



**Politechnika  
Śląska**



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY**

---

mgr inż. Jakub Franek

**PRACA DOKTORSKA**

**OPRACOWANIE NOWEJ METODY WTRYSKU BIODOPROZYTÓW  
ZWIĘKSZAJĄCEJ WYDAJNOŚĆ PRODUKCJI**

Promotor:

prof dr hab. inż. Jerzy Świder

Promotor pomocniczy:

dr inż. Piotr Michalski

---

Gliwice, 2023

*Niniejsza rozprawa doktorska została zrealizowana dzięki wsparciu Unii Europejskiej poprzez Europejski Fundusz Społeczny, jako część projektu pt. „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje” realizowanego pod nadzorem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju jako Instytucji Pośredniczącej dla Osi III Szkolnictwo wyższe dla gospodarki i rozwoju Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014-2020 przez Politechnikę Śląską w ramach Działania 3.5 Kompleksowe programy szkół wyższych na podstawie umowy nr POWR.03.05.00-00-Z098/17.*

# SPIS TREŚCI

<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>5</b>
<b>2. ANALIZA OBECNYCH PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH PRZETWÓRSTWA POLIMERÓW .....</b>	<b>12</b>
2.1. WYTŁACZANIE .....	13
2.2. ODLEWANIE.....	14
2.3. PRASOWANIE .....	15
2.4. WALCOWANIE I KALANDROWANIE.....	15
2.5. TECHNOLOGIE ADDYTYWNE .....	15
2.6. WTRYSKIWANIE .....	16
<b>3. CEL I ZAKRES PRACY .....</b>	<b>21</b>
3.1. CEL I TEZA PRACY .....	21
3.2. ZAKRES PRACY.....	22
3.3. OGRANICZENIA I ZAŁOŻENIA.....	23
<b>4. METODA TWINSHOT .....</b>	<b>24</b>
4.1. ANALIZA ZAGADNIENIA .....	24
4.2. OPIS METODY TWINSHOT .....	25
4.3. MOŻLIWE ZASTOSOWANIA METODY TWINSHOT .....	28
<b>5. ALGORYTM DECYZYJNY STOSOWANIA METODY TWINSHOT.....</b>	<b>29</b>
5.1. WSTĘPNA WERYFIKACJA OPŁACALNOŚCI METODY TWINSHOT .....	30
5.2. DOKŁADNA WERYFIKACJA OPŁACALNOŚCI METODY TWINSHOT .....	32
<b>6. ANALIZA MOŻLIWOŚCI WDROŻENIA METODY TWINSHOT .....</b>	<b>34</b>
6.1. WTRYSKIWANIE Z DOPRASOWANIEM .....	34
6.2. WTRYSK PROSZKÓW .....	35
6.3. MIKROWTRYSKIWANIE .....	35
6.4. WTRYSK WIELOKOMPONENTOWY.....	36
6.5. WTRYSK DO FORMY PIĘTROWEJ .....	37
6.6. WTRYSK WARSTWOWY TYPU „SANDWICH” .....	37
6.7. WTRYSK Z ASYSTĄ GAZU LUB WODY.....	38

---

6.8.	WTRYSK ZE SPIENIANIEM .....	39
6.9.	OTRYSKIWANIE.....	40
6.10.	WTRYSK Z DEKORACJĄ (IML / IMD) .....	41
6.11.	WTRYSK Z ROZDMUCHEM .....	42
<b>7.</b>	<b>PRZYGOTOWANIA DO BADAŃ PROCESU TWINSHOT .....</b>	<b>43</b>
7.1.	OKREŚLENIE WARTOŚCI POMIAROWYCH I OPIS UKŁADU POMIAROWEGO .....	43
7.2.	ZDEFINIOWANIE KRYTERIÓW OCENY .....	45
7.3.	PLAN EKSPERYMENTU .....	47
7.3.1.	WYBÓR DETALU .....	49
7.3.2.	KONSTRUKCJA PROTOTYPOWEJ FORMY WTRYSKOWEJ .....	49
7.3.3.	WYBÓR POLIMERU .....	52
7.3.4.	ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE BADAWCZEJ FORMY WTRYSKOWEJ .....	56
7.3.5.	PROJEKT FORMY WTRYSKOWEJ ORAZ SYMULACJE KOMPUTEROWE .....	61
7.3.6.	KONSTRUKCJA STEROWNIKA DYSZ WTRYSKOWYCH.....	67
<b>8.</b>	<b>BADANIA PROCESU WTRYSKU, PROWADZONEGO METODĄ TWINSHOT .....</b>	<b>69</b>
8.1.	ANALIZA WARTOŚCI POMIAROWYCH .....	70
<b>9.</b>	<b>ZASTOSOWANIE PRZEMYSŁOWE METODY TWINSHOT .....</b>	<b>90</b>
9.1.	DOKŁADNA WERYFIKACJA OPLACALNOŚCI METODY .....	90
9.2.	MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWAŃ .....	92
9.3.	MOŻLIWOŚCI KOMERCJALIZACYJNE .....	92
<b>10.</b>	<b>PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ .....</b>	<b>93</b>
10.1.	WERYFIKACJA TEZY PRACY .....	93
10.2.	WNIOSKI .....	93
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>96</b>
	<b>STRESZCZENIE.....</b>	<b>103</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>104</b>
	<b>ZAŁĄCZNIK .....</b>	<b>105</b>

## SPIS SKRÓTÓW

$A_F$	koszt amortyzacji formy
ABS	akrylonitryl-butadien-styren
$F_c$	maksymalna siła zamykania
$F_d$	siła zamykania potrzebna do rozpoczęcia wtrysku
$F_z$	siła zamykania formy wtryskowej
FDM	fused deposition modeling
FFF	fused filament fabrication
GK	gorąco-kanałowy
HDPE	polietylen wysokiej gęstości
$I_C$	całkowity koszt inwestycji
$I_M$	koszt wtryskarki
$I_F$	koszt formy wtryskowej
$I_A$	koszt automatyzacji
$I_P$	koszty poboczne
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMD	in mould decoration
IML	in mould labelling
ISM	industrial, scientific, medical
$K_P$	koszt pracownika
$K_{Ph}$	koszt osobogodziny pracownika
$K_E$	koszt energii elektrycznej
$K_{EkWh}$	koszt 1 kWh energii elektrycznej
LED	light-emitting diode (dioda LED)
LP-WPAN	Low Power – Wireless Personal Area Network
LSR	liquid silicone rubber (chemoutwardzalna ciekła żywica silikonowa)
MFI	melt flow index (wskaźnik płynięcia materiału)
$m_N$	masa noża
$m_W$	masa widelca
$m_{WTR}$	masa dawki wtryskowej
$n$	krotność formy / liczba gniazd formujących we formie
$n_P$	liczba pracowników zaangażowanych w proces

