

Automatyzacja procesów spawalniczych a efektywność logistyki produkcyjnej

Natalia Zawierucha

Nataliazawierucha1997@gmail.com; ORCID: 0009-0004-7874-367X
Uniwersytet WSB MERITO we Wrocław, Filia w Opolu, Polska

Anna Orzel

anna.orzel@wroclaw.merito.pl; ORCID: 0000-0002-7518-6480
Uniwersytet WSB MERITO we Wrocław, Polska

Adam Busławski

adam.buslawski@opole.merito.pl; ORCID: 0000-0002-6329-278X
Uniwersytet WSB MERITO we Wrocław, Polska

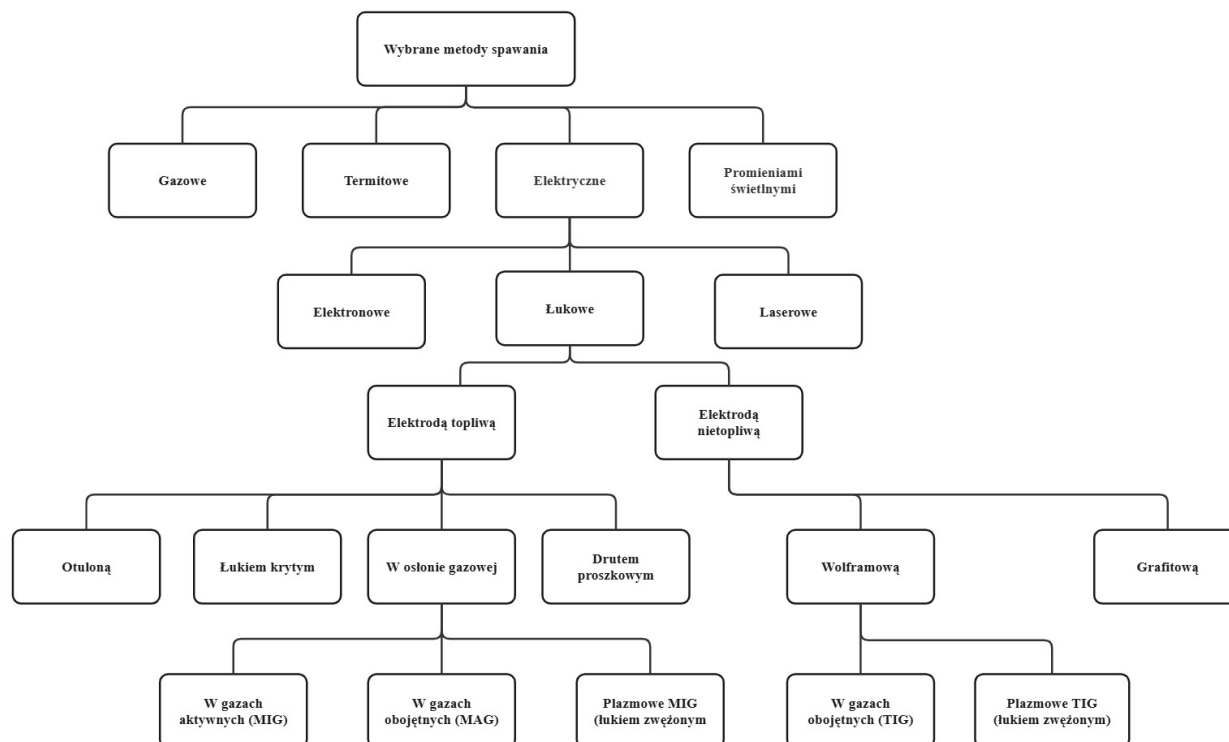
1. Wprowadzenie

Spawalnictwo stanowi jedną z podstawowych technologii polegających na przetwarzaniu i łączeniu różnych materiałów. Tym samym od wielu lat determinuje kluczowe procesy wytwórcze w wielu gałęziach przemysłu. W sektorze automotive odpowiada za precyzyjne i powtarzalne łączenie elementów konstrukcyjnych, w przemyśle stoczniowym umożliwia tworzenie masywnych struktur narażonych na ekstremalne warunki pracy, natomiast w branży maszynowej i utrzymania ruchu pozostaje fundamentem niezawodnej produkcji i skutecznych napraw infrastruktury technicznej. W każdym z tych obszarów rośnie jednocześnie zapotrzebowanie na procesy bardziej efektywne, stabilne i lepiej kontrolowane. Odpowiedzią na te potrzeby staje się dynamiczny rozwój automatyzacji i robotyzacji procesów spawalniczych. W ostatnich latach technologie te przeszły drogę od rozwiązań specjalistycznych, stosowanych głównie w dużych zakładach, do powszechnie dostępnych narzędzi, które coraz częściej stanowią standard w nowoczesnej produkcji. Automatyzacja nie tylko podnosi jakość i powtarzalność spoin, lecz także znacząco redukuje ryzyko błędów oraz ogranicza wpływ czynnika ludzkiego na przebieg procesu. W efekcie umożliwia przedsiębiorstwom osiągnięcie większej wydajności przy jednoczesnym obniżeniu kosztów operacyjnych. Warto podkreślić, że automatyzacja spawania wpływa nie tylko na sam proces łączenia materiałów, ale również na efektywność całego systemu logistyki produkcyjnej. Stabilny takt pracy wynikający z robotyzacji stanowisk spawalniczych pozwala na lepsze planowanie przepływu materiałów i minimalizację przestojów produkcyjnych. Przewidywalne czasy cyklu ułatwiają koordynację poszczególnych etapów produkcji. Natomiast utrzymanie właściwego poziomu jakości i procesu wytwarzania przekładają się na ograniczenie zapasów międzyoperacyjnych. W konsekwencji automatyzacja spawalnictwa staje się nie tylko

