koncernu, ale terytorialnie oddalonych od zakładów końcowego montażu.

Przeciętny samochód jest składany z ponad 1500 części, z których nie więcej niż 30 % produkowanych jest w zakładzie montażowym.



Rys. 1. Struktura organizacyjna przedsiębiorstwa

Po trzecie - problemem równie silnie odczuwanej potrzeby ograniczenia zapasów wyrobów gotowych opuszczających strefę produkcji; przy wielkich seriach wyrób musi być niemal bezpośrednio po ostatniej operacji produkcyjnej i kontroli jakościowej, oznakowaniu i zapakowaniu wysyłany do nabywców lub własnej sieci sprzedaży, stanowiących następne ogniwa łańcucha logistycznego; gromadzenie zapasów wyrobów gotowych - przy tej skali produkcji - staje się równie niemożliwe, jak gromadzenie zapasów materiałów.

Po czwarte - łańcuch logistyczny kończy się dopiero u ostatniego nabywcy konsumenta.

Zadania logistyki są bardzo złożone, nie kończą się na przepływach między podmiotami produkcyjnymi oraz tymi przedsiębiorstwami i handlem, ale sięgają do końcowego nabywcy dóbr konsumpcji i środków pracy [4].

Przedstawiona struktura przedsiębiorstwa jest jasna i przejrzysta z punktu widzenia zarządzania. Problem często stanowi brak identycznych systemów komputerowego wspomagania w zakładach a wtedy współpraca między zakładami jest utrudniona, co szczególnie odczuwa się w działaniach logistycznych przedsiębiorstwa. Często wprowadza się nieuzasadnione magazyny lub tworzy się zapasy międzyoperacyjne - zamraża się kapitał. Również podejście do organizacji logistyki w poszczególnych zakładach nie odpowiada randze zagadnienia.

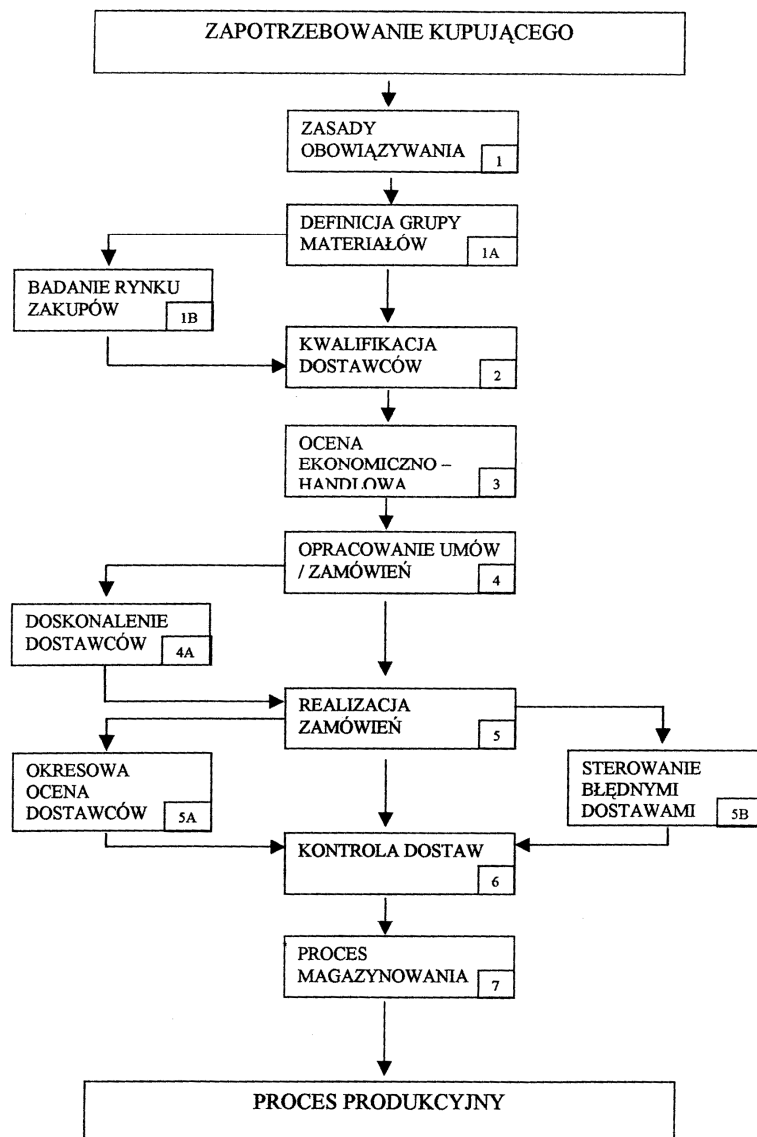
NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMU LOGISTYCZNEGO

Metoda podnoszenia niezawodności systemu logistycznego zabezpieczenia produkcji bazuje na sformułowaniu przebiegu od zapotrzebowania kupującego do dostarczenia wyrobu klientowi. Na rys. 2 przedstawiono przebieg takiej procedury. W przemyśle motoryzacyjnym przyjęto pewne zasady zakupu i sprzedaży wyprodukowanych dóbr.

Kooperanci są zobowiązani do przestrzegania wzajemnych ustaleń i przepisów związanych z dostawą jak i sprzedażą określonych wyrobów lub surowców.

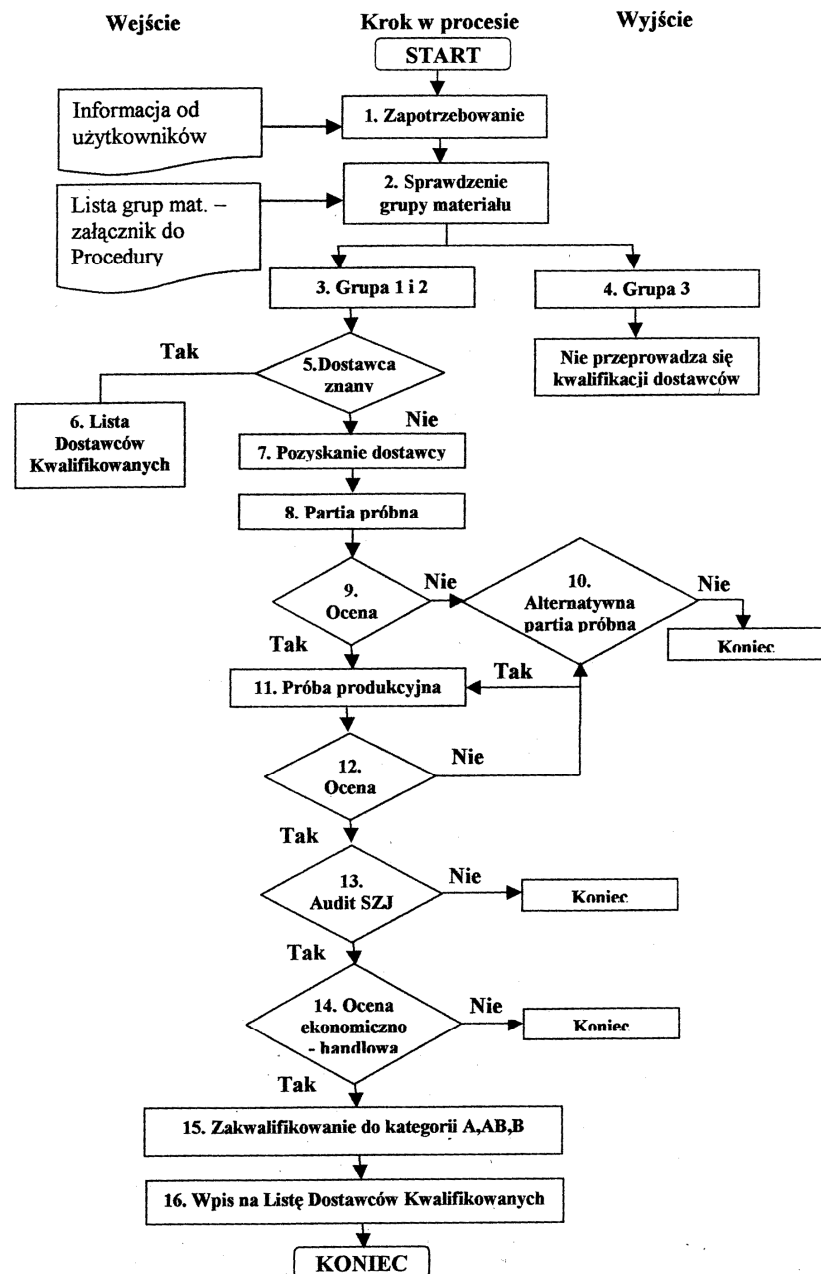
Ustalenia te dotyczą:

1. Formy zamówienia
2. Warunków rozliczeń finansowych,
3. Terminu i niezawodności dostaw (newralgiczna część umowy),
4. Jakości i niezbędnej dokumentacji,
5. Ustaleń końcowych (tajemnica produkcji).



Rys. 2. Ogólny schemat metody podnoszenia niezawodności systemu logistycznego

Z punktu widzenia procesu produkcyjnego najważniejsze są pozycje 3 i 4. Czas dostaw, jej terminowość, jakość i ilość mają dla zakładu znaczenie strategiczne. Tu również ustala się skutki prawne i finansowe dotyczące odstępstw od przyjętych zobowiązań. Dostawcy zapoznają się również z procedurą dostaw (rys. 2) i wyrażają zgodę na przeprowadzenie audytów Systemów Zarządzania Jakością (QM) oraz stosowania aktualnych norm VDA. [7], [8]. Dostawca musi zadeklarować się, czy będzie ubiegał się o umieszczenie go na liście kwalifikowanych dostawców.



Rys. 3. Kwalifikacja dostawcy

Kwalifikowany dostawca może liczyć na szereg przywilejów ze strony zakładu: stałą, wysoką cenę za swoje wyroby, gwarantowany zbyt, terminowość odbioru swoich wyrobów, odbioru wyrobów bez kontroli (po zarejestrowaniu w systemie SAP-R3 [5]), z możliwością dostawy bezpośrednio na produkcję (np. montaż – ograniczenie operacji pakowania i konserwacji wyrobu do niezbędnego minimum), co obniża pracochłonność produktu.

Odbiorca towaru jest zainteresowany posiadaniem wyłącznie kwalifikowanych dostawców, lecz dla zabezpieczenia płynności własnej produkcji przeprowadza okresową weryfikację dostawców, korzystając ze specjalnie opracowanych procedur. Na rysunku 3 przedstawiono przykładową procedurę stosowaną w części zakładów motoryzacyjnych.

Analizując przedstawioną procedurę widać, że uzyskanie statusu „kwalifikowanego dostawcy” jest bardzo złożone, jednak płynące z tego zyski wskazują na opłacalność jego posiadania. Jest oczywiste, że spełnienie wszystkich wymagań bywa trudne w danym momencie, dlatego zakład (odbiorca) klasyfikuje dostawców i umieszcza ich w jednej z kategorii.

W przemyśle motoryzacyjnym przyjęto następujące kategorie: A – najwyższa, AB – średnia, B – dostateczne i C – nie do zaakceptowania. Każda kategoria wymaga zdobycia przez dostawcę określonej liczby punktów. I tak: A, to 90-100 punktów – maksymalna liczba punktów, AB to 80 – 89 punktów, B to 60 – 79 punktów i C – poniżej 60 punktów. Punkty są sumą ocen uzyskanych w czterech kategoriach. Są to: zakupy – niezbędna dokumentacja, cena dostarczanego towaru i możliwość jej negocjacji, posiadanie systemu SAP-R3 do ewidencjonowania dostaw; jakość – posiadane certyfikaty, audyty, wskaźniki jakości oraz PPM (reklamacji na milion sztuk); logistyka – terminowość, kompletność dostaw, pakowanie i wysyłka w specjalnych pojemnikach; technika – wyposażenie techniczne zakładu dostawcy oraz jego zdolności rozwojowe.

Kryteria zakupu i techniki mają wpływ na długoterminową współpracę oraz zdolność do unowocześniania produktu oraz obniżania jego ceny. W celu przybliżenia problemu autorzy przedstawiają ocenę punktową do kryterium „Jakość produktu”. Liczba punktów za tą cechę wynikała z okresowego zestawienia ocen dostaw sporządzonego na podstawie kart kontroli dostaw wystawionych w okresie objętym oceną (około 1 roku).

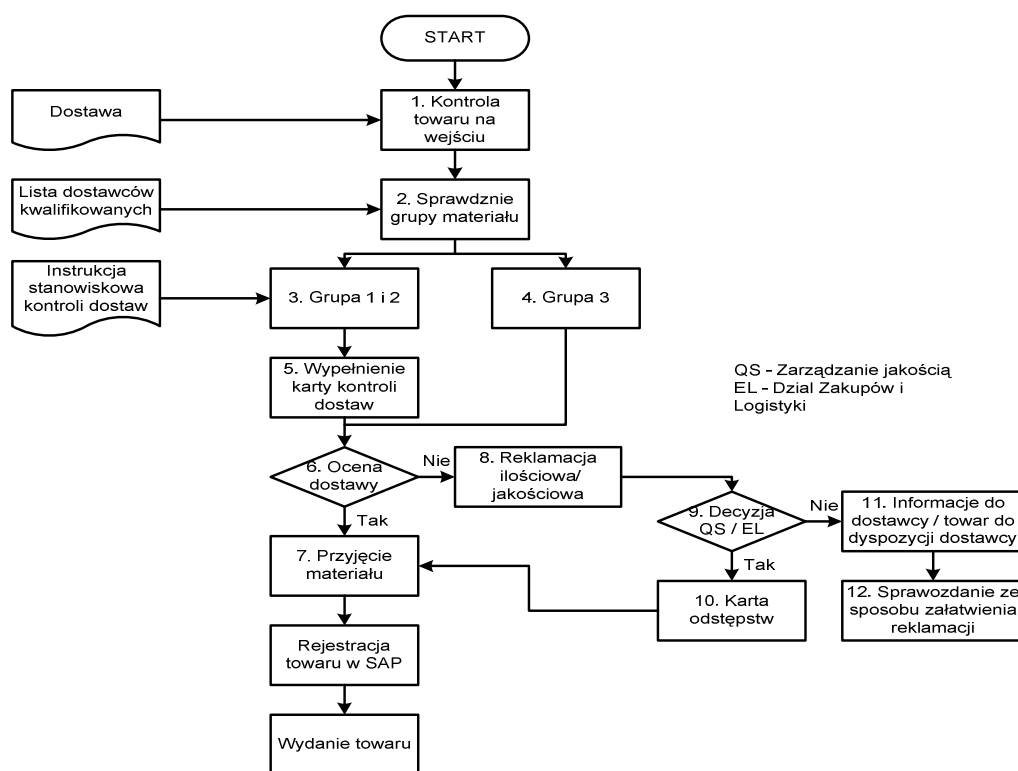
Przyznanie 100 punktów było możliwe, gdy dostawca spełnił następujące wymogi:

- posiadany aktualny certyfikat motoryzacyjny: ISO/TS oraz certyfikat 16949 Systemu Zarządzania Jakością, (10 pkt.),
- brak uwag do jakości aktualnie dostarczanego materiału, (35 pkt.),
- brak reklamacji (35 pkt.),
- ilość dostaw (powyżej 10 dostaw w okresie podlegającym ocenie), (10 pkt.),
- wieloletnia współpraca powyżej 3 lat, (10 pkt.)
- 90 punktów:
- posiadany aktualny certyfikat tylko Systemu Zarządzania Jakością, (8 pkt.),
- uwagi odnośnie jakości dostarczanego materiału z możliwością warunkowego przyjęcia (max. 2 dostawy w okresie podlegającym ocenie), (33 pkt.),
- reklamacja max. 1 dostawa, (33 pkt.),
- ilość dostaw (5-9 dostaw w okresie podlegającym ocenie), (8 pkt.),
- początek współpracy od 1 roku do 3 lat, (8 pkt)
- 80 punktów:
- dostawca był w trakcie certyfikacji, (6 pkt.),
- wielokrotne uwagi odnośnie jakości dostarczanego materiału z możliwością warunkowego przyjęcia (powyżej 2 dostaw w okresie podlegającym ocenie), (31 pkt.),
- reklamacja max 2 dostaw, w tym jedna dostawa nie nadawała się do wykorzystania (31 pkt.),
- ilość dostaw (do 4 dostaw w okresie podlegającym ocenie), (6 pkt.),
- pierwsza ocena powyżej 5 dostaw w okresie podlegającym ocenie, (6 pkt.)
- 70 punktów:

- dostawca planował certyfikację, (4 pkt.),
- wielokrotne uwagi odnośnie jakości dostarczanego materiału z możliwością warunkowego przyjęcia (powyżej 5 dostaw w okresie podlegającym ocenie), (28 pkt.),
- reklamacja max. 2 dostaw, które nie nadawały się do wykorzystania (28 pkt.),
- ilość dostaw (do 4 dostaw w okresie podlegającym ocenie), brak możliwości dokonania odbioru jakościowego dostawy, brak dowodów jakości dostawy, (6 pkt.),
- początek współpracy, zbyt mało dostaw (4 pkt.)
- 0 punktów:
- dostawca nie posiada certyfikatu, (0 pkt.),
- powtarzające się reklamacje (dotyczące tych samych zagadnień), dostawca podejmuje nieskuteczne działania korygująco - zapobiegawcze z zakresu Systemu Zarządzania Jakością, (0 pkt.),
- realizacja dostaw po rocznej przerwie, konieczność korzystania z innego dostawcy, (0 pkt.).

Osobne zagadnienie, to problemy związane z magazynowaniem dostarczonych wyrobów. Zagadnienie to częściowo omówiono we wcześniejszej publikacji [11].

Dzięki kwalifikowanym dostawcom proces magazynowania sprowadza się do kontroli według procedury przedstawionej wcześniej (rys. 4.) oraz zarejestrowanie dostawy w systemie SAP-R3 [5]. W zależności od organizacji zakładu, dostarczone elementy przekazywane są bezpośrednio do montażu lub do podręcznego magazynu.



Rys. 4. Kontrola dostaw [11]

PODSUMOWANIE

We współczesnej gospodarce nastąpiła wysoka specjalizacja zakładów, co szczególnie widoczne jest zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Szczególny problem stanowi produkcja seryjna i masowa. Proces wytwarzania odbywa się na liniach produkcyjnych gdzie istotne jest dostarczenie elementów w określonym czasie. W Polsce, w latach 90-tych zagadnienie to było marginalne.

Najczęściej na początku roku zamawiano ilość niezbędne do rocznej produkcji, składowane później w magazynach. W tym okresie nie zwracano uwagi na koszt i niezawodność dostarczonych części, ponieważ duże zapasy magazynowe gwarantowały ciągłość produkcji. Często zdarzało się, że przerywano produkcję, wiązało się to ze złomowaniem już dostarczonych i składowanych w magazynie części, co oczywiście generowało dodatkowe koszty.

Rosnąca konkurencja na rynku wymusiła zmianę podejścia do zagadnień produkcji. Zauważono, że poprawienie jakości elementów, zmniejszenie zapasów magazynowych oraz wyznaczenie nowej roli dla logistyki stanowi drogę do obniżenia kosztów produkcji jak i wzrostu konkurencyjności wyrobów na rynku.

Stwierdzono, że poprawienie jakości otrzymywanych elementów oraz terminowość dostaw (nawet przy wyższych ich kosztach) jest korzystne dla zakładu. Pozytywną rolę odgrywa posiadanie stałych dostawców, gwarantujących dostarczenie towaru o najwyższej jakości, za który otrzymują wyższą cenę. Kategorizacja dostawców i ich okresowa ocena gwarantuje obopólnie korzystną współpracę.

LITERATURA

1. Bussiek J., Ehrmann H., „*Buchführung 7. Auflage*” Ludwigshafen/Rhein 2002.
2. Fey P., „*Logistik Management und integrierte Unternehmensplanung*”. München 1989.
3. Kempny D., „*Logistyka. Zarządzanie logistyczn*”. Zarządzanie łańcuchem dostaw 1997.
4. Kempny D., „*Logistyczna obsługa klienta*” AE Katowice 2000.
5. Kosicki A., Kuprowska I., Łubniewski R., Streubel A., „*Komputeryzacja procesów logistycznych w przedsiębiorstwie*” WNT 2004.
6. Kuprowska I., „*Metody podwyższenia poziomu niezawodności systemu logistycznego w produkcji wielkoseryjnej w przemyśle motoryzacyjnym*” Praca doktorska. Politechnika Wrocławska 2006.
7. Miehle, „*Produktionswirtschaft, 8 Auflage*” Ludwigshafen/Rhein 2003.
8. Norma Niemieckiego Przemysłu Motoryzacyjnego VDA 6 część 4.1, tom 2.
9. Rupper P., „*Die Logistik organisatorisch verankern*” Unternehmenlogistik, Zürich/Köln 1991.
10. Schwajca D., „*Problemy oceny i pomiaru poziomu logistycznej obsługi klienta*” Materiały Międzynarodowej Konferencji Logistics '98. IliM Poznań 1998
11. Streubel A., Kuran M., Kuprowska I. „*Logistyczne zabezpieczenie seryjnego montażu tłoka silnika spalinowego*” Technologia i Automatyzacja Montażu 3/2010.

LOGISTICAL ENSURING OF THE ASSEMBLY PRODUCTION

Abstract. The paper discusses the challenges facing a modern logistics in the production system. Showing the problems that must be overcome by automotive, aerospace and electronics industries to guarantee reliable delivery of high quality production. The schema of increase reliability of logistic system is presented. Drew attention to the suppliers and their classification into categories adopted in the automotive industry. It also discusses the method of scoring classification suppliers. Showing the dependence between control of deliveries and suppliers category.

Zbigniew BOROWSKI

Bydgoska Szkoła Wyższa

Maciej MATUSZEWSKI

Janusz MUSIAŁ

Michał STYP-REKOWSKI

Uniwersytet Technologiczno-

Przyrodniczy w Bydgoszczy

Bydgoszcz

ORGANIZACYJNE I EKONOMICZNE UWARUNKOWANIA PROCESÓW WYTWARZANIA ELEMENTÓW WIELKOGABARYTOWYCH

ORGANIZATIONAL AND ECONOMICAL CONDITIONING OF PRODUCTION PROCESS OF LARGE-SIZE ELEMENTS

WPROWADZENIE

Definicji elementu wielkogabarytowego, którego obróbka jest przedmiotem niniejszej pracy, w literaturze fachowej nie znaleziono. Intuicyjnie przyjmuje się, że jest to element o dużych wymiarach zewnętrznych i jednocześnie dużej masie. Dla celów niniejszego opracowania jako elementy wielkogabarytowe (EWg) przyjęto elementy, których gabaryty wyznaczają jego graniczną objętość $V > 0,125 \text{ m}^3$. Takie kryterium przyjęto jako rezultat następującego rozumowania:

- tolerancje wykonania są znormalizowane, zasady obliczania ich wartości w funkcji wymiaru nominalnego zawarte są w normach krajowych i europejskich [3÷6]. Wartości tolerancji dla wymiarów nominalnych do 3150 mm zawarte są w normach [3, 4], dla większych zakresów wymiarowych - powyżej 3150 mm do 10000 mm w [5], a powyżej 10 000 mm do 40 000 mm w [6];
- najmniejszy wymiar graniczny (500 mm) przyjęty w normach o zasięgu europejskim można uznać za graniczny wymiar przy klasyfikacji elementów maszynowych jako wielkogabarytowych. przyjęcie tej granicy dla jednego wymiaru spowodowałoby potencjalną sytuację, że pręt $\varnothing 5$ o długości, np. 1000 mm należałoby przyjąć jako EWg. Podobna sytuacja byłaby gdy dwa wymiary są większe niż wymiar graniczny – arkusz blachy o grubości 1 mm i wymiarach, np. 600x600 mm także należałby już do EWg;
- ostatecznie przyjęto więc kryterium, że za element wielkogabarytowy uznaje się taki, którego wszystkie trzy wymiary przekraczają wymiar 500 mm, i jest ono równoważne kryterium objętościowemu, że $V > 0,125 \text{ m}^3$.

Ponieważ warunek trzech wymiarów gabarytowych większych niż wymiar graniczny znacznie ograniczyłby zbiór EWg (wykluczyłoby to elementy typu tarcza, płyta, pokrywa itp.) przyjęto ostatecznie, że jeden z wymiarów gabarytowych może być mniejszy, lecz element taki kwalifikuje się również jako wielkogabarytowy wówczas, gdy spełniony jest dodatkowo warunek objętości. Przyjęcie dodatkowego warunku powoduje pewne uelastycznienie klasyfikacji. Tworzenie różnych klasyfikacji ma na celu typizację procesów technologicznych, która powinna sprzyjać zwiększeniu produktywności procesu wytwórczego.