---

$n_E$	zużycie energii elektrycznej (w kWh)
NAFTA	North American Free Trade Agreement
LDPE	polietylen niskiej gęstości
PA	poliamid
PBA	polihydroksymaślan
PC	poliwęglan
PET	politereftalan etylenu
PHA	polihydroksyalkanolany
PLA	polilaktyd
PLC	programmable logic controller (sterownik PLC)
PMMA	polimetakrylan metylu
PP	polipropylen
PS	polistyren
PTFE	politetrafluoroetylen
PUR	poliuretan
PVC	polichlorek winylu
$RCT_{MFI}$	współczynnik przeliczeniowy siły zamykania na podstawie wskaźnika płynięcia materiału
RFID	radio-frequency identification
RMS	root mean square (średnia kwadratowa)
$S_{RZ}$	powierzchnia detalu rzutowana na pł. podziału formy
SLA	stereolitografia
SLS	Selective Laser Sintering
$T_C$	całkowity czas cyklu
$T_{Ch}$	czas trwania chłodzenia
$T_w$	czas trwania wtrysku
$T_d$	czas trwania docisku
$T_p$	czas przesterowania zaworów wtryskowych
$W_h$	wydajność godzinowa produkcji (szt./h)
$\dot{Z}_F$	prognozowana żywotność formy (liczba cykli)
$\omega$	współczynnik weryfikacji wstępnej TwinShot
$\Omega$	uproszczony współczynnik weryfikacji wstępnej TwinShot
$\rho_{WPC}$	gęstość polimeru WPC
$\rho_{PS}$	gęstość polistyrenu

## **1. WPROWADZENIE**

Celem każdego przedsiębiorstwa produkcyjnego jest efektywna produkcja, którą można różnorodnie definiować. Sprowadza się to często do poszukiwania kompromisu pomiędzy wydajnością produkcji, a jej kosztami, nie tylko bieżącymi, ale także niezbędnymi nakładami inwestycyjnymi. Na etapie projektowania nowych linii produkcyjnych, poza wspomnianymi kwestiami jak wydajność i koszty, bardzo ważnym aspektem jest również wielkość potrzebnej powierzchni na hali produkcyjnej, która często zwiększa się wraz ze wzrostem wydajności nowych maszyn, które są zazwyczaj większych gabarytów [1]. Oznacza to, że możliwość zaoferowania zwiększenia wydajności produkcji bez powiększania zajętej przestrzeni produkcyjnej może okazać się bardzo atrakcyjną cechą i stanowiło to zamysł do opracowania innowacyjnej techniki produkcyjnej, która na to zezwoli. Motywacją do przeprowadzenia opisywanych badań była chęć wniesienia wkładu w rozwój technologii wtryskiwania materiałów polimerowych.

Analizując obecny stan wiedzy, a także historię rozwoju przemysłu polimerowego, zauważono wielokrotne podejmowanie prób zwiększenia wydajności produkcji na różne sposoby. Głównie starano się skrócić czas cyklu poprzez wykonywanie szybszych ruchów technologicznych oraz proponowano zastosowanie znacznie większych maszyn, które mogą pracować z formami o większej liczbie gniazd formujących [2]. Nie znaleziono natomiast rozważań zwielokrotnienia ilości procesów wtrysku materiału w ramach jednego cyklu zamknięcia połówek formy wtryskowej. Spodziewając się możliwości osiągnięcia korzyści technologiczno-ekonomicznych zdecydowano o opracowaniu nowatorskiej metody sterowania systemem wypełniania gniazd form wtryskowych z grzanymi kanałami w procesie wtryskiwania tworzyw polimerowych. Zaplanowano w tym celu przeprowadzenie badań i sprawdzenie możliwości adaptacji znanych dotychczas procesów technologicznych w celu zastosowania metody opisanej w dalszych rozdziałach.

W porównaniu do innych materiałów inżynierskich, ścieżka rozwoju polimerów jest stosunkowo krótka, gdyż przyjmuje się, że pierwszym syntetycznym materiałem

polimerowym była nitroceluloza, którą w roku 1862 opracował Alexander Parkes, nadając jej nazwę „Parkesine” [3]. Była to przezroczysta masa plastyczna, która po schłodzeniu utrzymywała swój kształt. Niestety z racji niskiej jakości, materiał nie odniósł sukcesu. Zaledwie trzy lata później John Wedley Hyatt wynalazł celuloid, który początkowo wykorzystywano do produkcji kul bilardowych, natomiast później zastosowano go do produkcji innych przedmiotów, także imitując naturalne materiały, które były bardzo drogie, jak np. kość słoniowa czy szylkret.

Przełomowym odkryciem było wynalezienie przez Leo Baekeland bakielitu. W przeciwieństwie do wcześniejszych materiałów, dopiero bakielit zaczęto stosować na masową skalę, wykorzystując go głównie w elektrotechnice, ze względu na jego charakter elektroizolacyjny, ale także jako tworzywo konstrukcyjne, ze względu na dobre właściwości wytrzymałościowe. Wiek dwudziesty można nazwać okresem rozkwitu i rozwoju materiałów polimerowych. W kolejnych latach powstawały coraz to nowsze materiały, które z powodzeniem są wykorzystywane aż do dzisiaj we wszystkich sektorach gospodarki.

Do najważniejszych odkryć dwudziestego wieku w tym obszarze można zaliczyć:

- Polichlorek winylu (PVC) – 1912 r.
- Polistyren (PS) – 1929 r.
- Polilaktyd (PLA) – 1932 r.
- Polietylen niskiej gęstości (LDPE) – 1933 r.
- Polimetakrylan metylu (PMMA) – 1934 r.
- Poliamid (PA) – 1935 r.
- Poliuretan (PUR) – 1937 r.
- Politetrafluoroetylen (PTFE) – 1938 r.
- Politereftalan etylenu (PET) – 1941 r.
- Akrylonitryl-Butadien-Styren (ABS) – 1946 r.
- Polietylen wysokiej gęstości (HDPE) – 1955 r.
- Poliwęglan (PC) – 1956 r.
- Polipropylen (PP) – 1957 r.
- Polihydroksyalkanolany (PHA) – po 1980 roku,
- Polihydroksymaślan (PBA) – po 1980 roku.



Obecnie materiały polimerowe stanowią najbardziej rozległą grupę materiałową, wśród której rozpiętość właściwości może być bardzo duża; zdecydowanie większa, niż w przypadku innych grup materiałowych jak metale czy szkło. Tak duże zróżnicowanie charakterystyki materiałów wewnątrz jednej grupy prowadzi do generalizacji nazewnictwa i jego błędnego stosowania. W języku polskim funkcjonują trzy podstawowe terminy, które często są niewłaściwie używane: polimer, plastik oraz tworzywo sztuczne.