narzędziem podnoszącym jakość produktu. Jest również kluczowym elementem usprawniającym logistykę produkcyjną i wspierającym konkurencyjność przedsiębiorstwa.

2. CHARAKTERYSTYKA PROCESÓW SPAWALNICZYCH

Cechą charakterystyczną spawania jest utworzenie złącza dwóch lub większej liczby części składowych przez miejscowe doprowadzenie do nich energii cieplnej powodujące ich lokalne stopienie a następnie zakrzepnięcie, dzięki czemu powstaje spoina będąca zasadniczą częścią złącza. Materiałami łączonymi w kontekście podstawowych złączy są zwykle metale i ich stopy o takich samych lub zbliżonych właściwościach fizycznych i chemicznych. Spoina uzyskiwana jest w wyniku stopienia i przemieszania metali podstawowych i dedykowane spoiwa lub wyłącznie w wyniku stopienia tylko ze stopienia materiałów podstawowych [3, s. 23]. W zależności od rodzaju materiału, wymaganej jakości połączenia oraz warunków produkcyjnych i pomocniczych proces ten może być realizowany z wykorzystaniem różnych metod spawania, które różnią się zarówno sposobem generowania energii cieplnej, jak i stopniem możliwości ich automatyzacji. Głównym nośnikiem energii stosowanej w spawalnictwie jest energia elektryczna. W procesach spawalniczych przydatna jest tylko energia cieplna o dużej koncentracji strumienia. Stąd wynika konieczność przetwarzania energii elektrycznej na cieplną o wymaganych parametrach technicznych [10, s. 37-38]. Ze względu na sposób wytwarzania i kontrolowania tak skoncentrowanego ciepła usystematyzowało się kilka podstawowych metod spawania, które obecnie stanowią fundament zarówno tradycyjnych, jak i zautomatyzowanych procesów wytwórczych, rys.1.



Rysunek 1 Klasyfikacja wybranych metod spawania.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [3, s. 22-25].

Wszystkie metody spawania mają wspólną, kluczową cechę jaką jest kontrolowany przebieg procesu, który zapewnia jednolite i pozbawione wad spoiny poprzez regulację temperatury, szybkości, ciśnienia oraz środowiska pracy. Na tej podstawie w praktyce przemysłowej wykształciły się konkretne procesy spawania, które są najczęściej stosowane w różnych branżach: MIG, MAG, TIG, MMA oraz nowoczesne spawanie laserowe, tab. 1.

