

DOSKONALENIE PROCESU TECHNOLOGICZNEGO KLEJENIA METODĄ SIX SIGMA

Władysław ZIELECKI, Jarosław SĘP

Streszczenie: W pracy przedstawiono podstawowe wiadomości z zakresu technologii klejenia oraz doskonalenia produkcji metodą Six Sigma. Realizacja projektu Six Sigma pozwoliła zwiększyć zdolność produkcyjną procesu klejenia stali S235JR kompozycją klejową złożoną z żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC z $Cpk = 0,53$ do $Cpk = 1,31$. Zastosowanie analizy wariancji *One-way ANOVA* oraz wykresów *Boxplot*, pozwoliło wskazać obszary wymagające doskonalenia.

Słowa kluczowe: klejenie, wytrzymałość połączeń klejowych, metoda Six Sigma

1. Wprowadzenie

Klejenie należy do najnowocześniejszych technologii łączenia części maszyn. Polega ono na wprowadzeniu pomiędzy powierzchnie łączonych elementów cienkiej warstwy kleju – substancji posiadającej zdolność trwałego łączenia powierzchni dwóch materiałów dzięki działaniu sił przyczepności do powierzchni klejonej (adhezji) i sił spójności wewnętrznej (kohezji). Miejsce połączenia dwóch lub więcej elementów konstrukcyjnych za pomocą kleju nazywane jest złączem klejowym, połączeniem klejowym lub adhezyjnym [1,2,3]. Produkcja nowych klejów o znacznie lepszych właściwościach powoduje dynamiczny rozwój tej technologii i zastępowanie nią tradycyjnych sposobów łączenia – spawania, lutowania, nitowania oraz zgrzewania.

Podstawową zaletą klejenia jest możliwość łączenia praktycznie wszystkich materiałów konstrukcyjnych. Dotyczy to łączenia metali z metalami, takimi jak stal, stopy aluminium, magnezu, tytanu, miedzi oraz metali z niemetalami np. z drewnem, tworzywami sztucznymi, gumą, szkłem. W niektórych przypadkach klejenie jest jedynym sposobem łączenia różnorodnych materiałów. Klejenie pozwala łączyć materiały o bardzo dużej różnicy grubości oraz bardzo cienkich elementów. Warstwa kleju izoluje łączone metale, dzięki czemu zabezpiecza przed korozją stykową powodowaną różnymi potencjałami łączonych metali. Połączenia klejowe zapewniają dobrą szczelność konstrukcji oraz posiadają zdolność tłumienia drgań.

Oprócz zalet, połączenia klejowe i technologie ich wykonywania posiadają wady i ograniczenia ich stosowania. Zaliczyć do nich można mały zakres dopuszczalnej temperatury eksploatacji (420–570 K), małą odporność na odrywanie, niejednokrotnie długi czas utwardzania prowadzonego w podwyższonych temperaturach i znacznych naciskach, konieczność stosowania specjalnych sposobów przygotowania powierzchni celem zapewnienia dobrej adhezji kleju. Problemy związane z dotrzymaniem reżimów technologicznych podczas formowania złączy klejowych powodują pogorszenie ich właściwości wytrzymałościowych. Różnorodność czynników wpływających na jakość połączeń klejowych powoduje, że doskonalenie klejenia najlepiej realizować z zastosowaniem metody Six Sigma umożliwiającej eliminację zmienności procesów.

1.1. Technologia klejenia

Proces technologiczny klejenia rozpoczyna ciąg operacji, których celem jest właściwe przygotowanie powierzchni łączonych części. Przygotowanie powierzchni do klejenia powinno zapewnić zadziałanie wszystkich mechanizmów wiążących (natury fizycznej, chemicznej i mechanicznej). Uzyskanie mocnych wiązań adhezyjnych w połączeniu klejowym jest możliwe wówczas gdy proces przygotowania powierzchni spowoduje:

- usunięcie z łączonych części wszystkich zanieczyszczeń powierzchniowych,
- uzyskanie największego rozwinięcia powierzchni,
- uzyskanie dobrego uaktywnienia powierzchni.

W warunkach produkcyjnych uzyskanie wymienionych efektów realizowane jest różnymi metodami obróbki chemicznej lub mechanicznej.

Obróbka mechaniczna umożliwia ukonstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni zapewniającej maksymalne jej rozwinięcie, lecz nie gwarantuje ona dobrego uaktywnienia powierzchni. Realizowana jest ona różnymi metodami obróbki mechanicznej (piaskowanie, obróbka strumieniowo-ścierna, śrutowanie, kulkowanie, szlifowanie, szczotkowanie, skrobanie), a opis technologii przygotowania powierzchni zawiera informacje o stosowanych materiałach lub narzędziach ściernych (np. wielkości ziaren elektrokorundu stosowanego do obróbki strumieniowo-ścierniej, ziarnistości papieru ściernego) oraz parametry realizacji operacji obróbki mechanicznej.