Polimer oznacza substancję chemiczną o bardzo dużej masie cząsteczkowej, która składa się z łańcuchów makrocząstek połączonych ze sobą za pomocą wiązań fizycznych. Makrocząstki z kolei są zbudowane z pojedynczych merów, które są już podstawową jednostką budowy polimeru.

Plastik, czy też spolszczona wersja „plastyk”, została przetłumaczona z języka angielskiego „plastics”, który to oznacza polimer syntetyczny, często już przystosowany do dalszego przetwórstwa (za pomocą modyfikatorów i dodatków, jak na przykład plastyfikatory czy wypełniacze) [4]. W języku angielskim mówi się o gotowej mieszance przeznaczonej do dalszego przetwarzania, natomiast w języku polskim nazwa ta funkcjonuje jako potoczne określenie tworzyw sztucznych, a więc materiałów syntetycznych. Tworzywo sztuczne jest terminem wskazującym na materiał syntetyczny, przeznaczony do dalszego formowania, czy też tworzenia detalu. Można zatem powiedzieć, że każdy „plastik” jest polimerem, natomiast nie każdy polimer jest „plastikiem”. Z racji błędnej generalizacji i często błędnego używania w mediach terminów plastik czy tworzywo sztuczne, a także swego rodzaju negatywnego wizerunku, jaki media masowe wygenerowały w ostatnich latach, w dysertacji występuje wyłącznie termin: „materiały polimerowe”, ewentualnie w uproszczeniu: „polimer”, jeśli ma się na myśli jeden, konkretny materiał polimerowy. Ponadto, rozważania skoncentrowano na nowoczesnych materiałach, które są częściowo lub w pełni wykonane z surowców odnawialnych (np. biokompozyty), a więc nie mogą być nazywane materiałami syntetycznymi [5]. Materiały polimerowe można dzielić na wiele różnych

sposobów [6]. Wszystkie rozważane w pracy materiały to termoplasty, co zezwala na ich przetwórstwo za pomocą wtryskarek.

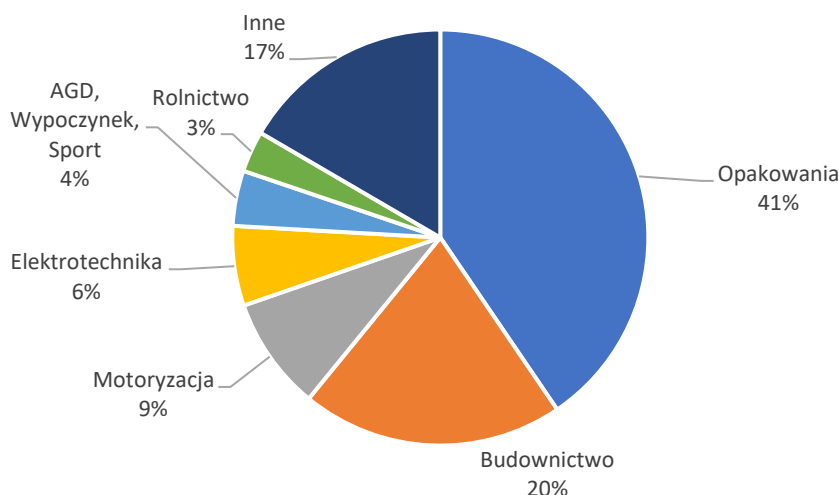
W wyniku zaawansowanego rozwoju technologicznego, polimery stanowią bardzo ważną grupę materiałową w sektorze przemysłowym. Warty zaznaczenia jest fakt, że według danych organizacji branżowych, na świecie, objętościowo produkuje się więcej materiałów polimerowych niż stali i aluminium [7]. Dynamika rozwoju rynku polimerów w ostatnich latach jest znacznie wyższa, niż ma to miejsce na rynku stali. Zaawansowana inżynieria materiałowa pozwala na tworzenie mieszanek polimerowych o coraz to lepszych właściwościach, co pozwala na częstsze ich wykorzystanie, zastępując konwencjonalne materiały, jak na przykład stal. Ta grupa materiałowa została doceniona przez inżynierów i konstruktorów, którzy chętnie korzystają z nowoczesnych rozwiązań podczas projektowania nowych produktów [8].

Przemysł polimerowy można podzielić na 3 główne sektory:

- produkcję materiału (polimeru),
- przetwórstwo polimeru,
- produkcję maszyn i urządzeń peryferyjnych do przetwórstwa polimerów.

Cały sektor polimerowy w znaczny sposób odznacza się w światowej gospodarce. Szacuje się, że w Europie w tym sektorze pracuje około 1,5 mln osób [7] w około 52 tysiącach przedsiębiorstw, produkując każdego roku wyroby gotowe o łącznej wartości około 400 miliardów dolarów [9], natomiast przemysł na całym świecie przyczynia się do obrotu ponad 1 biliona dolarów [10], co stanowi około 5 % handlu światowego [11]. Przyjmuje się, że na świecie w ciągu roku jest produkowanych około 390 milionów ton materiałów polimerowych, w których około 57 milionów ton przypada na produkcję europejską, co stanowi ok. 15 % całej produkcji i plasuje Europę na 4 miejscu zaraz po Chinach (32 %), Państwach NAFTA (18 %) i pozostałej części Azji (17 %). Roczne zapotrzebowanie na materiały polimerowe w Polsce jest stosunkowo wysokie, ponieważ wynosi około 3,7 milionów ton, co odpowiada około 7,5 % zużycia europejskiego [9].

Materiały polimerowe są obecne już we wszystkich sektorach gospodarki. Spotyka się je na co dzień i nieustannie wykorzystuje szereg ich zalet. Na rys. 1.1 przedstawiono podział zastosowań materiałów polimerowych na segmenty przemysłu.