Metoda spawania	Opis	Zastosowanie
MIG	Jest to spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych lub ich mieszanek.	Wysoka wydajność, dobra jakość spoin, stosowane głównie do aluminium i metali nieżelaznych.
MAG	Jest to spawanie łukowe elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych lub ich mieszanek.	Najczęściej stosowana metoda w przemyśle stalowym, łatwa automatyzacja i robotyzacja.
TIG	Jest to spawanie łukowe elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych.	Bardzo wysoka jakość spoin, niski poziom odprysków, wykorzystywane do precyzyjnych połączeń.
MMA	Jest to spawanie łukowe elektrodą topliwą otuloną, w którym otulina elektrody tworzy	Metoda uniwersalna, możliwość pracy w terenie i w trudnych warunkach środowiskowych.

	osłonę gazową i żużłową chroniącą jeziorko spawalnicze.	
Spawanie laserowe	Jest to proces spawania wykorzystujący skoncentrowaną wiązkę laserową jako źródło energii cieplnej, umożliwiającą uzyskanie wąskich i głębokich spoin.	Bardzo mała strefa wpływu ciepła, wysoka precyzji, powszechne w zautomatyzowanych liniach produkcyjnych.

Tabela 1 Charakterystyka i zastosowanie wybranych metod spawania.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10, s. 19-20, 53, 173, 293].

Każda z nich charakteryzuje się odmienną specyfiką, zakresem zastosowań oraz możliwością doskonalenia w kierunku adaptacji do zrobotyzowanych systemów spawalniczych. Jednak to spawanie laserowe w ostatnich latach zyskało szczególną popularność, stając się jedną z najszybciej rozwijających się i najchętniej wdrażanych metod. Spawanie laserowe to innowacyjna metoda łączenia materiałów dzięki energii skoncentrowanej wiązki laserowej, która topi obszar styku elementu [8, s. 24-25]. Sam proces cechuje się dużą precyzją oraz minimalnym wpływem na strukturę materiału. Warto podkreślić, że spawanie laserowe oznacza:

- dużą czystość i szybkość procesu,
- możliwość łączenia różnych metali,
- łatwość automatyzacji,
- precyzję w łączeniu materiałów cienkich i grubych,
- spawanie przy ciśnieniu atmosferycznym,
- dużą wartość gęstości mocy.

Porównując spawanie laserowe z tradycyjnymi metodami wysuwa się wniosek, że metoda ta staje się coraz częściej stosowana ze względu na wiele zalet [11, s. 29]. W odróżnieniu od tradycyjnych metod, spawanie laserowe umożliwia uzyskanie wąskich, głębokich spoin przy wysokiej prędkości prowadzenia procesu, co istotnie zwiększa wydajność produkcji. Jednocześnie jej wysoka powtarzalność i stabilność parametrów zwracają uwagę na ograniczenia tradycyjnych metod, w których znacznie większą rolę odgrywa czynnik ludzki oraz zmienność warunków pracy. To właśnie w konwencjonalnych procesach spawania najczęściej pojawiają się problemy typowe dla metod manualnych i półautomatycznych. Jakość spoin często odbiega od zakładanych standardów, a błędy operatorów prowadzą do zwiększonej liczby braków i konieczności ponownego wykonania operacji. Sam czas cyklu nie jest stały, ponieważ zależy od tempa i doświadczenia spawacza co w wielu branżach może mieć

negatywny wpływ na płynność produkcji. W konsekwencji konieczne stają się częste poprawki oraz dodatkowa obróbka, co przekłada się na wydajność, takt produkcji oraz poziom zapasów. Z tego względu kluczową rolę w nowoczesnej produkcji odgrywa automatyzacja spawania, która eliminuje większość ograniczeń metod tradycyjnych i zapewnia stabilny i wysoce powtarzalny proces.

