

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Krupicza nt.: „**Technologiczne uwarunkowania wprowadzania Lean Manufacturing w rozwoju prefabrykowanych elementów stalowych na przykładzie krat prasowanych**”

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Wasiak, prof. PB

Promotor pomocniczy: dr inż. Olga Orycz

Podstawa opracowania: pismo WIZ-600.4130.1.2019.JG z dnia 16 lipca 2019 r. Dziekana Wydziału Inżynierii Zarządzania Politechniki Białostockiej

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa, wydana w formie książki, zawiera 140 stron, a w tym: 2 str. spisu treści, 5 str. wykazu skrótów i symboli, 9 str. wstępu, 4 str. spisu literatury (72 pozycje), 2 str. wykazu tabel oraz 4 str. wykazu rysunków. Rozprawa składa się z 4 rozdziałów.

We wstępie Autor przedstawia obszernie genezę pracy podkreślając, że „... *postęp w technologii wytwarzania prefabrykowanych wyrobów stalowych umożliwia uzyskanie wysokiej jakości oraz ich atrakcyjnej ceny, ... umożliwia też przyspieszenie produkcji finalnych produktów...*”, np. w budownictwie. Doktorant odwołuje się do odpowiednich norm, dotyczących wymagań jakościowych. Z kolei projektanci oczekują od producentów jednoznacznego określenia właściwości użytkowych oferowanych elementów prefabrykowanych, lecz często w tym zakresie występują rozbieżności pomiędzy parametrami deklarowanymi i rzeczywistymi.

Analizując ten problem Doktorant słusznie stwierdza, że to „*technologia produkcji generuje zmiany, które nie są uwzględniane w projektowaniu elementów prefabrykowanych*”. Możliwości wyjaśnienia i poprawy tych rozbieżności mgr P. Krupicz upatruje w zastosowaniu współczesnych koncepcji zarządzania procesem produkcyjnym, tj. Lean Manufacturing (szczupłe wytwarzanie) czy też Agile Manufacturing (zwinne wytwarzanie). Do dalszej analizy Autor rozprawy wybrał koncepcję Lean Manufacturing, która jest zorientowana głównie na likwidację marnotrawstwa w produkcji. Jest to trany wybór, bowiem prefabrykowane elementy stalowe – w tym kraty prasowane, są przeznaczone na wyroby o długim cyklu życia.

Wprowadzanie zasad Lean Manufacturing w zakładzie produkcyjnych prowadzi do usprawnienia procesu produkcyjnego, poprawy organizacji pracy, a w konsekwencji do likwidacji (czy też znacznego ograniczenia) marnotrawstwa poprzez: *porządkowanie stanowisk (5S); szybkie przezbrajanie (SMED); kompleksowe utrzymanie ruchu (TPM); rozwijanie celów poziomu operacyjnego (Hoshin Kanri); wprowadzanie usprawnień (Kaizen); sterowanie przepływem produkcji na zasadzie ssącej (Kanban); standaryzację pracy.*

W wyniku przeprowadzonych analiz Doktorant sformułował dwa główne pytania badawcze:

- *w jaki sposób technologia produkcji prefabrykowanego elementu stalowego wpływa na właściwości końcowe tego produktu ?*
- *jakie są konsekwencje zmian w procesie produkcji spowodowane zmianami w projektowaniu w świetle zasad Lean Manufacturing ?*

Trafnie sformułowane problemy badawcze są podstawą metodologicznej koncepcji rozprawy doktorskiej, zaproponowanej hipotezy pracy oraz zastosowanej metodyki badań.

Biorąc pod uwagę poznawcze aspekty, potencjalny zakres implementacji wyników tych badań w warunkach przemysłowych, wybór tematu pracy doktorskiej uznaję za trafny i w pełni uzasadniony do podjęcia. Przedstawiony tok postępowania, cele szczegółowe i zadania do rozwiązania potwierdzają, że mgr inż. Paweł Krupicz jest bardzo dobrze przygotowany do realizacji i rozwiązania postawionych zadań badawczych.