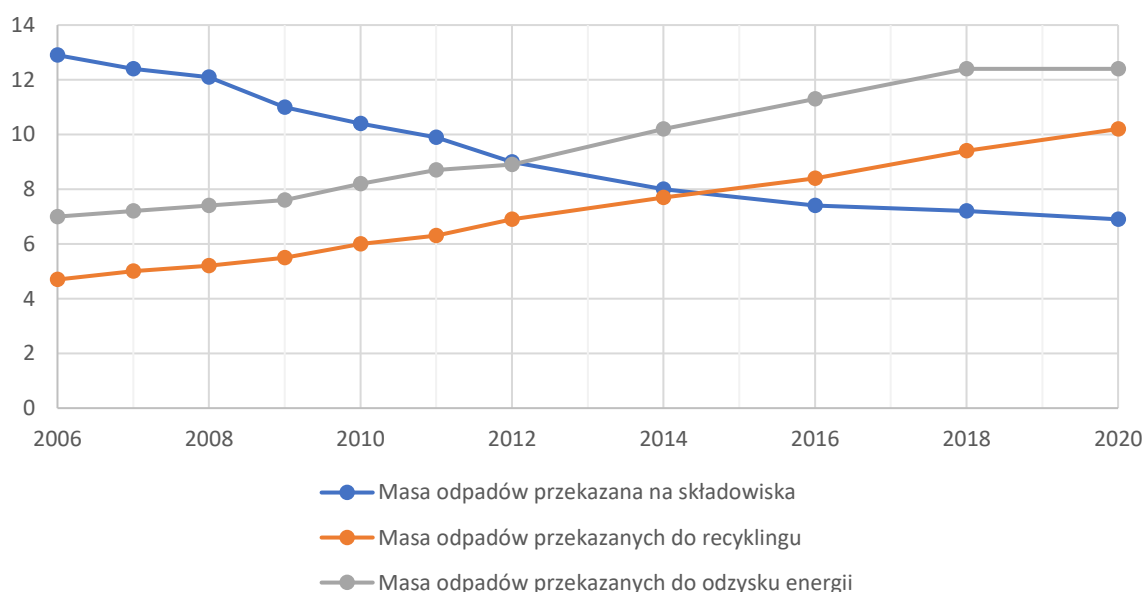


Rys. 1.1. Podział zastosowań materiałów polimerowych na segmenty przemysłu

Głównymi segmentami zastosowań materiałów polimerowych są przemysł opakowaniowy (40,5 %) oraz budownictwo (20,4 %). Istotnym celem zastosowań jest również motoryzacja (8,8 %) [12]. Jednak, pomimo, że materiały polimerowe znajdują coraz częstsze zastosowanie w medycynie, sektor ten odpowiada nadal za mniej niż 1 % rocznego zużycia materiałów polimerowych [7]. Najczęściej stosowanymi materiałami polimerowymi są polipropylen (PP) – 19,7 % oraz polietylen (PE) – 17,4 % [12].

Szerokie spektrum zastosowań materiałów polimerowych niesie za sobą również odpowiedzialność za środowisko naturalne i ziemski ekosystem. Niestety zachowania konsumentów potrafią niekiedy pozostawiać wiele do życzenia i niezbędna jest bardzo duża praca w zakresie edukacji i kampanii społecznych [13]. Na rys. 1.2 przedstawiono rozwój sposobów zagospodarowania pokonsumenckich odpadów polimerowych. W roku 2020 w krajach europejskich zebrano ponad

29 milionów ton pokonsumenckich odpadów z materiałów polimerowych, z których prawie 35 % przekazano do recyklingu, 23 % skierowano na składowiska, a pozostałe 42 % wykorzystano do odzysku energii. Należy zauważyć pozytywny aspekt znacznej zmiany udziału sposobu zagospodarowania odpadów polimerowych na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat. W porównaniu do roku 2006, poziom recyklingu wzrósł o prawie 118 %, a ilość odpadów przekazanych na składowiska zmalała o prawie 46,5 % [12].



Rys. 1.2. Przedstawienie sposobu zagospodarowania pokonsumenckich odpadów polimerowych

Pomimo, że problem zanieczyszczenia polimerami nie jest nowy (pojawiał się już w latach 50. XX wieku), w ostatnim czasie zdecydowanie przybrał na sile i stał się bardzo obecny w mediach masowych. W roku 2021 ponad 100 organizacji rządowych na świecie zadeklarowało chęć przystąpienia do rozmów mających na celu ustanowienia światowego porozumienia w sprawie zanieczyszczenia środowiska polimerami [14]. W tym samym okresie, producenci materiałów polimerowych zaplanowali inwestycje w technologię recyklingu chemicznego, które w roku 2030 mają wynieść 7,2 miliarda euro [12]. Rozwijane są także dedykowane metody recyklingu produktów, które do tej pory nie były poddawane procesowi odzysku – np. opakowania TetraPak lub produkty wykonane z papieru pokrywanego

warstwą polietylenu. Rozważania ekologiczne są zasadniczym trendem obserwowanym w ostatnich latach [15]. Wszelkie zmiany są podyktowane efektem środowiskowym [16]. Wiele sektorów przemysłu dąży do gospodarki o obiegu zamkniętym, a to wymaga od materiałów właściwości, które do tej pory nie były traktowane jako priorytetowe [17]. Preferowane cechy ekologiczne i zmniejszenie wpływu na środowisko stało się tym samym bardzo istotne, co jest często wykorzystywane jako element marketingowy. Konsument, zazwyczaj nie posiadający odpowiednio rozległej wiedzy o efektach środowiskowych, jest podatny na wszelkiego typu manipulacje i jest wprowadzany w błąd np. za pomocą niewłaściwie przedstawianych danych lub koncentrowaniu uwagi tylko na części informacji. Proces taki jest nazywany „greenwashing”. Niestety często, w wyniku takiego działania, na rynku pojawiają się rozwiązania wykonane z alternatywnych materiałów, które w ostatecznym rozrachunku mają gorszy wpływ na środowisko (np. emisję dwutlenku węgla), niż rozwiązania stosowane dotychczas [18]. Przykładem może być błędna argumentacja zamiany polimerowych butelek do napojów na ich szklane odpowiedniki. Ilość energii potrzebnej do wytworzenia butelki szklanej jest wielokrotnie wyższa, niż do uformowania butelki polimerowej (dotyczy to zarówno produkcji nowej butelki, jak i procesu recyklingu używanych butelek). Ponadto, rozlewnie napojów nie są w stanie produkować ich samodzielnie (w przeciwieństwie do butelek polimerowych), co wymaga transportowania gotowych butelek z huty szkła do producenta napoju. Z racji objętości i masy butelek, ich transport jest stosunkowo drogi oraz generuje bardzo dużą ilość dwutlenku węgla w przeliczeniu na jedną butelkę, i to na każdym etapie transportu: z huty do producenta napoju, do hurtowni, a później do sklepu. Tym samym poziom emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia butelki szklanej może być ponad czterokrotnie wyższy niż w przypadku butelki wykonanej z polimeru, np. PET [19, 20]. Pomimo zdecydowanie gorszego wpływu szklanych butelek na środowisko, są one promowane i lobbowane przez odpowiednie środowiska, które stosują właśnie mechanizm „greenwashing”.