3. AUTOMATYZACJA I ROBOTYZACJA PROCESÓW SPAWALNICZYCH

Robot przemysłowy można zdefiniować jako wielofunkcyjny manipulator sterowany i programowany do realizacji różnych zadań, zdolny do przemieszczania materiałów, części lub narzędzi, przeznaczony do zastosowań w automatyzacji przemysłowej. Innymi słowy, roboty przemysłowe są wielofunkcyjne i możliwe do przeprogramowania, dzięki czemu mogą realizować różne funkcje. Skupiając się na spawaniu zrobotyzowanym, proces spawania może być realizowany dzięki wprowadzeniu materiału dodatkowego za pomocą elektrody, lasera lub łuku elektrycznego, który osiąga temperaturę powodującą stopienie metali. W celu przeprowadzenia procesu spawania konieczne jest zastosowanie elementów pomocniczych, takich jak stoły obrotowe lub podobne urządzenia umożliwiające ustawianie spawanych elementów pod różnymi kątami, źródło zasilania oraz oprogramowanie do programowania zadań [1, s. 1-2]. Wymagania stawiane współczesnym wytwórcom przez silną konkurencję rynkową wymuszają ciągłe podnoszenie jakości wyrobów przy jednoczesnej redukcji kosztów ich produkcji. Automatyzacja procesów wytwarzania pozwala na spełnienie tych, pozornie sprzecznych, oczekiwań. Roboty przemysłowe przejmują od pracowników czynności monotonne, uciążliwe i niebezpieczne, umożliwiając jednocześnie bardziej efektywne wykorzystanie ich kwalifikacji oraz posiadanego parku maszynowego. Roboty są niezastąpione w aplikacjach wymagających wysokiej dokładności i powtarzalności procesów. Dodatkowym atutem jest ich duża elastyczność sprzętowa i programowa, dzięki której zmiana profilu produkcji, modyfikacja geometrii wytwarzanych detali, modernizacja stanowiska czy optymalizacja procesu przebiegają stosunkowo łatwo i nie wymagają znaczących nakładów finansowych [6, s. 48]. Od jakiegoś czasu w przemyśle stosowana jest automatyzacja polegająca na stosowaniu automatycznie działających i wyspecjalizowanych urządzeń dostosowanych do wytwarzania określonych wyrobów. Automatyzacja procesów spawalniczych wymaga rozwiązania wielu specyficznych zagadnień raczej nie występujących w innych technologiach. W tym kontekście jedną z kluczowych decyzji staje się odpowiedni dobór metody spawania. Ważną kwestią w procesie projektowania zrobotyzowanego

stanowiska spawalniczego jest wybór technologii łączenia, która zwykle wynika z przyjętej procedury spawalniczej i zależy od wielu czynników, takich jak: rodzaj i grubość materiału spawanego, geometria spoiny, wymagania jakościowe, oczekiwana wydajność, prędkość procesu czy uwarunkowania ekonomiczne. Dobór metody ma bezpośredni wpływ na sposób montażu detali w przyrządach spawalniczych, prędkość cykli, konfigurację robota w trakcie pracy oraz niezbędny osprzęt [5, s. 80]. Właściwe określenie technologii spawania stanowi za razem punkty wyjścia do skutecznej robotyzacji procesu. Spośród wszystkich gałęzi przemysłu robotyzacja odegrała kluczową rolę w procesach spawalniczych. Robot ma nie tylko ułatwiony dostęp do wykonywania spoin o stabilnej jakości, ale również jego zastawanie nie powoduje konieczności wykonywania przebrojeń stanowisk pracy. Spawanie przy zastosowaniu robota zwiększa konkurencyjność, innowacyjność oraz prestiż przedsiębiorstw produkcyjnych [14, s. 20]. Automatyzacja i robotyzacja spawania pozwalają również na znaczące zwiększenie powtarzalności procesu oraz ograniczenie wpływu czynnika ludzkiego na jakość wykonywanych połączeń. Dzięki precyzyjnemu sterowaniu ruchem robota możliwe jest utrzymanie stałych parametrów technologicznych, takich jak prędkość spawania, długość łuku czy energia liniowa, co bezpośrednio przekłada się na jednorodność i wysoką jakość spoin. Ma to szczególne znaczenie w produkcji seryjnej i masowej, gdzie nawet niewielkie odchylenia mogą prowadzić do powstawania wad oraz zwiększenia kosztów braków. Istotnym elementem automatyzacji procesów spawalniczych są nowoczesne technologie wspomagające. Do najważniejszych z nich należą systemy sensoryczne, monitoring łuku spawalniczego, zaawansowane metody programowania robotów oraz integracja stanowisk z systemami zarządzania klasy MRP (Manufacturing Resource Planning) lub ERP (Enterprise Resource Planning). Współczesna robotyzacja procesów spawalniczych wpisuje się w założenia Przemysłu 4.0, który zakłada integrację i inteligentne zarządzanie produkcją. Wdrażanie koncepcji Przemysłu 4.0 wiąże się z cyfryzacją większości procesów bądź ich wybranych etapów, na różnych fazach wytwarzania wyrobu. Celem tych działań jest dostarczenie klientowi produktu dostosowanego do jego indywidualnych preferencji, w akceptowalnym czasie, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów oraz zachowaniu wymaganej jakości. Osiągnięcie tych założeń jest możliwe dzięki integracji procesów logistycznych i produkcyjnych w elastycznym systemie wytwarzania, uwzględniającym zarówno cykl życia produktu, jak i samej linii produkcyjnej. Uwzględniając konieczność wdrażania elastycznej automatyzacji procesów produkcyjnych w celu skrócenia czasu realizacji zleceń oraz zwiększenia dostępnego czasu produkcji. W ten sposób można wyraźnie dostrzec istotny wpływ robotyzacji na sprawność i efektywność realizacji procesów logistycznych [13, s. 285].