Należy też zwrócić uwagę, iż Doktorant jasno określił (s.19), jakich kompetencji w obszarze inżynierii produkcji spodziewa się nabyć w wyniku zrealizowania tej pracy.

Uwagi:

- w celu szczegółowym nr 1 Doktorant mówi o „... *identyfikacji zjawisk...*”. Sądzę, że powinno się w tym przypadku mówić o zachodzących procesach, które wywołują trwałe skutki, a nie o zjawiskach, jako chwilowym zdarzeniu;
- w tym kontekście cel szczegółowy nr 4 dotyczy „... *opracowania metody oceny interdyscyplinarnej...*” trwałych skutków tych procesów;
- takie ujęcie tych zagadnień potwierdza, wg mnie, cel szczegółowy nr 2, w którym m. in. jest mowa o parametrach „... *wpływających na właściwości końcowe produktu ... oraz o dokładności tych danych...*”;
- przedstawiając metody badawcze Doktorant podaje (s.18, pkt 4), że „w trakcie analizy wyników badań eksperymentalnych wykorzystano metody statyczne”. Wymaga to wyjaśnienia, bowiem np. na s.88 – rys.2.36 są zaznaczone rozrzuty wyników pomiarów modułu Younga, a to wskazuje, że zastosowano metody „statystyczne”.

W rozdziale 1 Autor rozprawy przedstawił przebieg procesu technologicznego w produkcji krat prasowanych, jako przykład prefabrykowanego wyrobu stalowego. Szczegółowo omówił poszczególne etapy procesu wytwórczego, ale także, co uznaję za ważne, scharakteryzował fizyczne podstawy przemian, które mają miejsce w trakcie kształtowania wyrobu. Ta analiza została wykorzystana w dalszej części rozprawy do zaproponowania pewnych zmian w celu efektywnego wdrażania „Lean Manufacturing”.

W kolejnym punkcie tego rozdziału Doktorant krótko scharakteryzował wybrane narzędzia Lean Manufacturing. Na podstawie tej analizy do oceny organizacji procesu wytwórczego krat prasowanych zaproponował mapowanie strumienia wartości VSM (*Value Stream Mapping*). **Ten wybór uznaję za trafny.**

Uwaga: w tekście Doktorant stosuje sformułowania – przykłady: „...*przy pomocy urządzeń...* (s.21); *przy pomocy narzędzia* (s.40), ...”; powinno być: za pomocą urządzeń, itd. (za pomocą „czegoś”, przy pomocy „kogoś”).

Doktorant opracował mapę procesu wg stanu obecnego (rys.1.21) oraz wstępną propozycję mapy stanu przyszłego (rys.1.22). Uzasadniając, że ta propozycja jest „wstępną”, **dr inż. P. Krupicz słusznie stwierdził**, że: „*do pełnej walidacji i potwierdzenia takiej organizacji pracy konieczna jest szczegółowa analiza parku maszynowego producenta oraz dostępnych możliwości zmian...*).

W następnym kroku przedstawił wprowadzenie zasady „przepływu jednej sztuki” (rys.1.23), z której wynika skrócenie czasu realizacji cyklu produkcji, dzięki zastosowaniu systemu organizacji produkcji wg zasady inżynierii równoległej.

Kolejnym etapem poprawy organizacji procesu wytwórczego jest wprowadzenie „ssania sekwencyjnego (*pull*) w procesie cynkowania ogniowego (rys.1.24).

W rozdziale 2 (s.47 – s.98) Autor rozprawy poddał analizie wpływ warunków produkcji na jakość technologiczną (właściwości końcowe) krat prasowanych.

Uwaga: w pierwszym zdaniu Doktorant stwierdza, że: „*parametry produktu, które wpływają na jego właściwości końcowe, wynikają bezpośrednio z używanych metod obliczeniowych*”.