## **2. ANALIZA OBECNYCH PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH PRZETWÓRSTWA POLIMERÓW**

Różnorodność i szerokie spektrum zastosowań materiałów polimerowych w produkcji przemysłowej spowodowała powstanie wielu technik przetwórstwa tych materiałów oraz ich znaczny rozwój na przestrzeni lat. Zasadniczo, procesy sprowadzają się do wykorzystania temperatury i ciśnienia, które w sposób kontrolowany wpływają na zachowanie materiału. Produkcja wyrobów gotowych często sprowadza się do takich operacji jak:

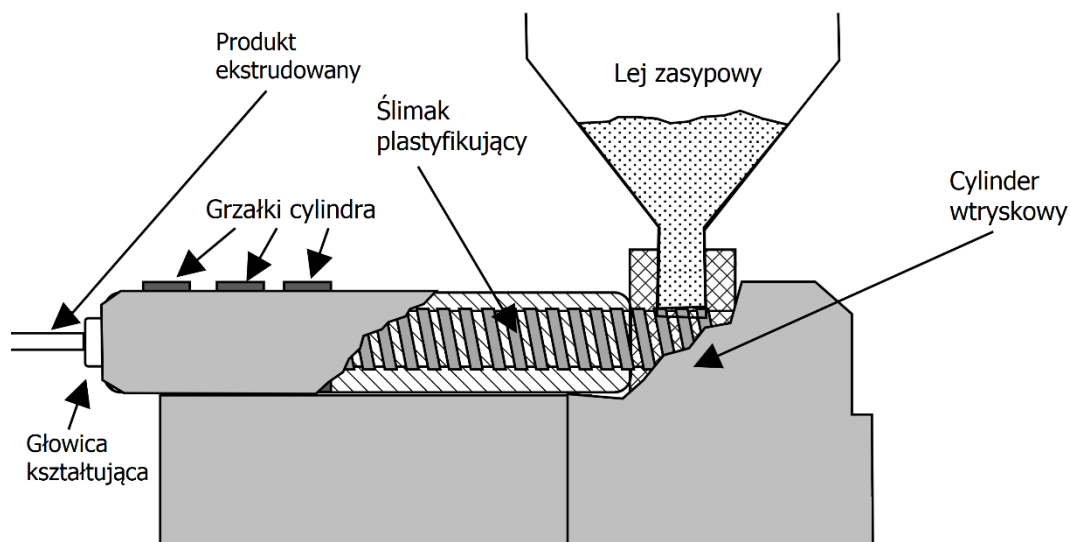
- przygotowanie – polegające na przygotowaniu półproduktu w postaci granulatu, folii, płyty,
- kształtowanie – nadające kształt wstępny półproduktów lub ostateczny w przypadku produktów gotowych,
- kształtowanie wtórne – operacja nieobowiązkowa, nadająca półproduktom kształt ostateczny, co czyni je produktami gotowymi; przykładem może być proces termoformowania lub najczęściej spotykany rodzaj drukowania 3D – Fused Deposition Modeling czy też Fused Filament Fabrication,
- usunięcie materiału – niektóre metody obróbki wymagają usunięcia części materiału, który stanowi odpad technologiczny,
- łączenie – przynajmniej dwa półprodukty są łączone w jeden produkt gotowy za pomocą, na przykład, zgrzewania lub klejenia.

Wśród podstawowych metod kształtowania można wymienić:

- wytłaczanie,
- odlewanie,
- prasowanie,
- walcowanie i kalandrowanie,
- wtryskiwanie,
- technologie addytywne.

## 2.1. Wytłaczanie

Wytłaczanie polega na ciągłym poddawaniu uplastycznionej masy polimeru na działanie ciśnienia, które powoduje jego przeciskanie przez ustnik w głowicy kształtującej. Tą metodą mogą być produkowane różne profile (np. okienne lub uszczelki), rury, folie oraz płyty [21]. Schemat ideowy budowy wytłaczarki pokazano na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat konstrukcji wytłaczarki

Granulki polimeru są zasypywane do leja, z którego są pobierane do cylindra przez ślimak wytłaczarki, następnie pod wpływem ich ogrzania, przechodzą w stan plastyczny, a stale obracający się ślimak uplastycznia materiał w jednolitą masę, która za pomocą zwojów ślimaka jest przesuwana w kierunku głowicy cylindra; opcjonalnie po drodze może zostać poddany procesowi odgazowania (stosowane często podczas przetwórstwa materiałów pochodzących z recyklingu), a następnie pod wpływem działającego ciśnienia spiętrzenia, zhomogenizowana masa jest przeciskana przez ustnik w głowicy kształtującej oraz kalibrującej, która chłodzi materiał i zestawia go w postaci profilu [22]. W procesie pomocniczo może być wykorzystywane sprężone powietrze lub podciśnienie, które ma na celu utrzymanie wymiarów wyrobu, chłodzenie części kalibracyjnej oraz samego detalu [23].

Wytłaczanie jest jedną z podstawowych i najczęściej spotykanych form przetwórstwa tworzyw polimerowych [24]. Wytłoczki stanowiące gotowy produkt lub półprodukt są cięte na odpowiednią długość lub nawijane na bębny czy szpule.

## 2.2. Odlewanie

Odlewanie jest procesem przetwórstwa materiałów polimerowych, który jest charakterystyczny ze względu na brak użycia wpływu ciśnienia na uplastycznioną masę. Podobnie jak w przypadku innych metod, rozróżnia się kilka odmian procesu odlewania.

Do produkcji folii używa się specjalnych gatunków polimerów, które cechują się bardzo niskim wskaźnikiem płynięcia, dzięki czemu mogą być odlewane przez cienką szczelinę na obracającą się taśmę lub metalową, wypolerowaną rolkę w celu otrzymania przezroczystej folii. Następnie folia jest odklejana z wałka lub taśmy odbierającej, przycinana na wymiar oraz zwijana na gilzie.

Odlewanie bezciśnieniowe może odbywać się także do form odlewniczych, do których masa jest wlewana za pomocą oddziaływania sił grawitacji czy sił odśrodkowych. Ta metoda jest przeznaczona wyłącznie do materiałów o strukturze półkryształicznej, ponieważ jest wymagana bardzo niska lepkość stopu.

W przypadku płyt, prętów lub rur, wykorzystywane jest odlewanie cechujące się przeprowadzeniem procesu polimeryzacji rodnikowej wewnątrz formy odlewniczej. Przykładem może być zastosowanie monomeru metakrylanu metylu, który w procesie polimeryzacji w formie nabiera bardzo wysokiej masy cząsteczkowej i tym samym zmienia swoje właściwości po przekształceniu w polimetakrylan metylu. Jednak ze względu na bardzo silne właściwości egzotermiczne tego procesu, można go stosować jedynie w ograniczonym zakresie grubości i masy produktów.

Kolejnym typem odlewania jest odlewanie rotacyjne, które służy do produkcji elementów pustych w środku, jak zbiorniki, kajaki, kontenery. Proszek lub granulaty polimerowe jest wsypywany do rozgrzanej formy, która następnie jest zamykana i montowana na urządzeniu rotacyjnym, które wprawia ją w ruch obrotowy wokół wielu osi jednocześnie. Całość jest wprowadzana do dużego pieca na ustalony czas. Forma może zostać otwarta po jej schłodzeniu, a detal może być wyjęty i poddany dalszej obróbce wykańczającej – np. w celu wycięcia otworów przyłączeniowych w przypadku zbiorników.



