

Research on the economic efficiency for technological equipment extending of the kinematic chains on the numerically controlled machines

Badania efektywności ekonomicznej oprzyrządowania technologicznego wydłużającego łańcuchy kinematyczne obrabiarek sterowanych numerycznie

ROKSANA ZDZIARSKA
AGATA BINIEK
DANIEL GROCHAŁA
MIROSLAW PAJOR*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.80>

The article describes the selection of machining holders included in the so called special machining fixture-tools. The equipment presented in the work is readily used by technologists as a solution extending the kinematic chain of the machine tool. It enables multi-axis machining (from many sides) using one item clamping. This paper presents the calculation of productivity and its growth through the use of special equipment. The research was carried out for medium-volume production, which is quite a difficult area in the design of technologies and the study of production costs. In the technical development of tooling and modeling of its usage costs, it was assumed to maintain the required level of dimensional and shape accuracy with a simultaneous significant reduction of operating costs. As part of the work, a model was also developed for determining the break-even point of investment in special machining tools that are used on triaxial milling machining centers.

KEYWORDS: CNC machines, metal cutting, technological equipment, serial production, production economics

W artykule opisano sposób doboru uchwytów obróbkowych, wchodzących w skład tzw. specjalnych przyrządów obróbkowych. Zaprezentowane oprzyrządowanie jest chętnie wykorzystywane przez technologów jako rozwiązanie przedłużające łańcuch kinematyczny obrabiarki. Umożliwia ono prowadzenie obróbki wieloosiowej (z wielu stron) w jednym zamocowaniu przedmiotu. Omówiono metodykę obliczeń produktywności oraz jej wzrostu dzięki zastosowaniu specjalnego oprzyrządowania. Badania prowadzono dla produkcji średnioseryjnej, która jest dosyć trudnym obszarem w projektowaniu technologii oraz badaniu kosztów produkcji. W opracowaniu technicznym oprzyrządowania i modelowaniu kosztów jego użycia założono utrzymanie wymaganego poziomu dokładności wymiarowo-kształtowej z jednoczesną istotną redukcją kosztów operacyjnych. W ramach zrealizowanej pracy opracowano również model do określania prognozy rentowności inwestycji w specjalne przyrządy obróbkowe, które są stosowane na trójosiowych frezarskich centrach obróbkowych.

SŁOWA KLUCZOWE: obrabiarki CNC, obróbka skrawaniem, oprzyrządowanie technologiczne, produkcja seryjna, ekonomika produkcji

Wprowadzenie

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne bardzo często są wyspecjalizowane w wytwarzaniu wyrobów zgodnie ze standardami określonymi za pomocą norm branżowych (IATF ISO 16949 – w motoryzacji, ISO/TC – w lotnictwie i przemyśle aeronautycznym, przepisów Lloyd's Register – w branży morskiej). Ta specjalizacja jest widoczna zwłaszcza w obszarze technologii oraz zapewnienia standardów jakościowych. Obejmuje również obszar badań efektywności ekonomicznej (tzw. controllingu) realizowanych projektów w celu zachowania konkurencyjności na tle innych wytwórców [1].

Jednymi z ważniejszych ograniczeń współczesnej technologii są wielkość zamówień oraz termin dostawy wyrobów. Jednocześnie dzięki współczesnym obrabiarkom CNC (wieloosiowym centrach obróbkowym) coraz łatwiejsza staje się koncentracja technologiczna, pozwalająca na kształtowanie wyrobów o skomplikowanych kształtach i wysokiej dokładności geometrycznej przy ograniczonej liczbie operacji obróbkowych. To sprawia, że czas dostępności maszyn i urządzeń technologicznych jest efektywniej wykorzystywany. Rośnie też wartość współczynnika detalooperacji L_{do} , przypadających na stanowisko robocze:

$$L_{do} = \frac{I_{op}}{I_p}$$

gdzie: I_{op} – liczba wszystkich operacji niezbędnych do wykonania jednej sztuki przedmiotu, I_p – liczba przedmiotów obrabianych w poszczególnych operacjach.