Pytanie: czy o właściwościach końcowych produktu rzeczywiście mają decydować metody obliczeniowe (jeśli są one błędne, to nie należy ich stosować), czy raczej zastosowana konstrukcja i technologia?

Natomiast zależności i obliczenia wybranych parametrów konstrukcyjnych, które zostały zaprezentowane przez Autora rozprawy (wzory 2.1 – 2.39) nie budzą zastrzeżeń. Oryginalną i dobrą propozycją jest podział wyników tych obliczeń na 5 grup wielkości (s.52), których: *wartości są definiowane przez klienta (1); przez klienta lub producenta (2); tylko przez producenta (3); wynikają z zastosowanej technologii i uproszczeń w obliczeniach (4); uwarunkowań prawnych (5).*

Analizując poszczególne warunki i ograniczenia Doktorant na podstawie obliczeń symulacyjnych zaproponował różne warianty rozwiązań projektowych kraty prasowanej. Wyniki tych obliczeń są udokumentowane na rys.2.2 – rys.2.12 oraz syntetycznie zestawione w tab.2.1.

Podobną procedurę zastosował do analizy i oceny wpływu procesu wytwórczego na właściwości końcowe produktu) na przykładzie krat prasowanych, zabezpieczanych antykorozyjnie w procesie cynkowania ogniowego (s.65 – s.92). Został prześledzony proces technologiczny od etapu cięcia blachy do etapu końcowego - cynkowania ogniowego.

Mgr inż. P. Krupicz wykonał odpowiednie obliczenia wartości naprężeń i odkształceń występujących w strefie cięcia arkuszy blachy. Przedstawił wyniki badań struktury metalograficznej (rys.2.17 i rys.2.18) na próbkach pobranych z różnych obszarów cięcia (rys.2.14 i rys.2.15) oraz zmiany granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie badanych próbek (2.19 i rys. 2.20). Przeprowadził też badania wpływu procesu wykrawania na jakość wykonywanych rowków w płaskowniku nośnym w zależności od luzu pomiędzy stemplem i matrycą oraz liczby cykli pracy stempla (wyniki są przedstawione rys.2.23 – rys.2.24).

Ważnym problemem, na który zwrócił uwagę jest deformacja krat jako uboczny, ale istotny efekt procesu wykrawania rowków. Uwidacznia się on szczególnie w procesie montażu krat wielkogabarytowych. Analizując to zagadnienie (rys.2.25) Autor rozprawy również odniósł je do problemów związanych z ukształtowaniem geometrii rowka i obliczeń odkształceń kraty (rys.2.26).

Analizując wpływ procesu wytwórczego na płaskowniki poprzeczne, a także wpływ wciskania płaskowników poprzecznych w płaskowniki nośne na właściwości użytkowe kraty (wyniki badań są przedstawione na rys.2.29 – rys.2.31) dochodzi do ważnego, technologicznego wniosku, iż: *„... nie ma potrzeby wykonywania rowków z występnym zmniejszającym szerokość rowka znacznie poniżej grubości płaskownika poprzecznego, ... bowiem potrzebna jest dużo większa siła do wciskania płaskowników poprzecznych, a siły tarcia decydujące o połączeniu ze sobą płaskowników nośnych i poprzecznych pozostają na podobnym poziomie...”.*

Końcowym procesem w produkcji krat jest proces cynkowania ogniowego w celu zabezpieczenia ich przed korozją. Proces cynkowania ogniowego wskutek wysokiej temperatury może prowadzić do zmiany struktury i parametrów technicznych stali, a w efekcie także do zmiany właściwości mechanicznych kraty. Doktorant stwierdził, że producenci krat prasowanych nie prowadzą identyfikacji właściwości materiału wyjściowego pochodzącego z różnych partii wytwarzania. Dlatego też przeprowadził badania na losowo pobranych próbkach z hali produkcyjnej, a wyniki tych badań zostały przedstawione na rys.33 – rys.2.38. Wykonał również odpowiednie do tych badań obliczenia (zależności 2.47 – 2.54). Komentując uzyskane wyniki Doktorant stwierdza m. in., że:

- *„... sztywność badanych krat ocynkowanych (Z) jest o 45 % większa od sztywności krat nieocynkowanych (S) ...”;*

- „... krata ocynkowana może przenieść ponad dwukrotnie większe obciążenie, niż wynika to ze stosowanej teraz procedury obliczeniowej i wciąż pracować w zakresie odkształceń sprężystych...”.

Pytanie: czy wobec powyższych stwierdzeń właściwe są wartości średniej sztywności badanych krat, podane na s.90, tj.: dla kraty nieocynkowanej oraz dla kraty ocynkowanej ?

W końcowej części tego rozdziału podaje normatywne zalecenia dotyczące okresu użytkowania krat w zależności od warunków ich eksploatacji (tab.2.3). Interesujące i ważne dla użytkowników są także zalecenia opracowane przez Doktoranta, uwzględniające wpływ stopnia korozyjności atmosfery i środowiska eksploatacji na utrzymanie właściwości użytkowych i na technologię elementów ocynkowanych ogniowo (tab.2.4 – tab.2.7). Wynika z nich m. in. celowość modyfikacji procesu wytwórczego i zastosowania technologii cynkowania ogniowego.

Oceniając tę część pracy stwierdzam, że mgr inż. Paweł Krupicz opanował na wysokim poziomie umiejętność analizy oraz syntezy złożonych problemów badawczych, łącząc wyniki badań z interpretacją przyczyn i procesów wpływających na uzyskany efekt.

W rozdziale 3 zostały zawarte propozycje zmian w procesie wytwórczym wg wybranych zasad Lean Manufacturing. Ich głównym założeniem jest likwidacja marnotrawstwa związanego z utratą możliwych do osiągnięcia właściwości wyrobu. Dotyczy to zarówno sfery projektowania, jak i wytwarzania, co zostało syntetycznie ujęte w pracy (s.99-103). Całość tych zagadnień mgr inż. P. Krupicz ujął w tab. 3.1, w której zaproponował „konieczne zmiany w klasycznym procesie wytwórczym”. Natomiast w tab.3.2 przedstawił propozycje „koniecznych zmian w procesie wytwórczym działającym zgodnie z zasadami Lean Manufacturing”. Dokonał też identyfikacji potencjalnych czynności, które nie dodają wartości, ale są niezbędne ze względu na proces wytwórczy (*muda I-go rodzaju*) oraz czynności, które są zbędne i nie dodają wartości do wyrobu (*muda II-go rodzaju*). Te scenariusze działań zostały ujęte w tab.3.3. – tab.3.4.

Do syntetycznej, ilościowej oceny wpływu zmian w projektowaniu na poszczególne rodzaje marnotrawstwa, zdefiniowane wg Lean Manufacturing i powstające w procesach wytwórczych prefabrykowanych elementów stalowych, Autor rozprawy zastosował wielokryterialną analizę porównawczą. Jej zaletą jest możliwość skorzystania z cech mierzalnych, określonych liczbowo oraz cech niemierzalnych, które nie dają się bezpośrednio ująć w postaci liczbowej¹. Wówczas cechy niemierzalne mogą być skwantyfikowane (przykład – tab.3.5) i również wyrażone w postaci liczbowej za pośrednictwem przyjętej arbitralnej skali ocen.

W sformalizowanym zapisie przedstawia to macierz (wzór 3.4), w której w wierszach znajdują się miary cząstkowe poszczególnych wariantów, a w kolumnach miary cząstkowe wszystkich wariantów zgodnie z przyjętym kryterium. Ocena każdego z rozwiązań jest dokonywana za pomocą syntetycznego wskaźnika (zależność 3.6).