Rzadziej proces przygotowania powierzchni zawiera informację o ukonstytuowanej strukturze geometrycznej powierzchni. Najczęściej chropowatość ukonstytuowanej powierzchni opisywana jest parametrami wysokościowymi profilu chropowatości: średnim arytmetycznym odchyleniem rzędnych profilu Ra lub maksymalną wysokością profilu chropowatości Rm [1, 2, 3]. W pracach [4, 5] wykazano natomiast, że chropowatość powierzchni przygotowanej do klejenia powinna być charakteryzowana współczynnikiem długości profilu chropowatości l_r , średnim arytmetycznym pochyleniem profilu chropowatości Rda , średnim kwadratowym pochyleniem profilu chropowatości Rdq lub parametrami hybrydowymi: średnią arytmetyczną krzywizną wierzchołków Ssc , rozwiniętym polem międzyfazowym Sdr oraz nachyleniem średniokwadratowym Sdq .

1.2. Metoda Six Sigma

System Six Sigma został wdrożony po raz pierwszy przez Boba Galwina w Motoroli [6]. Współcześnie Six Sigma definiowana jest jako strategia zwalczania zmienności i marnotrawstwa we wszystkich procesach realizowanych w przedsiębiorstwie, poprzez realizację projektów doskonalenia, w których przetwarzane są dane pochodzące z pomiarów z wykorzystaniem złożonych narzędzi statystycznych. Podstawowymi elementami strategii Six Sigma są:

- nowa definicja jakości,
- metodologia,
- infrastruktura.

W Motoroli przyjęto filozofię, według której „jakość nie może kosztować”, musi być ona „darmowa” a dodatkowo powinna generować zyski. W strategii Six Sigma filozofia Motoroli pozwoliła zdefiniować jakość jako „prawo do wartości”. W takim ujęciu jakością nie jest zaspokojenie potrzeb klienta lecz dostarczenie klientowi wyrobu o pewnej wartości, posiadającego pożądane przez niego cechy użytkowe, niezawodnościowe, estetyczne, za które jest skłonny zapłacić, przez co producent wyrobu uzyskuje uzasadnione prawo do

wartości czyli zysku.

Strategia Six Sigma stosuje nową, odmienną koncepcję rozwoju opartą na trwających 2-3 miesiące projektach doskonalenia, uruchamianych kolejno w kluczowych obszarach (procesach) przedsiębiorstwa. Każdy z projektów przebiega według ściśle określonego porządku, w oparciu o algorytm DMAIC (z ang. **D**efine - definiuj, **M**easure - mierz, **A**nalyze - analizuj, **I**mprove - poprawiaj, **C**ontrol - nadzoruj) z zastosowaniem odpowiednich narzędzi statystycznych [7].

Oprócz odpowiedniej metodologii, do stosowania strategii Six Sigma niezbędna jest również odpowiednia infrastruktura (tab. 1). Strategia Six Sigma wymaga stworzenia grupy osób (ok. 1% załogi), bezpośrednio zaangażowanych w realizację projektów Six Sigma, którym przydzielono zadania i odpowiedzialności.

Projekt doskonalenia – projekt Six Sigma składa się z następujących elementów:

- Istotny problem, przeznaczony do rozwiązania. W strategii Six Sigma problemem jest każda nieakceptowalna różnica pomiędzy stanem obecnym a pożądanym.
- Proces, w obrębie którego tkwi rozwiązywany problem.
- Zespół dedykowany do rozwiązania problemu. Skład tego zespołu zależy od wielu czynników np. od charakteru problemu czy od obszaru, w którym problem występuje. Aby zespół mógł być skuteczny, musi być dobrany pod kątem konkretnego problemu.
- Lider zespołu w postaci Black Belta lub Green Belta.
- Przyjęte miary i wskaźniki opisujące analizowany proces, problem i postęp w projekcie. Opisują one zarówno sam problem, ale też zjawiska powiązane. Przyjęte miary i wskaźniki powinny w sposób prosty i zrozumiały informować o postępie w projekcie.