Zasadniczym celem podjęcia niniejszych badań było zidentyfikowanie czynników charakterystycznych dla obróbki EWg i wskazanie tych, które w istotny sposób determinują procesy wytwórcze elementów o dużych gabarytach, głównie w aspekcie ich dokładności.

PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ ELEMENTÓW WIELKOGABARYTOWYCH

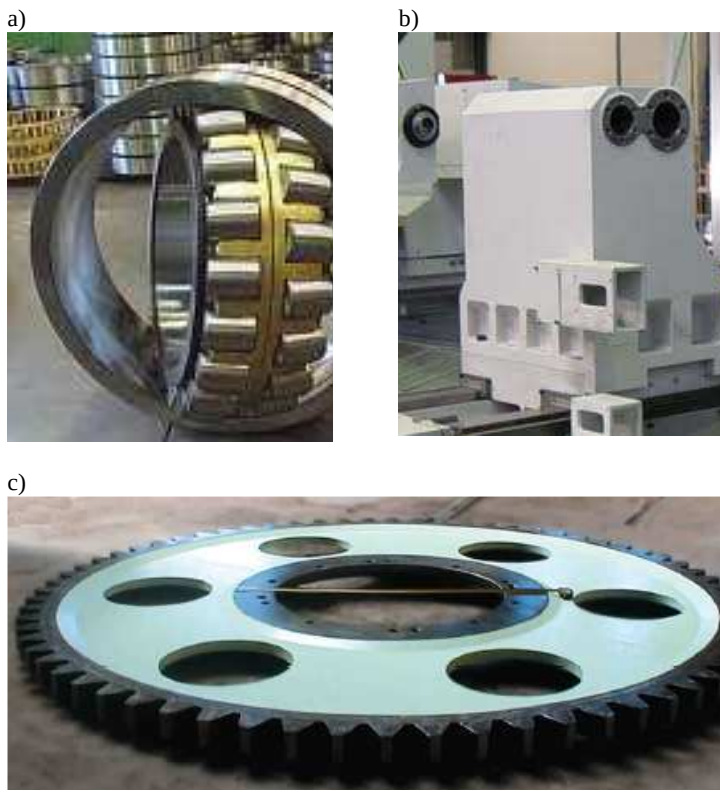
Elementy wielkogabarytowe znajdują coraz szersze zastosowania. Z jednej strony wynika to z zapotrzebowania na coraz większe znane już rodzaje obiektów technicznych, czego przykładami mogą być:

- coraz większe budowane i użytkowane samoloty (pasażerskie i transportowe),
- duże tankowce, masowce i inne specjalistyczne obiekty pływające,
- pojazdy drogowe (samochody, ciągniki),
- maszyny budowlane,
- obrabiarki itp.

Rosnące zapotrzebowanie na duże elementy wynika także z pojawiania się rozwiązań konstrukcyjnych do niedawna nieznanych. W tej grupie zastosowań EWg można wymienić:

- siłownie wiatrowe,
- wielozadaniowe maszyny rolnicze,
- maszyny technologiczne realizujące nowe procesy technologiczne, np. prasy hartownicze lub procesy znane lecz ze skokowo większą niż dotychczas wydajnością, np.: koparki, kruszarki.

Na rys. 1. przedstawiono kilka przykładów elementów, ze względu na swoje wymiary zaliczanych do grupy EWg.



Rys. 1. Przykłady elementów zaliczanych do wielkogabarytowych: a) dwurzędowe łożysko baryłkowe ($d=1000\text{ mm}$), b) korpus maszynowy, c) koło zębate ($m=30$, $z=70$)

Prezentowane elementy wykonywane są różnymi technikami: obróbką skrawaniem, spawaniem lub odlewaniem, przy czym wymienionymi technikami kształtowane są ich gabaryty, a do obróbki wykończającej wykorzystywane mogą być inne rodzaje obróbek.

SPECYFIKA OBRÓBKII ELEMENTÓW O DUŻYCH WYMIARACH

W obróbce EWg obserwuje się szereg trendów charakterystycznych dla tego typu elementów. Coraz większa jest na przykład oczekiwana ich dokładność geometryczna. Przejawem wychodzenia na przeciw tego trendu jest budowa obrabiarek umożliwiających obróbkę takiego elementu z kilku stron, minimalizując w ten sposób liczbę niezbędnych mocowań. W skrajnych przypadkach możliwa jest obróbka elementu z 5 stron, co w praktyce pozwala wykonać taki element „na gotowo” w jednym mocowaniu. Taka realizacja procesu technologicznego jest bardzo istotnym krokiem prowadzącym do uzyskania dużej dokładności obróbki.

Innym obserwowanym trendem w obróbce EWg jest zastępowanie szlifowania w obróbce wykończającej dokładnym frezowaniem. Szlifowanie, stanowiące w wielu przypadkach ostatnią operację technologiczną w procesie wytwórczym, jest bardzo energochłonnym sposobem obróbki, która to cecha wynika z samej istoty tej obróbki. Zastąpienie szlifowania dokładnym frezowaniem powoduje więc zmniejszenie kosztów produkcji, jednak przy spełnieniu wymagań jakościowych dotyczących obrabianych powierzchni. W obróbce EWg wymagania stawiane strukturze geometrycznej powierzchni są najczęściej mniejsze dlatego też można je zaspokoić frezując je.

SPOSOBY OBRÓBKII I NARZĘDZIA W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH EWg

Analiza procesów produkcyjnych elementów o dużych gabarytach pozwoliła zidentyfikować w nich następujące operacje technologiczne:

- frezowanie: obróbka płaszczyzn o tworzących prosto- i krzywoliniowych,
- wytaczanie: obróbka powierzchni wewnętrznych, przede wszystkim obrotowych, lecz nie tylko,
- wiercenie, rozwiercanie, gwintowanie: obróbka otworów,
- dłutowanie, przeciąganie, inne rodzaje: obróbki występujące sporadycznie w odniesieniu do EWg.

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że liczba rodzajów operacji technologicznych jest w nich mniejsza niż w przypadku elementów o gabarytach mniejszych niż EWg.

Najczęściej realizowanymi sposobami obróbki EWg są: frezowanie, wytaczanie i wiercenie. Wszystkie one należą do grupy obróbek skrawaniem, przy czym pierwsza z nich wykorzystywana jest przede wszystkim do obróbki powierzchni płaskich, druga i trzecia – do powierzchni obrotowych. Podstawowymi narzędziami, którymi realizuje się wymienione obróbki są odpowiednio:

- frezowanie: głowice frezowe z różnego rodzaju ostrzami, frezy, np. palcowe, walcowe, kształtowe i inne,
- wytaczanie: noże wytaczaki, wytaczadła lub głowice wytaczarskie, z ostrzami różnego rodzaju, zarówno pod względem materiałowym jak i geometrycznym,
- obróbka otworów (w zależności od ich rodzaju): wiertła, rozwiertaki, gwintowniki, pogłębiacze.

Zakres zastosowania frezowania w obróbce EWg jest duży, m.in. z powodu wykorzystywania go zarówno w obróbce zgrubnej jak i wykończającej – zamiast szlifowania. Po to, aby zastąpienie jednej obróbki drugą było możliwe niezbędne są zarówno odpowiednie obrabiarki jak również narzędzia.

Wszystkie obrabiarki muszą charakteryzować się, m.in. dużą sztywnością oraz możliwością realizacji obróbki z parametrami kinematycznymi o odpowiednich wartościach, np. duże prędkości obrotowe wrzeciona, małe i dokładne przemieszczenia zespołów roboczych. Przykładem obrabiarek o dużej sztywności są obrabiarki o strukturze portalowej dlatego też coraz więcej obrabiarek do obróbki EWg ma taką strukturę. Moduły robocze współczesnych obrabiarek (wrzecienniki, suporty), usytuowane w takiej strukturze mają

zazwyczaj duże możliwości ruchowe, co łącznie powoduje zaspokojenie wspomnianych wyżej potrzeb na wysokim, satysfakcjonującym poziomie.

Inną niezbędną cechą, stanowiącą o innowacyjności obrabiarek, jest zdolność do automatycznego korygowania położenia ostrza skrawającego względem obrabianej powierzchni. Ze względu na dokładność obróbki – zwłaszcza EWg, jest to cecha bardzo istotna. Zużycie ostrza powoduje bowiem zmianę wymiaru obrabianej powierzchni, przy czym w przypadku powierzchni wewnętrznych wymiar zmniejsza się, natomiast podczas obróbki powierzchni zewnętrznych – powiększa się. Możliwość automatycznego korygowania zmiany względnego położenia ostrza, wynikającej z jego zużycia, to jednocześnie czynnik zwiększający ekonomiczną trwałość ostrza – stan narzędzia (ostrza), wynikający z postępującego procesu zużywania narzędzia (ostrza), nie warunkuje bowiem jego wyłączenia z użytkowania. Decydować o tym będzie czas osiągnięcia granicznej wartości wielkości przyjętej jako miara zużycia, a jest on zazwyczaj większy.

Narzędzia realizujące dokładne frezowanie także powinny charakteryzować się odpowiednimi cechami, wśród których jako najistotniejsze należy uznać:

- trwałość ostrza – zwiększona w porównaniu do narzędzi używanych w obróbce małych elementów (jednym narzędziem – bez ostrzenia – należy obrobić dużą powierzchnię),
- możliwość obróbki z dużymi wartościami parametrów technologicznych.

Powyższe cechy narzędzi uzyskuje się doskonaląc ich cechy materiałowe. Realizuje się to poprzez pokrywanie ostrzy skrawających powłokami wykonanymi najczęściej z tworzyw należących do grupy ceramiki technicznej. Używa się do tego celu: azotków, borków, węglików takich pierwiastków jak: tytan, krzem, cyrkon, wolfram oraz ich różne kompozycje. Coraz częściej ostrza narzędziowe pokrywa się powłokami z grupy DLC (*Diamond Like Carbon*). Współczynnik tarcia takich powłok o materiał obrabiany jest znacząco mniejszy niż materiałów tradycyjnych, co powoduje, że opory skrawania są mniejsze i tym samym temperatura w strefie skrawania jest także mniejsza. Te nakładające się nawzajem zjawiska powodują mniejszą intensywność procesu zużywania i w efekcie – większą trwałość narzędzia.

Wytaczanie, podobnie jak frezowanie stanowi najczęściej ostatnią operację danej powierzchni w procesie obróbki EWg. Narzędzia używane do wytaczania powierzchni obrotowych w elementach wielkogabarytowych powinny charakteryzować się podobnymi cechami jak narzędzia do frezowania z tych samych powodów jak one. W przypadku standardowych narzędzi do wytaczania (wytaczadeł, np. rys. 2, głowic wytaczarskich) występuje dodatkowe ograniczenie wymiaru obrabianego otworu. Ze względu na sztywność takiego narzędzia wytaczaniem obrabia się otwory o średnicach nie większych niż 1000 mm wykorzystując do tego celu narzędzia standardowe. W przypadku konieczności obróbki większego otworu zachodzi potrzeba zastosowania narzędzia specjalnego, co zazwyczaj generuje duże koszty.



Rys. 2. Standardowe wytaczadło z aluminiowym korpusem o zakresie wytaczanych średnic: 100÷1025 mm; dokładność nastawy: 0,01 mm na średnicy, maksymalne dopuszczalne obroty : 2.500 min⁻¹

Współczesne obrabiarki, także te do obróbki elementów o dużych gabarytach, wyposażone są zazwyczaj w magazyny narzędzi, zawierające nawet do kilkuset różnych narzędzi, automatycznie wybieranych i wymienianych podczas obróbki. W takim systemie narzędzia usytuowane są w specjalnych oprawkach lub uchwytach zapewniających szybko, trwałą i dokładną jego wymianę. Ze względu na dokładność obróbki istotne jest użycie właściwej oprawki, gdyż inne są one do obróbki kształtującej (zgrubnej), inne – do obróbki wykończającej. Stosowanie oprawek stwarza potrzebę istnienia w strukturze zakładu produkcyjnego narzędziowni, w której narzędzia są nie tylko ostrzone lecz przede wszystkim dokładnie ustawiane.

ASPEKTY MONTAŻOWE W PRODUKCJI DUŻYCH ELEMENTÓW

W przypadku elementów o dużych gabarytach demontaż w celach remontowych i powtórny montaż jest ze względów oczywistych trudny. Po to aby tych trudności uniknąć lub minimalizować je, o ile jest to możliwe obróbki dokonuje się bez demontażu – podczas użytkowania. Do tego celu służą obrabiarki modułowe, które coraz częściej wykorzystywane są w obróbce skrawaniem, zwłaszcza EWg [2, 7, 9]. Jako przykłady stosowania takiej obróbki można przytoczyć obróbkę elementów podporowych obrotowych pieców cementowniczych lub młynów obrotowych.

Jest to jednak reakcja na skutki procesu zużywania, a wiadomo, że profilaktyka jest lepsza niż terapia. Aby opóźnić wystąpienie stanu powodującego konieczność dokonania napraw podejmuje się działania o różnym charakterze. Jednym z nich jest zwiększenie dokładności obróbki obrabianych elementów. W ten sposób można w bardzo znaczący sposób zwiększyć okres poprawnego działania maszyny, w której strukturalnie taki element występuje. Reprezentatywnym przykładem potwierdzającym powyższe stwierdzenie jest przekładnia obiegowa występująca w turbinie wiatrowej. Dokładność usytuowania i rozstawu osi kół zębatach determinuje jej trwałość, gdyż niewielkie nawet odchyłki, np. współosiowości otworów pod łożyska przy dużych wymiarach wywołują duże przemieszczenia elementów i tym samym gorsze warunki współpracy zębów. W konsekwencji prowadzi to do intensyfikacji procesu zużywania i konieczności remontu. Przekładnia o gabarytach rzędu tysięcy milimetrów usytuowana jest na dużej wysokości na maszynie w związku z czym jej demontaż jest już operacją trudną i kosztowną.

ASPEKTY EKONOMICZNE PRODUKCJI EWg

W przypadku elementów o gabarytach nie kwalifikujących je jako elementy wielkogabarytowe typową obróbką wykończającą, zapewniającą oczekiwaną dokładność, jest szlifowanie. Ze względów technologicznych, w przypadku EWg szlifowanie zastępuje się dokładnym frezowaniem, za pomocą którego można uzyskać parametry struktury geometrycznej powierzchni porównywalne ze szlifowaniem, a nawet lepsze. Zastąpienie szlifowania frezowaniem wywołuje skutki w sferze ekonomicznej procesu produkcyjnego. Szlifowanie jest bowiem najbardziej energochłonnym rodzajem obróbki skrawaniem. Dowodzą tego rezultaty licznych badań, np. [1, 8], a uzasadnić słuszność tego stwierdzenia można w prosty sposób – obserwując te dwa rodzaje obróbki. Podczas szlifowania przedmiot nagrzewa się do wyższych temperatur (przy takich samych głębokościach skrawania), a wiadomo, że ciepło dyssypuje do otoczenia stanowiąc część włożonej energii, która jest bezpowrotnie tracona. Energetycznie, szlifowanie jest więc obróbką mniej efektywną niż frezowanie, co jest równoznaczne z tym, że ekonomicznie jest to także obróbka gorsza.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone rozważania wykazały jednoznacznie, że w przypadku elementów wielkogabarytowych w analizach ekonomicznych należy uwzględniać także koszty – najczęściej duże – demontażu i montażu po naprawie. Przede wszystkim ze względów ekonomicznych należy przestrzegać zasady, że nie zawsze i nie wszystkie wymiary należy wykonywać z dużą dokładnością. Dokładność bowiem kosztuje, a technicznie nieuzasadnione zwiększanie dokładności obróbki powoduje znaczny wzrost kosztów jednostkowych produktu.

W kalkulacjach ekonomicznych należy jednak obligatoryjnie uwzględnić również racje techniczne. Ich pominięcie mogłoby bowiem doprowadzić do absurdalnych sytuacji.

LITERATURA

1. Kwapisz L., Przybył R., Frącki W.: Obrabiarki do skrawania metali. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999.
2. Musiał J., Styp-Rekowski M.: Technologiczne uwarunkowania modułowej budowy obrabiarek skrawających. *Technologia i Automatyzacja Montażu* nr 2/2006, s. 26-29.
3. Norma PN-EN 20286-1: 1996. Układ tolerancji i pasowań ISO. Podstawy tolerancji, odchyłek i pasowań.
4. Norma PN-EN 20286-2: 1996. Układ tolerancji i pasowań ISO. Tablice klas tolerancji normalnych oraz odchyłek granicznych otworów i wałków.
5. Norma PN-84/M-02108. Tolerancje i pasowania. Tolerancje wymiarów powyżej 10000 mm do 40000 mm.
6. Norma PN-91/M-02106. Podstawy zamienności. Układ tolerancji i pasowań. Pola tolerancji i odchyłki graniczne wymiarów powyżej 3150 do 10000 mm.
7. Pogodin A., Churtasienko A.W.: Modułowe technologie w obróbce wielkogabarytowych elementów w procesie eksploatacji bez ich demontażu. *Technologia i Automatyzacja Montażu* nr 1/2003, s.30-33.
8. Robert Polasik: Metoda doboru warunków szlifowania stali na sucho. Rozprawa doktorska, UTP Wydział Mechaniczny, Bydgoszcz 2007.
9. Rychlik K., Jastrzębski M.: Problemy technologiczne obróbki otworów w wielkogabarytowych przedmiotach – modułowe obrabiarki przenośne. *Technologia i Automatyzacja Montażu* nr 2/2009, s. 28-31.

ORGANIZATIONAL AND ECONOMICAL CONDITIONING OF PRODUCTION PROCESS OF LARGE-SIZE ELEMENTS

Abstract. *The tendency to intensification of technological processes is one of causes of enlarged interest with a large-size elements observed in last years. Next, this fact this is the reason of undertaken works aiming to production processes optimizing in all their phases. Realized technological processes use the well-known techniques and method of processing, however in relation to large-size elements some specific features are visible. In presented paper these special features were described and discussed. Moreover, in introduced analysis the factor of costs of production was also considered was. – It is also different than in production processes of small dimensions elements.*

Konrad KLUSEK
Kazimierz RYCHLIK
Jacek TYLEND
Instytutu Mechanizacji Budownictwa
i Górnictwa Skalnego
Warszawa

BADANIA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH OKUĆ BUDOWLANYCH

TESTING THE MECHANICAL PROPERTIES OF BUILDING HARDWARE

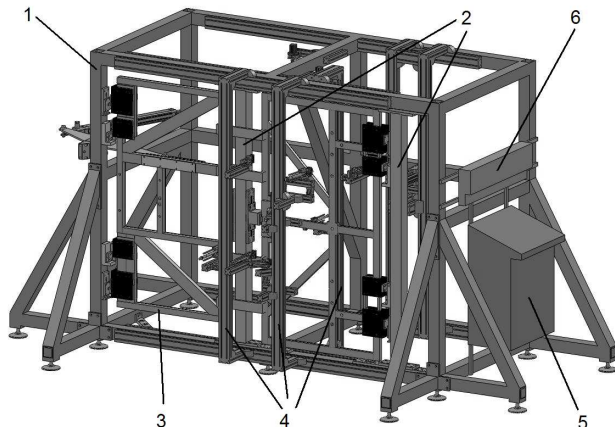
Podstawowym dokumentem regulującym zagadnienia związane z wyrobami budowlanymi w krajach należących do UE jest Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich 89/106/EWG wraz ze zmianami ujętymi w Dyrektywie 93/68/EWG. Zgodnie z dyrektywą wyrób budowlany może być stosowany w obiektach pod warunkiem posiadania znaku CE, który wskazuje na zgodność produktu ze stosowną europejską specyfikacją techniczną, do których należą krajowe normy zharmonizowane oraz europejskie aprobaty techniczne. Europejska specyfikacja techniczna określa min. klasy właściwości użytkowych i wymagań technicznych, oraz sposoby określania właściwości wyrobu budowlanego w oparciu o wspólne europejskie metody badań. Przed umieszczeniem swoich produktów na rynku europejskim producent powinien mieć pewność, że jego produkt został wykonany w sposób spełniający wymogi dyrektywy „wyroby budowlane”. W tym celu producent jest zobowiązany do przeprowadzenia oceny zgodności wyrobu z dyrektywą, co wiąże się z przeprowadzeniem szeregu badań opisanych w normach zharmonizowanych. Celem tych badań jest zapewnienie by wyroby budowlane stosowane na terenie UE były bezpieczne dla ludzi, zwierząt oraz mienia, miały odpowiednie cechy użytkowe i spełniały wymagania podstawowe, a dzięki ujednoliconej klasyfikacji w ramach wspólnoty pozwalały na swobodny obrót wyrobami we wszystkich krajach członkowskich.

Obowiązek przeprowadzenia szerokiego zakresu badań produktu w celu uzyskania przez niego znaku CE zmusza producenta do inwestowania w specjalistyczne urządzenia badawcze, które byłyby wykorzystane jedynie przy uruchomieniu nowej produkcji. Wychodząc naprzeciw potrzebom producentów okuć budowlanych w Instytucie Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie opracowano, na podstawie wytycznych zawartych w odpowiednich normach, zestaw stanowisk do badania właściwości mechanicznych okuć budowlanych. W procesie ich projektowania duży nacisk został położony na możliwość wykonania badań na jak największej liczbie produktów z danej klasy, różniących się od siebie budową, wielkością czy sposobem mocowania.

Przykładem takiego urządzenia jest stanowisko do badania trwałości i wytrzymałości okuć budowlanych, którego schemat konstrukcyjny przedstawiono na rys.1. Zostało ono skonstruowane do przeprowadzania badań mechanicznych okuć budowlanych typu zawiasy [1], zamki mechaniczne [2], zamknięcia przeciwpaniczne [4] oraz zamknięcia awaryjne [3]. Ze względu na podobieństwa w cyklach badawczych wymaganych przez odpowiednie normy dotyczące badanych okuć powstało jedno stanowisko badawcze umożliwiające wykonanie łącznie trzynastu badań mechanicznych okuć budowlanych. Każde badanie wymaga wybrania jednej z sześciu konfiguracji stanowiska.

Głównym elementem jest rama spawana rys.1. poz. 1 wykonana z profili zamkniętych, której zadaniem jest przenoszenie obciążeń powstałych podczas prac badawczych. Do ramy są zamocowane specjalne prowadnice umożliwiające precyzyjne ustawienie przestawnych belek wspornikowych 2. Służą one do mocowania na stanowisku drzwi próbnych 3 o różnej szerokości w taki sposób, by zamki i zamknięcia przeciwpaniczne i awaryjne zamocowane na drzwiach mogły właściwie ze sobą współpracować. Do ramy zamocowano również aluminiowe profile prowadzące, do których mocowane są z kolei ramki przestawne z siłownikami pneumatycznymi 4. Ze względu na konieczność przykładania sił o różnych wartościach w wielu miejscach jednocześnie, ramki aluminiowe zapewniają możliwość szybkiego przeobrażenia położenia siłowników pneumatycznych.

Zespół napędu i sterowania pneumatycznego zbudowany jest z aparatury i siłowników firmy FESTO. Elementy napędu i sterowania pneumatycznego są zamontowane na płytach montażowych przytwierdzonych do ramy stanowiska, a siłowniki są umieszczone na wspornikach wykonanych z profili aluminiowych. Zasilanie powietrzem układu odbywa się przez zespół przygotowania powietrza w skład którego wchodzi filtr sprężonego powietrza z zaworem redukcyjnym, zawory załączający start, i przełącznik pneumo - elektryczny. Ciśnienie pracy układu pneumatycznego wynosi 0,6 MPa.



Rys. 1. Stanowisko do badania trwałości i wytrzymałości okuć budowlanych – schemat konstrukcyjny
1 – rama główna; 2 – zespół przestawnych belek wspornikowych; 3 – drzwi próbne; 4 – ramki przestawne z siłownikami pneumatycznymi; 5 – szafa sterownicza; 6 – wyspa zaworowa sterowania pneumatycznego.

W przypadku spadku ciśnienia poniżej 0,55 MPa nastąpi wyłączenie pracy układu pneumatycznego przez przełącznik pneumo - elektryczny. Wznowienie pracy układu pneumatycznego będzie możliwe po ponownym osiągnięciu wartości ciśnienia powyżej 0,6 MPa. Filtr sprężonego powietrza ma za zadanie usuwać z czynnika roboczego zanieczyszczenia stałe i ciekłe. W układzie napędu i sterowania pneumatycznego połączenia pomiędzy aparatami, siłownikami pneumatycznymi zrealizowane są za pomocą przewodów elastycznych z tworzywa sztucznego. Każdy siłownik posiada możliwość regulacji siły za pomocą zaworu redukcyjnego. Zawory zwrotno - dławiące zapewniają możliwość regulacji szybkości pracy siłowników.