Korzystając z ocen panelu eksperckiego Doktorant wyznaczył wagi cząstkowe poszczególnych *mud* w procesie wytwarzania krat prasowanych (tab.3.6) oraz klasyfikację punktową *mud* wraz z obliczonymi wartościami wskaźników (tab.3.7 i tab.3.8). Zwraca jednak uwagę na to, że wprowadzenie jednocześnie kilku wariantów działań projektowych likwidujących marnotrawstwo, wymaga ponownej analizy z nowym wariantem, „... jako realizacja wspólna kilku działań”.

Wprowadzanie wszelkich działań Lean Manufacturing powinno odbywać się z uwzględnieniem oczekiwań klienta, jak też i możliwości przedsiębiorstwa. Dla zobrazowania tej sytuacji Doktorant wykonał analizy i obliczenia wskaźników rozwoju działania dla różnych dwóch scenariuszy, a wyniki przedstawił w tab.3.9 i tab.10.

¹ można w tym celu zastosować metodę Saty’ego – Analityczny Proces Hierarchiczny (AHP)

Rozdział 4 – podsumowanie i wnioski zawiera zwięzłą syntezę dokonań Autora rozprawy. Opracowana metoda interdyscyplinarnej oceny kierunków rozwoju produkcji prefabrykowanych elementów stalowych – krat prasowanych została pozytywnie zweryfikowana, a tym samym potwierdzona została trafność hipotezy pracy. Doktorant wyodrębnił 7 głównych działań, które redukują marnotrawstwo w produkcji prefabrykowanych elementów stalowych na przykładzie krat prasowanych wskazując, że największe możliwości osiągnięcia korzystnych efektów tkwią w cynkowaniu ogniowym.

Doktorant ma także świadomość, że zaproponowane w pracy metody obliczeniowe oceny marnotrawstwa (wartości *mudy*) w przedsiębiorstwie oraz interdyscyplinarnej oceny kierunków rozwoju technologii prefabrykowanych elementów stalowych bazują na szacunkowych danych, ustalanych na podstawie opinii ekspertów. Dlatego też prace badawcze powinny zmierzać do opracowania wiarygodnych ocen wag poszczególnych kryteriów oraz sposobów szacowania ich wartości.

Przedstawiona przeze mnie skrótkowa charakterystyka opiniowanej rozprawy doktorskiej w pełni potwierdza, że mgr inż. Paweł Krupicz gruntownie przemyślał koncepcję podjętej rozprawy doktorskiej. Potwierdził, że jest bardzo dobrze przygotowany do prowadzenia prac badawczych o czym świadczą: rzeczowa, merytoryczna analiza i synteza literatury, szerokie wykorzystanie wiedzy z zakresu planowania i organizacji badań, modelowania i symulacji komputerowej, weryfikacji opracowanych procedur z uwzględnieniem warunków przemysłowych oraz umiejętne i na wysokim poziomie opracowanie wyników badań.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam w pełni pozytywnie**, albowiem zawiera ona spójną merytorycznie analizę stanu techniki i technologii produkcji prefabrykatów stalowych, propozycję logicznych procedur do rozwiązania zaproponowanych zadań badawczych, opracowanie końcowych, wariantowych działań we wdrażaniu metody Lean Manufacturing w przedsiębiorstwie produkującym kraty prasowane.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego, związanego z wdrażaniem narzędzi Lean Manufacturing, eliminujących marnotrawstwo w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Opracowanie edytorskie rozprawy jest bardzo staranne.

Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się obecnie w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna” (wcześniej inżynieria produkcji) posiada oryginalne cechy nowości oraz znaczące walory użyteczne. W mojej ocenie rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Krupicza nt.: „Technologiczne uwarunkowania wprowadzania Lean Manufacturing w rozwoju prefabrykowanych elementów stalowych na przykładzie krat prasowanych” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. oraz ustawa z dnia 3 lipca 2018 r) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 31 lipca 2019 r.