Tabela 1. Elementy infrastruktury Six Sigma [6]

Element infrastruktury	Odpowiedzialność	Ilość w przedsiębiorstwie
Naczelne kierownictwo	Motywowanie, przewodzenie, zapewnienie długoterminowej wizji, przełamywanie barier	
Czempion	Zapewnienie zasobów niezbędnych do realizacji projektów, wybór i selekcja kandydatów na Black Belt, kontrola przebiegu wdrożenia	1 na jednostkę organizacyjną
Master Black Belt	Wybór i szkolenie kandydatów na Black Belt, wspieranie Black Belts, nadzór nad projektami, nadzór nad szkoleniami dla Green Belts	1 na 10 Black Belts
Black Belt	Realizacja projektów Six Sigma, szkolenie Green Belts	1 na 100 pracowników
Green Belt	Kierownicy zespołów, pomoc Black Belts w realizacji projektu	Ok. 25% załogi (działają na rzecz Six Sigma tylko w części swojego czasu pracy)

Zastosowanie Six Sigma przynosi rzeczywiste, wymierne korzyści. Pionierzy Six Sigma – Motorola, General Electric, American Express zaoszczędziły miliardy dolarów. Oprócz wymiernych oszczędności stosowanie Six Sigma wywołuje w organizacji pozytywne zjawiska takie, jak np.: poprawa jakości pracy zespołowej, poszerzenie wiedzy o produkcji i procesie, poprawa komunikacji czy zwiększenie zadowolenia pracowników.

2. Doskonalenie procesu klejenia metodą Six Sigma

2.1. Charakterystyka procesu klejenia

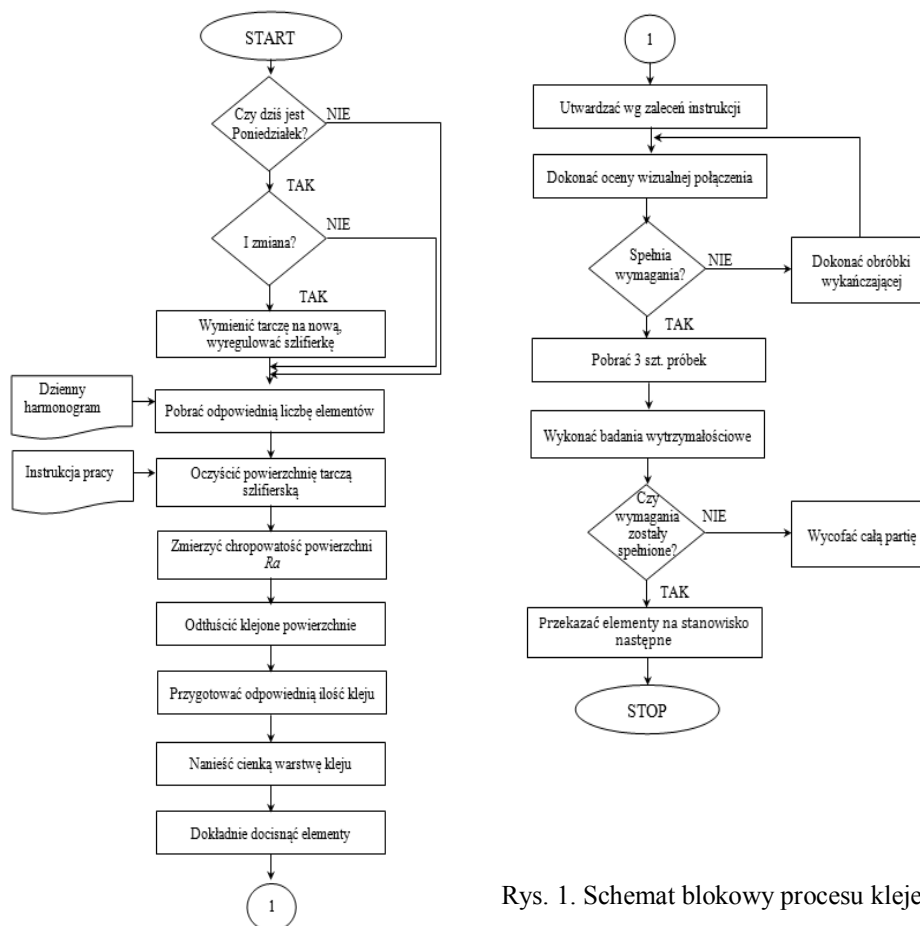
Proces technologiczny polega na sklejeniu 2 części fotela samochodowego wykonanych ze stali S235JR kompozycją klejową złożoną z żywicy epoksydowej Epidian 5 z utwardzaczem PAC (połączonych w proporcji 100 części masowych żywicy i 80 części masowych utwardzacza). W trakcie procesu klejenia wykonywana jest operacja czyszczenia realizowana tarczą z nasypem diamentowym $\varnothing 100$ mm (producent Instytut Technologii Lotniczej UkrNIIAT w Kijowie), parametry: prędkość $v = 8,4$ m/s, posuw i docisk ręczny połączona z pomiarem średniego arytmetycznego odchylenia rzędnych profilu chropowatości od linii średniej Ra (ukonstytuowana powierzchnia powinna posiadać $Ra = 16 - 17$ μm), operacja odtłuszczenia realizowana acetonem w myjce ultradźwiękowej przez okres 5 min, operacji klejenia polegającej na umieszczeniu na powierzchni łączonych części cienkiej warstwy kleju, złożeniu części w uchwycie montażowym oraz sieciowania realizowanego w temperaturze 20°C pod naciskiem $0,05$ MPa. Operacja wykonywana jest przez 2 pracowników, przez dwie zmiany. Z każdej partii połączeń wykonanych na zmianie pobierane są 3 próbki, które poddawane są statycznej próbie ścinania. Wykonane połączenia klejowe powinny posiadać wytrzymałość na ścinanie większą od $10,5$ MPa. Co pięć dni, w poniedziałek na pierwszej zmianie wymieniana jest tarcza szlifierska. Schemat blokowy procesu klejenia przedstawiono na rys. 1.