W literaturze funkcjonuje taka klasyfikacja produkcji, w której wyróżnia się jej pięć podstawowych typów, tj. produkcję: jednostkową, małoseryjną, średnioseryjną,

* Inż. Roksana Zdziarska, roksana.zdziarska@zut.edu.pl – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska
Mgr inż. Agata Biniek, agata.biniek@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8676-5607> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska
Dr inż. Daniel Grochała, daniel.grochala@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2553-7739> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska
Dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. ZUT, miroslaw.pajor@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7701-385X> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska

wielkoseryjną i masową [2]. Typ produkcji zależy nie tylko od jej wielkości, lecz także od charakteru. Aby produkcja była jak najbardziej efektywna, bez względu na jej typ należy dążyć do maksymalizacji wartości współczynnika detalooperacji. W procesach technologicznych typowych części maszyn w produkcji średnioseryjnej wartość współczynnika detalooperacji mieści się zwykle w przedziale $0,05 \leq L_{do} \leq 0,2$. Dla technologa jest to jeden z najtrudniejszych obszarów pomiędzy produkcją jednostkową a masową, gdzie przy wykorzystaniu bardzo elastycznych centrów obróbkowych trudno jest ograniczyć liczbę realizowanych ustaleń i sposobów zamocowania przedmiotu, tak aby zapewnić swobodny dostęp do wszystkich powierzchni obrabianych (zwłaszcza w przypadku płyt, korpusów i przedmiotów wieloosiowych). W produkcji średnioseryjnej alternatywą dla zwiększania wartości współczynnika detalooperacji może być użycie specjalnego oprzyrządowania, wydłużającego łańcuch kinematyczny obrabiarki – w ten sposób można ograniczyć całkowitą liczbę operacji obróbki ubytkowej (dzięki koncentracji technologicznej) (rys. 1).

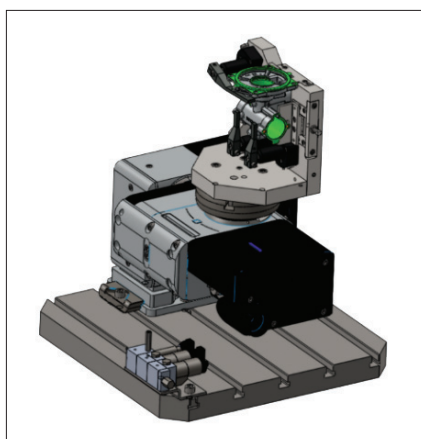


Fig. 1. Tooling for extending the machine tool kinematic chain based on a swivel rotary table and a special machining chuck [3]

Rys. 1. Oprzyrządowanie wydłużające łańcuch kinematyczny obrabiarki na bazie stołu uchylno-obrotowego oraz specjalnego uchwytu obróbkowego [3]

Bazą do budowy specjalnego przyrządu obróbkowego w produkcji średnioseryjnej najczęściej są powszechnie dostępne stoły uchylno-obrotowe (np. firmy pL LEHMANN lub PEISELER), które bez większych problemów można integrować z układem CNC obrabiarki dowolnego producenta. Dzięki takiemu rozwiązaniu wydłużeniu łańcucha kinematycznego obrabiarki jest stosunkowo niedrogi. Ponadto po zastosowaniu w obrotowym stole przyłącza wrzecionowego – podobnego do tego w obrabiarkach – istnieje możliwość szybkiej wymiany specjalnego uchwytu obróbkowego (również z napędem hydraulicznym lub pneumatycznym). Takie oprzyrządowanie pozwala również na obróbkę grupową przedmiotów (rys. 2) – w ten sposób zapewnia się wyższy stopień wykorzystania czasu dostępności maszyn, ponieważ ogranicza się czasy pomocnicze i obsługi.