4. WPŁYW AUTOMATYZACJI SPAWANIA NA LOGISTYKĘ PRODUKCYJNĄ

Współczesne przedsiębiorstwa dążą do jak najbardziej efektywnego wykorzystania posiadanych zasobów. W obecnej, dynamicznie zmieniającej się i wymagającej, rzeczywistości rynkowej wprowadzanie zmian, modyfikacji oraz działań doskonalących procesy logistyczne stanowi duże wyzwanie dla przedsiębiorstw. W dobie postępu technologicznego, przedsiębiorstwa coraz częściej poszukują najlepiej dopasowanych do swoich potrzeb rozwiązań, w tym najnowszych technik, technologii i metod koordynacji procesów logistycznych [12, s. 71]. Jednym z kluczowych czynników wspierających realizację tego celu jest robotyzacja, która stwarza nowe możliwości rozwoju i optymalizacji procesów. Do najważniejszych korzyści wynikających z jej wdrożenia należą zwiększenie mocy produkcyjnych, ograniczenie przestojów, poprawa wydajności i jakości wytwarzanych wyrobów, a także podniesienie poziomu bezpieczeństwa pracy. Roboty oraz manipulatory przemysłowe stanowią istotną grupę środków automatyzacji wykorzystywanych zarówno w procesach produkcyjnych, jak i logistycznych [2, s. 78]. Automatyzacja procesów spawalniczych w istotny sposób wpływa na stabilność i przewidywalność przebiegu produkcji co stanowi podstawę efektywnej logistyki produkcyjnej. Zastosowanie robotów spawalniczych umożliwia realizację operacji w ściśle określonym, powtarzalnym czasie cyklu. W przeciwieństwie do spawania manualnego, gdzie czas wykonania operacji może się różnić w zależności od operatora czy warunków pracy. Warto podkreślić, że roboty zapewniają wysoką przewidywalność procesów a optymalizacja przebiegu operacji technologicznych sprzyja zachowaniu ciągłości oraz rytmiczności produkcji, które są kluczowe z punktu widzenia organizacji procesów logistycznych. Właściwie przeprowadzone zarządzanie procesami pomocniczymi pozwala zapewnić ciągłość oraz rytmiczność produkcji, przy zachowaniu wysokiej jakości wyrobów gotowych, a w dalszej perspektywie wspomóc minimalizację stanów magazynowych, wpłynąć na poprawę terminowości czy skrócenie czasu produkcji [15, s. 10]. Zatem stabilizacja czasu produkcji jako efekt wdrożenia robotyzacji, umożliwia dokładne i przewidywalne planowanie oraz harmonogramowanie kolejnych etapów procesu wytwórczego. Powtarzalny czas cyklu realizowany przez roboty sprawia, że możliwe staje się precyzyjne określenie rytmu produkcji oraz zarządzanie zasobami i logistyką wewnętrzną przedsiębiorstwa. Kolejną istotną korzyścią jest redukcja odpadów i braków. Dzięki wysokiej jakości spoin wykonywanych przez roboty konieczność poprawek jest ograniczona. Pozwala to zmniejszyć straty materiałowe i zapewnia optymalne wykorzystanie materiałów.

