

Nowoczesne przedsiębiorstwa produkcyjne muszą stawać się coraz bardziej elastyczne, aby utrzymać konkurencyjność na zmiennym rynku. Rozwiązaniem jest wdrażanie narzędzi i metod zgodnych z koncepcją Przemysłu 4.0 lub nawet Przemysłu 5.0 w celu budowania autonomicznych i wysoce wydajnych środowisk produkcyjnych. W pracy doktorskiej zbudowano nowe podejście do dynamicznego zarządzania wiedzą techniczną (TK) w procesie produkcji form odlewniczych w przedsiębiorstwie branży motoryzacyjnej i metalowej. Badania koncentrują się w szczególności na produkcji form odlewniczych w sektorze o wysokiej precyzji, w którym jakość produktu w znaczącym zakresie determinuje efektywność realizacji procesu. Wiedza techniczna często pozostaje rozproszona wśród doświadczonych inżynierów lub ukryta w rejestrach maszyn, co sprawia, że realizacja procesu jest w dużym stopniu zależna od indywidualnej wiedzy i podatna na niespójności czy zakłócenia.

Głównym celem pracy doktorskiej jest opracowanie podejścia do dynamicznego zarządzania wiedzą techniczną w celu zbudowania inteligentnego i elastycznego produkcji form odlewniczych i produkcji odlewów. W rozprawie został sformułowany problem badawczy, gdzie poszukiwana jest odpowiedź na pytania: (1) w jaki sposób można pozyskiwać, przechowywać i przekazywać wiedzę techniczną związaną z procesem produkcji form do odlewania ciśnieniowego w celu zwiększenia efektywności tego procesu? (2) w jaki sposób można wspierać decyzje dotyczące zwiększania efektywności procesu odlewania ciśnieniowego na podstawie zgromadzonej wiedzy technicznej?

W środowisku odlewania ciśnieniowego wahania parametrów, takich jak temperatura ciekłego metalu, prędkość wtrysku, szybkość chłodzenia czy wzorce zużycia formy, mają istotny wpływ na jakość produktu oraz trwałość formy. Aby zarządzać tą złożonością pozyskiwania danych, informacji i wiedzy zbudowano stanowisko badawcze, które obejmuje maszynę odlewniczą Bühler 840T oraz czujniki wyposażone w technologię IoT, które zostały rozmieszczone w całej linii odlewania ciśnieniowego w celu rejestrowania parametrów operacyjnych w czasie rzeczywistym, takich jak ciśnienie w gnieździe formy, odczyty z termopar, drgania maszyny, temperatura formy oraz przepływ środka smarującego. Systemy informatyczne klasy ERP i MES są integrowane w celu gromadzenia danych kontekstowych, w tym zleceń produkcyjnych, numerów części, partii materiałowych oraz zmian operatorów. Integracja ta zapewnia, że wiedza techniczna nie jest odizolowana, lecz ściśle powiązana ze środowiskiem produkcyjnym.

Prace badawcze przeprowadzono w następujących etapach:

1. Dokonano charakterystyki przebiegu procesu produkcji form odlewniczych.

Zamodelowano przebieg procesu i zaprezentowano szczegółowy jego przebieg w podziale na następujące etapy: (a) zrozumienie projektu części i potrzeb klienta: od klienta pozyskiwana jest szczegółowa dokumentacja 2D i 3D. Dokumentacja ta jest analizowana w celu zrozumienia tolerancji oraz ograniczeń maszyn do odlewania ciśnieniowego i obrabiarek CNC, na których planowana jest produkcja tych części. (b) projektowanie formy do odlewania ciśnieniowego: forma jest projektowana i wytwarzana wirtualnie, zanim zostanie fizycznie wykonana. Przed rozpoczęciem rzeczywistej produkcji formy cały projekt jest testowany i walidowany w symulacji 3D w celu sprawdzenia procesów krzepnięcia, zjawisk cieplnych podczas odlewania

ciśnieniowego, prędkości wypełniania formy, odprowadzania powietrza itp. (c) produkcja formy: na podstawie projektu formy przygotowywany jest BOM (zestawienie materiałowe), a następnie zamawiane są komponenty od zatwierdzonych dostawców. Każdy element formy przechodzi kolejne procesy technologiczne. (d) próby formy i proces korekcji: zespoły projektowania i produkcji form, inżynierowie procesu produkcyjnego oraz inżynierowie jakości opracowują raporty pomiarowe.

2. Zbudowano bazę wiedzy technicznej dla procesu produkcji form odlewniczych.

Wyróżniono dwa kluczowe obszary wiedzy eksperckiej technicznej. Pierwszy to wiedza techniczna projektowa, która jest zdobywana przez inżynierów konstruktorów dzięki ich doświadczeniu, ciągłemu uczeniu się oraz udoskonalaniu podobnych form lub kolejnych wersji tej samej formy. Do najważniejszych czynników należą: liczba gniazd, lokalizacja linii podziału formy, położenie i wielkość wlewów oraz położenie, wielkość i liczba kanałów odpowietrzających, tak aby zapewnić odpowiedni czas przepływu stopu aluminium i jego krzepnięcia, umożliwiając uzyskanie zarówno wysokiej jakości, jak i najlepszego czasu cyklu. Istotne są również lokalizacja i liczba kanałów chłodzących zapewniających optymalne zarządzanie temperaturą. Projektowanie tolerancji odlewów musi uwzględniać tolerancje wymagane w kolejnych procesach produkcyjnych, takich jak obróbka CNC. Drugi obszar wiedzy eksperckiej to wiedza techniczna inżynierów procesu dotycząca parametrów procesowych oraz kompromisów pomiędzy nimi. Obejmuje ona między innymi czas trwania i ciśnienie hydrauliczne stosowane w różnych fazach procesu, zarządzanie cyklem temperatury formy, temperaturę ciekłego aluminium oraz czas cyklu produkcyjnego części. W rezultacie zbudowano bazę wiedzy technicznej w postaci wiedzy technicznej specjalistów, takich jak inżynierowie projektujący formy, wiedzy na podstawie danych i informacji gromadzonych za pomocą czujników wyposażonych w technologię IoT, zainstalowanych na maszynach do odlewania ciśnieniowego, wiedzy pozyskanej z systemu informatycznego klasy ERP, który jest zintegrowany z maszynami do odlewania ciśnieniowego, oraz danych aktualizowanych przez inżynierów procesu i operatorów produkcji.