Fig. 2. LEHMANN tilt and rotary table T3-507510, designed for group mean series workpieces [5]

Rys. 2. Stół uchylno-obrotowy typu T3-507510 firmy pL LEHMANN, przeznaczony do obróbki grupowej przedmiotów [5]

Dodatkowo sama wymiana uchwytu obróbkowego w stole uchylno-obrotowym, zamontowanym na stałe w obrabiarce, znacząco skraca czas przebrojeń maszyny pomiędzy kolejnymi seriami produkowanych wyrobów [4].

Badania efektywności ekonomicznej specjalnego oprzyrządowania

W zrealizowanej pracy badawczej bliżej przyjrano się produkcji średnioseryjnej w kontekście wymaganego oprzyrządowania oraz ekonomiczności opracowanej technologii [6]. Procesy technologiczne w produkcji średnioseryjnej odznaczają się większym stopniem ustabilizowania przebiegu w porównaniu z produkcją jednostkową lub małoseryjną. Tę produkcję charakteryzuje też występowanie asortymentu wyrobów różnego typu – najczęściej o podobnych gabarytach. Pojawia się również powtarzalność produkcji wyrobów w seriach w ustalonym odstępie czasowym [7].

Badania opłacalności zastosowania uniwersalnego oprzyrządowania prowadzono na przykładzie procesu technologicznego przedmiotu wieloosiowego (korbwodu) (rys. 3). Prefabrykatami użytymi w badaniach były półwyroby odlewane ciśnieniowo [8].

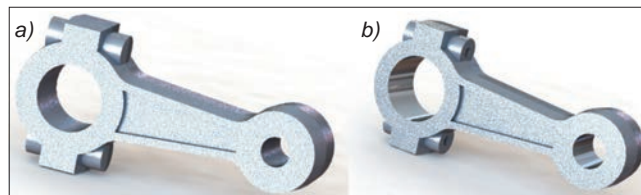


Fig. 3. Part used to test the economic efficiency of special equipment in mean series production: a) semi-finished product, b) connecting rod after processing

Rys. 3. Część wykorzystana do badań efektywności ekonomicznej specjalnego oprzyrządowania w produkcji średnioseryjnej: a) przygotówka, b) korbwód po obróbce

Badanie symulacyjne wykonano dla trójosiowego centrum obróbkowego Mikron VCE 500.

W pierwszym punkcie planu badań założono wyznaczenie pracochłonności dwóch operacji technologicznych. Pierwszą operację prowadzono na wiertarce słupowej uzbrojonej w uchwyt szczękowy BISON 6516-M160 [9], w którym wykonano oraz powiercano pokrywę, a następnie w złożeniu (korbwód – pokrywa) gwintowano. Druga operacja, prowadzona na centrum obróbkowym Mikron VCE 500 (również wyposażonym w uchwyt szczękowy BISON), obejmowała zabiegi zgrubnego powiercania i wykończeniowego rozwiercania pasowanych otworów głównych.

Drugi punkt planu badań zakładał wykorzystanie specjalnego przyrządu obróbkowego – uchylno-obrotowego stołu pL LEHMANN T1507510 z zamontowanym automatycznym uchwytem szczękowym ROEHM RPP-A50. W tym wariantcie proces technologiczny obróbki był realizowany w jednym ustaleniu i zamocowaniu przedmiotu. Za zmianę ustawienia przedmiotu był odpowiedzialny przyrząd obróbkowy sterowany z układu CNC. W ten sposób wyeliminowano ręcznie wykonywaną operację wiercenia i gwintowania, a jednocześnie poprawiono wartość współczynnika detalooperacji (L_{do}).

Czas główny (t_g) zabiegów realizowanych w pierwszym i drugim wariantcie procesu technologicznego był taki sam (zakładano wykorzystanie w kolejnych zabiegach narzędzi tego samego typu, pracujących ze stałymi parametrami technologicznymi), natomiast różne były wartości czasu pomocniczego (t_p) oraz wynikowe wartości czasu wytworzenia (t_w) (tabl. I).