Zmniejszenie przestojów stanowi równie ważny aspekt wspierający efektywność logistyki produkcyjnej. Roboty mogą pracować w trybie ciągłym. W ten sposób eliminują wąskie gardła określone jako najsłabsze ogniwo, które ogranicza pełne wykorzystanie możliwości przedsiębiorstwa czy też systemu produkcyjnego. Wąskie gardła nie tylko uniemożliwiają rozwój, hamują również działania, które należy wykonać w dalszych etapach łańcucha dostaw [9, s. 212-213]. Redukcja wąskich gardeł zapewnia stabilny przebieg procesu produkcyjnego oraz bezpośrednio wpływa na ciągłość realizacji zamówień. Ciągłość i stały takt pracy robotów sprzyja wdrożeniu strategii Just in Time (JIT) oraz synchronizacji materiałowej. Dzięki przewidywalnemu rytmowi produkcji możliwe jest dostosowanie dostaw surowców i komponentów do faktycznego zapotrzebowania, czyli zgodnie z zasadą dokładnie na czas. JIT jest metodą radykalnie obniżającą zapasy oraz przyspieszającą przepływ materiałów, półproduktów i produktów w układzie logistycznym przedsiębiorstwa. Domeną tego systemu jest perfekcyjne dostosowanie wyjść systemu produkcyjnego do potrzeb rynku przy eliminacji wszelkich przestojów i marnotrawstwa, a każdy produkt wykonywany jest w odpowiedzi na konkretną, występującą w danej chwili potrzebę [7, s. 42]. Zastosowanie robotów spawalniczych znacząco wspiera realizację zasad JIT. Powtarzalność i przewidywalność procesów spawalniczych pozwalają osiągnąć wiele korzyści m.in. precyzyjne planowanie dostaw materiałów czy optymalne zarządzanie przestrzenią magazynową. W rezultacie możliwe staje się utrzymanie minimalnych zapasów przy jednoczesnym zapewnieniu płynności produkcji. Równie istotnym aspektem w automatyzacji procesów spawalniczych jest integracja robotów z rozbudowanymi systemami zarządzania przedsiębiorstwem. Coraz częściej w tym celu stosuje się właśnie system MRP. Innym rozwiązaniem jest jego bardziej zaawansowany odpowiednik system ERP. Jest to szeroko zakrojony system informatyczny integrujący i synchronizujący rozmaite działania w rozbudowanym przedsiębiorstwie. Przez system ERP można zarządzać procesami dotyczącymi całego przedsiębiorstwa, takim jak zarządzanie materiałami, planowanie produkcji czy zarządzanie zamówieniami. System ERP integruje wszystkie działania i przepływ informacji odnoszące się do istotnych procesów przedsiębiorstwa [4, s. 405-406]. Ponadto oba systemy realizują szereg istotnych zadań, do których należą śledzenie postępu produkcji, planowanie dostaw oraz optymalizacja przepływu półproduktów. Takie połączenie technologii produkcyjnych z systemami informatycznymi wspiera podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym i zwiększa elastyczność przedsiębiorstwa w reagowaniu na zmieniające się potrzeby rynku. W kontekście automatyzacji spawania ważną rolę pełni lead time, czyli czas realizacji procesu produkcyjnego od momentu złożenia zamówienia do dostarczenia gotowego produktu. Lead time obejmuje moment od

złożenia zamówienia aż do jego dostarczenia. Jest to istotny element, gdyż wpływa na jakość obsługi i satysfakcję klientów. Skuteczne zarządzanie tym czasem umożliwia usprawnienie procesów logistycznych, co przekłada się na szybsze dostawy i lepsze wykorzystanie zasobów, co z kolei podnosi poziom zadowolenia odbiorców [16]. Istotne jest, że automatyzacja spawania oddziałuje na wszystkie elementy logistyki produkcyjnej, dzięki stabilizacji czasu produkcji, redukcji odpadów i braków, zmniejszeniu przestojów oraz integracji z systemami ERP znacząco skraca lead time. Stały takt pracy robotów umożliwia sprawną synchronizację materiałów w systemie Just in Time co w rezultacie wpływa na efektywność całego procesu produkcyjnego i logistycznego.