### **2.3. Prasowanie**

Prasowanie jest jedną z najstarszych metod przetwórstwa materiałów polimerowych, bowiem było stosowane już w XIX wieku [25]. Polega ono na wprowadzeniu do formy prasowniczej polimeru w postaci proszku, żelu lub tabletek, a następnie jego stopieniu i uplastycznieniu wewnątrz zamkniętej formy (często pod wpływem nacisku prasy hydraulicznej), po których to czynnościach następuje zestalenie materiału. Po wyjęciu gotowego produktu z formy należy usunąć z niego wypływki materiału, które stanowią odpad technologiczny.

### **2.4. Walcowanie i kalandrowanie**

Walcowanie i kalandrowanie to dwie spokrewnione ze sobą metody obróbki, które są przeprowadzane na walcach lub za pomocą kalandra. Upłastyczniona masa polimeru jest nieustannie podawana na obracające się walce kształtujące, które ją wciągają i przekazują na kolejne walce. Układ i liczba obracających się walców są zmienne i zależą od przetwarzanego polimeru oraz ilości komponentów, ponieważ w tym procesie jest możliwa produkcja laminatów np. folii wielowarstwowych lub zbrojonych włókniną. Za pomocą zmiany odległości walców między sobą jest możliwa regulacja grubości produktu końcowego. Po przejściu przez główne walce folia jest chłodzona, docinana po brzegach na żądany wymiar i nawijana na gilzę odbiorczą.

### **2.5. Technologie addytywne**

W ostatnich latach bardzo intensywny rozwój zanotował także sektor technologii przyrostowych, czyli drukowania 3D. O ile metody FDM i FFF wykorzystują przygotowany wcześniej półprodukt w postaci filamentu, czyli żyłki (wykonanej w procesie ekstruzji), to istnieje również szereg metod wykorzystujących proszki czy żywice polimerowe. Przykładami mogą być technologie: SLS (Selective Laser Sintering), SLA (Stereolitografia), Polyjet. Metody przyrostowe mogą być także używane do produkcji wkładek formujących do prototypowych lub krótkoseryjnych form wtryskowych [26].

## 2.6. Wtryskiwanie

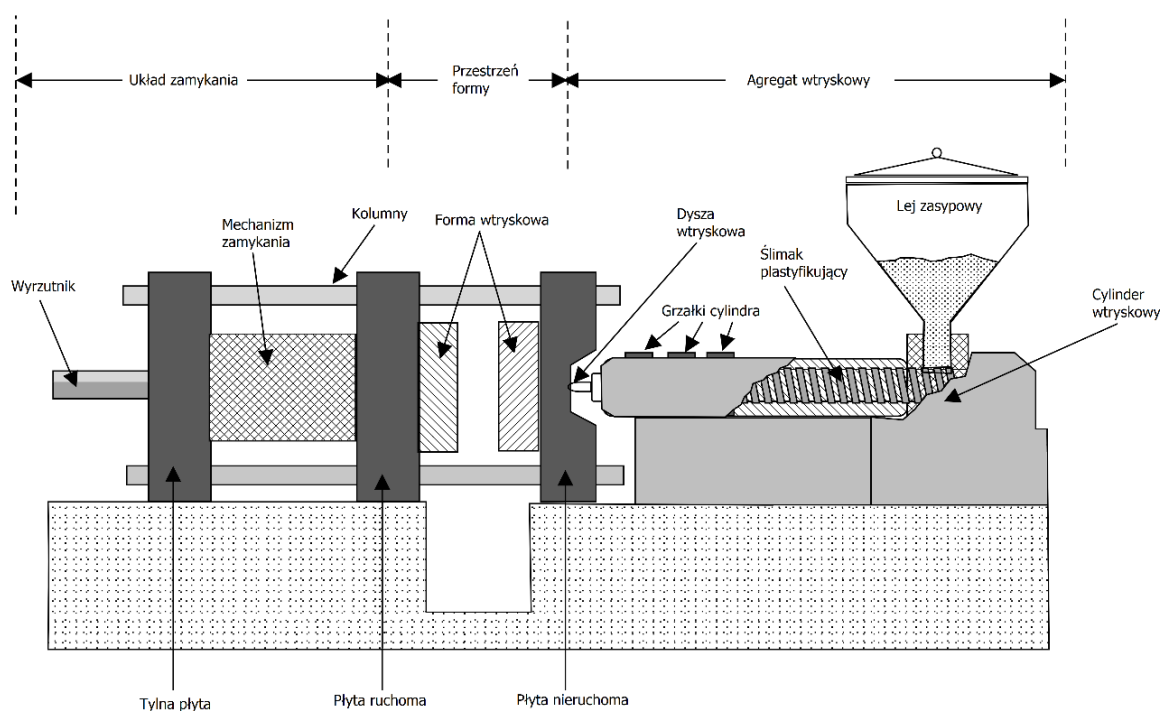
Proces formowania wtryskowego ewoluował do jednej z najważniejszych metod przetwórstwa termoplastycznych materiałów polimerowych [27], ponieważ zezwala on na otrzymanie gotowego produktu o masie od 1 miligrama do kilkudziesięciu kilogramów, przy czasach cyklu w zakresie od kilku sekund do kilkunastu minut. Często, metodą wtryskiwania w łatwy i szybki sposób można wykonać produkty o skomplikowanej geometrii, których wykonanie metodą obróbki ubytkowej wymagałoby dużej liczby operacji i tym samym pochłonęłyby znacznie więcej czasu i pracy. Bardzo wysoka dokładność nowoczesnych obrabiarek numerycznych zezwala na wykonanie form posiadających skomplikowane mikrostruktury [28]. Zauważalny jest trend wprowadzania rozwiązań inteligentnych z obszaru „Przemysł 4.0”, które zezwalają na integrację wtryskarek i innych urządzeń w całość linii produkcyjnej oraz coraz większy poziom automatyzacji procesu produkcyjnego [29]. W ramach niniejszej pracy skupiono się na rozważaniach dotyczących tej techniki przetwórstwa i sprawdzeniu możliwości jej dalszego rozwoju.

Wtryskarka składa się z trzech zasadniczych komponentów [30], z których każdy pełni bardzo ważną rolę. Są to:

- układ zamykania,
- jednostka plastyfikująca (agregat wtryskowy),
- forma wtryskowa.