3. Opracowano metodę dzielenia się wiedzą techniczną w celu zbudowania inteligentnego i elastycznego procesu produkcji form odlewniczych i następnie sformułowano model predykcyjny do wykrywania zakłóceń w procesie przy zastosowaniu technologii IoT i sztucznej inteligencji.

Model dzielenia się wiedzą z wykorzystaniem podejścia głębokiego uczenia został wytrenowany z wykorzystaniem zestawu danych 9919 instancji z projektu „Valeo_Renault CH”, zawierającego 39 parametrów wejściowych, takich jak temperatura stopu, siła zacisku i czas cyklu. Po przetestowaniu różnych konfiguracji, jednowarstwowy system MLP z 20 ukrytymi neuronami osiągnął dokładność predykcyjną na poziomie 98,94%. Surowe dane (kategoryczne, tekstowe i numeryczne) są wstępnie przetwarzane do formatu czytelnego dla maszyn przy użyciu technik takich jak kodowanie jednokrotne (one-hot encoding) w celu klasyfikacji wieloklasowej (predykcja klas: BAD, LOK, LOT, OK i OUT). Model udostępniania wiedzy technicznej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji dostarcza kierownikowi produkcji alerty w czasie rzeczywistym, umożliwiające podjęcie działań, śledząc

negatywne trendy ciśnienia w gnieździe lub prędkości wtrysku, zanim wystąpią wady lub uszkodzenia maszyny. Ponadto umożliwia prognozowanie zmęczenia podzespołów, aby zaplanować prewencyjną konserwację narzędzi, radykalnie minimalizując przestoje.

4. Opracowano i wykonano system informatyczny wspomagający dynamiczne zarządzanie wiedzą techniczną w dziale serwisowym w procesie produkcji form odlewniczych.

W rezultacie zbudowano system wspomagania decyzji do dynamicznego i elastycznego zarządzania procesem, który zweryfikowano poprzez praktyczne wdrożenie na maszynie odlewniczej Bühler 840T w ramach projektu „Mahle_PSA FH”. System ten pełni funkcję systemu wspomagania decyzji, dzieląc produkcję w czasie rzeczywistym na trzy strefy wizualne:

- ZIELONY (Kontynuuj): Przewidywana liczba dobrych części > 98%.
- ŻÓŁTY (Korekta): Przewidywana liczba dobrych części pomiędzy 95% a 98%; system wysyła alerty (SMS/e-mail) z prośbą o interwencję eksperta w celu zapobiegania przestojom.
- CZERWONY (Zatrzymaj): Przewidywana liczba dobrych części < 95%; system automatycznie wstrzymuje produkcję i powiadamia kierownictwo o konieczności skorygowania procesu.

Zweryfikowano i potwierdzono skuteczność zastosowania proponowanej metody w warunkach rzeczywistych na przykładzie studium przypadku procesu produkcji form odlewniczych i produkcji odlewów.

Zbudowane podejście do dynamicznego zarządzania wiedzą techniczną, zaimplementowane w systemie informatycznym, pozwala na formułowanie rekomendacji dotyczących koniecznych korekt w działaniach w analizowanym procesie lub na predykcję potencjalnych defektów przed ich wystąpieniem. System rejestruje informacje zwrotne od operatorów i wartości mierzonych parametrów w trakcie realizacji procesu produkcji form odlewniczych w celu udoskonalania modeli AI.

Wkładem naukowym do dyscypliny inżynieria mechaniczna jest nowa metoda do dynamicznego zarządzania wiedzą techniczną, której zastosowanie umożliwia rozwój inteligentnego i elastycznego procesu produkcji form odlewniczych. Rozwiązano problem badawczy, tj. zbudowano bazę wiedzy technicznej zaangażowanej w realizację procesu produkcji form odlewniczych w celu zwiększenia efektywności tego procesu. Udowodniono empirycznie, że zastosowanie zbudowanego podejścia skutecznie poprawia efektywność procesu produkcji form odlewniczych, tj.:

- Całkowita wydajność maszyn (OEE): Wzrost o 8%, ze średniej 6-miesięcznej wynoszącej 71% do 78%.
- Redukcja braków: Wskaźnik braków wewnętrznych (części NOK) spadł o 22%, co znacznie zmniejszyło koszty związane ze stratami energii, materiałów i robocizny.
- Żywotność formy: Zaobserwowano 13% wzrost liczby dobrych części wyprodukowanych w całym cyklu życia narzędzia.

- Zrównoważony rozwój: Poprzez optymalizację parametrów i redukcję odpadów, system bezpośrednio wspiera Cele Zrównoważonego Rozwoju (SDG) i cele środowiskowe Przemysłu 5.0.

Ponadto opracowana metoda stanowi oryginalne i uniwersalne rozwiązanie możliwe do zastosowania w badanym procesie produkcji form odlewniczych w przedsiębiorstwach branży motoryzacyjnej i metalowej.