Prowadzone badania wytrzymałościowe wykazują, że ok. 7% wykonanych połączeń posiada wytrzymałość na ścinanie mniejszą od $10,5$ MPa. Dążąc do zapewnienia większej satysfakcji klienta zarząd przedsiębiorstwa postanowił udoskonalić proces klejenia metodą Six Sigma.

2.2. Projekt Six Sigma

Prowadzone badania wytrzymałościowe wykazały niską jakość wytwarzanych połączeń klejowych. Zarząd postanowił rozwiązać ten problem poprzez zrealizowanie projektu Six Sigma. W tym celu powołany został zespół złożony z Back Belta, kierownika linii produkcyjnej, konstruktora, technologa, przedstawiciela służb jakościowych oraz dwóch pracowników wykonujących połączenia klejowe. Zespół opracował kartę projektu Six Sigma (rys. 2) oraz diagram SIPOC (rys. 3), na którym zaznaczono wejście i wyjście procesu klejenia oraz cztery główne jego fazy. Na diagramie SIPOC podano również wymagania jakościowe dotyczące wytrzymałości na ścinanie (maksymalnie $0,5\%$ złączy o wytrzymałości mniejszej niż $10,5$ MPa oraz chropowatość powierzchni $Ra = (16 - 17)$ μm). Zespół zastrzył wymagania jakościowe przyjmując, że dąży do osiągnięcia zdolności procesu klejenia Cpk większej od $1,3$. Na pierwszym spotkaniu zespół dokonał analizy czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych, a jej wyniki przedstawił na wykresie Ishikawy.

W celu określenia stanu wyjściowego, zespół przeprowadził analizę statystyczną wyników badań wytrzymałościowych wykorzystując oprogramowanie Minitab 16 [8]. Wyniki analizy przedstawiono na rys. 5. Wskazują one, że rozkład wyników badań wytrzymałościowych jest zbliżony do rozkładu normalnego natomiast proces klejenia jest niestabilny – zdolność procesu wynosi $Cpk = 0,53$.



Rys. 1. Schemat blokowy procesu klejenia

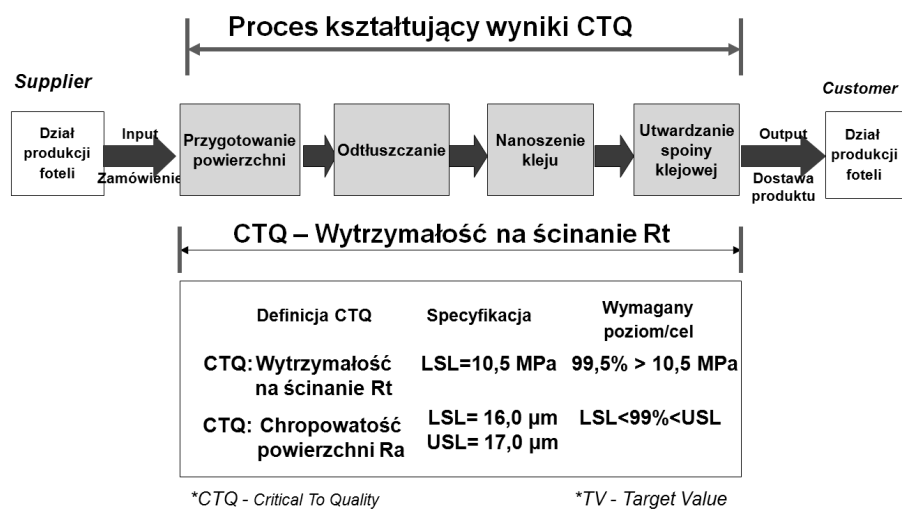
Chcąc zaproponować działania doskonalące, zespół postanowił przeanalizować wpływ pracowników, tarczy oraz dnia tygodnia (czasu użytkowania tarczy ścierniej) na wytrzymałość połączeń klejowych. Analizę wpływu przeprowadzono metodą analizy wariancji *One-way ANOVA* oraz przedstawiono na wykresach *Boxplot*.