Najbardziej popularnym typem wtryskarek są maszyny trzypłytkowe, przykład takiej maszyny przedstawiono na rys. 2.2. Forma jest zamontowana na dwóch płytach mocujących, z których jedna jest nieruchoma, a druga jest przesuwana po prowadnicach za pomocą kolanowego mechanizmu zamykającego lub bardzo dużego siłownika hydraulicznego [31]. Trzecia płyta pomocnicza znajduje się na końcu układu i jest połączona z płytą stałą za pomocą stalowych kolumn, a z płytą ruchomą za pomocą mechanizmu zamykania. Po wyprostowaniu kolan układu

zamykającego lub nabudowaniu ciśnienia zwierania w przypadku układu zamykania z siłownikiem centralnym, generowana jest duża siła, która dociska do siebie obie połówki formy. W ruchomej płycie montażowej jest także zaimplementowany układ wyrzutników, który jest połączony z formą wtryskową i odpowiada za rozformowanie produktu po jej otwarciu. Jednostka plastyfikująca składa się z agregatu wtryskowego, który zawiera cylinder zakończony dyszą wtryskową. Wewnątrz cylindra pracuje ślimak, który na swoim końcu posiada zawór zwrotny, dzięki któremu jest w stanie dozować materiał gdy się obraca oraz wygenerować ciśnienie podczas ruchu posuwistego do przodu. Na początku cylindra jest zamontowany lej zasypowy, w którym znajduje się granulata. Bardzo często na leju zasypowym jest montowany automatyczny podajnik podciśnieniowy, który zaciąga materiał ze zbiornika (oktabiny transportowej lub silosu). Ślimak jest zmontowany na sztywno z przekładnią zębatą, która jest napędzana silnikiem. Pod agregatem wtryskowym znajduje się zwykle szafa sterownicza, a w przypadku maszyn hydraulicznych także zbiornik oleju, silnik oraz pompa hydrauliczna [32].



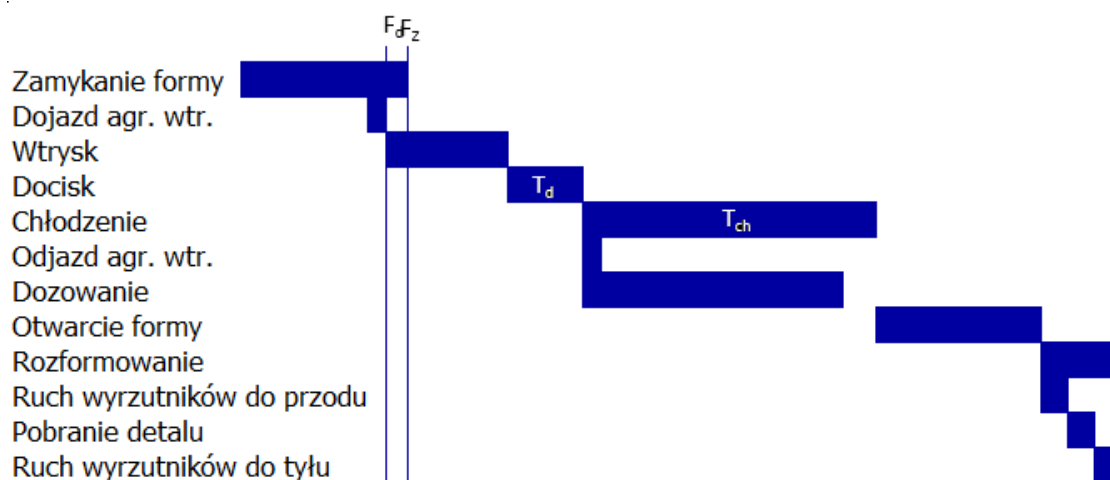
Rys. 2.2. Schemat konstrukcji wtryskarki

Wszystkie cztery główne osie robocze wtryskarki (ruch formy, wyrzutniki, wtrysk oraz dozowanie) mogą być napędzane silnikami elektrycznymi lub siłownikami i silnikami hydraulicznymi. Zasadniczo, maszyny elektryczne mają szereg zalet:

- cechują się większą energooszczędnością,
- wyróżniają się precyzją działania (pozycjonowania osi),
- oferują większą powtarzalność procesu,
- generują znacznie niższy poziom hałasu.

Niestety, wymienione pozytywne cechy są okupione wyższą ceną, co dla pewnych przedsiębiorstw bywa niekiedy przeszkodą wstrzymującą przed zakupem takiej maszyny.

Najbardziej popularny proces wtrysku przebiega według cyklogramu, przedstawionego na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Przykład cyklogramu procesu wtrysku

Cykl rozpoczyna się w momencie rozpoczęcia ruchu zamykania formy przez układ zamykania. Przed samym ukończeniem zamykania formy i uzyskania odpowiedniej siły zwierania następuje dojazd agregatu wtryskowego do dyszy wtryskowej formy, a po nabudowaniu siły zwierania  $F_d$  rozpoczyna się proces wtrysku, w trakcie którego ślimak jest przesuwany w kierunku czoła cylindra, aby wytwarzając odpowiednie ciśnienie oddziałujące na polimer, wymusić przepływ materiału do formy wtryskowej. W trakcie ruchu wtrysku, pozycja ślimaka jest

sterowana za pomocą prędkości w funkcji drogi lub czasu, jednocześnie ograniczając maksymalne ciśnienie wtrysku, które wytwarza się z przodu cylindra wtryskowego. Po zasadniczej fazie wtrysku następuje okres docisku, czyli oddziaływania ustalonym ciśnieniem w funkcji czasu na uplastyczniony materiał, co ma na celu uzupełnić skurcz materiału w początkowej fazie chłodzenia [33]. Po zakończeniu czasu docisku, agregat wtryskowy odjeżdża od formy wtryskowej i rozpoczyna proces dozowania, czyli za pomocą obracającego się ślimaka, ponowna dawka materiału zostaje nabrana oraz jego uplastyczniona. Po upływie zadanego czasu chłodzenia następuje otwarcie formy wtryskowej, a następnie ruch wyrzutników do przodu, co ma spowodować odformowanie detalu. Wypraska jest pobierana przez robota zamontowanego nad formą wtryskową lub z boku wtryskarki. Ewentualnie, produkty mogą też spadać grawitacyjnie na przenośnik taśmowy, zlokalizowany pod formą wtryskową. Po wypchnięciu detalu, wyrzutniki powracają do swojej pozycji wyjściowej. Tym samym cykl dobiega końca i może rozpocząć się od nowa.

Bardzo ważnym podzespołem wtryskarki jest forma wtryskowa. Często to od jej poziomu wykonania zależy jakość detalu i powodzenie procesu wtrysku. Wysokie ciśnienie stopu potrafi wypełnić szczeliny o wielkości 0,05 mm [34, 35], co narzuca konieczność bardzo dokładnego dopasowania elementów formy i wykonania ich w bardzo wąskich zakresach tolerancji wymiarowej. Zdolność polimeru do wypełniania szczelin zależy od jego reologii oraz parametrów procesu [36].

Znane są różne systemy doprowadzania uplastycznionego polimeru do gniazd formujących [37, 38, 39]. Podstawowym typem jest układ zimnokanałowy, w którym stop jest rozprowadzany za pomocą wlewka do gniazd formujących [38]. Wlewek wypada razem z wypraską i stanowi odpad technologiczny. Bardziej zaawansowanym systemem są układy gorącokanałowe (GK), które za pośrednictwem rozdzielacza i dysz wtryskowych, doprowadzają polimer do gniazd formujących [37]. Wykorzystywane są różne sposoby ogrzewania komponentów układu gorącokanałowego: wewnętrzne, zewnętrzne, mieszane, pośrednie, jak również różne typy dysz: otwarte, igłowe, zamykane, przeznaczone do wlewu bocznego [40].