TABLE I. Time components, determined on the work consumption for the technological operation

TABLICA I. Składowe czasu, określane podczas ustalania pracochołności operacji technologicznej

Składniki czasu jednostkowego produkcji t_j	Wariant procesu	10. Wiertarka słupowa 20. Mikron VCE 500	10. Mikron VCE 500
Czas główny t_g [s]		4,88	4,88
Czas pomocniczy t_p [s]		52	35
Czas wytworzenia t_w [s]		56,88	39,88

TABLE II. Value of means of production and shift cost, calculated in simulation studies

TABLICA II. Wartość środków produkcji i koszt zmianowy, obliczony w badaniach symulacyjnych

	Nazwa maszyny + oprzyrządowanie	Koszt środków produkcji [zł]	Koszt produkcji na jednej zmianie [zł]
1	Wiertarka słupowa + Mikron VCE 500	422 000	123,08
2	Mikron VCE 500 + pL LEHMANN T1507510 + ROEHM RPP-A50	510 400	148,87

Na podstawie wyznaczonej pracochołności i czasu dostępności maszyn (przyjętego zgodnie ze standardem VDI 3423) [10] określono czas jednostkowy produkcji t_j (czas wytworzenia jednej sztuki wyrobu) oraz czas potrzebny do wyprodukowania serii pięciu tysięcy korbowodów (co w branży samochodowej jest uznawane za produkcję średnioseryjną). Liczby produkowanych korbowodów w trakcie jednej zmiany to odpowiednio: 472 dla pierwszego i 673 dla drugiego wariantu procesu. Jednocześnie czas potrzebny do wykonania serii (5000 sztuk) to 84h42' w przypadku dwóch operacji oraz 59h24' w przypadku produkcji zintegrowanej w jednej operacji.

W badaniach symulacyjnych ujęto jedynie koszty wynikające z opracowanej technologii oraz zastosowanej maszyny i oprzyrządowania.

Jednocześnie pominięto zmienne składniki kosztów produkcji oraz koszty ogólnozakładowe [11]. Dla obu wariantów przyjęto maksymalny poziom wadliwości produkcji wynoszący 5%. W drodze indywidualnego wywiadu określono wartość obrabiarki oraz oprzyrządowania, wyznaczono również koszty produkcyjne generowane w trakcie jednej zmiany roboczej (tabl. II).

Na podstawie wartości wyznaczonego czasu jednostkowego produkcji oraz czasu wytworzenia serii i kosztów zmianowych obliczono jednostkowy koszt wytworzenia korbowodu. Wyniósł on 1,95 zł dla pierwszego wariantu i 1,65 zł dla drugiego wariantu produkcji. Na tej podstawie wyznaczono próg rentowności w obu wariantach (rys. 4), obliczając jednocześnie jego efektywność ekonomiczną [12, 13]. Z obliczeń wynika, że dzięki zastosowaniu specjalnego oprzyrządowania w drugim wariantie skrócono czas obróbki jednej serii o 30%, co przełożyło się na wydłużenie czasu dostępności maszyn i tym samym na większe zyski. Porównując próg rentowności dla obu wariantów, można zauważyć znaczącą różnicę w liczbie wykonanych korbowodów, przy której przychody ze sprzedaży pokrywają koszty całkowite. Dla wariantu pierwszego jest to 9091, a dla wariantu drugiego – 5883.

Podsumowanie i wnioski

Współczesne obrabiarki dają szerokie możliwości integracji z nowoczesnym oprzyrządowaniem w celu podniesienia efektywności procesów wytwórczych. Dzięki temu można znacznie obniżyć koszty wytwarzania (jednak każdorazowo należy wykonać analizę produktywności oraz określić próg rentowności dla danej inwestycji), wydłużyć czas dostępności maszyn (co oznacza możliwość wyprodukowania większej liczby korbowodów), zwiększyć przychody, a jednocześnie skrócić czas potrzebny do wyprodukowania serii. Ponadto specjalne oprzyrządowanie pozwala na osiągnięcie wyższej dokładności geometrycznej wyrobów – dzięki wykorzystaniu jednego sposobu ustalenia i zamocowania przedmiotu podczas obróbki [3, 14].