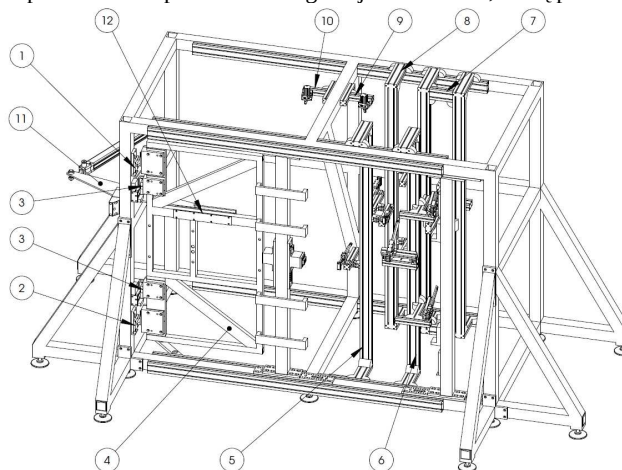
Zawory i rozdzielacze pneumatyczne wraz ze sterownikiem PLC są elementami wyspy zaworowej, zamocowanej na prawej ścianie stanowiska (6 – rys.1). W celu łatwej zmiany konfiguracji stanowiska, przewody pneumatyczne prowadzące bezpośrednio do wyspy zaworowej zostały wyposażone w złącza wtykowe samoodcinające (3 z rys.4). Zaletą złączy jest możliwość odłączania i przyłączania siłowników do stanowiska, bez konieczności ponownego prowadzenia przewodów od siłownika do wyspy zaworowej w sposób uniemożliwiający kolizję. Każdy przewód i złącze wtykowe samoodcinające są oznaczone zgodnie z symboliką zawartą na schemacie pneumatycznym stanowiska. Zasada ta obowiązuje również w odniesieniu do przyłączy elektrycznych dla czujników położenia tłoczków siłowników.

Zespół napędu i sterowania pneumatycznego jest samodzielnym zespołem bezobsługowym, który wymaga jedynie kontroli poprawności przyłączenia przewodów pneumatycznych do wyspy i złącz wtykowych oraz kontroli zanieczyszczenia filtra.

Instalacja elektryczna stanowiska wykonana jest na napięcie sieci jednofazowej 230 VAC 50Hz (sieć z trzema przewodami L1, N, PE). Główne źródło zasilania dla elementów wyposażenia stanowi zasilacz FESTO o nominalnej wartości napięcia wyjściowego DC wynoszącej 24 V przy wydajności prądowej do 10 A. W szafie sterowniczej znajduje się wyłącznik różnicowoprądowy o czułości 30 mA stanowiący drugi stopień ochrony przeciwporażeniowej oraz wyłącznik nadprądowy. Dodatkowe gniazdo serwisowe w szafie

sterowniczej umożliwiające podłączenie np. komputera przenośnego w celach diagnostycznych również zabezpieczone jest wyłącznikiem nadprądowym.

Badania zawias są przeprowadzane zgodnie z wytycznymi z normy PN-EN 1935:2003 + AC:2005 [1] i polegają na odwzorowaniu warunków pracy badanego okucia. Zadaniem zawias jest utrzymywanie elementu o określonej masie w pionie przy zapewnieniu jego możliwości obrotu wokół osi zawias o kąt określony przez producenta. Badania zawias wykonywane na stanowisku polegają na odpowiednim obciążeniu drzwi próbnych, do których mocowane są zawiasy, a następnie na ich cyklicznym otwieraniu i zamykaniu. Do badania zawias jest przeznaczona pierwsza konfiguracja stanowiska, którą przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko w konfiguracji pierwszej:

1 – badane okucie, 2 – okucie pomocnicze, 3 – zawiasy zabezpieczające, 4 – drzwi próbne, 5 – ramka III, 6 – ramka I, 7 – ramka IV, 8 – ramka II, 9 – siłownik zderzakowy prawy, 10 – siłownik zderzakowy lewy, 11 – mechanizm dźwigniowy, 12 – prowadnica łożyska.

Przed badaniami każdorazowo wykonywany jest pomiar odległości pomiędzy stałymi bazami pomiarowymi znajdującymi się w ramie stanowiska badawczego, oraz ruchomą bazą pomiarową znajdującą się na drzwiach próbnych. Po badaniach pomiar wykonywany jest ponownie i na podstawie dopuszczalnych przemieszczeń na obu kierunkach pomiarowych dokonywana jest ocena poprawności działania okucia.

Stanowisko umożliwia wykonanie czterech badań zawias na wszystkich czternastu klasach zawias:

1. badanie wstępne,
2. badanie wytrzymałości na obciążenia statyczne,
3. badanie podczas próby przeciążenia,
4. badanie trwałości.

Zgodnie z wymaganiami normatywnymi badania przeprowadza się na dwóch zawiasach, z czego badaną jest zawiasa górna. Masa elementu próbnego musi być w całości utrzymywana jedynie przez badaną zawiasę. Odległość pomiędzy środkami badanej zawiasy a dolnej zawiasy powinna wynosić $1540 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Osie obrotu zawias powinny być pionowe, z tolerancją w granicach $0,1^\circ$ oraz współliniowe z tolerancją w granicach 2mm. Dolna zawiasa powinna być umiejscowiona tak, aby pozwoliła na swobodny ruch pionowy, w tym celu, aby każde zużycie lub odkształcenie w obrębie badanej zawiasy wywoływało przemieszczanie się elementu próbnego (drzwi próbnych) osadzonego na zawiasach. Moment tarcia na dolnej zawiasie powinien być mniejszy niż 1 Nm.

Badania są przeprowadzane wg sposobu postępowania zawartego w wymaganiach normatywnych, który zakłada przeprowadzenie badań 1-3 na tej samej zawiasie, oraz badania 4 na nowej, wcześniej nie

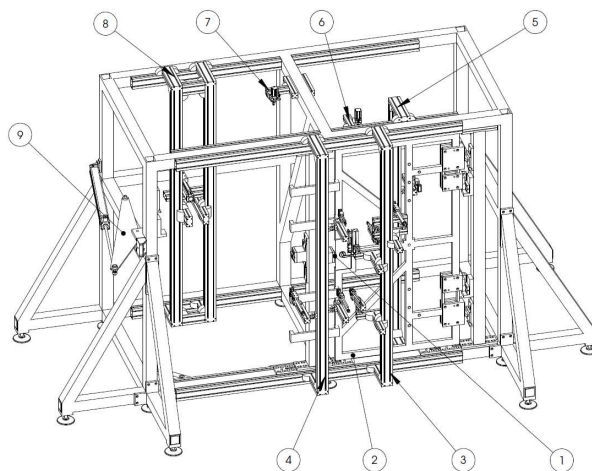
badanej zawiasie. Jeżeli wynik któregośkolwiek badania poprzedzającego jest negatywny, uznaje się że badana zawiasa nie spełnia wymagań.

Badania 1-3 polegają na sprawdzeniu stanu zawiasy po wykonaniu 20 cykli w przypadku badania pierwszego i drugiego oraz 6 cykli w przypadku badania trzeciego. W badaniu pierwszym masa drzwi próbnych jest właściwa dla danej klasy zawiasy, w badaniu drugim zostaje podwojona, a w badaniu trzecim potrojona. Badanie czwarte jest badaniem zmęczeniowym, gdzie w zależności od klasy zawiasy wykonywane jest od 10 000 cykli do 200 000 cykli.

Jeden cykl próbny składa się z otwarcia drzwi o mniejszy z kątów $90^\circ \pm 2,5^\circ$ lub zalecony przez producenta, a następnie zamknięcia drzwi próbnych – całość w czasie 6 sekund.

Drzwi próbne są napędzane siłownikiem pneumatycznym o średnicy tłoka $\varnothing 63$. Wysuwanie siłownika powoduje ruch mechanizmu dźwigniowego, który wymusza ruch łożyska po prowadnicy zamocowanej do drzwi próbnych, tym samym wymuszając otwieranie się drzwi próbnych. Kąt otwarcia drzwi próbnych jest zależny od wysunięcia siłownika otwierającego, dzięki czemu jest on ustawiany za pomocą czujnika kontaktronowego zamocowanego na tłoczysku siłownika. Po osiągnięciu wymaganego kąta otwarcia następuje zatrzymanie ruchu drzwi próbnych za pomocą układu luzownika, który został zamocowany na siłowniku otwierającym. Następnie układ wraca do pozycji początkowej, w której drzwi próbne dotykają zderzaków stanowiska badawczego, co jest wykrywane za pomocą czujnika indukcyjnego. Sterownik PLC pozwala na ustawienie wymaganej liczby cykli, zlicza cykle wykonane oraz zapewnia możliwość zatrzymania stanowiska badawczego po upływie określonej liczby cykli bez przerywania badania, np. w celu przesmarowania zawias.

Badania zamków są przeprowadzane zgodnie z wytycznymi z normy PN-EN 12209:2005 + AC:2006 [2], i polegają na odwzorowaniu pracy badanego okucia w warunkach rzeczywistych. Stanowisko umożliwia przeprowadzenie badań trwałości mechanizmu zapadki zamków mechanicznych w dwóch wariantach. Badanie polega na cyklicznym otwieraniu drzwi próbnych o założony kąt, a następnie na zamykaniu ich poprzez zatrzasknięcie przy wykorzystaniu stałej, ściśle określonej siły. Do badań zamków stanowisko powinno zostać przebrojone do konfiguracji drugiej (rys.3).



Rys .3. Konfiguracja druga:

1 – badany zamek, 2 – drzwi próbne, 3 – ramka I, 4 – ramka II, 5 – ramka III, 6 – siłownik zderzakowy prawy, 7 – siłownik zderzakowy lewy, 8 – ramka IV, 9 – mechanizm dźwigniowy.

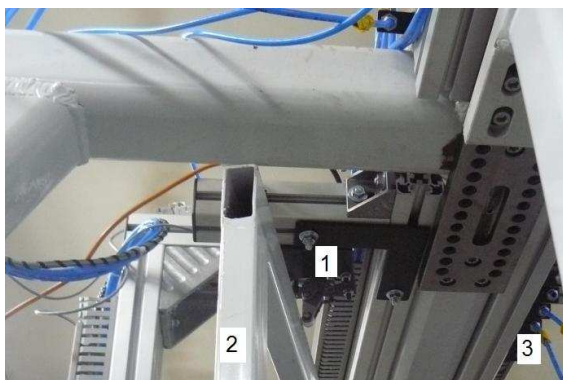
W zależności od klasy badanego okucia stosuje się różne siły nacisku na klamkę od 5 do 50N, oraz siły zamykające od 7 do 50N. W drugim wariantcie badania dodatkowo sprawdzane jest, czy po zastosowaniu

siły naciskowej prostopadłej do powierzchni drzwi próbnych zapadka zamka zadziała prawidłowo i pozwoli na otwarcie drzwi próbnych. Siła nacisku zależy od klasy badanego okucia i wynosi od 10 do 120 N. Ilość cykli w obu przypadkach wynosi od 50 000 do 200 000 cykli, wykonywanych z prędkością 10 cykli na minutę. Każdy siłownik wykorzystany w badaniu jest zasilany oddzielną drogą i ma programowalną wartość ciśnienia, co przy danej średnicy tłoka pozwala na zastosowanie sił określonych w wymaganiach normatywnych.

Norma szczegółowo podaje nie tylko kierunki i wartości, ale również i punkty przyłożenia siły zarówno na drzwiach próbnych jak i na klamce badanego zamka.

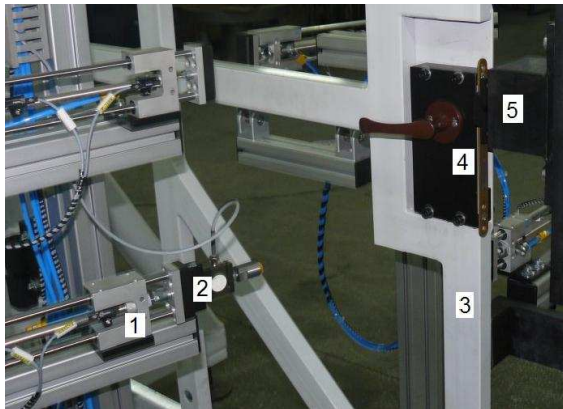
Każdy cykl składa się z naciśnięcia klamki z określoną siłą, następnie otwarcia drzwi próbnych o zadanej masie o kąt 10° , a po osiągnięciu wymaganej pozycji na trzaśnięciu drzwiami w taki sposób, by siła zamknięcia była zgodna z wymaganiami normatywnymi. W celu spełnienia tego wymagania zastosowano specjalny układ, który został przedstawiony na rys. 4 i rys. 5.

Układ ten pozwala na zatrzaśnięcie drzwi próbnych z wymaganą siłą, która wynika jedynie z dynamiki ruchu drzwi. Po otwarciu drzwi próbnych o założony kąt zostaje wysunięty siłownik rolkowy (1 z rys.4), który blokuje zamknięcie drzwi. Następnie zostaje uruchomiony siłownik zatraskujący (1 z rys.5), który został wyposażony w czujnik siły (2 z rys.5).



Rys. 4. Mechanizm zatrzymywania drzwi próbnych.

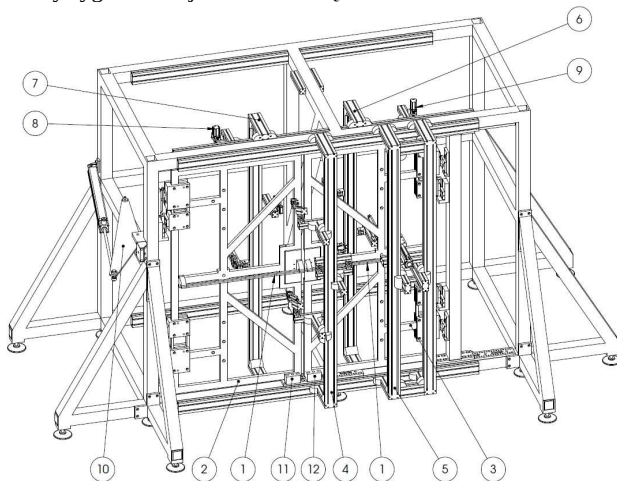
1 – siłownik rolkowy, 2 – drzwi próbne, 3 – złącza wtykowe samoodcinające do podłączania siłowników



Rys. 5. Pomiar siły zamykania drzwi próbnych: 1 – siłownik zatraskujący, 2 – dynamometr, 3 – drzwi próbne, 4 – badana zapadka zamka, 5 – zaczep współpracujący z zapadką zamka

Narastające ciśnienie w siłowniku powoduje wzrost siły zatraskiwania aż do osiągnięcia wymaganej wartości, którą sygnalizuje dynamometr. W momencie osiągnięcia wymaganej wartości siłownik rolkowy gwałtownie się wycofuje pozwalając na uderzenie zapadki zamka (4 z rys.5.) we współpracujący z nią zaczep (5 z rys. 5). Opisany układ jest używany również podczas badań zamknięć przeciwpanicznych i awaryjnych, a bliźniaczy układ pozwala również na regulację siły zatraskiwania drugiego skrzydła drzwiowego (rys.6).

Zatrzaśnięcie drzwi próbnych jest wykrywane przez czujnik. W przypadku nie wykrycia zatrzaśnięcia drzwi próbnych po czasie 6 sekund (czas trwania 1 cyklu) na ekranie operatora wyświetlany jest błąd, a badana zapadka uznana jest za niespełniającą wymagań normatywnych. Do rozpoczęcia nowego cyklu każdorazowo jest potrzebny sygnał z czujnika zatrzaśnięcia drzwi.



Rys. 6. Konfiguracja szóstą: 1 – badane okucia, 2,3 – drzwi próbne dwuskrzydłowe, 4 – ramka I, 5 – ramka IV, 6 – ramka II, 7 – ramka III, 8 – siłownik zderzakowy lewy, 9 – siłownik zderzakowy prawy, 10 – mechanizm dźwigniowy, 11,12 – zderzaki do mocowania czujników zamknięcia.

Badania zamknięć przeciwpanicznych są przeprowadzane zgodnie z wytycznymi z normy PN-EN 1125:2009 [4], a badania zamknięć awaryjnych zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 179:2009 [3]. W obu przypadkach wykonywane są badania zwolnienia, badania ponownego zaczepienia oraz badania trwałości. W przypadku zamknięć przeciwpanicznych stosowane są dodatkowo badania pod naciskiem. Stanowisko jest przystosowane do badania zamknięć przeciwpanicznych i awaryjnych montowanych zarówno na drzwiach jednoskrzydłowych jak i dwuskrzydłowych.

Przebieg cyklu badawczego zależy ilości skrzydeł drzwi próbnych. W przypadku badań zwolnienia cykl polega na określeniu, czy przy użyciu wymaganej siły zamknięcie pozwoli na ich otwarcie. Cykl badawczy zwolnienia pod naciskiem polega na określeniu, czy drzwi próbne obciążone siłą 1000N prostopadłą do czoła będą mogły być zwolnione określoną siłą przykładaną do zamknięcia. Cykle badań trwałości polegają na otwieraniu i zamykaniu poprzez trzaśnięcie drzwi próbnych. W przypadku drzwi próbnych dwuskrzydłowych należy dodatkowo dbać, by odpowiednie skrzydła otwierały się i zamykały we właściwej kolejności.

Badania zamknięć przeciwpanicznych i awaryjnych mają identyczny przebieg, różnią się jedynie miejscem i wartościami przykładanych sił. W przypadku zamknięć awaryjnych siła uruchamiająca klamkę wynosi 70N, a siła uruchamiająca płytkę naciskową 150N. W przypadku zamknięć przeciwpanicznych pręt uruchamiany jest w trzech miejscach siłą 80N. Siła zamykająca drzwi próbne wynosi 50N. Masa jednego skrzydła drzwi próbnych może wynosić 100 lub 200 kg w zależności od klasy badanego okucia. Badania trwałościowe polegają na wykonaniu odpowiedniego cyklu zależnego od klasy badanego okucia 100 000

lub 200 000 razy, z prędkością 6 cykli na minutę. Podobnie jak w badaniach zamków wykrywane jest zatrzaśnięcie drzwi próbnych w celu rozpoczęcia następnego cyklu badawczego. Na rys. 6 pokazano stanowisko w konfiguracji szóstej, która pozwala na badanie zamknięć przeciwpanicznych i awaryjnych zamocowanych na drzwiach próbnych dwuskrzydłowych.

Stanowisko badawcze zostało tak skonstruowane, by maksymalnie zabezpieczyć operatora przed skutkiem zdarzeń niepożądanych. Stanowisko wykonuje badania trwałościowe, które wymagają jego ciągłej pracy przez 334 godziny, co oznacza konieczność maksymalnego zautomatyzowania badania i ograniczenia konieczności ciągłego nadzoru operatora. Ze względu na dużą masę drzwi próbnych, w ekstremalnym przypadku dochodzącą do 480kg, na ramie stanowiska zamontowano dodatkowe zawiasy zabezpieczające, których zadaniem jest uniemożliwienie upadku drzwi po zerwaniu zawias. Stan zerwania zawias jest monitorowany przez dwa czujniki odpowiedzialne za oba skrzydła drzwiowe, po zerwaniu zawias uruchamia się stan alarmowy. Każde niezazębienie się zamknięcia lub zamka ze współpracującym zaczepem jest wykrywane, a po przekroczeniu czasu trwania pojedynczego cyklu uruchomiony jest stan alarmowy. W celu zachowania stałości sił używanych w badaniu w układzie sterowania pneumatycznego zastosowano przełącznik pneumo - elektryczny wykrywający spadek ciśnienia poniżej odpowiedniej granicy. Wszystkie stany alarmowe powodują natychmiastowe odcięcie zasilania pneumatycznego oraz uruchomienie sygnałów dźwiękowego i świetlnego.

PODSUMOWANIE

1. Badania walidacyjne stanowiska wykazały, że jego właściwości użytkowe zapewniają możliwość poprawnego i bezpiecznego wykonywania badań decydujących o bezpieczeństwie wyrobów budowlanych zgodnie z wymaganiami przytaczanymi w normach.
2. Skonstruowane stanowisko charakteryzuje się dużą uniwersalnością pozwalającą na przeprowadzenie badań okuć budowlanych wszystkich klas opisanych w normach.
3. Usługi badawcze związane z oceną cech wytrzymałościowych i użytkowych okuć budowlanych mogą być realizowane przez nowo uruchomione laboratorium badawcze zlokalizowane w siedzibie IMBiGS w Warszawie.

LITERATURA

1. PN-EN 1935:2003 + AC:2005 „Okucia budowlane. Zawiasy jednoosiowe. Wymagania i metody badań.”
2. PN-EN 12209:2005 + AC:2006. „Okucia budowlane. Zamki. Zamki mechaniczne wraz z zaczepami. Wymagania i metody badań.”
3. PN-EN 179:2009 „Okucia budowlane. Zamknięcia awaryjne do wyjść uruchamiane klamką lub płytka naciskową, przeznaczone do stosowania na drogach ewakuacyjnych.. Wymagania i metody badań.”
4. PN-EN 1125:2009. „Okucia budowlane. Zamknięcia przeciwpaniczne uruchamiane prętą poziomą, przeznaczone do stosowania na drogach ewakuacyjnych. Wymagania i metody badań.”
5. Wzór przemysłowy WP-15272 „Stanowisko badawcze okuć budowlanych”
6. Łabęda M., Łunarski J., Rychlik K., Tyłenda J.: Półautomatyczne testy bezpieczeństwa urządzeń rekreacyjnych. Technologia i Automatyzacja Montażu nr 1/2010 s.16.
7. Łabęda M., Łunarski J., Rychlik K., Tyłenda J.: Badania właściwości wytrzymałościowych urządzeń sportowo-rekreacyjnych. Technologia i Automatyzacja Montażu nr 2/2010 s.52.

TESTING THE MECHANICAL PROPERTIES OF BUILDING HARDWARE

Abstract. *New building hardware which is put on European market, should meet defined safety requirements. This article presents the constructional solution of automatic device for testing the mechanical properties of building hardware such as single-axis hinges, locks, panic exit devices and emergency exit devices.*

Aleksey MAKAROV
Leonid A. RABINOVICH
Wołgogradzki Państwowy
Uniwersytet Techniczny
Wołgograd, Rosja

ATOMATYZACJA DOZOWANIA MATERIAŁÓW SYPKICH DO MAŁO SZTYWNYCH OPAKOWAŃ

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСФАСОВКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В НЕЖЕСТКУЮ ТАРУ

Разработаны рычажно-шарнирные захватные устройства для автоматического захвата, раскрытия и удержания мешков при наполнении сыпучим материалом с последующей возможностью их прошивки. Произведенные расчеты и моделирование динамики движения устройств подтверждают их работоспособность. Предложена схема комплексной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в мешки.

Сыпучие материалы естественного происхождения или созданные искусственно получили широкое применение в различных отраслях промышленности (пищевой, химической, перерабатывающей и т.д.), в строительстве, сельском хозяйстве, а также в повседневной жизни человека. Очевидно, что существует ряд предприятий, которые занимаются расфасовкой сыпучих материалов. Чаще всего расфасовка осуществляется в нежесткие виды тары: мешки, пакеты, эластичную пленку и т.д. Анализ процессов расфасовки сыпучих продуктов в мешки из различных материалов в объемах от 5 до 50 килограмм показал, что они проходят с применением ручного труда. Так, захват расфасовочной тары, ее раскрытие и подача под выбойный патрубок дозирующего устройства обычно выполняется вручную. Сыпучие вещества, как правило, сильно пылящие, иногда взрывоопасные и токсичные. Для человека операции расфасовки трудоемки, утомительны, часто вредны для здоровья, травмоопасны, и, поэтому, требуют автоматизации.

Для автоматического раскрытия и закрытия мешков могут быть использованы рычажно-шарнирные захватные устройства (РШЗУ), содержащие рычажно-шарнирный механизм (РШМ) и пневматический привод его перемещения [1, 2]. Для автоматизации процесса захвата мешков из стопы предлагается шестизвенное РШЗУ [3], способное самостоятельно захватить мешок, раскрыть его и подать под загрузочный патрубок (рис. 1).

Устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания мешков содержит раму 1, смонтированную на пневмоцилиндре 2, на которой посредством подвижных шарниров 3 установлен РШМ 14, состоящий из двух криволинейных рычагов 4, планки 6, связанной со штоком 5 пневмоцилиндра 2, двух силовых миницилиндров двустороннего действия 10 с штоками 9 и дополнительной тяги 13. При этом криволинейные рычаги 4 связаны с планкой 6 подвижными шарнирами 7, а с штоками 9 – осевыми шарнирами 8. Дополнительная тяга 13 посредством осевых шарниров 12 и накладок 11 связана с основаниями миницилиндров 10. Все пальцы 15, выполняющие функции захватов, расположены соосно осям соответствующих шарниров и перпендикулярно плоскости шарнирного механизма 14 (Вид А на рис. 1).

РШМ 14 при выдвинутом штоке 5 пневмоцилиндра 2 обеспечивает расположение пальцев 15 в ряд, при этом при втянутых штоках 9 силовых миницилиндров 10 расстояние между крайними боковыми пальцами (I на рис. 1) меньше размера горловины сложенного мешка. Поэтому, если обеспечить провисание непрошитой горловины мешка (например, приподняв горловину верхнего из стопы мешков, лежащих горизонтально, с помощью вакуумных захватов), можно автоматически ввести пальцы РШЗУ в образовавшуюся открытую полость. Затем, посредством выдвигания штоков

9 силовых миницилиндров боковые пальцы устройства раздвигаются, захватывая горловину мешка с внутренней стороны и удерживая ее (рис. 2а). При втянутом штоке пневмоцилиндра 2 РШМ 14 обеспечивает расположение пальцев 15 в вершинах правильного выпуклого многоугольника (рис. 2б), тем самым раскрывая мешок для наполнения. После наполнения горловина мешка закрывается для прошивки выдвиганием штока 5 пневмоцилиндра 2.

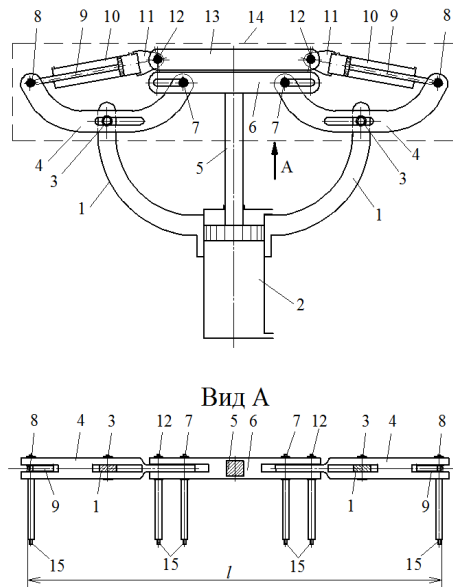


Рис. 1. Рычажно-шарнирное захватное устройство в закрытом положении

Rys. 1. Dźwigniowo-przegubowe urządzenia chwytne w położeniu zamkniętym

Данное РШЗУ может применяться на линиях расфасовки сыпучих материалов как захватное устройство (ЗУ) манипулятора, раскрывающего и подающего мешок под засыпку, а затем растягивающего его для прошивки.

Для задания размеров звеньев и других элементов РШЗУ необходимо установить максимально допустимое расстояние l между крайними пальцами ЗУ в сложенном состоянии. Для этого методами вариационного исчисления, решением задачи провисания нити, свободно подвешенной на двух опорах, получено уравнение кривой провисания нижней части горловины приоткрытого мешка [2]:

$$y = C_1 * ch \frac{x-C_2}{C_1} - \lambda, \quad (1)$$

где λ - неопределенный множитель, C_1, C_2 – произвольные постоянные интегрирования, значения которых определяются из граничных условий.

С помощью уравнения (1) можно вычислить расстояние l , на основе которого найти значения остальных параметров звеньев РШЗУ.

Поскольку в открытом положении горловина мешка, удерживаемого пальцами РШЗУ [2,3] имеет вид правильного выпуклого шестиугольника с длиной стороны R (м), сечение загрузочного патрубка, свободно помещаемого внутрь горловины мешка, имеет вид окружности радиуса $r_{пат.}$

вписанной в этот шестиугольник. Длина горловины мешка $L_{\text{мешк}} = 6R = 2B$, где B – ширина мешка (м). Тогда максимально допустимый диаметр патрубка $D_{\text{патб}} = 2r_{\text{патб}} = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} R$. Или:

$$D_{\text{патб}} = \frac{\sqrt{3}B}{3} \text{ (м)}. \quad (2)$$

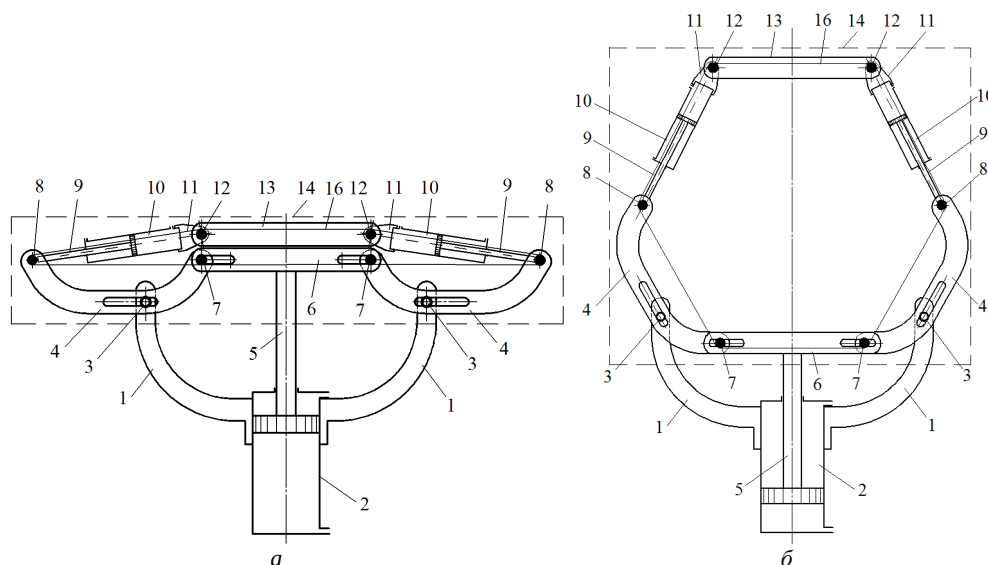


Рис. 2. Рычажно-шарнирное захватное устройство в двух положениях: а – в закрытом, мешок удерживается пальцами; б – в раскрытом, мешок открыт

Rys. 2. Dźwigniowo-przegubowe urządzenia chwytne w dwóch położeniach: a) w zamkniętym, mieszek utrzymywany jest palcami, b) w otwartym, mieszek otwarty

Определение давления загружаемого сыпучего материала на стенки мешка с использованием методов прикладной механики (элемент горловины мешка представлен в виде гибкой нити) позволило рассчитать минимальное необходимое усилие для удержания мешка в процессе его наполнения:

$$T_{\min} = \frac{0,86\rho B^4}{2L-B} \text{ (Н)}, \quad (3)$$

где L – ширина мешка (м), а ρ – насыпная плотность материала (кг/м^3). Знание минимальных усилий, достаточных для удержания мешка при его наполнении необходимо для расчета и подбора пневмоцилиндров привода РШЗУ.

С помощью программных средств проектирования произведена трехмерная визуализация механики движения РШЗУ. При соблюдении требований к точности и простоте модели визуализация является весьма наглядной демонстрацией функциональных возможностей в части механики движения РШЗУ. Проведенные расчеты и моделирование движения устройства подтверждают его работоспособность.

В [4] предложено устройство для раскрытия и надевания мешков на загрузочный патрубок, содержащее раму, внутри которой расположен стол со стопой мешков, уложенных горизонтально, над горловиной которых находятся вакуумные захваты, закрепленные на рычаге, установленном с возможностью осевого перемещения на валу посредством привода продольного перемещения. Вал

смонтирован на раме, на ней же закреплен неподвижно привод продольного перемещения рычага. На валу неподвижно установлен кронштейн и шарнирно соединенная с ним поворотная пластина. Один конец пластины связан посредством пружины с кронштейном и взаимодействует с укрепленным на рычаге упором, выполненным, например, в виде ролика, а другой конец пластины взаимодействует с боковой кромкой мешка. Нижняя часть загрузочного патрубка выполнена из двух разъемных по вертикали частей. Дальняя от вакуумного захвата часть загрузочного патрубка выполнена с приводом горизонтального возвратно-поступательного перемещения. Ближняя к вакуумному захвату часть патрубка установлена неподвижно и выполнена с шарнирно соединенными с ней боковыми поворотными стенками, связанными через систему рычагов с приводом горизонтального возвратно-поступательного перемещения.

При начале очередного цикла вакуумный захват прижимается к горловине верхнего мешка и захватывает его. При возвращении захвата в исходное положение мешок поднимается, при этом нижняя стенка мешка провисает, а кронштейны сжимают стенки мешка в боковом направлении, дополнительно приоткрывая его. Затем вакуумный захват с мешком посредством привода поворачивается на валу к загрузочному патрубку, при этом нижняя часть загрузочного патрубка заходит в полость раскрытой горловины мешка и с помощью привода горизонтального возвратно-поступательного перемещения раскрывается, растягивает и удерживает мешок для наполнения. После наполнения стенки загрузочного патрубка возвращаются в исходное положение, и мешок опускается на транспортер.

Данное устройство позволяет захватывать мешок, лежащий на подъемном столе, раскрывать его и надевать на загрузочный патрубок. Однако недостатком устройства является сложность конструкции. Выполнение нижней части загрузочного патрубка в виде двух разъемных частей может привести к разрыву верхней кромки мешка при его надевании. Мешок удерживается захватами лишь с одной стороны, при этом другая не контролируется, то есть мешок может раскрываться самопроизвольно. Для раскрытия мешка используются вакуумные захваты, что может привести к неправильному или неполному раскрытию мешка из различных воздухопроницаемых материалов и ненадежному закреплению его на загрузочном патрубке. Это снижает надежность устройства. К тому же, после наполнения мешок опускается на ленту конвейера с непрошитой горловиной и в таком состоянии направляется на прошивку, что может привести к просыпке части продукта при транспортировке.

Использование в данном устройстве для захвата, раскрытия и удержания мешка РШЗУ, конструкция которого описана выше (рис. 1 и 2), позволяет ограничить функции вакуумного захвата лишь предварительным открытием горловины мешка, при котором нижняя часть горловины провисает, открывая внутреннюю полость для входа пальцев РШЗУ. Кроме того, выполнение захватного устройства в виде РШМ, приводимого в движение пневмоцилиндрами, позволяет осуществлять ряд дополнительных технологических операций с мешком, необходимых для его затаривания в автоматическом режиме, например, растягивание его горловины в линию и прошивку. При этом упрощается конструкция загрузочного патрубка, так как функции раскрытия и удержания мешка выполняет РШЗУ и лента транспортера, на которой стоит мешок. Использование в процессе захвата, раскрытия и удержания мешка РШЗУ, осуществляющее удержание мешка пальцами с внутренней стороны силами фрикционного взаимодействия поверхности пальцев с материалом стенок мешка и под действием демпфирующих свойств воздуха в миоцилиндрах повышает надежность устройства. Предложенное устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания мешков позволяет вывести человека из вредной для здоровья рабочей зоны, и выполнять все операции расфасовки сыпучих материалов в нежесткую тару автоматически.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. м. 88339 РФ, МПК В 65 В 67/12. Устройство для захвата, раскрытия и удержания мешков / Л. А. Рабинович, Г. П. Барабанов, А. М. Макаров; ВолГТУ.- 2009.
2. Рабинович, Л. А. Автоматизация подачи мешков из ткани на рабочие позиции фасовочного оборудования / Л. А. Рабинович, Е. С. Брискин, А. М. Макаров // Сборка в машиностроении, приборостроении.- 2009.- №11. – С. 35-39.
3. **Заявка на Патент № 2010122140** от 31.05.2010 на изобретение. Устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания мешков / Л.А. Рабинович, А.М. Макаров; ВолГТУ. Решение о выдаче патента 12.01.2011.
4. Патент № 2050308 РФ, МПК В 65 В 7/00. Устройство для раскрытия и надевания мешков на грузочный патрубок / А.Ф. Суворов, И.Н. Барышев, Ю.В. Волков, И.А. Егоров; Дзержинский научно-иссл. и констр. институт хим. Машиностроения.- 1995.

AUTOMATION OF PACKAGING OF FREE-FLOWING MATERIALS IN NONRIGID PACKAGE

Abstract. *Stick-hinged capturing devices for automatic capture, opening and holding of bags at filling by free-flowing material with possibility of their following closing for insertion are developed. The produced calculations and modeling of dynamics of movement of devices confirm their efficiency. The scheme of complex automation of packaging process of free-flowing materials in bags is offered.*

Edward GAWLIK
Stanisław GIL
Politechnika Krakowska
Kraków

KONCEPCJA SYSTEMU OCENY TECHNOLOGICZNOŚCI KONSTRUKCJI CZĘŚCI MASZYN I ZESPOŁÓW MASZYNOWYCH

THE CONCEPT OF THE SYSTEM FOR THE EVALUATION OF THE MANUFACTURABILITY OF MACHINE PARTS AND ASSEMBLIES

Montażowa technologiczność konstrukcji jest ważnym etapem modułu projektowania procesu technologicznego montażu. Pomimo wzrostu stopnia mechanizacji i automatyzacji prac montażowych, w dalszym ciągu w procesie montażu przeważają prace ręczne. Przyczyn tego stanu należy przede wszystkim upatrywać w nieodpowiednim poziomie technologiczności konstrukcji wyrobu, zespołów maszynowych, podzespołów i części maszyn oraz w niskich nakładach środków finansowych na badania przeznaczone na mechanizację i automatyzację montażu.

Szczególnie istotne są działania na etapie projektu koncepcyjnego wyrobu, zespołów maszynowych i części maszyn, ponieważ na tym etapie istnieją największe możliwości wprowadzenia zmian konstrukcyjnych, tak by zminimalizować koszty wszystkich etapów ich rozwoju. Na tym etapie dokonuje się oceny technologiczności konstrukcji wyrobu, zespołów i części na podstawie analizy technologiczności konstrukcji. Ocena ta powinna być również wykonana na prototypie wyrobu. Jeżeli konstrukcja wyrobu jest technologiczna w danych warunkach produkcji, to można przyjąć, że koszt jego wytworzenia w tych warunkach będzie najmniejszy. W związku z tym konieczne jest zastosowanie komputerowego systemu podejmowania decyzji, aby można było działać szybko i skutecznie. Przedstawiona w referacie koncepcja systemu umożliwia ocenę technologiczności konstrukcji części maszyn, zespołów i wyrobów oraz takiej ich modyfikacji, aby w efekcie uzyskać konstrukcję o największej wartości ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji.

Technologiczność konstrukcji wyrobu określa stopień jej przystosowania do warunków produkcji, przy których można uzyskać najniższy koszt jego wytworzenia w określonym czasie. Miarą technologiczności konstrukcji może być wartość ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji [1]. Konstrukcja o możliwie najwyższej wartości ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji jest konstrukcją technologiczną. W danych warunkach produkcyjnych, zapewnia wytworzenie wyrobu, zespołu lub części o najniższych kosztach [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Zaproponowana ocena technologiczności konstrukcji jest szczególnie przydatna na etapie projektu koncepcyjnego wyrobu, gdy nie jest możliwe dokładne oszacowanie kosztu jego wytworzenia.

OCENA TECHNOLOGICZNOŚCI KONSTRUKCJI CZĘŚCI MASZYN, ZESPOŁÓW MASZYNOWYCH I WYROBU

Technologiczność konstrukcji w odniesieniu do części maszyn, zespołów czy urządzeń, oznacza taką konstrukcję, której montaż w danych warunkach zakładu i przy określonej wielkości produkcji jest ekonomiczny i najprostszy. Podstawową przesłanką technologiczności konstrukcji montażu jest uzyskanie najmniejszej pracochłonności. Analiza technologiczności konstrukcji pozwala na ocenę stopnia technologiczności konstrukcji na podstawie przyjętych kryteriów, które określają wymagania jakim powinna odpowiadać konstrukcja technologiczna. W oparciu o te kryteria można dokonać oceny technologiczności konstrukcji przez określenie jej ilościowego wskaźnika.

SPOSÓB PRZEPROWADZENIA ANALIZY TECHNOLOGICZNOŚCI KONSTRUKCJI ZE WZGLĘDU NA WYTWARZANIE I MONTAŻ

Analizę technologiczności konstrukcji części maszyn, zespołów i wyrobu przeprowadzono na podstawie przyjętych kryteriów, które określają wymagania jakie powinna spełniać konstrukcja technologiczna.

Analiza technologiczności konstrukcji wyrobu (maszyny, urządzenia) obejmuje:

- ogólną ocenę technologiczności konstrukcji wyrobu,
- ocenę technologiczności konstrukcji części zorientowaną na wytwarzanie,
- ocenę technologiczności konstrukcji części, podzespołów, zespołów i wyrobu zorientowaną na montaż.

Danymi wejściowymi do oceny technologiczności konstrukcji są:

- program produkcyjny wyrobu i wynikający z niego program produkcyjny poszczególnych części, podzespołów i zespołów wchodzących w skład tego wyrobu,
- projekt konstrukcyjno-technologiczny wyrobu, poszczególnych części i zespołów,
- klasa części lub jej typ technologiczny,
- okres eksploatacji,
- warunki odbioru technicznego (WOT),
- klasyfikacje jednostek montażowych.

Analizując technologiczność konstrukcji zespołu lub elementu maszyny należy mieć na względzie zadanie, które ma on spełniać w pracy maszyny, oraz kryteria funkcjonalności, niezawodności i trwałości. Temu celowi trzeba podporządkować wszystkie inne względy, a więc i technologiczność konstrukcji maszyny.

Ogólną ocenę technologiczności konstrukcji wyrobu (maszyny, urządzenia) można przeprowadzić na podstawie następujących kryteriów, takich jak [4], [6]:

- masa wyrobu,
- liczba części w wyrobie,
- stopień normalizacji i unifikacji zespołów i części,
- liczba gatunków materiałów zastosowanych na części.

Ocenę technologiczności konstrukcji części maszyn ze względu na wytwarzanie należy przeprowadzić w pierwszym etapie na podstawie kryteriów, które są wspólne dla części należących do różnych klas lub typów technologicznych. W drugim etapie na podstawie kryteriów charakterystycznych dla danej klasy lub typu technologicznego części i kryteriów wynikających z różnych technik wytwarzania półfabrykatów oraz różnych sposobów i metod obróbki, dysponując odpowiednią bazą wiedzy i danymi o systemie wytwarzania przedsiębiorstwa. Kryteriami wspólnymi dla części maszyn należących do różnych klas są [2], [3], [4], [5], [6], [7], [9], [10]:

- *złożoność części* – ocenić czy istnieje możliwość uproszczenia konstrukcji części bez pogorszenia jej funkcjonalności,
- *gatunek materiału części* – ocenić czy przyjęty gatunek materiału spełnia wymagania wytrzymałościowe stawiane danej części i czy jest łatwo obrabialny,
- *wymiary gabarytowe części i masa* – ocenić czy możliwe jest wytworzenie części w istniejącym systemie wytwarzania przedsiębiorstwa,
- *kształt i wymiary części* – ocenić czy kształt i wymiary części umożliwiają zastosowanie do ich wykonania katalogowych wyrobów hutniczych przy jak najmniejszym udziale obróbki skrawaniem,
- *postać i sposób wykonania półfabrykatu* – ocenić czy postać i sposób wykonania półfabrykatu jest ekonomicznie uzasadniony,
- *kształt i wymiary powierzchni obrabianych* – ocenić czy możliwe jest zastosowanie prostych i tanich metod obróbki,
- *sposób ustalenia części* – ocenić czy do obróbki poszczególnych powierzchni istnieje łatwy i pewny sposób ustalenia części umożliwiający zastosowanie typowego i znormalizowane-go oprzyrządowania przedmiotowego zapewniającego wymaganą dokładność obróbki,

- *szttywność części* – ocenić czy część jest dostatecznie sztywna tak by możliwe było zastosowanie wysoko wydajnych metod obróbki,
- *dostęp narzędzia* – ocenić czy do obróbki wszystkich powierzchni możliwy jest łatwy dostęp narzędzi, a w przypadku obróbki powierzchni przelotowych – łatwe i właściwe wyjście narzędzi,
- *liczba powierzchni obrabianych* – ocenić czy istnieje możliwość zmniejszenia liczby powierzchni obrabianych,
- *wielkość powierzchni obrabianych* – ocenić czy istnieje możliwość zmniejszenia powierzchni obrabianych,
- *wymiary powierzchni po obróbce* – ocenić czy podane wymiary odpowiadają wymiarom znormalizowanych narzędzi i znormalizowanego oprzyrządowania technologicznego,
- *dokładność wymiarowo-kształtowa i chropowatość powierzchni po obróbce* – sprawdzić czy podane parametry dokładności i chropowatości powierzchni są ekonomicznie uzasadnione i konieczne dla prawidłowego działania części w wyrobie,
- *obróbka cieplna* – ocenić czy konieczna jest obróbka cieplna części, a jeżeli tak – czy pomiędzy powierzchniami występują łagodne przejścia i zaokrąglenia,
- *korozyjność części* – ocenić stopień korozyjności części, który decyduje o dodatkowych operacjach technologicznych takich, jak malowanie, piaskowanie, konserwacja itp.

Ocenę technologiczności konstrukcji części maszyn, podzespołów, zespołów i wyrobu ze względu na montaż, należy przeprowadzić na podstawie następujących kryteriów [2], [3], [5], [6], [7], [8], [11], [12]:

- liczba części w wyrobie,
- gatunek materiału części,
- wymiary gabarytowe części i masa,
- możliwość podziału wyrobu na jednostki montażowe złożone (zespoły główne, zespoły, podzespoły),
- jakość wykonania,
- dostępność części,
- stałość baz, dokładność wykonania,
- możliwość uproszczenia konstrukcji par roboczych i zespołów przy zachowaniu ich wymagań eksploatacyjnych i jakości,
- stopień zamienności jednostek montażowych (zespołów i części), normalizacja, typizacja, unifikacja części,
- sposób bazowania części, jednoznaczność określenia bazy montażowej, bazowanie części może być, w kierunku poosiowym, w kierunku promieniowym na powierzchniach walcowych, na powierzchniach płaskich z zachowaniem dokładności wzajemnego położenia elementów,
- samonastawności – w konstrukcji łożysk ślizgowych wałów, przy dużym stosunku długości panewki do jej średnicy,
- eliminowania naprężeń – przyczyną powstawania naprężeń jest błędna konstrukcja, np. przestalenie, wadliwy montaż,
- błędny montaż - montowane elementy powinny być tak skonstruowane, aby nie było możliwości złożenia ich w niewłaściwym położeniu,
- niezmienność kształtu części pod wpływem sił mocujących,
- zmniejszenie czynności pomocniczych,
- pozyskiwanie zespołów i części z innych wyspecjalizowanych zakładów (możliwość kooperacji),
- uproszczenie operacji montażowych,
- możliwość montażu za pomocą prostych czynności i jednokierunkowych ruchów,
- możliwość jednoznacznej orientacji i bazowania montowanych zespołów i części,
- możliwość kontroli dokładności par roboczych w różnych fazach procesu technologicznego montażu,
- dokładność montażu,
- dostępność narzędzi montażowych,
- prawidłowość doboru pasowań,
- łańcuchy wymiarowe, określające położenie współpracujących części,

- oryginalność konstrukcji,
- wymiary gabarytowe,
- stopień trudności montażu,
- sztywność statyczna i dynamiczna,
- korozyjność,
- funkcjonalność (łatwość obsługi),
- łatwość konserwacji (montaż i demontaż, czyszczenie).
- estetyka wyglądu zewnętrznego,
- koszt wykonania wyrobu,
- masa wyrobu,
- wymiary gabarytowe wyrobu,
- stopień specjalizacji,
- kształt i wymiary części,
- dokładność wymiarowo-kształtowa i chropowatość powierzchni.

Na podstawie każdego z kryteriów należy dokonać oceny technologiczności konstrukcji przypisując jej określoną liczbę punktów P z przedziału od 0 ÷ 5 i przyjęciu wartości wskaźnika ważności w dla przyjętego kryterium oceny z przedziału 0 ÷ 1, a następnie obliczyć iloczyn Pw w [1]. W przedstawionej metodzie należy przyjąć skalę ocen punktowych P zgodnie z zasadami podanymi w pracy [10].