Przeprowadzona analiza wariancji *One-way ANOVA* wykazała, że istotny wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych wywierają pracownicy ($p = 0,024$) oraz dzień tygodnia - czasu użytkowania tarczy ścierniej ($p = 0,000$). Natomiast numer tarczy nie wykazał istotnego wpływu na wytrzymałość połączeń klejowych ($p = 0,829$), co wskazuje na dobrą jakość stosowanych tarczy diamentowych. Wyniki analizy wariancji potwierdzają również wykresy *Boxplot* (rys. 6).

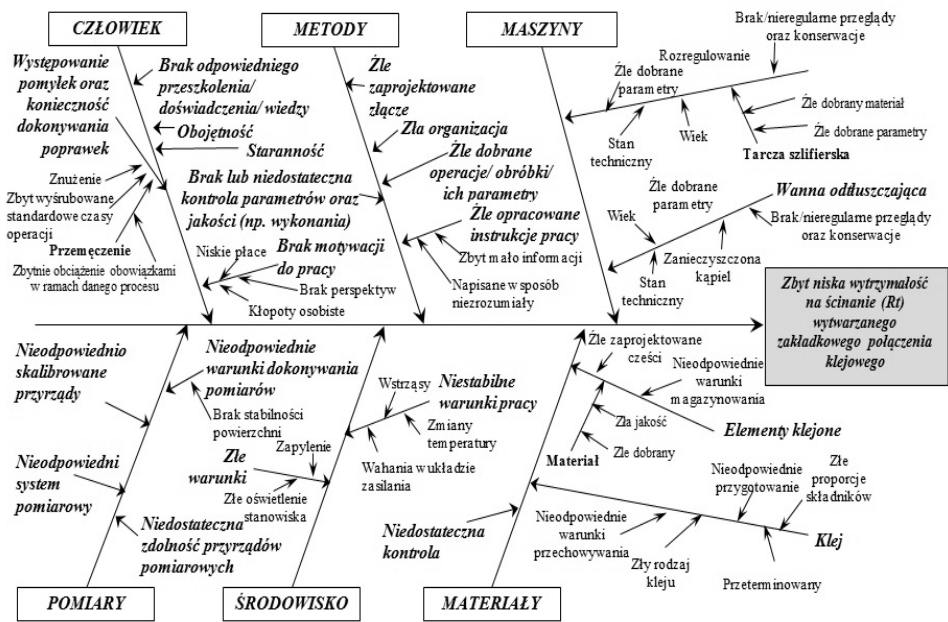
KARTA PROJEKTU SIX SIGMA																		
Tytuł projektu: Zwiększenie wytrzymałości na ścinanie zakładkowego połączenia klejowego							Nr projektu: 891908/56/2013											
Zespół			Opracował:		Osoba	Nazwisko i imię	Dane kontaktowe		Sprawdził i zatwierdził:									
Nazwisko i imię	Rola w zespole	Dane kontaktowe		Data			Podpis	Nr tel.	E-mail	Data	Podpis							
		Nr tel.	E-mail			Champion												
						Właściciel procesu												
CEL PROJEKTU							Data rozpoczęcia:		07.02.2013									
							Spodziewana data zakończenia:		27.06.2013									
							Spodziewane oszczędności/korzyści				Zwiększenie: wytrzymałości na ścinanie Rt, zakładkowych połączeń klejowych, zaдоволення klienta. Zmniejszenie kosztów przeróbek, reklamacji, odszkodowań, itp.							
							Potrzebne zasoby				<table border="1"> <tr> <th>Nazwa zasobu</th> <th>Ilość</th> </tr> <tr> <td>• W pełni wyposażone stanowisko pracy</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>• Pracownicy produkcji</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>• Materiały (Epidian 5, utwardzacz PAC, elementy klejone)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>• Osoba dokonująca pomiarów</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>• Przyrządy pomiarowe</td> <td></td> </tr> </table>			Nazwa zasobu	Ilość	• W pełni wyposażone stanowisko pracy	1	• Pracownicy produkcji
Nazwa zasobu	Ilość																	
• W pełni wyposażone stanowisko pracy	1																	
• Pracownicy produkcji	2																	
• Materiały (Epidian 5, utwardzacz PAC, elementy klejone)																		
• Osoba dokonująca pomiarów	1																	
• Przyrządy pomiarowe																		
OPIS PROBLEMU				Celem projektu jest osiągnięcie wytrzymałości na ścinanie Rt zakładkowych połączeń klejowych, elementów ze stali S235JR klejonych kompozycją Epidianu 5 z utwardzaczem PAC w stosunku 100 części masowych żywicy do 80 części masowych utwardzacza, powyżej 10,5 MPa do 27.06.2013 r.														
Rozpatrywany proces																		
Klejenie elementów ze stali S235JR kompozycją Epidianu 5 z utwardzaczem PAC w stosunku 100 części masowych żywicy do 80 części masowych utwardzacza																		
Definicja problemu																		
Otrzymywane w wyniku powyższego procesu zakładkowe połączenia klejowe osiągają wytrzymałości na ścinanie Rt, mniejszą niż 10,5 MPa.				ETAP			Data ukończenia			Założenia								
<i>Istotność problemu / Skutki nie rozwiązania problemu</i>				planowana			przeżywita			Spotkania odbywać się będą w każdą środę o 11 ⁰⁰ . Decyzje podejmowane będą większością głosów, a w przypadku braku rozstrzygającego wyniku głosowania, głos decydujący należy do lidera.								
Utrata znaczącego klienta, potencjalnych klientów, pozycji na rynku, lojalności klientów skutkująca ich przejściem do konkurencji, spadek sprzedaży, ponoszenie kosztów z tytułu kar, odszkodowań, przeróbek, itp.				DEFINE			27.02.2013					27.02.2013						
				MEASURE			27.03.2013					28.03.2013						
				ANALYZE			27.04.2013					27.04.2013						
				IMPROVE			27.04.2013					27.04.2013						
				CONTROL			27.06.2013			26.06.2013								