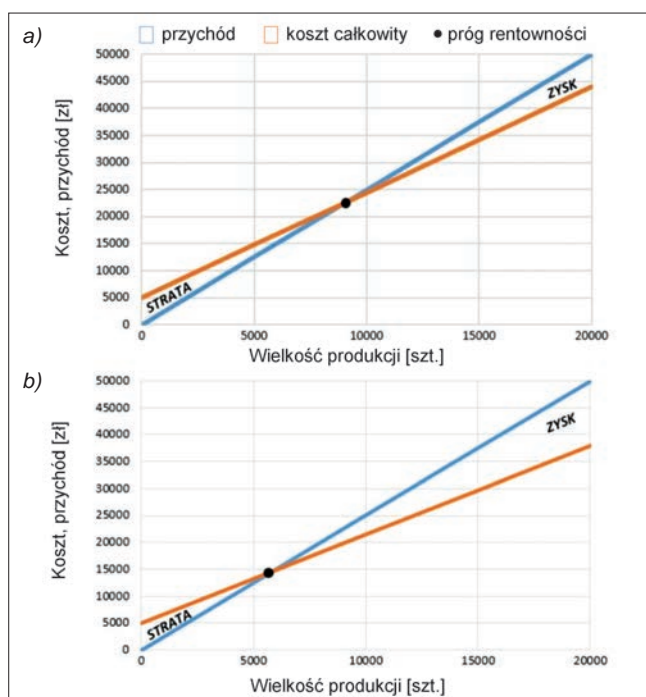


Fig. 4. Graphical representation of the break-even point for the variant I (a) and II (b)

Rys. 4. Graficzne przedstawienie progu rentowności dla wariantu I (a) i II (b)

LITERATURA

- [1] Hamrol A., Zerbst S., Bozek M., Grabowska M., Weber M. "Analysis of the conditions for effective use of numerically controlled machine tools" *Advances in Manufacturing*. Poznań, 2017: 3–12, https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_1.
- [2] Brzeziński M. „Organizacja produkcji w przedsiębiorstwie”. Warszawa: Difin, 2013.
- [3] Abrahamowicz M., Grochała D. „O problemach w projektowaniu specjalnego oprzyrządowania technologicznego do obrabiarek wieloosiowych”. *Przegląd Mechaniczny*. 5 (2015): 40–45.
- [4] Honczarenko J. „Elastyczna automatyzacja wytwarzania: Obrabiarki i systemy obróbkowe”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [5] Jaworski J., Kluz R., Trzepieciński T. „Analiza zużycia narzędzi skrawających podczas obróbki wspornika silnika spalinowego”. *Mechanik*. 3 (2015): 109–115, <http://dx.doi.org/10.17814/mechanik.2015/3.124>.
- [6] www.arcotools.pl/oferta-lehmann (dostęp: 06.07.2019 r.).
- [7] Karpiński T. „Inżynieria produkcji”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
- [8] Perzyk M. „Odlewnictwo”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [9] www.bison-bial.pl/imadla/6516-m160 (dostęp: 06.07.2019 r.).
- [10] Standard VDI 3423:2011 Technical availability of machines and production lines. Terms and definitions, determination of time periods and calculation.
- [11] Tymowski J. „Technologia budowy maszyn”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1989.
- [12] Gabrusewicz W. „Podstawy analizy finansowej”. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2002.
- [13] Sawicki K. „Rachunkowość finansowa”. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2005.
- [14] Bachtia-Radka E., Dudzińska S., Grochała D., Berczyński S., Olszak W. „The influence of CNC milling and ball burnishing on shaping complex 3D surfaces”. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 5, 1 (2017): 015001.