Wyniki oceny technologiczności konstrukcji danej części, zespołu, należy zestawić w odpowiedniej tabeli zakładając, że jest to pierwszy wariant konstrukcji. Jeżeli technologiczność konstrukcji części, zespołu, została oceniona liczbą punktów $P = 2, 1$ lub 0 na podstawie przynajmniej jednego kryterium, należy zmodyfikować konstrukcję danej części i przyjąć ją jako drugi wariant. Modyfikacja konstrukcji powinna być taka, aby w wyniku jej oceny na podstawie tych samych kryteriów uzyskać możliwie maksymalne liczby punktów P . Nie może to być jednak taka modyfikacja konstrukcji, która spowoduje obniżenie założonej jakości i zmianę wymagań technicznych wyrobu. Jeżeli w zakresie danego kryterium nie jest możliwa modyfikacja konstrukcji części, to wartości P należy wpisać takie same jakie były przyjęte w pierwszym wariantcie. Dla obu wariantów konstrukcji należy obliczyć wskaźniki jakości konstrukcji i ilościowe wskaźniki technologiczności konstrukcji z podanych wzorów. Wskaźnik jakości konstrukcji W_k oblicza się ze wzoru:

$$W_k = \frac{\sum Pw}{5 \sum w} \quad (1)$$

Ilościowy wskaźnik technologiczności konstrukcji części oblicza się z wzoru

$$N_k = 5W_k \quad (2)$$

Na podstawie przyjętych kryteriów należy dokonać oceny technologiczności konstrukcji części. Miarami technologiczności konstrukcji danej części są: wskaźnik jakości konstrukcji W_k oraz ilościowy wskaźnik technologiczności konstrukcji N_k . Na podstawie obu wskaźników można ocenić jakość i technologiczność konstrukcji części bez konieczności szacowania kosztów jej wytworzenia.

Ocenę ułatwia porównanie danej konstrukcji z podobnymi konstrukcjami wyróżniającymi się wysokim poziomem technicznym i sprawdzonymi w warunkach eksploatacyjnych. Często zachodzi potrzeba oceny i wyboru optymalnego wariantu konstrukcji części spośród kilku proponowanych. Opracowanie wariantów konstrukcyjnych części i zespołów jest właściwą metodą projektowania umożliwiającą znalezienie optymalnego rozwiązania [6]. Dla przeprowadzenia oceny konstrukcji pod kątem technologiczności potrzebna jest wiedza teoretyczna i praktyczna w zakresie procesów wytwarzania – obróbka mechaniczna, technologia montażu, eksploatacja maszyn.

Jeśli będzie brak oceny niektórych kryteriów oznacza to niemożność oszacowania go na podstawie rysunku, bądź oszacowanie wiązałoby się z dużym ryzykiem popełnienia błędu. Nie sposób np. ocenić stopnia

specjalizacji danej części nie wiedząc w jakiej konstrukcji jest ona podzespołem, to samo dotyczy oceny funkcjonalności.

Podane kryteria części maszyn i zespołów można uzupełniać o nowe, w zależności od rodzaju ocenianego wyrobu i jego specyficznych cech. Liczba kryteriów ocenionych ma znaczenie w tym sensie, że im więcej atrybutów danej części lub zespołu zostanie ocenionych, tym pełniej oddawany jest wskaźnik stopnia technologiczności konstrukcji. Należy pamiętać, że metoda ta jest subiektywna i można przewidzieć różnicę w liczbie punktów przyznanej danej części lub zespołowi pomiędzy jednym oceniającym, a drugim. Dotyczy to nawet ekspertów, którzy daną część lub zespół znają bardzo dobrze. Można założyć, że różnice te nie będą duże. Rzecz w tym, że ocena ta będzie jednoznacznie wskazywać, która część lub zespół jest bardziej zbliżony do punktowej oceny maksymalnej.

Na podstawie obu wskaźników można ocenić jakość i technologiczność konstrukcji części bez konieczności szacowania kosztów jej wytworzenia. Należy przyjąć ten wariant konstrukcji części, dla którego wartość ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji będzie większa. Można się spodziewać, że koszty wytworzenia części dla tego wariantu konstrukcji będą możliwie najniższe.

Zaproponowana metoda oceny technologiczności konstrukcji części pozwala na łatwy i szybki wybór takiej konstrukcji, która zapewni możliwie najniższy koszt jej wytworzenia bez konieczności jego szacowania. Metoda jest szczególnie przydatna na etapie projektowania koncepcyjnego wyrobu, gdy trudne jest oszacowanie spodziewanego kosztu jego wytworzenia.

SZACOWANIE KOSZTU WYTWARZANIA CZĘŚCI LUB ZESPOŁÓW

Koszt wytworzenia wyrobu jest równy sumie kosztów wytworzenia i zakupu wszystkich części wchodzących w skład wyrobu oraz kosztu montażu wyrobu. Podstawowymi składnikami kosztu wytworzenia wyrobu (kosztu wytworzenia części, kosztu montażu wyrobu) są [13], [14], [15], [16]:

- koszty bezpośrednie:
 - koszty materiałowe,
 - koszty robocizny,
 - koszty specjalne,
- koszty pośrednie:
 - koszty wydziałowe, są to koszty ruchu maszyn, urządzeń technologicznych i koszty ogólnowydziałowe,
 - koszty ogólnozakładowe.

Największy udział w koszcie wytworzenia wyrobu mają koszty wytworzenia poszczególnych części, z których składa się wyrób. Koszt wytworzenia określonej części wyrobu zależy w znacznym stopniu od tego czy półfabrykat jest zakupiony czy też jest wytworzony we własnym zakresie. Strukturę kosztu wytworzenia części danego wyrobu przedstawiono na rys. 1. Koszt ten jest równy sumie kosztów bezpośrednich i pośrednich związanych z wytworzeniem części.

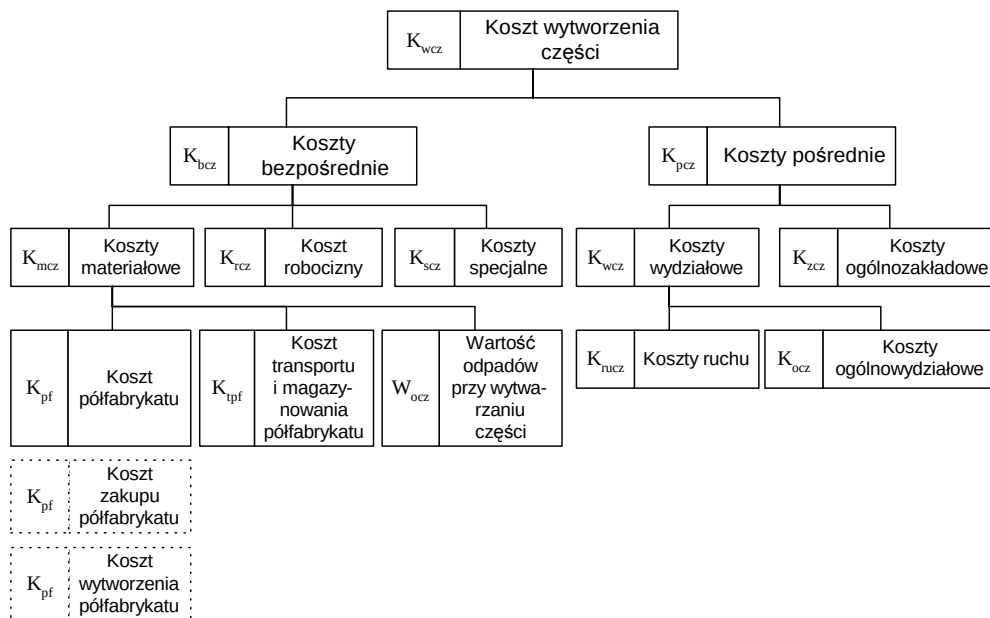
Koszty bezpośrednie związane z wytworzeniem części (K_{bcz}) można określić na podstawie następujących danych:

- programu produkcyjnego wyrobu i wynikającego z niego programu produkcyjnego części,
- wielkości serii wytwarzanej części,
- kosztów materiałowych (K_{mcz}), na które składają się koszty półfabrykatu, koszty jego transportu i magazynowania pomniejszone o wartość odpadów powstałych po wytworzeniu części,
- całkowitego kosztu robocizny (K_{rcz}) związanej z wytworzeniem części równego sumie kosztów robocizny wszystkich operacji technologicznych. Koszt operacji technologicznej można określić znając normę czasu tej operacji, wielkość serii wytwarzanej części oraz stawkę godzinową operatora. Jeżeli czynności przygotowawczo-zakończeniowe na stanowisku wytwarzania wykonuje ustawiacz, koszt operacji technologicznej można określić znając czas czynności przygotowawczo-zakończeniowych, wielkość serii wytwarzanej części, stawkę godzinową ustawiacza, czas jednostkowy operacji oraz stawkę godzinową operatora.

W koszcie robocizny bezpośredniej uwzględniane są również świadczenia socjalne i dodatki dla pracowników bezpośrednio produkcyjnych,

- kosztów specjalnych związanych z wytworzeniem części (K_{scz}), na które składają się koszty technicznego przygotowania produkcji, koszty oprzyrządowania specjalnego, koszty szkolenia załogi.

Koszty pośrednie związane z wytworzeniem części (K_{pcz}) są sumą kosztów wydziałowych (K_{wcz}) i ogólnozakładowych (K_{zcz}).



Rys. 1. Struktura kosztu wytworzenia części

Koszty wydziałowe (K_{wcz}) obejmują koszty ruchu maszyn i urządzeń technologicznych (K_{rcz}) przy wytwarzaniu części oraz koszty ogólnowydziałowe związane z wytworzeniem części (K_{ocz}).

Koszty ruchu maszyn i urządzeń (K_{rcz}) można określić mając następujące dane:

- koszty pracy narzędzi i oprzyrządowania technologicznego,
- koszty pracy maszyn,
- koszty remontów maszyn,
- koszty amortyzacji maszyn i ewentualnie leasingu maszyn.

Koszty ogólnowydziałowe związane z wytworzeniem części (K_{ocz}) obejmują koszty amortyzacji budynku lub koszty dzierżawy budynku, koszty oświetlenia, koszty ogrzewania, koszty bieżących napraw i konserwacji budynku.

Koszty ogólnozakładowe związane z wytworzeniem części (K_{zcz}) określane są na podstawie sumy kosztów robocizny bezpośredniej i kosztów wydziałowych po przyjęciu odpowiedniej wielkości narzutu kosztów ogólnozakładowych.

Ocena technologiczności konstrukcji części powinna zmierzać nie tylko do uzyskania najniższych kosztów wytwarzania wyrobu, ale również do usprawnienia procesów technologicznych oraz poprawy organizacji produkcji z jednoczesnym zachowaniem wymaganej jakości wyrobu i spełnienia określonych jego wymagań technicznych. Szczegółowe zasady szacowania kosztu wytworzenia części przedstawiono w pracy [16].

KONCEPCJA SYSTEMU DO OCENY TECHNOLOGICZNOŚCI KONSTRUKCJI CZĘŚCI MASZYN, ZESPOŁÓW I WYROBU

Na pracochłonność a więc i koszt wytworzenia wyrobu w największym stopniu wpływa pracochłonność wytworzenia wszystkich części wchodzących w jego skład. Pracochłonność wytworzenia danej części zależy od technologiczności konstrukcji części. Wartość ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji N_k decyduje o stopniu technologiczności konstrukcji części. Im większy jest stopień technologiczności konstrukcji części, tym pracochłonność jej wytworzenia jest mniejsza.

Zgodnie z tą metodyką na rys.1 przedstawiono koncepcję systemu do oceny technologiczności części i zespołów maszynowych na etapie projektu koncepcyjnego wyrobu oraz na dalszych etapach jego rozwoju umożliwiającego zaprojektowanie konstrukcji części i zespołów maszynowych wchodzących w skład wyrobu o możliwie największej wartości ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji, a tym samym o możliwie najniższym spodziewanym koszcie wytworzenia.

Danymi wejściowymi systemu są:

- program produkcyjny wyrobu i wynikający z niego program produkcyjny danej części. Program produkcyjny wyrobu zależy przede wszystkim od rodzaju produkcji i orientacyjnej masy projektowanego wyrobu [10]. Dysponując programem produkcyjnym wyrobu można określić program produkcyjny danej części W_i wchodzącej w jego skład na podstawie wzoru [4],

$$W_i = W m_i \left(1 + \frac{z_i}{100\%}\right) \left(1 + \frac{b_i}{100\%}\right) \quad (3)$$

gdzie:

W – roczny program produkcji wyrobu, do którego należy dany przedmiot [szt/rok],

m_i – liczba i -tej części w wyrobie,

z_i – procent części zapasowych (zamiennych) [%],

b_i – przewidywany procent braków [%],

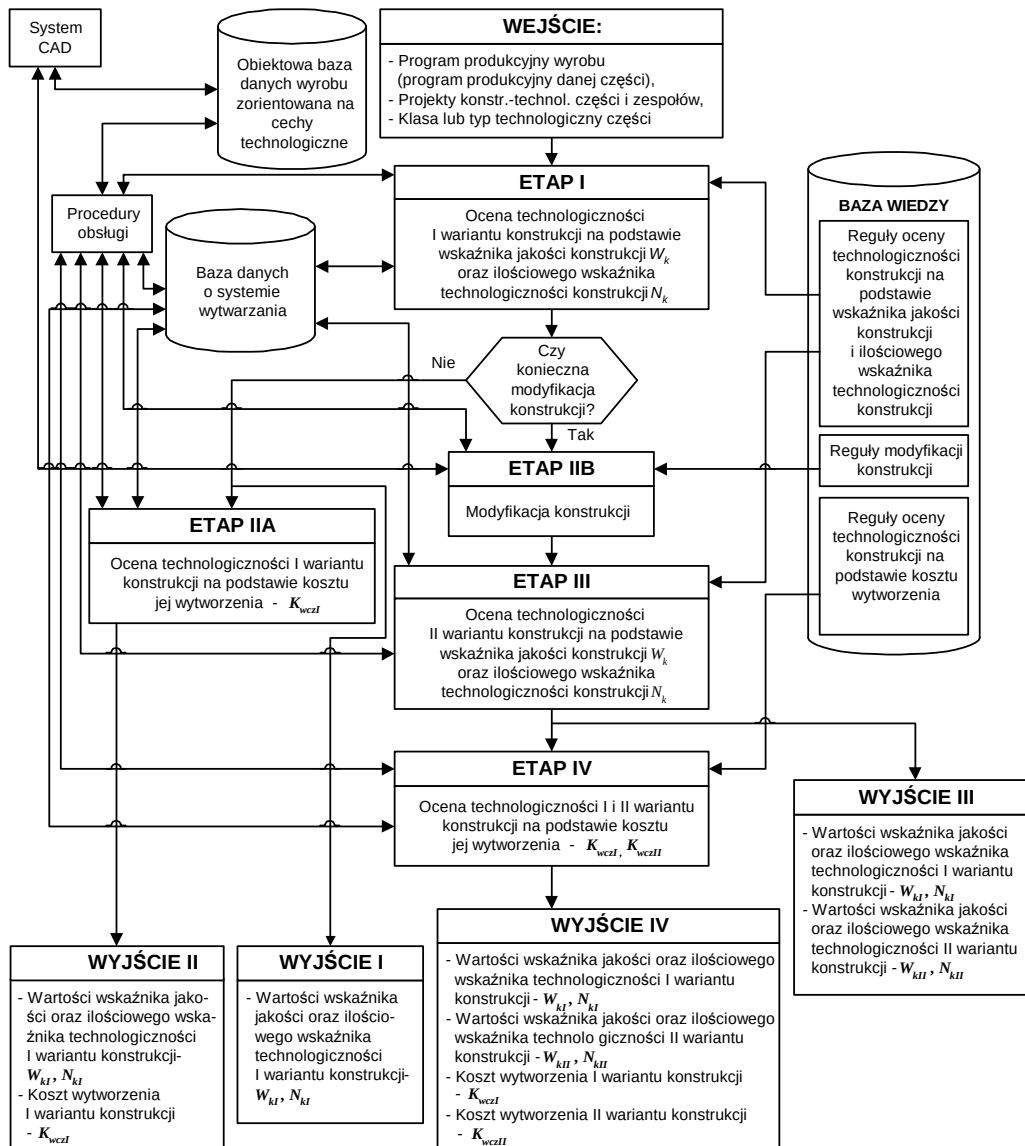
- projekt konstrukcyjno-technologiczny danej części. Projekt ten powinien być opracowany przy wykorzystaniu odpowiedniego systemu CAD. Model rozpatrywanej części opracowany za pomocą tego systemu powinien być zorientowany na cechy technologiczno-konstrukcyjne tak, by umożliwiał łatwą i szybką ocenę technologiczności konstrukcji,

- klasa lub typ technologiczny części, należy określić za pomocą klasyfikatora części maszyn [17], [18].

Ocenę technologiczności konstrukcji montażu, na podstawie wskaźnika jakości konstrukcji oraz ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji należy przeprowadzić osobno dla części maszyn i zespołów maszynowych.

Realizacja działań zmierzających do oceny technologiczności konstrukcji części maszyn lub zespołów maszynowych obejmuje następujące etapy:

- ETAP I – Ocena technologiczności I wariantu konstrukcji na podstawie wskaźnika jakości konstrukcji oraz ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji. W etapie tym, zgodnie z określonymi regułami, dokonywana jest ocena technologiczności konstrukcji części, zespołów i wyrobu na podstawie przyjętych kryteriów [1], [6], [7], [8], [10], [11]. Efektem tej oceny jest podjęcie decyzji, czy należy dokonać modyfikacji konstrukcji części, zespołów, czy też nie. Jeżeli zostanie podjęta decyzja, że nie należy modyfikować konstrukcji części, zespołu, to należy uznać tę konstrukcję za technologiczną;
- ETAP IIA – Ocena technologiczności I wariantu konstrukcji na podstawie kosztu wytworzenia części, zespołu. Etap ten pojawi się wtedy, gdy po ETAPIE I zostanie podjęta decyzja dotycząca kosztu wytworzenia części lub zespołu [14], [15], [16], [19];



Rys. 2. Schemat systemu do oceny technologiczności konstrukcji części maszyn i zespołów

- ETAP IIB – Modyfikacja konstrukcji części lub zespołu. W etapie tym dokonywana jest modyfikacja konstrukcji zgodnie z regułami modyfikacji konstrukcji podczas analizy technologiczności konstrukcji [3], [6], [9], [10];
- ETAP III – Ocena technologiczności II wariantu konstrukcji na podstawie wskaźnika jakości konstrukcji oraz ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji. W etapie tym, zgodnie z tymi

samymi regułami, jak w ETAPIE I, dokonywana jest ocena technologiczności konstrukcji części lub zespołu;

- ETAP IV - Ocena technologiczności I i II wariantu konstrukcji na podstawie kosztu wytworzenia części lub zespołu. W etapie tym nastąpi oszacowanie kosztów wytworzenia pierwszego i drugiego wariantu konstrukcji części lub zespołu, na podstawie tych samych reguł jak w ETAPIE IIA. Koszt wytworzenia drugiego wariantu konstrukcji powinien być niższy niż pierwszego wariantu, co powinno potwierdzić efekt trzeciego etapu, że konstrukcja drugiego wariantu jest technologiczna.

W systemie występują następujące wyjścia:

- WYJŚCIE I – jest efektem realizacji ETAPU I i podjęcia decyzji o tym, że nie jest konieczna modyfikacja konstrukcji;
- WYJŚCIE II – jest efektem realizacji ETAPU I, podjęcia decyzji o tym, że nie jest konieczna modyfikacja konstrukcji oraz ETAPU IIA;
- WYJŚCIE III – jest efektem realizacji ETAPU I, podjęcia decyzji o tym, że konieczna jest modyfikacja konstrukcji części lub zespołu, ETAPU IIB oraz ETAPU III;
- WYJŚCIE IV – jest efektem realizacji ETAPU I, podjęcia decyzji o tym, że konieczna jest modyfikacja konstrukcji części lub zespołu, ETAPU IIB, ETAPU III oraz ETAPU IV. Ocena technologiczności konstrukcji jest dokonywana na podstawie obliczonego wskaźnika jakości konstrukcji, ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji oraz oszacowanego kosztu wytworzenia części lub zespołu.

Na wyjściu systemu są obliczone wartości jakościowego wskaźnika technologiczności I wariantu konstrukcji i II wariantu konstrukcji części lub zespołu. Wartość jakościowego wskaźnika technologiczności II wariantu konstrukcji powinna być wyższa niż dla I wariantu konstrukcji. Świadczyć to będzie o poprawie technologiczności konstrukcji części lub zespołu, a tym samym o zmniejszeniu kosztów jej wytworzenia.

Na etapie projektu koncepcyjnego wyrobu należy wykorzystać WYJŚCIE I w przypadku, gdy nie jest konieczna modyfikacja konstrukcji części lub zespołu w celu jej u technologicznienia oraz WYJŚCIE II w przypadku, gdy w celu uzyskania konstrukcji technologicznej konieczna jest modyfikacja konstrukcji części lub zespołu. Ocenę technologiczności konstrukcji uzyskuje się bez konieczności szacowania kosztu wytworzenia części lub zespołu, które na tym etapie jest trudne i mało dokładne.

Na dalszych etapach rozwoju wyrobu należy wykorzystać WYJŚCIE III w przypadku, gdy nie jest konieczna modyfikacja konstrukcji części lub zespołu w celu jej u technologicznienia oraz WYJŚCIE IV w przypadku, gdy w celu uzyskania konstrukcji technologicznej konieczna jest modyfikacja konstrukcji. Ocenę technologiczności konstrukcji uzyskuje się na podstawie oszacowanego kosztu wytworzenia części lub zespołu.

PODSUMOWANIE

Zaproponowana koncepcja systemu umożliwia łatwą i szybką ocenę technologiczności konstrukcji części maszyn lub zespołów maszynowych oraz wybór konstrukcji optymalnej po ewentualnej ich modyfikacji.

Na etapie projektu koncepcyjnego wyrobu system zapewnia wybór optymalnej konstrukcji części lub zespołów maszynowych w wyniku oceny technologiczności konstrukcji na podstawie obliczonych wartości wskaźnika jakości konstrukcji i ilościowego wskaźnika technologiczności konstrukcji.

Na dalszych etapach rozwoju wyrobu system zapewnia wybór optymalnej konstrukcji części maszyn lub zespołu maszynowego w wyniku oceny technologiczności konstrukcji na podstawie oszacowanego ich kosztu wytworzenia.

Zaproponowana metoda oceny technologiczności konstrukcji części lub zespołu pozwala na łatwy i szybki wybór takiej konstrukcji, która zapewni możliwie najniższy koszt jej wytworzenia bez konieczności jego szacowania. Metoda jest szczególnie przydatna na etapie projektowania koncepcyjnego wyrobu i do oceny zespołu maszynowego i wytworzonego prototypu wyrobu, gdy trudne jest oszacowanie kosztu ich wytworzenia.

Efektem działania systemu jest możliwość uzyskania, na wszystkich etapach rozwoju wyrobu, najniższych kosztów wytworzenia części maszyn i zespołów maszynowych, a tym samym najniższego kosztu wytworzenia wyrobu, usprawnienia procesów technologicznych obróbki i montażu oraz poprawy organizacji produkcji i technologicznej elastyczności systemów z jednoczesnym zachowaniem wymaganej jakości wyrobu i spełnienia określonych jego wymagań technicznych zaproponowanych przez konstruktora.