Rys. 2. Karta projektu Six Sigma

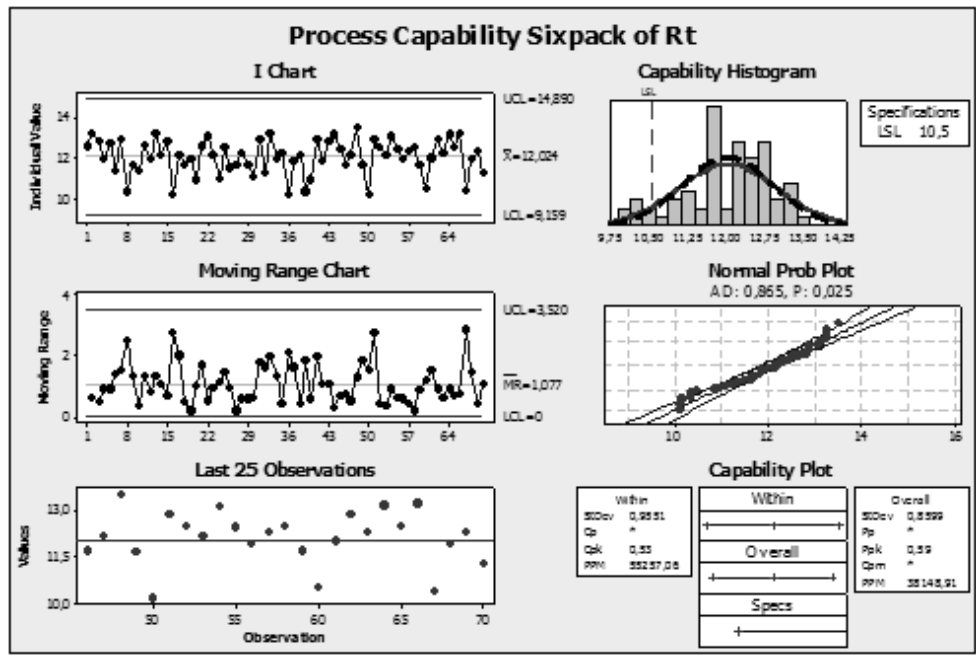
Process Map & CTQ' (SIPOC)



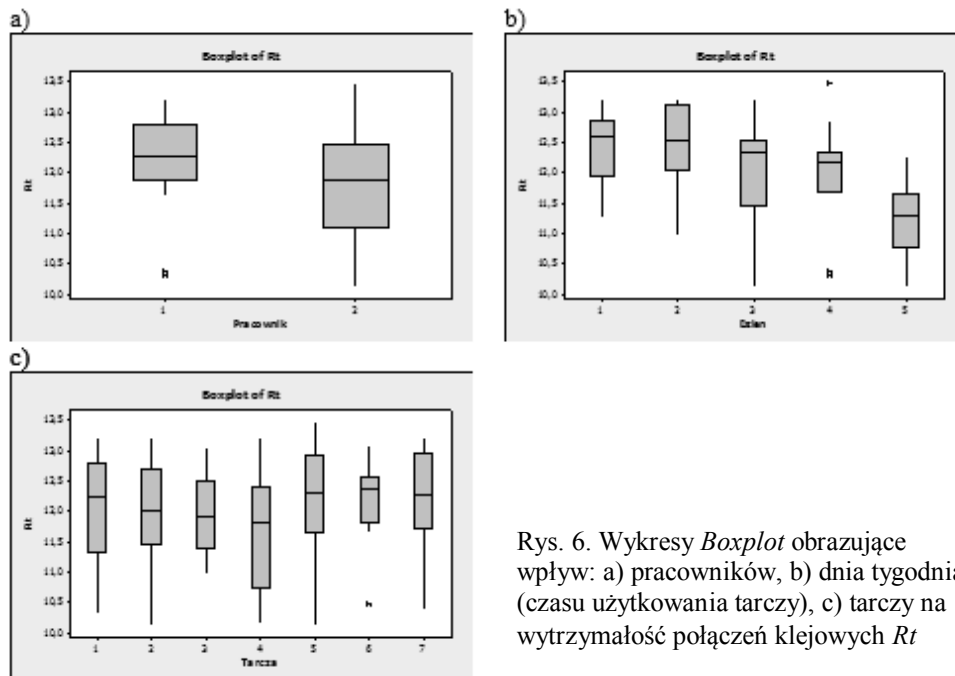
Rys. 3. Diagram SIPOC doskonalonego procesu klejenia