5. PODSUMOWANIE

Automatyzacja procesów spawalniczych w logistyce produkcyjnej stanowi istotne znaczenie, ponieważ wpływa na stabilność i przewidywalność przebiegu produkcji. Zastosowanie zrobotyzowanych stanowisk spawalniczych przynosi wymierne korzyści organizacyjne i ekonomiczne. Przede wszystkim pozwala na zwiększenie powtarzalności i jakości wykonywanych spoin, co przekłada się na stabilny takt pracy oraz ograniczenie liczby braków i odpadów produkcyjnych. Mniejsza liczba niezgodności wpływa na redukcję zapasów bezpieczeństwa oraz optymalizację procesów logistycznych. Każde przedsiębiorstwo produkcyjne powinno dążyć do wdrażania rozwiązań z zakresu automatyzacji i robotyzacji procesów spawalniczych w celu usprawnienia planowania i harmonogramowania produkcji. Skrócenie czasu realizacji zamówień oraz lead time wpływa na zwiększenie elastyczności i terminowości dostaw. Im większy zakres integracji procesów spawalniczych z systemami informatycznymi oraz nowoczesnymi technologiami, tym większa efektywność całego łańcucha produkcyjnego i logistycznego. Zastosowanie rozwiązań zgodnych z koncepcją Przemysłu 4.0 oraz wykorzystanie narzędzi opartych na sztucznej inteligencji z pewnością usprawni funkcjonowanie przedsiębiorstw i przyczyni się do dalszego rozwoju nowoczesnej logistyki produkcyjnej.

Streszczenie

Automatyzacja procesów spawalniczych stanowi istotny element usprawniania logistyki produkcyjnej w przedsiębiorstwach przemysłowych. Prawidłowo zaprojektowane i wdrożone zrobotyzowane stanowiska spawalnicze mogą przynieść szereg korzyści, takich jak stabilizacja czasu produkcji, redukcja odpadów i braków oraz ograniczenie przestojów. Artykuł przedstawia wpływ automatyzacji spawania na logistykę produkcyjną, ze szczególnym uwzględnieniem integracji procesów spawalniczych z systemami informatycznymi klasy ERP. W

opracowaniu omówiono również znaczenie automatyzacji w skracaniu lead time, synchronizacji przepływu materiałów oraz poprawie terminowości realizacji zamówień.

Słowa kluczowe: automatyzacja spawania, logistyka produkcyjna, robotyzacja, zarządzanie produkcją

LITERATURA

- [1] Curiel, D., Veiga, F., Suarez, A., Villanueva, P., Advances in robotic welding for metallic materials: application of inspection, modeling, monitoring and automation techniques. *Metals*, 2023, 13.4: 711,
- [2] Dobrzański P., Wykorzystanie robotów w procesach logistycznych. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie. Politechnika Śląska*, 2016,
- [3] Ferenc K., *Spawalnictwo*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2016,
- [4] Griffin R. W., *Podstawy zarządzania organizacjami*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2022,

- [5] Kaczmarek W., Panasiuk, J., Zrobotyzowane procesy spawania łukowego. Napędy i Sterowanie, 2019, 21,
- [6] Kaczmarek W., Panasiuk, J., Wykorzystanie robotów przemysłowych w wybranych aplikacjach. Napędy i Sterowanie, 2019, 21.2: 48-51,
- [7] Korczak J., Podstawy logistyki. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2023,
- [8] Lonkwic P., Chołuj M., Usydus G., Stelmachowicz A., Krakowski T., Nowe trendy w spawalnictwie, spawanie laserowe. Obróbka Metalu, 2025,
- [9] Pająk E., Zarządzanie produkcją, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2021,
- [10] Pod red. prof. dr hab. inż. Pilaryczyka J., Poradnik Inżyniera Spawalnictwo, tom 1 i 2., Wydawnictwo WNT, Warszawa 2022,
- [11] Radek N., Laserowe spawanie stali niskowęglowej. Obróbka Metalu, 2023, 2: 29-37,
- [12] Rut J., Andrzejczyk P., Meyer D., Koncepcja unowocześnienia procesów logistycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym–studium przypadku. Ekonomia i Organizacja Logistyki, 2022, 7.4: 69-87,
- [13] Walczak K., Przemysł 4.0 i elastyczna robotyzacja oraz automatyzacja determinantą rozwoju procesów logistyki produkcji. Zeszyty Studenckie „Nasze Studia”, 2024, 14: 284-293,
- [14] Słania J., Dzięcioł R., Automatyzacja i robotyzacja procesu montażu i spawania profili walcowanych część 1 historia. Welding Technology Review, 2015, 87.1,
- [15] Tymińska J., Gudanowska, A. E., Doskonalenie jakości w obszarze logistyki produkcji- wykorzystanie wybranych metod zarządzania jakością w przedsiębiorstwie produkcyjnym, 2021,
- [16] <https://totransport.pl/lead-time-co-to-jest-i-jakie-ma-znaczenie-w-logistyce/> (dostęp na dzień 22.12.2025).