LITERATURA

1. Wrotny L., Projektowanie obrabiarek. Zagadnienia ogólne i przykłady obliczeń, WNT, Warszawa 1986.
2. Choroszy B., Technologia maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
3. Feld M., Technologia budowy maszyn, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
4. Praca Zbiorowa, Poradnik Inżyniera. Mechanika. T. 3. Zagadnienia Technologiczne, WNT, Warszawa 1970.
5. Samek A., Projektowanie procesów technologicznych. Skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych, Politechnika Krakowska, Kraków 1981.
6. Skarbiński M., Skarbiński J., Technologiczność konstrukcji maszyn, WNT, Warszawa 1982.
7. Wieczorowski K., Żurek J., Próba ustalenia ilościowego kryterium oceny rozwiązania technicznego w aspekcie technologiczności konstrukcji, V Międzynarodowa Konferencja, Postępy w Teorii i Technice Obróbki Materiałów, Kraków 1979.
8. Żurek J., Bartczak S., Kryteria i wskaźniki technologiczności konstrukcji, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Mechanika nr 38, Poznań 1993.
9. Tymowski J., Technologia budowy maszyn, WNT, Warszawa 1970.
10. Gawlik E., Gil S., Ocena technologiczności konstrukcji części, Proceedings of IV Conference, Process and Manufacturing Equipment Design Systems, CA Systems and Technologies and DAAAM activities, 5th – 6th October 2004, Cracow, Poland 2004.
11. Żurek J., Boratyński M., Bartczak S., Bębel R., Zasady kształtowania oraz ocena technologiczności konstrukcji wyrobu w montażu automatycznym. Technologia i automatyzacja montażu, 2/1993, s.2-4.
12. Łunarski J., Szabajkiewicz W., Automatyzacja procesów technologicznych montażu maszyn, WNT, Warszawa 1993.
13. Farineau T., Rabenasolo B., Castelain J. M., Meyer Y., Duverlie P., Use of Parametric Models in an Economic Evaluation Step During the Design Phase, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2001) 17.
14. Karpiński T., Inżynieria produkcji, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2002.
15. Chwastyk P., Knosala R., Koncepcja systemu wspomagającego projektowanie maszyn zorientowanego na koszty, Politechnika Opolska, Opole.
16. Gawlik E., Gil S., Szacowanie kosztów wytwarzania, International DAAAM Workshop CA SYSTEMS AND TECHNOLOGIES, Integration and Intelligence of CA Systems, 29th September – 1th October 2003, Žilina – Strečno, Slovak Republic 2003.
17. Praca Zbiorowa, Jednolity klasyfikator konstrukcyjno-technologiczny przedmiotów produkcji, Centralny Ośrodek Badawczy, Zakład Klasyfikacji i Informatyki. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa 1977.
18. Praca zbiorowa, Technologiczny klasyfikator części maszyn, Instytut Organizacji Przemysłu Maszynowego, Warszawa 1966.
19. Eversheim W., Gupta Ch., Kümper R., Methods and Tools for Cost Estimation in Mechanical Manufacturing, Production Engineering, Vol. I/2 (1994).

THE CONCEPT OF THE SYSTEM FOR THE EVALUATION OF THE MANUFACTURABILITY OF MACHINE PARTS AND ASSEMBLIES

Abstract: *This paper presents the concept of the system for the evaluation of the manufacturability of machine parts and assemblies on the stage of the initial design of the machine. The other development stages were also taken into account. In the introductory stage the quantitative factor of the construction manufacturability was used. On the other stages of the development, the cost of part manufacturing was considered.*

Andrzej KOMOREK
Paweł PRZYBYŁEK
Wyższa Szkoła Oficerska
Sił Powietrznych w Dęblinie

NAPRAWA USZKODZEŃ KOMPOZYTOWYCH ELEMENTÓW LOTNICZYCH WYWOŁANYCH NISKOENERGETYCZNYM OBCIĄŻENIEM UDAROWYM

THE REPAIR OF LOW-ENERGY IMPACT-RELATED DAMAGES IN AVIATION COMPOSITE ELEMENTS

Od połowy XX wieku w lotnictwie wykorzystywane są materiały kompozytowe, które przy niewielkiej masie, cechują się bardzo korzystnymi właściwościami mechanicznymi (R_m/ρ) co pozwala na budowę bardzo wytrzymałych i lekkich konstrukcji lotniczych, a w związku z tym na obniżenie kosztów eksploatacji statków powietrznych. Przemysł lotniczy szczególnie chętnie wykorzystuje kompozyty warstwowe (laminaty) stosowane na elementy pokryć samolotów i śmigłowców. Niestety bardzo dobre właściwości mechaniczne kompozytów ulegają znacznemu pogorszeniu w momencie pojawienia się uszkodzenia. Materiały kompozytowe są wrażliwe na oddziaływanie karbu, więc punktowe, nawet niewielkie uszkodzenia lub przebiecia powodują istotną degradację właściwości mechanicznych materiału. Należy zatem, w procesie projektowania, wytwarzania a szczególnie eksploatacji, w znacznie większym stopniu zwrócić uwagę na warunki pracy lotniczych struktur kompozytowych oraz metodyki napraw tychże struktur.

USZKODZENIA STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH

Statki powietrzne oraz ich zespoły napędowe mogą być eksploatowane w dwóch systemach organizacyjnych:

- według resursu,
- według stanu technicznego.

W obu systemach, celem jest dążenie do realizacji nakazanych zadań w ustalonym czasie pracy (nalogu) z jednoczesnym zachowaniem ustalonych parametrów i charakterystyk lotno-technicznych. Zdolność do realizacji tego celu nazywana jest niezawodnością. Niestety w eksploatacji każdego sprzętu zdarzają się odchylenia w stanie technicznym od norm określonych w przepisach dotyczących eksploatacji i obsługi technicznej tego sprzętu, co nazywa się niesprawnością obiektu eksploatacji. Specyficznym rodzajem niesprawności jest uszkodzenie, które może być zdefiniowane jako: utrata fizycznych własności i/lub właściwości elementu konstrukcyjnego lub zdarzenie polegające na przejściu struktury technicznej (elementu) ze stanu zdatności do stanu niezdatności. [1]

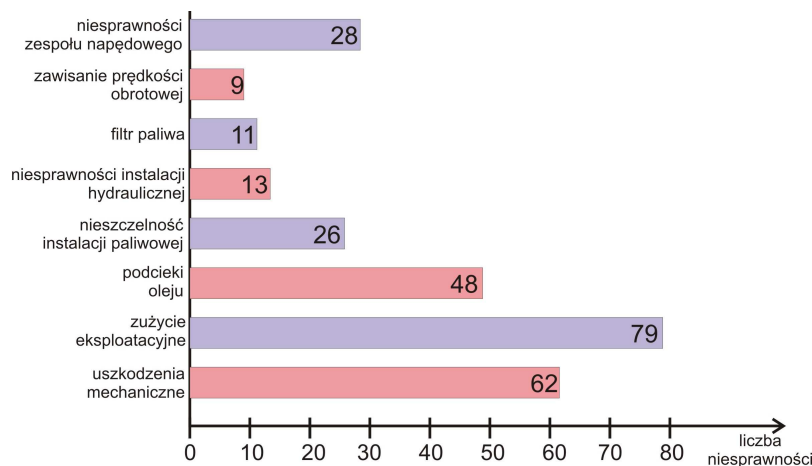
Uszkodzenie jest często efektem pracy konstrukcji w warunkach do których nie jest ona przystosowana. Innymi przyczynami powstawania uszkodzeń są m.in. błędy konstrukcyjne, wady materiałowe, nadmierne zużycie lub niedotrzymanie technologii produkcji. Uszkodzenia można podzielić na:

- konstrukcyjne,
- technologiczne,
- eksploatacyjne,
- awaryjne,
- bojowe.

Uszkodzenia awaryjne (np. zużycie eksploatacyjne) oraz różnorodne uszkodzenia mechaniczne są najczęściej spotykanymi w lotnictwie niesprawnościami, które wywierają największy wpływ na niezawodność statków powietrznych (rys. 1). Mogą być one spowodowane zderzeniami na ziemi podczas kołowania z innymi samolotami lub przeszkodami terenowymi, zderzeniami z ptakami w czasie lotu, twardym ląd-

waniem, uderzeniem tylną częścią kadłuba o ziemię przy lądowaniu lub lądowaniu bez podwozia, albo z częściowo wypuszczonym podwoziem.

Statki powietrzne są często eksploatowane w warunkach zagrożenia wystąpieniem uszkodzeń udarowych niebezpiecznych dla elementów wykonanych z kompozytów wzmacnianych włóknami, które są niezwykle trudne do wykrycia. W zastosowaniach lotniczych nawet niewielkie uszkodzenie struktury kompozytu na skutek uderzenia: upuszczonego narzędzia, ciała obcych wyrzucanych spod kół samolotu podczas startu lub ptaka w trakcie lotu, może drastycznie obniżyć margines bezpieczeństwa konstrukcji ze względu na obniżenie wytrzymałości materiału. Tego typu obciążenia charakteryzują się oddziaływaniem stosunkowo małej masy przy niewielkiej prędkości a tym samym niewielką energią uderzenia.

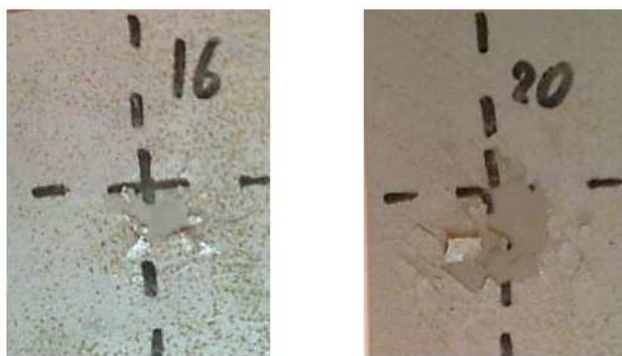


Rys. 1. Liczba niesprawności samolotu M28 w grupach wydzielonych wg symptomów niesprawności

Lokalizacja niskoenergetycznych uszkodzeń lotniczych struktur kompozytowych (BVID - barely visible impact damage) jest niezwykle trudna. Wewnątrz materiału, w rejonie uderzenia, występuje siatka rozwarstwień i poprzecznych pęknięć warstw, nie ma natomiast obszarów masowego pęknięcia włókien. Na powierzchni, w miejscu uszkodzenia powstaje niewielki, często niewidoczny ślad, na powierzchni przeciwległej uszkodzenie jest wyraźnie bardziej rozległe, jednak często nie ma możliwości inspekcji tej strony elementu [2] (rys.2).



Rys. 2. Próbkę po działaniu obciążenia udarowego o energii 10J. Na dolnych zdjęciach widoczne miejsca przyłożenia obciążenia. Na górnych zdjęciach widok próbek od przeciwnej strony



Rys. 2. cd.

TECHNOLOGIA NAPRAW USZKODZEŃ

Statki powietrzne zostają skierowane do napraw zarówno z powodu wypracowania ресурсu, jak również z powodu uszkodzeń.

Naprawa jest to przywrócenie wartości użytkowej (eksploatacyjnej) obiektu technicznego, np. samolotu lub silnika, przez całkowite lub częściowe usunięcie zużycia lub uszkodzenia [3]. Naprawy powinny przywracać statkom powietrznym ich pierwotne własności użytkowe i wytrzymałość. Powinny być wykonane na podstawie dokumentacji technologicznej opracowywanej przez producenta lub wykwalifikowane biuro technologiczne.

Stopień uszkodzenia statków powietrznych jest określany na podstawie:

- ilości uszkodzonych agregatów i podzespołów;
- charakteru uszkodzeń;
- wymiarów uszkodzeń i ich ilości.

Z racji na wysoką cenę statków powietrznych, każdy uszkodzony egzemplarz powinien zostać usprawniony, jeżeli jest to możliwe ze względów technicznych i koszty naprawy nie przekraczają jego wartości, czyli ceny nowego egzemplarza, pomniejszonej o amortyzację. W naprawach konstrukcji płatowców należy dążyć do:

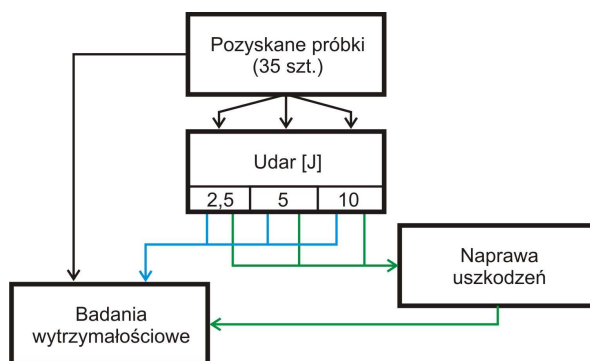
- zapewnienia równoważnej wytrzymałości naprawianego elementu,
- uzyskania zbliżonej, a najlepiej identycznej sztywności naprawianego układu,
- uzyskania identycznego przyłożenia sił do elementów,
- ewentualnego zwiększenia masy płatowca nie większego niż 2%,
- zachowaniu położenia środka ciężkości naprawianego statku powietrznego.

Bardzo duże prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń struktur statków powietrznych wywołanych obciążeniami udarowymi oraz konieczność ich identyfikacji i naprawy (dla wojskowych samolotów i śmigłowców często prowadzone w warunkach polowych) stanowiło impuls do rozpoczęcia badań eksperymentalnych.

BADANIA EKSPERYMENTALNE

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu niskoenergetycznego udaru na właściwości mechaniczne materiału kompozytowego (laminatu) zastosowanego na poszycie przedniej części kadłuba w samolocie TS 11 „Iskra”, oraz skuteczności napraw takich uszkodzeń dokonywanych w warunkach polowych. Dodatkowo, ze względu na fakt, iż element z którego pozyskano próbki był eksploatowany na statku powietrznym, uzyskano dane na temat jakości napraw (wykonywanych w zakresie remontów polowych) tego rodzaju elementów, poddanych procesom starzeniowym.

Badania zostały zrealizowane według programu badań, określonego algorytmem:



Rys. 3. Algorytm programu badań

Próbki w kształcie płytki prostokątnej o wymiarach 60x80mm i grubości 4mm pozyskano z elementu poszycia samolotu TS 11 „Iskra”, zwracając szczególną uwagę, na istnienie uszkodzeń eksploatacyjnych i uszkodzeń powstałych w późniejszym czasie podczas składowania oraz pobierając próbki z miejsc w których krzywizna elementu jest jak najmniejsza, mając na celu uzyskanie próbek jak najbardziej zbliżonych do prostopadłościanu.



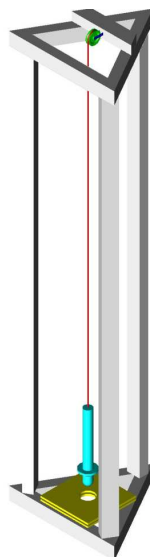
Rys. 4. Samolot TS 11 „Iskra”, zaznaczony element z którego wykonano próbki wykorzystane do badań (fot. P. Dzikiewicz)

Na potrzeby badań pozyskano 35 próbek o wymiarach 60x80mm i grubości 4mm. Trzy serie liczące po 10 próbek zostały poddane działaniu poprzecznego obciążenia uderowego o energii odpowiednio: 2.5J, 5J i 10J. Następnie 5 próbek z każdej serii było poddawanych badaniu w celu określenia wpływu zadanego uderu na wytrzymałość badanego materiału kompozytowego na zginanie. Kolejne 5 próbek z każdej serii, było naprawiane metodami z zakresu remontów polowych (każda próbka została wzmocniona jedną warstwą maty szklanej). W kolejnym etapie realizowanych badań były one poddawane badaniu wytrzymałości na zginanie.

Na potrzeby badań zostało skonstruowane stanowisko do zadawania poprzecznego obciążenia uderowego. Stanowisko posiada możliwość regulacji wysokości, z jakiej spada bijak. Bijak wyposażony jest

w sferyczną końcówkę o średnicy 25 mm, oraz posiada możliwość zainstalowania końcówek o innych rozmiarach.

Energia uderzenia jest dobierana na podstawie zasady zachowania energii. Pomijając znikomo małe opory, założono, że cała energia potencjalna bijaka, zostanie przekształcona w jego energię kinetyczną w momencie uderzenia w próbkę.



Rys. 5. Model przyrządu do wytwarzania obciążenia udarowego

Wysokość spadku bijaka można regulować w zakresie do jednego metra, maksymalną masę bijaka ogranicza w zasadzie wytrzymałość linki mocującej i konstrukcja bijaka. Masa bijaka wynosi 460 gramów.

W przeprowadzonych badaniach, urządzenie posiadało 3 konfiguracje energii uderzenia (tabela 1).

Tabela 1. Zestawienie energii uderu i odpowiadających im konfiguracji urządzenia

Lp.	Energia uderzenia	Masa bijaka	Wysokość spadku
1	2,5 J	460 g	554 mm
2	5 J	920 g	554 mm
3	10 J	1460 g	698 mm

Naprawy próbek poddanych obciążeniu udarowemu dokonano w technologii remontu polowego, stosując nakładkę z tkaniny szklanej o gramaturze 150 g/m² i żywicę Epidian 53 + Z1. Wszystkie próbki zostały naprawione w tych samych warunkach, z wykorzystaniem tej samej technologii naprawy. Każda próbka została wzmocniona jedną warstwą maty szklanej przesyconej żywicą. Powierzchnia próbek została przygotowana do klejenia metodą szorstkowania papierem ściernym o uziarnieniu 240 i przemyta benzyną ekstrakcyjną. Kompozycję klejową sporządzono, na bazie żywicy epoksydowej Epidian 53 i utwardzacza Z1 w proporcji 10:1.

Do wykonania badań wytrzymałości na zginanie wykorzystano maszynę wytrzymałościową Zwick Roell Z100.

W celu określenia danych wyjściowych do badań porównawczych 5 próbek zostało poddane próbie zginania 3-punktowego, w celu określenia pierwotnej wytrzymałości na zginanie badanego materiału. Oce-

na wpływu niskoenergetycznych obciążeń uderowych na doraźną wytrzymałość kompozytu warstwowego przebiegła w dwóch etapach.

W pierwszym etapie, próbka w kształcie płytki prostokątnej o wymiarach 60x80 mm i grubości 4 mm była umieszczana w specjalnym uchwycie w formie dwóch żeliwnych płyt z centralnym otworem o średnicy 40mm, a następnie była obciążana uderowo, z określoną energią, poprzecznie wzdłuż osi symetrii.

W drugim etapie, próbka była badana pod kątem doraźnej wytrzymałości na zginanie, zgodnie z normą PN – EN ISO178, która zakłada stosunek rozstawu podpór do grubości próbki wynoszący 16:1.

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano wyniki średniej wytrzymałości na zginanie próbek materiału kompozytowego poddanego poprzecznemu obciążeniu uderowemu o różnych energiach uderzenia, oraz wytrzymałości na zginanie po wykonanej naprawie (tabela 2).

Tabela 2. Średnia wytrzymałość na zginanie

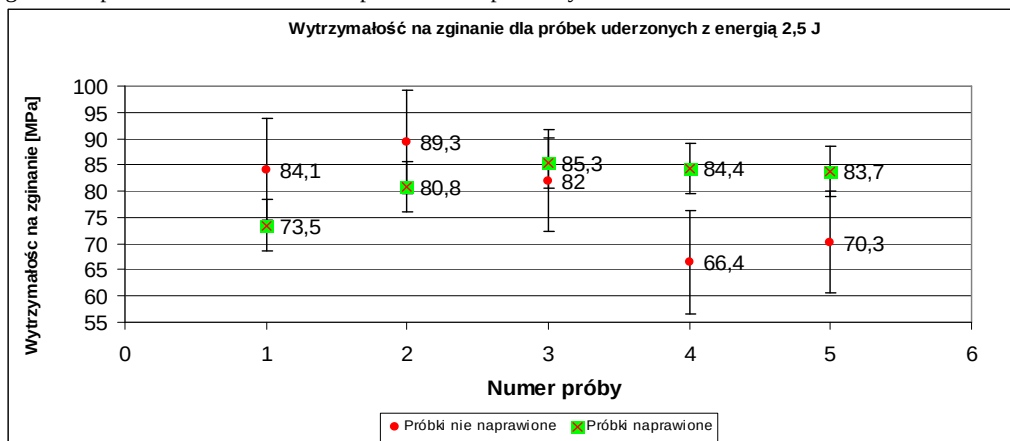
Energia uderu [J]	Naprawa	$R_{g\dot{s}r}$ [MPa]
2,5	BRAK	79,09
	NIE	78,34
	TAK	81,54
5	NIE	77,68
	TAK	90,92
10	NIE	49,01
	TAK	90,72

W pierwszej serii próbek, która została obciążona poprzecznym uderem o energii 2,5 J, jedynie nieznacznie obniżyła się wytrzymałość na zginanie badanego materiału. Następnie na próbkach została przeprowadzona naprawa technologią remontu polowego.

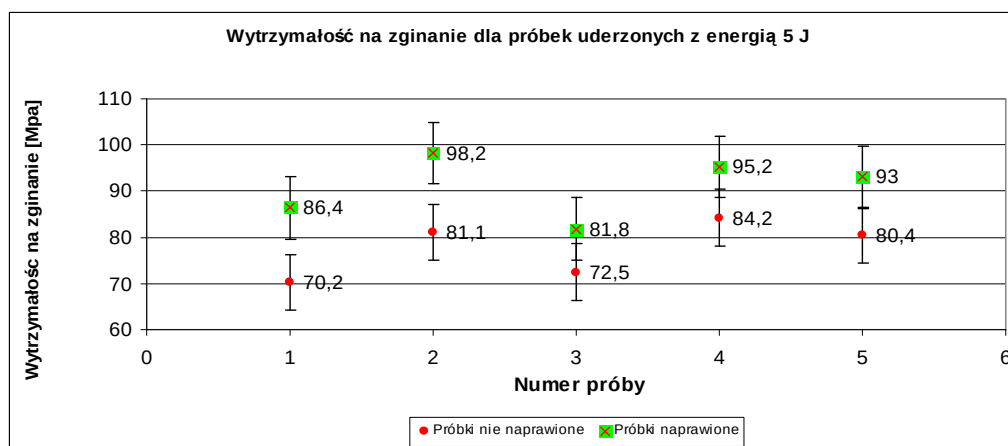
Wytrzymałość próbek naprawionych w ten sposób, wzrasta nieznacznie (4% w stosunku do materiału nie naprawianego).

Druga seria próbek została poddana oddziaływaniu poprzecznego obciążenia uderowego o energii 5 J. Ich wytrzymałość doraźna, mimo że zmniejsza się, nie jest znacząco mniejsza od wytrzymałości próbek w obciążonych z energią 2,5 J (spadek o 1,8%).

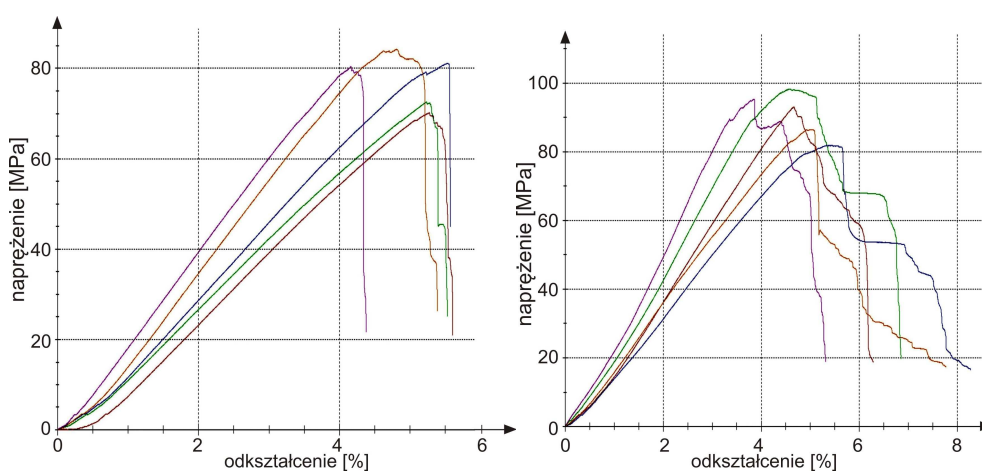
Seria próbek naprawionych w zakresie napraw polowych wykazała wzrost średniej wytrzymałości na zginanie o ponad 17% w stosunku do próbek nie naprawianych.



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie próbek poddanych obciążeniu uderowemu o energii 2,5 J



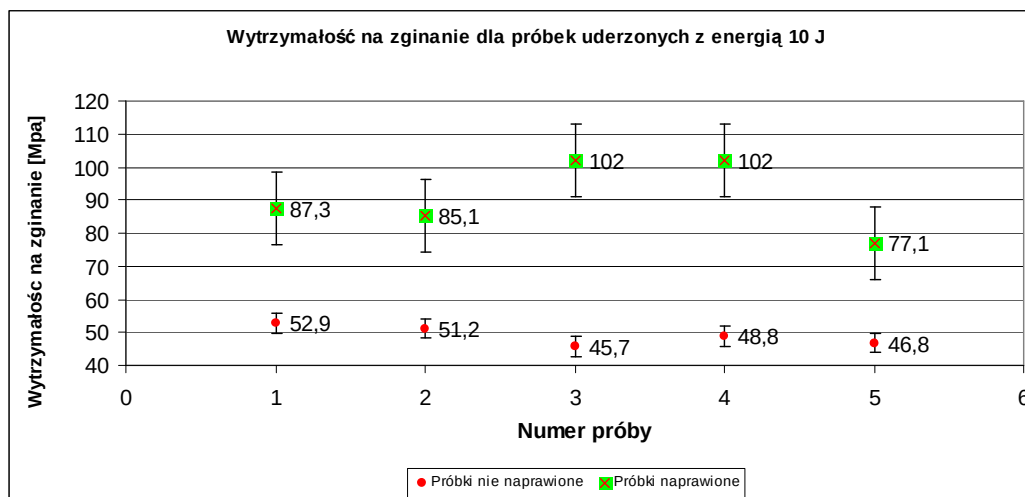
Rys. 7. Wytrzymałość na zginanie próbek poddanych obciążeniu uderowemu o energii 5 J



Rys. 8. Charakterystyki wytrzymałości na zginanie próbek po obciążeniu uderowym o energii 5 J: nie naprawiane (z lewej) oraz poddane naprawie w warunkach polowych (z prawej)

Mniej gwałtownie w tym przypadku przebiega również proces zniszczenia próbek. W przypadku naprawy próbek obciążonych uderowo z energią 5 J, porównując charakterystyki wykresów wytrzymałościowych można wyraźnie zauważyć różnicę w ich przebiegu, szczególnie po przekroczeniu dopuszczalnej wytrzymałości na zginanie (rys. 8).