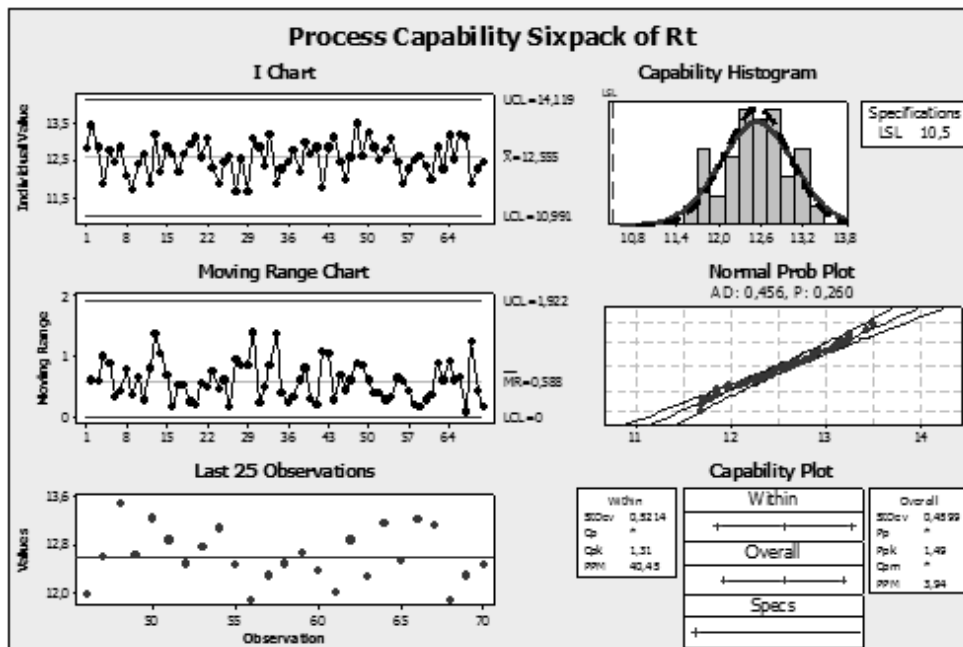
Rys. 4. Diagram Ishikawy procesu klejenia



Rys. 5. Wyniki analizy statystycznej wyjściowego procesu klejenia



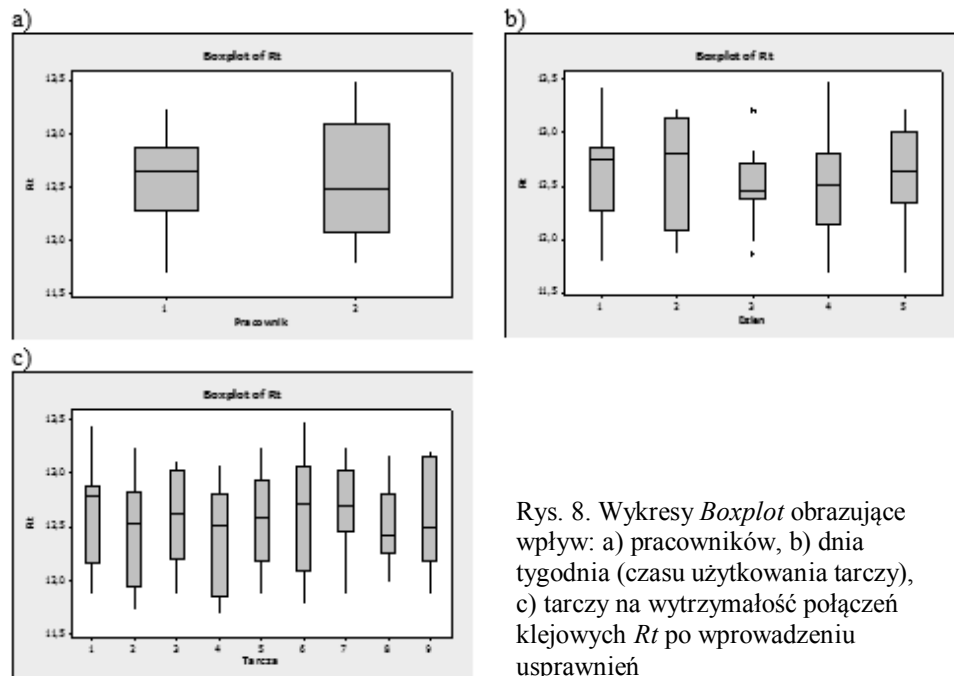
Rys. 6. Wykresy *Boxplot* obrazujące wpływ: a) pracowników, b) dnia tygodnia (czasu użytkowania tarczy), c) tarczy na wytrzymałość połączeń klejowych *Rt*



Rys. 7. Wyniki analizy statystycznej procesu klejenia po wprowadzeniu działań doskonalących

Biorąc pod uwagę wyniki analiz zespół zaproponował przeprowadzić szkolenie pracownika 2 z zakresu klejenia, tak aby połączenia przez niego wykonywane charakteryzowały się mniejszym rozrzutem wytrzymałości na ścinanie. Dodatkowo postanowiono wymieniać tarczę ścierną po czterech dniach użytkowania.

Po wprowadzeniu zaproponowanych działań doskonalących powtórzono badanie zdolności procesu. Uzyskane wyniki (rys. 7) wskazują, że proces klejenia został ustabilizowany co potwierdza wartość wskaźnika $Cpk = 1,31$. Analiza wariancji wyników badań wytrzymałościowych (tab. 2) oraz wykresy *Boxplot* (rys. 8) wskazują, że żaden z badanych czynników nie wywiera istotnego wpływu na wytrzymałość połączeń klejowych (pracownicy $p = 0,727$, dzień tygodnia - czasu użytkowania tarczy ściernej $p = 0,916$, numer tarczy – czas użytkowania $p = 0,972$).



Rys. 8. Wykresy *Boxplot* obrazujące wpływ: a) pracowników, b) dnia tygodnia (czasu użytkowania tarczy), c) tarczy na wytrzymałość połączeń klejowych *Rt* po wprowadzeniu usprawnień

3. Podsumowanie

Zrealizowany projekt potwierdził, że metoda Six Sigma jest doskonałym narzędziem doskonalenia procesów technologicznych. Pozwala w sposób metodyczny przeprowadzić badanie procesu, a zastosowanie odpowiednich narzędzi statystycznych umożliwia jednoznacznie wskazać czynniki wpływające na badany proces, których doskonalenie doprowadza do zmniejszenia jego zmienności. Ustabilizowany proces technologiczny jest gwarancją wytwarzania wyrobów charakteryzujących się wysoką jakością.

Literatura

1. Der LOCTITE PL92. Materiały informacyjne firmy LOCTITE Deutschland GmbH, Munchen 1988.
2. Kuczmaszewski J.: Wpływ sposobu przygotowania warstwy wierzchniej na wytrzymałość adhezyjnych połączeń metali. Materiały II Międzynarodowej KNT nt „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej WW'93”. Instytut Badań i Ekspertyz Naukowych „IBEN” Ltd, Gorzów Wlkp. 1993, 405-408.
3. Zastosowanie klejenia w budowie obrabiarek. Mechanik, 6, 1988, s. 264-266.
4. Łunarski J., Zielecki W.: Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejonych. Technologia i Automatyzacja Montażu, 2, 1994, s. 13-16. ISSN 1230-7661
5. W. Zielecki, P. Pawlus, R. Perłowski, A. Dzierwa: Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment: Archives of Civil and Mechanical Engineering 13 (2013), p. 175 – 185.
6. Pande P.S., Neuman R.P., Cavanagh R.R.: Six Sigma sposób poprawy wyników nie tylko dla firm takich jak GE czy Motorola. Wydawnictwo K.E. LIBER, Warszawa 2003
7. Dietrich E., Schulze A.: Metody statystyczne w kwalifikacji środków pomiarowych maszyn i procesów produkcyjnych. Notika System, Warszawa 2000
8. Bass I.: Six Sigma Statistics with Excel and Minitab. McGraw-Hill Companies Inc., New York 2007

Dr hab. inż. Władysław ZIELECKI, prof. PRz
Prof. dr hab. inż. Jarosław SEP
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
Politechnika Rzeszowska
35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 8
tel./fax: (0-17) 865 17 27
e-mail: wzktmiop@prz.edu.pl
jsztmiop@prz.edu.pl