Próbki naprawione, po oddziaływaniu poprzecznego obciążenia uderowego o energii 10 J wykazały wzrost wytrzymałości na zginanie w stosunku do próbek z tym samym uszkodzeniem lecz nie poddawanych naprawie o ponad 80% (rys. 9). W tym przypadku, celowość naprawy uszkodzenia, nawet technologiami remontów polowych jest bezdyskusyjna.



Rys. 9. Wytrzymałość na zginanie próbek poddanych obciążeniu uderowemu o energii 10 J

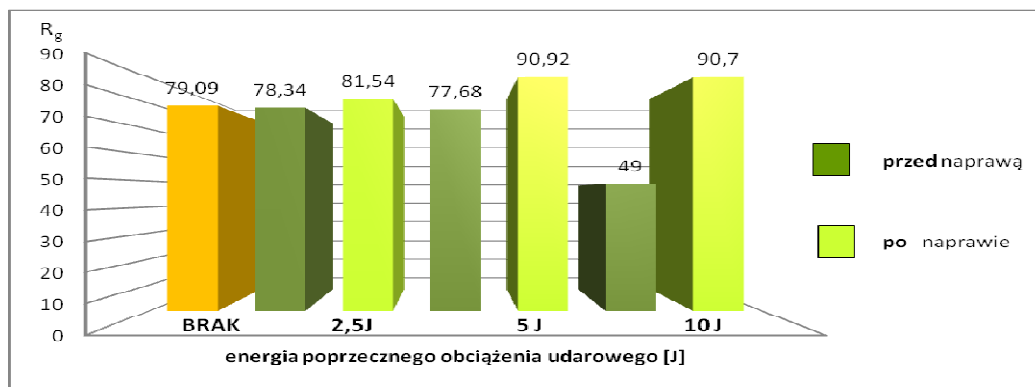
WNIOSKI

Przeprowadzone badania potwierdziły wpływ niskoenergetycznych poprzecznych obciążeń uderowych na wytrzymałość doraźną materiału kompozytowego (laminatu). Energia uderzenia 10 J odpowiada upadkowi przedmiotu o masie około 1,5 kg z wysokości około 70 cm, zatem upuszczenie narzędzia o podobnej masie z takiej wysokości może powodować znaczne osłabienie struktury laminatu. Uszkodzenie w przypadku uderu o niższych energiach jest zwykle trudne do zlokalizowania, ponieważ zewnętrzna powłoka zazwyczaj pozostaje nieuszkodzona.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

- uszkodzenie spowodowane poprzecznymi obciążeniami uderowymi powoduje degradację właściwości wytrzymałościowych materiałów kompozytowych,
- naprawa w technologii napraw polowych, z zastosowaniem najprostszych technologii skutkuje:
 - o poprawą wytrzymałości doraźnej w każdym przypadku uszkodzenia uderowego;
 - o wyraźnym wzrostem wytrzymałości doraźnej w przypadku uszkodzeń wywołanych obciążeniami uderowymi o energii 10 J (rys.10),
 - o złagodzeniu charakteru przebiegu zniszczenia.

Charakter przebiegu wykresu wytrzymałości na zginanie materiałów kompozytowych poddanych poprzecznemu obciążeniu uderowemu i dokonaniu naprawy technologią remontu polowego świadczy o celowości dokonywania takiej drobnej naprawy w przypadku nawet niewielkiego (2,5 J) uderzenia. Po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie proces zniszczenia w próbkach poddanych naprawie przebiega łagodniej, skąd wynika, że trwa dłużej do całkowitego zniszczenia materiału. W konstrukcjach lotniczych należy to zinterpretować jako czas, który może być wykorzystany na wykonanie np. pełnego manewru do lądowania zanim element kompozytowy statku powietrznego ulegnie zniszczeniu.



Rys. 10. Wytrzymałość doraźna na zginanie dla poszczególnych serii

Przeprowadzone badania wykazały celowość napraw polowych uszkodzeń lotniczych struktur kompozytowych wywołanych niskoenergetycznym obciążeniem uderowym nawet o niewielkiej energii (2,5 J). Ponadto pozwoliły określić orientacyjny zakres energii poprzecznych obciążeń uderowych dla których należałoby przeprowadzić bardziej szczegółowe badania (5...10 J). Wykonane badania wskazują również na potrzebę przeprowadzenia badań wytrzymałości zmęczeniowej materiałów kompozytowych obciążonych uderowo.

LITERATURA

1. J. Lewitowicz, Podstawy eksploatacji statków powietrznych, ITWL, Warszawa 2001
2. A. Bełzowski, Z. Rechul, J. Stasiński, Uszkodzenia uderowe w laminacie wzmocnionym tkaniną szklaną *Kompozyty* 5/2002
3. J. Godzimirski, Technologia napraw samolotów i śmigłowców – naprawy polowe, WAT, Warszawa, 1987

THE REPAIR OF LOW-ENERGY IMPACT-RELATED DAMAGES IN AVIATION COMPOSITE ELEMENTS

Abstract. Composites are one of ultramodern materials used in aviation constructions. In such applications, a very high strength and low density of these materials are very important. Aircraft's service conditions jeopardize composite structures on impact loading. Composites can fail in wide variety of modes and contain barely visible impact damage (BVID) which nevertheless severely reduces the structural integrity of component. Moreover, low-energy impact weaken the composite laminates properties. The influence on the flexural strength R_g and vital necessity of the repair after low-energy impact composite aerial elements is presented in the paper.

Dorota STADNICKA
Politechnika Rzeszowska
Rzeszów

SYMULACYJNA LINIA MONTAŻOWA DO NAUCZANIA NARZĘDZI LEAN MANUFACTURING

SIMULATION ASSEMBLY LINE FOR LEARNING LEAN MANUFACTURING TOOLS

WPROWADZENIE

Firmy funkcjonujące na dzisiejszym rynku, aby się na nim utrzymać, muszą być konkurencyjne. Można wymieniać wiele czynników konkurencyjności firmy, ale dwoma najbardziej oczywistymi są jakość wyrobów i ich cena. Jakość i cena są ze sobą bardzo ściśle związane. Firmy chcąc konkurować ceną często obniżają jakość. Ale powszechnie stosowane są również inne praktyki obniżania ceny, takie jak obniżanie kosztów poprzez zwalnianie pracowników z pracy i przydzielanie pracy przez nich wykonywanej pozostałym osobom w firmie. Nie może być to dobre rozwiązanie, szczególnie na dłuższą metę, ponieważ przepracowani pracownicy popełniają więcej błędów, a to generuje koszty organizacji. I koło się zamyka.

Pod koniec ubiegłego stulecia pojawiła się filozofia szczupłego myślenia. Za twórców *lean management* uważa się Sakichi Toyoda, Kaiichiro Toyoda i Taiichi Ohno. [1]. Jednakże nazwę *lean manufacturing* po raz pierwszy zastosowali James P. Womack, Daniel T. Jones i Daniel Roos w książce „*The Machine That Changed the World*” [3].

Głównym założeniem szczupłego myślenia jest stwierdzenie faktu, że w organizacji występują straty. Singeo Singo zidentyfikował osiem głównych strat w procesach. Są to straty wynikające z nadprodukcji, utrzymywania nadmiernych zapasów, zbędnego transportu, oczekiwania, zbędnych ruchów wykonywanych przez pracowników, zbędnego przetwarzania, błędów i braków oraz ze straconej kreatywności pracowników [6].

Głównym celem koncepcji *lean* stała się eliminacja tych strat. Z czasem dla realizacji tego celu rozwinęły się różne narzędzia zwane narzędziami *lean manufacturing*.

PRZEGLĄD METOD I NARZĘDZI LEAN MANUFACTURING

Znanych jest wiele narzędzi *lean*. Koncepcja stosowania większości z nich jest bardzo prosta, a ich stosowanie wiąże się w większości przypadków z niewielkimi kosztami. Najbardziej popularnymi narzędziami są:

- *Metoda 5S* – wprowadzanie 5S w organizacji, czy na stanowisku pracy wiąże się z wdrożeniem następujących działań: selekcja, systematyka, sprzątanie, standaryzacja i samodyscyplina, które mają na celu zapewnienie, że na stanowisku pracy będą znajdowały się tylko rzeczy potrzebne do pracy, że będą one rozmieszczone w określonym porządku, ułatwiając pracę na uporządkowanym i czystym stanowisku, że będą ustalone standardy pracy dla stanowiska i że będą one przestrzegane przez świadomego pracownika. Stosowanie 5S jest powiązane z wizualizacją, która ułatwia zrozumienie tego, co dzieje się na stanowisku pracy i pomaga szybko dostrzegać pojawiające się problemy [2];

- *SMED (Single Minute Exchange of Die)* – metoda wykorzystywana do redukcja czasów przebrajania maszyn technologicznych i czasów operacji serwisowych. Głównym celem metody jest skrócenie czasu przebrojenia maszyny, które zakłóca przepływ w strumieniu wartości, ale jednocześnie jest niezbędne przy produkcji różnorodnego asortymentu. Metoda skupia się na identyfikowaniu czynności realizowanych w procesie przebrajania, które można zakwalifikować, jako czynności zbędne lub zewnętrzne i możliwe do

zrealizowania w czasie pracy maszyny. Zwraca również uwagę na możliwości upraszczania procesu przeobrażenia np. poprzez stosowanie szybkozłączów lub pakietów narzędzi wykorzystywanych w operacji przeobrażenia. Stosowanie metody SMED jest powiązane ze stosowaniem zasad 5S [9];

- *TPM (Total Productive Maintenance)* – kompleksowe utrzymanie maszyn jest strategią, której celem jest zapewnienie ciągłej sprawności maszyn i urządzeń i ich efektywnej i bezawaryjnej pracy. Jednym z głównych założeń *TPM* jest to, że za osiągnięcie tego celu jest odpowiedzialny nie tylko dział utrzymania ruchu firmy, ale również każdy z operatorów [7];

- *Poka Yoke* – oznacza unikanie błędów poprzez zastosowanie rozwiązań organizacyjnych bądź technicznych. Opiera się na założeniu, że każdy popełnia błędy i można im zapobiec tylko wtedy, jeżeli uniemożliwimy pracownikom popełnianie błędów. Jednym z celów wdrażania *Poka Yoke* jest eliminacja kontroli jakości tam, gdzie można zastosować rozwiązania typu *Poka Yoke*. Typowymi rozwiązaniami stosowanymi w celu zapobiegania błędom są termostaty stosowane w kuchenkach gazowych, czy różne rodzaje złącz [6];

- *Mapowanie strumienia wartości (Value Stream Mapping)* – koncepcja mapowania strumienia wartości po raz pierwszy została przedstawiona przez Mike’a Rothera i Johna Shooka w książce *“Learning to See”*. Głównym celem stosowania mapowania strumienia wartości jest zidentyfikowanie tego, co dzieje się w strumieniu przepływu wartości. Wartość wyznaczana jest z punktu widzenia klienta. Procesy realizowane w strumieniu wartości powinny ją tworzyć, ale niestety nie każdy z procesów tworzy wartość dodaną. W strumieniu występują również procesy niedodające wartości, a także inne straty, których istnienie może być zauważone po zmapowaniu całego strumienia wartości, w którym przepływają zarówno materiały jak i informacje. Metoda wykorzystuje zestaw symboli graficznych, za pomocą których w prosty wizualny sposób przedstawiane jest to, co dzieje się w całym strumieniu. Mapowanie stanu aktualnego jest pierwszym krokiem w doskonaleniu przepływu strumienia wartości, podczas którego wykorzystuje się również inne narzędzia *lean* [4];

- *Karty Kanban i system ssący typu Supermarket* – karty Kanban występują w dwóch postaciach: kart Kanban transportowych i kart Kanban produkcyjnych. Karty Kanban produkcyjne pełnią rolę zleceń produkcyjnych i krążą w systemie produkcyjnym pomiędzy supermarketem a stanowiskiem dostawczym. Karty Kanban transportowe są zleceniem dostawy i krążą pomiędzy supermarketem a stanowiskiem odbiorczym. Zadaniem Kanbanu jest sterowanie zapasami występującymi w systemie produkcyjnym. System pozwala prawie na całkowitą eliminację magazynów. Formę magazynu stanowią Supermarkety, które mieszczą określoną ilość materiałów, półwyrobów i wyrobów i rozmieszczone są w różnych miejscach systemu produkcyjnego pomiędzy stanowiskami pracy tam, gdzie nie jest możliwe wdrożenie przepływu ciągłego [8];

KONCEPCJA LEAN LEARNING AKADEMII

Chociaż koncepcja *lean manufacturing* jest szeroko znana na świecie to jednak w polskich przedsiębiorstwach nie często spotyka się zastosowanie narzędzi *lean*. Do niektórych firm wraz z kapitałem zagranicznym przyszły nowe zasady i ogórne zarządzenia dotyczące wdrażania koncepcji doskonalących procesy realizowane w przedsiębiorstwach. Szefowie firm polskich natomiast niechętnie patrzą, czy to na 5S, *TPM*, czy na inne narzędzia, oceniając je, jako niepotrzebne lub odrywające pracowników od pracy, którą powinni wykonać, czyli od produkcji. Nie rozumieją, jakie korzyści mogą przynieść ich firmom proste do wdrożenia metody i boją się, że zmiany mogą być niekorzystne dla przedsiębiorstwa.

Utworzenie *Lean Learning Akademii* oraz zaprojektowanie montażowej linii symulacyjnej zostało zainicjowane przez firmę *Volvo Cars Gent z Belgii*, która znając zalety narzędzi *lean* poszukiwała prostego sposobu, za pomocą którego mogłaby nauczać swoich pracowników, jak stosować narzędzia *lean*. A jednocześnie przekonać ich o skuteczności tych narzędzi poprzez zaskakujące korzyści z ich stosowania na symulacyjnej linii montażowej.

W celu zwiększenia wartości projektu do współpracy zaproszono następujące firmy oraz uczelnie wyższe:

- Volvo Powertrain AB Skövde, Szwecja,
- Associação Comunidade Lean Thinking, Portugalia,
- Siemens Program and System Engineering S.R.L, Rumunia,
- PRZEMOT H.P.T. Chmiel s.j., Polska,
- Katholieke Hogeschool Sint-Lieven, Belgia,
- University of Skövde, Szwecja,
- Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugalia,
- Universitatea Transilvania din Brasov, Rumunia,
- Politechnikę Rzeszowską, Polska.

W wyniku współpracy tych organizacji powstała *Lean Learning Academy* [11]. Na Politechnice Rzeszowskiej funkcjonuje rzeszowski oddział Akademii [10].

Celem funkcjonowania *Lean Learning Academy* jest:

- zwiększenie konkurencyjności przedsiębiorstw,
- wzmocnienie zdolności studentów, absolwentów, pracowników i menedżerów do znalezienia pracy,
- uatrakcyjnienie programów nauczania inżynierów,
- zwiększenie korzyści ze studiowania w obszarze nauki i technologii.

Lean Learning Academy uczy stosowania zasad i narzędzi szczupłej produkcji, skupiając się na następujących zagadnieniach:

- myślenie kategoriami *lean*,
- ciągłe doskonalenie,
- praca standardowa,
- ustalanie taktyki,
- TPM,
- mapowanie strumienia wartości,
- FMEA,
- SMED,
- 5S,
- Poka Yoke,
- JIT/Kanban, przepływ jednej sztuki, heijunka,
- rozmieszczenie wyposażenia w zakładzie przemysłowym,
- jakość,
- ocena lean, audit lean, benchmarkingu,
- praca zespołowa,
- zarządzanie wizualne,
- bezpieczeństwo.

Jakość wyników prac podjętych w ramach projektu podlega ocenie zewnętrznego oceniającego z niezależnej firmy Amelior. Wyniki prac konsultowane są z członkami grup rezonansowych, w skład których wchodzi pracownicy uczelni wyższych i przedsiębiorstw.

KONCEPCJA LINII SYMULACYJNEJ DO MONTAŻU DŁUGOPISÓW

Dzięki symulacyjnej linii do montażu długopisów studenci mogą w praktyce poznać zalety stosowania lean. Na linii odbywa się prosty proces montażu długopisów realizowany ręcznie na kilku stanowiskach pracy. Montowany jest długopis, który składa się z 7 elementów (rys. 1). Aby rozbudować proces montażu do długopisu dodano element dekoracyjny.



Rys. 1. Montowany wyrób

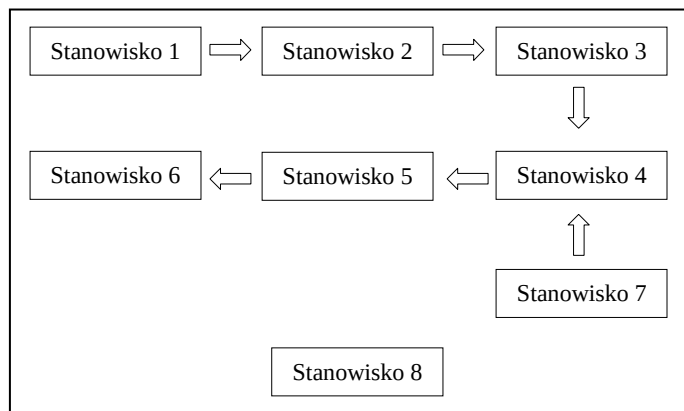
Na poszczególnych stanowiskach realizowane są następujące zadania:

- stanowisko 1 – zakładanie sprężynki na wkład,
- stanowisko 2 – nakładanie opaski gumowej na obudowę dolną i umieszczanie wkładu ze sprężynką w obudowie,
- stanowisko 3 – montaż kompletnego długopisu,
- stanowisko 4 – montaż elementu dekoracyjnego,
- stanowisko 5 – kontrola,
- stanowisko 6 – pakowanie,
- stanowisko 7 – przygotowanie elementu dekoracyjnego,
- stanowisko 8 – wystawianie zleceń produkcyjnych przez kierownika produkcji.

Rozmieszczenie stanowisk na linii prezentuje rys. 2. Na każdym stanowisku pracy znajduje się instrukcja pracy, a na stanowisku 5 instrukcja kontroli i odpowiednie formularze do rejestracji wyrobów niezgodnych. Montaż realizowany jest w oparciu o wystawiane przez kierownika produkcji zlecenia produkcyjne. Oprócz osób realizujących pracę na przedstawionych ośmiu stanowiskach w grze symulacyjnej biorą udział inne osoby realizujące następujące zadania:

- dostawy materiałowe,
- chronometraż dla poszczególnych stanowisk pracy,
- analizę SMED dla stanowiska wymagającego przezbierania.

Na linii montażowej montowane są długopisy w czterech kolorach, co powoduje konieczność przezbierania. Analizę SMED prowadzi się dla stanowiska przygotowania elementu dekoracyjnego.



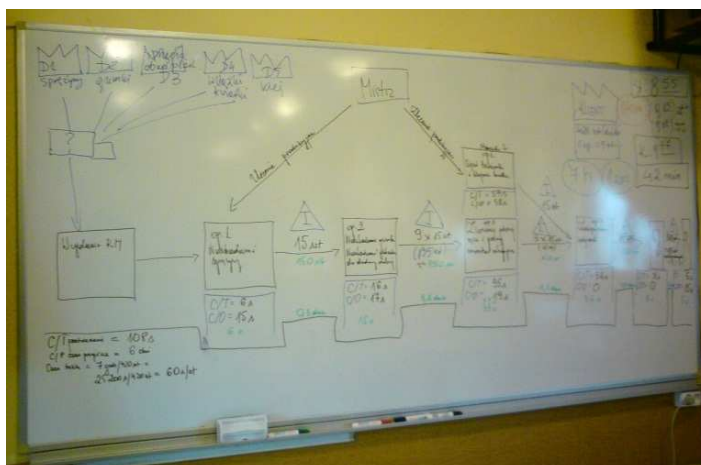
Rys. 2. Rozmieszczenie stanowisk na symulacyjnej linii montażowej

MAPOWANIE STRUMIENIA WARTOŚCI

Praca realizowana na stanowiskach podlega obserwacji chronometrażystów. Zbierają oni dane o czasach trwania poszczególnych operacji montażowych. Po określonym czasie praca na linii jest wstrzymywana celem analizy uzyskanych wyników. Przygotowywana jest mapa przepływu strumienia wartości dla stanu aktualnego. Rys. 3 prezentuje przykładową mapę przygotowaną na jednej z sesji symulacji procesu montażu długopisów.

Po narysowaniu mapy analizuje się aktualną sytuację na linii oceniając:

- Ile wyrobów gotowych wyprodukowano w założonym czasie?
- Jak długo trwało wyprodukowanie pierwszego wyrobu, który zszedł z linii?
- Ile czasu pochłaniają operacje wykonywane na linii?
- Gdzie występują i z czym są związane straty czasu?
- Gdzie pojawiły się zapasy?
- Który punkt w systemie jest „wąskim gardłem”?
- Czy w obecnej sytuacji możliwe jest wyprodukowanie zamówionej przez klienta liczby wyrobów?
- Czy zidentyfikowano wyroby niezgodne i jaki charakter miały niezgodności?
- Jakie problemy pojawiły się na linii, jakie były ich przyczyny i jak można je rozwiązać?
- Czy możliwe jest skrócenie czasu przezbrojenia na stanowisku przygotowania elementu dekoracyjnego?
- Czy można zastosować jakieś rozwiązania techniczne lub organizacyjne, które poprawiłyby funkcjonowanie linii montażowej?



Rys. 3. Mapa strumienia wartości dla linii montażowej – stan aktualny

Celem analizy stanu obecnego jest zidentyfikowanie miejsc powstawania strat i zaproponowanie sposobów ich eliminacji.

PRZEPROWADZANE ANALIZY I ZASTOSOWANE NARZĘDZIA LEAN

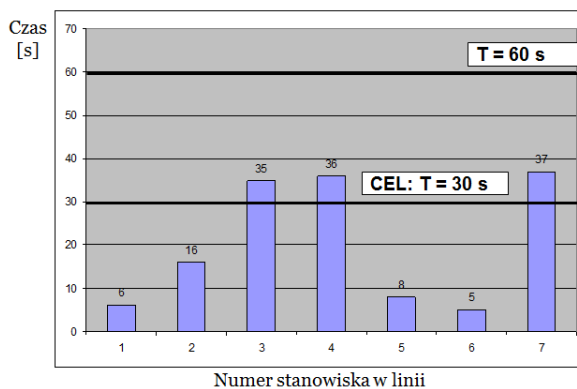
W celu doskonalenia pracy linii uczestnicy symulacji są zachęceni do stosowania następujących narzędzi lean:

- analizy SMED z rejestracją czynności wykonywanych podczas przezbrojenia i czasów ich trwania, rejestracją narzędzi wykorzystywanych w procesie przezbrojenia oraz narzędzi i materiałów

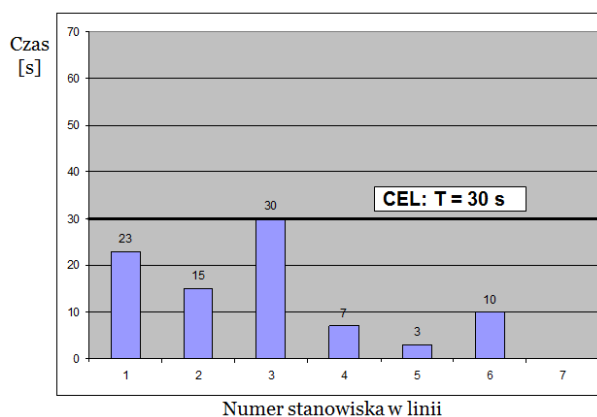
- potrzebnych do realizacji operacji produkcyjnej i rysowaniem wykresu spaghetti dla przejść operatora wykonującego przebrojenie,
- chronometrażu czasów wykonywania operacji,
 - mapowania strumienia wartości dla zobrazowania sytuacji występującej na linii montażowej,
 - metody 5S dla skrócenia czasu przebrojenia oraz uporządkowania poszczególnych stanowisk pracy,
 - wizualizacji dla lepszej oceny tego, co dzieje się na poszczególnych stanowiskach oraz łatwiejszej pracy na stanowiskach,
 - pracy zespołowej dla skuteczniejszego poszukiwania rozwiązań zidentyfikowanych problemów,
 - bilansowania linii montażowej poprzez reorganizację pracy na poszczególnych stanowiskach,
 - kart Kanban i systemu ssącego typu supermarket,
 - ciągłego przepływu,
 - kolejki FIFO,
 - rozwiązań typu Poka Yoke dla zapobiegania błędom w montażu.

Na podstawie danych z mapy strumienia wartości dokonywana jest analiza czasów trwania operacji na poszczególnych stanowiskach pracy (rys. 4). Czas taktu T uzależniony jest od zamówienia klienta. Jednym z zadań uczestników symulacji jest zbilansowanie linii montażowej. Na rys. 5 przedstawiono czasy trwania operacji na poszczególnych stanowiskach na linii montażowej po wprowadzeniu zmian na linii. Z rysunku wyraźnie wynika, że mimo poprawy linia ciągle nie jest zbilansowana i wymaga wprowadzenia dalszych zmian. Dzięki możliwości symulacji pracy studenci mogą bezkarnie wprowadzać zmiany i oceniać wyniki tych zmian. w rzeczywistym przedsiębiorstwie nie byłoby to możliwe. Dlatego tak ważna jest *Lean Learning Academy*, bo pokazuje, jakie mogą być skutki określonych działań, bez konieczności ponoszenia strat w przypadku podjęcia niewłaściwych decyzji, a jednocześnie pokazuje, że doskonalenie nigdy nie ma końca.

Duży nacisk kładziony jest na zaangażowanie operatorów w analizę problemów, które pojawiły się na ich stanowiskach pracy, co uświadamia, że to właśnie pracownicy najlepiej potrafią zidentyfikować problemy na swoich stanowiskach pracy i zaproponować ciekawe rozwiązania. Pokazuje to również, że nie wszystko jest takie, jak wydaje się być z zewnątrz i że próby narzucania rozwiązań mogą być nie tylko źle odbierane przez pracowników, ale i zupełnie niedostosowane do faktycznych przyczyn problemów. To pracownicy linii mają za zadanie opracować koncepcje pomocy warsztatowych, które mogłyby ułatwić im montaż.



Rys. 4. Analiza czasów trwania operacji na poszczególnych stanowiskach na linii montażowej



Rys. 5. Analiza czasów trwania operacji na poszczególnych stanowiskach na linii montażowej po reorganizacji i wprowadzeniu usprawnień

PROBLEMY NA LINII MONTAŻOWEJ I MAPA STANU PRZYSZŁEGO

Jednym z zadań zrealizowanych w celu doskonalenia funkcjonowania linii montażowej jest zidentyfikowanie i rozwiązanie problemów, które się pojawiają. W tabeli 1 przedstawiono problemy, które zostały zidentyfikowane podczas jednej z sesji symulacyjnych.

Uczestnicy symulacji mają za zadanie zastosować usprawnienia pracy linii. Powstaje, więc mapa przepływu strumienia wartości – stan przyszły, który od razu jest wdrażany (rys. 6).

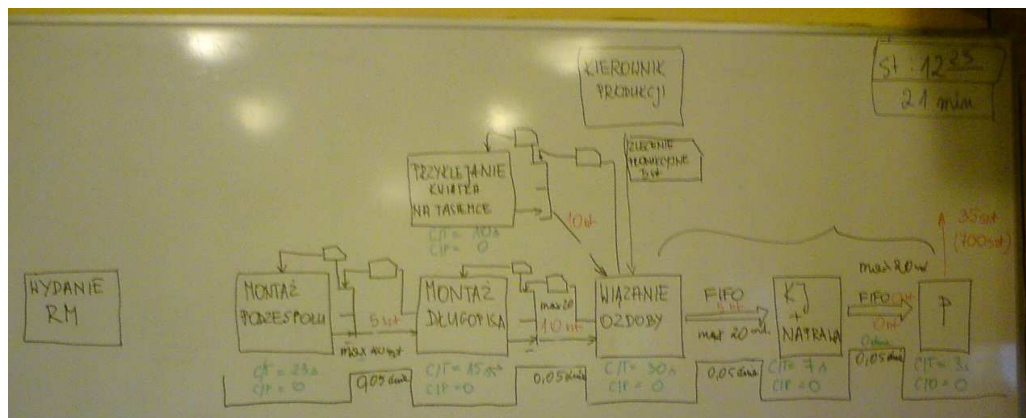
Na zmienionej linii produkcyjnej realizowana jest praca. Po określonym czasie dokonywana jest analiza pracy linii. W tabeli 2 przedstawiono problemy, które zidentyfikowano w wyniku dalszych analiz w prezentowanym przykładzie.

Tab. 1. Zidentyfikowane problemy, ich przyczyny i propozycje rozwiązań ustalone z wykorzystaniem burzy mózgów i pracy zespołowej

Problem	Przyczyna	Propozycja rozwiązania
Niewłaściwy kolor wkładu w długopisie	Pomieszane kolory wkładów w pudełku	Kontrola dostaw Kontrola na pierwszym stanowisku Zmiana koloru obudowy wkładu
Problem z montażem sprzęgła	Część sprzęgła nie wchodziła do obudowy	Zmiana dostawcy Reklamacja do dostawcy
Nie można zwolnić serii, gdy pojawiły się sztuki wadliwe	Zlecenie jest na dużą partię Brak procedur zwalniania niepełnej partii	Zwolnić wyroby zgodne. Na zleceniu adnotacja o wyrobach niezgodnych Zmniejszyć wielkość partii.
Brak technologii naprawy wadliwych wyrobów Brak zlecenia naprawy wadliwych wyrobów	Brak odpowiedniego zarządzania	Nadanie uprawnień odpowiednim osobom Próba naprawy przez kontrolera Ustawianie priorytetu naprawy Wyroby niezgodne od razu złomować

Tab. 1. cd.

Problem	Przyczyna	Proponycja rozwiązania
Zlecenia produkcyjne pokreślone na kolorowo	Brak kartki, aby operator mógł sprawdzić kolor	Zapewnić kartkę papieru do testowania koloru
Stanowisko drugie – za mało miejsc odkładczych	Za dużo zapasów Następne stanowisko za wolno pracuje	Zmniejszyć zapasy Zwiększyć zatrudnienie na następnym stanowisku
Problemy przy nakładaniu opakowań gumowych	Opaski gumowe za ciasne	Poprawić kontrolę dostaw Zapewnić operatorowi przyrząd pomocniczy
Zamiana kolejności realizacji zleceń	Bałagan na stanowisku	Posprzątać – wprowadzić 5S
Odklejanie się kwiatków	Za krótki czas schnięcia Nie wiadomo, w jakiej kolejności przyklejane były kwiatki Nie wszystkie kwiatki miały taki sam czas schnięcia	Wprowadzenie kolejki FIFO
Klej za długo schnie i się ciągnie	Niewłaściwy klej Niewłaściwy dozownik – dozuje różną ilość kleju	Wymienić klej Zapewnić precyzyjny dozownik
Brak środków ochrony indywidualnej (szczególnie na stanowisku klejenia)	Nikt o tym nie pomyślał, że mogą być potrzebne	Zakupić rękawiczki
Problemy z rozwijaniem wstążki Rozpadła się szpulka	Tasiemka niewłaściwie nawinięta na szpulkę	Kontrola dostaw
Problem z przebrojeniem na stanowisku klejenia	Bo potrzebny jest klucz Bo częste zmiany szpułek ze wstążkami	Zastosowanie śruby motylkowej Zastosowanie przyrządu ze szpułkami ze wszystkimi potrzebnymi kolorami wstążek
Wielokrotny transport	Brak jasnych dyspozycji	Zapewnienie kompletu elementów



Rys. 6. Przykładowa mapa strumienia wartości – stan przyszedł

Tab. 2. Zidentyfikowane na udoskonalonej linii montażowej problemy, ich przyczyny i propozycje rozwiązań ustalone z wykorzystaniem burzy mózgów i pracy zespołowej

Problem	Przyczyna	Propozycja rozwiązania
Trudno rozróżnić kolory wkładów na pierwszym stanowisku (czarny i niebieski)	Słabe oświetlenie	Zainstalować dodatkowe oświetlenie
Brak synchronizacji zleceń produkcyjnych	Brak ustalonej kolejności wracania kart Kanban Zbyt dużo kart Kanban w procesie produkcyjnym	Wprowadzenie tablic Kanban z ograniczoną liczbą miejsc Ustalenie max liczby kart Kanban
Brak wolnej karty Kanban do przekazania na poprzednie stanowisko	Nie zapewniono właściwej liczby kart	Podwojenie liczby kart Kanban do dyspozycji operatora na stanowisku 4
Problem ze zwolnieniem partii	Zidentyfikowano braki nienaprawialne	Zapewnić zapas kompensacyjny
Dużo wyrobów niezgodnych	Wada części – trudności montażu	Konsultacje z dostawcą

TESTOWANIE SYMULACYJNEJ LINII MONTAŻOWEJ

Symulacyjna linia montażowa została przetestowana z uczestnictwem studentów Politechniki Rzeszowskiej oraz pracowników firm takich jak Stomil Sanok S.A., Restol sp. z o.o., Hispano-Suiza Polska Sp. z o.o., Dezamet S.A., PZL “WSK-Rzeszów” S.A., Norbert Polska Sp. z o.o. i in. Linia montażowa jest przenośna i może zostać łatwo i szybko zorganizowana w różnych miejscach (rys. 7 i rys. 8).



Rys. 7. Instalacja linii montażowej długopisów na Politechnice Rzeszowskiej



Rys. 8. Linia montażowa zorganizowana w ośrodku szkoleniowym

PODSUMOWANIE

Nauczanie narzędzi *lean* jest niezbędne, aby dać firmom szansę na doskonalenie organizacji swoich procesów produkcyjnych. Symulacyjna linia montażowa pozwala w prosty i jednocześnie przyjemny sposób testować koncepcje i narzędzia *lean* oraz łatwiej zrozumieć możliwości ich zastosowania. Powszechnie wiadomo, że nauka poprzez gry i zabawy przynosi dużo lepsze rezultaty niż jakikolwiek inny sposób nauczania. Podczas symulacji można przekazać nie tylko wiedzę, ale także pozyskać zaangażowanie pracowników. Rozwijają się zdolności twórcze oraz praca zespołowa. Uczestnicy symulacji mają szansę przekonać się, jakie rezultaty dają ich pomysły, a nawet, gdy nie są one dobrym rozwiązaniem istniejących problemów to nie przyniesie to szkody, ponieważ wszystko to tylko symulacja. Studenci mają szansę zobaczyć, jak można stosować narzędzia *lean* i jakie efekty przynosi ich stosowanie. Studenci są zadziwieni tym, jak w prosty sposób można udoskonalić organizację procesów wytwórczych.

Mimo takich samych założeń dla funkcjonowania linii za każdym razem symulacja daje inne rezultaty. Wszystko zależy od kreatywności, ale również doświadczeń uczestników symulacji. Studenci w większości nie mają dużych doświadczeń produkcyjnych, pracownicy firm natomiast wywodzą się z różnych organizacji, które realizują różnego rodzaju produkcję. Czasem mają doświadczenia z produkcji jednostkowej, czasem z produkcji seryjnej. Ale bez względu na rodzaj realizowanej w ich firmie produkcji zawsze możliwe jest tam zastosowanie wybranych narzędzi *lean*. Uczestnictwo w symulacji daje szansę również na ocenę narzędzi *lean* i możliwości ich zastosowania we własnym przedsiębiorstwie.

LITERATURA

1. Liker Jeffrey K.: *Droga Toyoty*. MT Biznes. 2005
2. Pawlak W.R.: *Praktyki 5S w przedsiębiorstwach i instytucjach, czyli dbałość o porządek i skrzętne gospodarowanie*. Wydawnictwo: WEKA. Warszawa 2002
3. Ross Daniel, Womack James P., Jones Daniel T.: *Maszyna, która zmieniła świat*. ProdPress, 2007
4. Rother Mike, Shook John: *Naucz się widzieć*. Wydawnictwo: Lean Enterprise Institute. Wydanie 2, 2009
5. Shingo Shigeo: *“Zero quality control: source inspection and the poka-yoke system”*, Portland, Oregon, Productivity Press, 1986
6. Singo Shigeo: *“Zero Quality Control”*. Japan Management Association. Tokio, 1985
7. Steven Borris, *“Total Productive Maintenance”*, McGraw-Hill, 2006
8. The Productivity Press Development Team: *Kanban na hali produkcyjnej*. Wydawnictwo: ProdPress. Wrocław 2009
9. The Productivity Press Development Team: *Szybkie przebrojenie dla Operatorów: System SMED*. ProdPublishing, 2010

10. leanacademy.portal.prz.edu.pl

11. www.leanlearningacademy.eu

SIMULATION ASSEMBLY LINE FOR LEARNING LEAN MANUFACTURING TOOLS

Abstract. *In the article the concept of simulation assembly line developed in Lean Learning Academy is presented. Simulation line is going to be use in learning lean manufacturing tools students and company employees. The article includes an example of a simulation results for simulation, which has been done with employees of two production companies.*

Wykaz autorów i specjalistów

współpracujących z Wydziałem Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej
oraz Zakładem Obrabiarek i Technologii Montaży
Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego
w zakresie montażu maszyn i połączeń montażowych,
których prace opublikowano w niniejszym Zeszyście Naukowym
oraz kwartalniku naukowo-technicznym „Technologia i Automatyzacja Montaży” (nr 2/2011)

1. Abdolreza Bayesteh, Uniwersytet Techniczny „Politechnika Kijowska”, Kijów, Ukraina,
2. Antosz Katarzyna, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska
3. Bakena Mbua Ž. K., mgr inż., Moskiewski Państwowy Uniwersytet Techniczny MAMI, Moskwa, Rosja, e-mail: bamjec@rambler.ru
4. Bandyra Zbigniew, mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska
5. Błaziak Michał, Politechnika Lubelska, Lublin, Polska
6. Borowski Zbigniew, dr inż., Bydgoska Szkoła Wyższa, Bydgoszcz, Polska, e-mail: dzieka-nat.zip@bsw.edu.pl
7. Bożkowska L. W., prof. dr hab. inż., Moskiewski Państwowy Uniwersytet Techniczny MAMI, Moskwa, Rosja, e-mail: iptm@mami.ru
8. Bramowicz M. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska
9. Bromberek Franciszek, doc. dr inż., Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz, Polska, e-mail: bfrank@utp.edu.pl
10. Chernyshev Dmitry E., Wołgogradzki Państwowy Uniwersytet Techniczny, Wołgograd, Rosja,
11. Chomenko Dmitrij, Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
12. Chruściel M., Politechnika Lubelska, Lublin, Polska,
13. Cieślak Robert, mgr inż., Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, Poznań, Polska, e-mail: robert.cieslak@put.poznan.pl
14. Ciszak Olaf, dr inż., Politechnika Poznańska, Poznań, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Polska, e-mail: olaf.ciszak@put.poznan.pl
15. Demkowski Aleksandr, Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
16. Drobotov Aleksey V., Wołgogradzki Państwowy Uniwersytet Techniczny, Wołgograd, Rosja,
17. Duras Tadeusz, mgr inż., Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego, e-mail: tduras-pwsz@wp.pl
18. Gawlik Edward, dr inż., Instytut Technologii Maszyn, Politechnika Krakowska, Kraków, Polska, e-mail: gil@mech.pk.edu.pl
19. Gil Stanisław, dr inż., Instytut Technologii Maszyn, Politechnika Krakowska, Kraków, Polska, e-mail: gil@mech.pk.edu.pl
20. Gromov Victor F., Moskiewski Instytut Lotniczy MAI, Moskwa, Rosja, e-mail: yikirin@mail.ru
21. Hyży Janusz, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, Polska, ios@ios.krakow.pl
22. Jastrzębski Robert, mgr inż. Centrum Badawczo Konstrukcyjne Obrabiarek sp. z o.o., Pruszków, Polska, jastrzebski@cbko.pl
23. Jastrzębski Maciej, mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska, e-mail: m.jastrzebski@imbigs.org.pl
24. Kasprzak Andrzej, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, Polska, ios@ios.krakow.pl
25. Kijewski Piotr, mgr inż., Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska,
26. Klusek Konrad, inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska
27. Kłonica Mariusz, mgr inż., Politechnika Lubelska, Lublin, Polska, e-mail: m.klonica@pollub.pl

28. Komorek Andrzej, mgr inż., Wyższa Szkoła Oficerska Sił Lotniczych, Dęblin, Polska, kom-man@op.pl
29. Korenkov Vladimir, doc. dr inż., Uniwersytet Techniczny „Politechnika Kijowska”, Kijów, Ukraina, e-mail: vkorenkov@gmail.com
30. Koszel Anna, doc. inż., Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
31. Kowalski Tadeusz, dr inż., Politechnika Warszawska, Centrum Badawczo Konstrukcyjne Obrabiarek, Pruszków, Polska, e-mail: t.kowalski@wip.pw.edu.pl
32. Kozioł Stanisław, dr inż., Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, Polska, stanislaw.koziol@itee.radom.pl
33. Kristal G. Mark, prof. dr hab. inż., Wołgogradzki Państwowy Uniwersytet Techniczny, Wołgograd, Rosja, e-mail: crysmar@mail.ru
34. Kuczmazewski Józef, prof. dr hab. inż., Politechnika Lubelska, Lublin, Polska, e-mail: j.kuczmazewski@pollub.pl
35. Kuprowska Iwona, dr, Koncern MAHLE Stuttgart, Niemcy
36. Kuran Marek, dr inż., Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, e-mail: ma-rek.kuran@pwr.wroc.pl
37. Kyrylovych Valerii, prof. dr hab. inż., Żytomirski Państwowy Uniwersytet Techniczny, Żytomierz, Rosja, e-mail: kiril_v@mail.ru
38. Lashyna Yuliya, mgr inż., Uniwersytet Techniczny „Politechnika Kijowska”, Kijów, Ukraina, e-mail: tm_mmi@users.ntu-kpi.kier.ua
39. Lekki Bartłomiej, mgr inż., Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska
40. Łunarski Jerzy, prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska, e-mail: jlkmtiop@prz.edu.pl
41. Magiera Marek, dr inż., Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska, e-mail: magiera@zarz.agh.edu.pl
42. Makarov Aleksandr F., Uniwersytet Przyrody, Społeczeństwa i Człowieka, Dubna, Rosja
43. Matuszewski Maciej, dr inż., Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Bydgoszcz, Polska, e-mail: matus@utp.edu.pl
44. Melnuchyk Petro, prof. dr hab. inż., Żytomirski Państwowy Uniwersytet Techniczny, Żytomierz, Rosja,
45. Musiał Janusz, dr inż., Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz, Polska, e-mail: janusz.musial@utp.edu.pl
46. Oborska Nina, Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
47. Oborskiy Artiem, Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
48. Oborskiy Ivan, prof. dr inż., Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina, e-mail: ivan.oborskiy@mail.ru
49. Oborskiy Siergiej, Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
50. Oroń Grzegorz, mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska
51. Osówniak Paweł, mgr inż., Centrum Badawczo Konstrukcyjne Obrabiarek, Pruszków, Polska
52. Ovsyannikov Dmitriy A., Moskiewski Instytut Lotniczy MAI, Moskwa, Rosja,
53. Pasichnyk Vitalii, prof. dr hab. inż., Uniwersytet Techniczny „Politechnika Kijowska”, Kijów, Ukraina, e-mail: pasichnyk@ukr.net
54. Pergałowski Stanisław, mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska, s.pergalowski@imbigs.org.pl
55. Polyakova Maria, mgr inż., Wołgogradzki Państwowy Uniwersytet Techniczny, Wołgograd, Rosja, e-mail: Polyakova-M-V@yandex.ru
56. Przybyłek Paweł, mgr inż., Wyższa szkoła Oficerska Sił Lotniczych, Dęblin, Polska, e-mail: sgcdr@wp.pl

57. Pysarchuk Oleksandr, prof. dr hab. inż., Żytomirski Państwowy Uniwersytet Techniczny, Żytomierz, Rosja,
58. Rabinovich Leonid, doc. inż., Wołgogradzki Państwowy Uniwersytet Techniczny, Wołgograd, Rosja
59. Reifur Bogusław, dr inż., doc PWr, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, e-mail: boguslaw.reifur@itma.pwr.wroc.pl
60. Rośkowicz Marek, dr inż., Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, Polska, e-mail: marek.roskowicz@wat.edu.pl
61. Rudawska Anna, dr inż., Politechnika Lubelska, Lublin, Polska, a.rudawska@pollub.pl
62. Rychlik Kazimierz, mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska, k.rychlik@imbigs.pl
63. Samborski Tomasz, dr inż., Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, Polska, e-mail: tomasz.samborski@itee.radom.pl
64. Sasiadek M., dr inż., Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Mechaniczny, Zielona Góra, Polska, e-mail: m.sasiadek@iizp.uz.zgora.pl
65. Stadnicka Dorota, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Rzeszów Polska, email: dsktmiop@prz.edu.pl
66. Stelmakh Nataliia, mgr inż., Uniwersytet Techniczny „Politechnika Kijowska”, Kijów, Ukraina, e-mail: stelmakhnv@yandex.ru
67. Stós Jerzy, doc. dr inż., Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, Polska, ios@ios.krakow.pl
68. Streubel Aleksander, prof. dr hab. inż., Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska, e-mail: aleksander.streubel@pwr.wroc.pl
69. Styp-Rekowski Michał, prof. dr hab. inż., Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, e-mail: janusz.musial@utp.edu.pl, Bydgoszcz, Polska
70. Szepe Anna, mgr inż., Centrum Badawczo Konstrukcyjne Obrabiarek, Pruszków, Polska
71. Tylanda Jacek, mgr inż., Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa, Polska, j.tylanda@imbigs.pl
72. Wartanow M. W., prof. dr hab. inż., Moskiewski Państwowy Uniwersytet Techniczny MAMI, Moskwa, Rosja,
73. Węgrzyniak Tadeusz, mgr inż.,
74. Zbrowski Andrzej, dr inż., Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, Polska, e-mail: andrzej.zbrowski@itee.radom.pl
75. Zenkin Anatolij, prof. dr hab. inż., Kijowski Uniwersytet Technologii i Projektowania, Kijów, Ukraina
76. Żurek Jan, prof. dr hab. inż., Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Poznań, Polska, e-mail: jan.zurek@put.poznan.pl

**Artykuły w kwartalniku
„Technologia i Automatyzacja Montażu”
nr 2/2011**

1. *Reifur B., Lekki B.*: Efektywne narzędzia programowe w wyrównowywaniu linii montażowych
2. *Bromberek F., Musiał J., Styp-Rekowski M., Węgrzyniak T.*: Montażowe aspekty produkcji elementów wielkogabarytowych.
3. *Sąsiadek M.*: Wykorzystanie metody FMEA do usprawnienia montażu motoreduktora
4. *Stós J., Kasprzak A., Hyży J.*: Przyrząd montażowy do włączania króćców w wyrobie o złożonej konfiguracji
5. *Samborski T., Zbrowski A., Kozioł S.*: Model mechatronicznego podajnika arkuszy aplikacji poligraficznych
6. *Pergałowski S., Łunarski J.*: Zautomatyzowane wytwarzanie półek meblowych
7. *Kłonica M., Kuczmazewski J.*: Ozonowanie jako metoda aktywowania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych w operacjach klejenia
8. *Rudawska A., Chruściel M.*: Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych lotniczego stopu aluminium
9. *Kijewski P., Rośkowicz M.*: Diagnostowanie węzłów naprawczych wykonanych za pomocą materiałów kompozytowych
10. *Rychlik K., Jastrzębski M., Bramowicz M.*: Modularyzacja konstrukcji w technologii głębokiego wiercenia otworów wiertłami lufowymi
11. *Żurek J., Cieślak R., Duras T.*: Badania czasów montażu sprężarki klimatyzacji metodami chrometrażu i MTM