Istotną różnicę technologiczną stanowi typ przewężki, która powstaje w wyniku stosowania dysz GK. Stosowane są przewężki zamykane termicznie (samokrzepnące) oraz zamykane mechanicznie za pomocą igły zamykającej [39]. Dostępne są różne rodzaje napędzania iglic zamykających dysze wtryskowe: mechaniczne (samoczynne na skutek ciśnienia), pneumatyczne, hydrauliczne oraz elektryczne. Przeniesienie napędu może odbywać się bezpośrednio (każda igła posiada własny napęd) lub pośrednio (np. za pomocą płyty napędzającej). Zamykane dysze wtryskowe są wymagane do przeprowadzenia procesów wtryskiwania sekwencyjnego oraz kaskadowego, które przeznaczone są do kontroli propagacji czoła polimeru wewnątrz jednego gniazda formującego [39].

Najnowsze rozwiązania w zakresie zamykanych igłowo dysz GK są napędzane za pomocą serwonapędów lub hydraulicznie, co dodatkowo zezwala na profilowanie drogi oraz prędkości otwierania i zamykania dysz wtryskowych, tym samym umożliwiając dokładniejszą kontrolę nad procesem wtryskiwania oraz docisku. Dzięki takim rozwiązaniom można np. zredukować efekt skokowego wzrostu prędkości napełniania gniazda podczas kolejnych etapów wtryskiwania kaskadowego i tym samym uzyskać lepszą jakość wypraski.

Stosowanie układów GK pomaga: skrócić czas cyklu, zmniejszyć niezbędną siłę zamykania podczas procesu, eliminować odpad technologiczny w postaci wlewka, kontrolować temperaturę stopu wpływającego do gniazd oraz uzyskiwać wypraski o wysokiej jakości lub bardziej zaawansowane.

Wydajność produkcyjna wtryskarki jest uzależniona od czasu cyklu oraz liczby gniazd formujących formy wtryskowej [41]. Zużycie energii elektrycznej podczas produkcji metodą wtrysku można podzielić na kilka różnych części, jedną z nich jest energia potrzebna do poruszania ślimaka oraz płyty ruchomej wtryskarki [42]. Koszt produkcji detali metodą wtrysku jest odwrotnie proporcjonalny do wydajności produkcji [43]. Co za tym idzie, jedną z metod obniżania kosztów produkcji jest zwiększanie wolumenu produkcji, a ten można osiągnąć między innymi przy zastosowaniu formy wtryskowej o większej liczbie gniazd [44].

### **3. CEL I ZAKRES PRACY**

#### **3.1. Cel i teza pracy**

Podstawowym celem wielu przedsiębiorstw produkcyjnych jest osiągnięcie zamierzonych wyników finansowych oraz dążenie do ich poprawy. Kluczowymi czynnikami pomagającymi osiągnąć wspomniane zadanie mogą być na przykład wzrost wydajności produkcji oraz optymalizacja kosztów, w tym nakładów inwestycyjnych. Postawione w pracy cele mają za zadanie implikować rozwój badań i zastosować ich wyniki w zakresie budowy urządzeń technicznych w postaci maszyn do przetwórstwa materiałów polimerowych metodą wtrysku ciśnieniowego do form. Wiedza pozyskana w wyniku realizacji niniejszej pracy powinna ułatwić przedsiębiorstwom produkcyjnym osiągnięcie wymienionych celów.

Celem naukowym prowadzonych badań jest opracowanie nowej metody wtrysku biokompozytów, zwiększającej wydajność produkcji. W tym celu niezbędna jest analiza obecnych metod produkcyjnych oraz rozważenie możliwości ich poprawy według autorskiej koncepcji wykorzystania formy wtryskowej o teoretycznie (obliczeniowo) zbyt dużej liczbie gniazd formujących, bez zwiększania rozmiaru wtryskarki. Cel ten wymusza weryfikację możliwości wykonania na wtryskarce dwóch, następujących po sobie, procesów wtrysku w trakcie jednego cyklu pracy układu zamykania formy. Aby ułatwić kadrze zarządzającej proces decyzyjny wdrażania nowej metody produkcyjnej postanowiono także opracować wskaźnik weryfikacji opłacalności nowej metody produkcyjnej.

Celem użytkowym prowadzonych badań jest wykorzystanie do przetwórstwa materiału o mniejszym śladzie węglowym niż tradycyjne materiały polimerowe. Cel ten wpisuje się w aktualne trendy rynkowe i jest spójny z polityką środowiskową, która coraz częściej staje się kryterium decyzyjnym w łańcuchu rozwoju produktu. Również wprowadzone w ostatnich latach regulacje prawne nakazują między innymi oferowanie konsumentom opakowań wykonanych z materiałów alternatywnych, pod którymi rozumie się materiały pochodzenia naturalnego. Kreuje to popyt na tego typu produkty, dlatego zasadnym wydaje się być rozwijanie technologii przetwórstwa

takich materiałów, które często jednak powodują wydłużenie czasu cyklu z powodów technologicznych, tym samym zwiększając jeszcze bardziej różnicę cenową w stosunku do materiałów konwencjonalnych.

W pracy zdefiniowano problem badawczy jako konieczność rozpoznania obecnego stanu wiedzy oraz zaplanowania sprawdzenia na drodze doświadczalnej nowej metody produkcyjnej [45]. W rozprawie postawiono również następującą tezę:

**„Możliwe jest zwiększenie wydajności produkcji, poprzez zastosowanie formy wtryskowej o teoretycznie (obliczeniowo) zbyt dużej liczbie gniazd formujących, bez zwiększania rozmiaru wtryskarki.”**

### 3.2. Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- analizę problemu wydajności produkcji oraz współczesnych metod przetwarzania materiałów polimerowych metodą wtrysku; dwa pierwsze rozdziały pracy obejmują wstęp do tematyki oraz przegląd literatury dotyczącej przetwórstwa materiałów polimerowych,
- opracowanie innowacyjnej metody przetwórstwa polimerów, która została opisana w rozdziale 4, a rozdział 5 definiuje matematyczne wskaźniki opłacalności zastosowania innowatorskiej metody oraz pokazuje algorytm decyzyjny, który ułatwia proces weryfikacji celowości implementacji tego procesu,
- weryfikację możliwości zastosowania autorskiego procesu produkcyjnego w specjalistycznych odmianach procesu wtrysku polimerów, wraz z opracowaniem algorytmów i wskaźników decyzyjnych, a także zaprojektowaniem oraz wykonaniem formy wtryskowej, która posłuży do weryfikacji tezy pracy; analiza możliwości została opisana w rozdziale 6,
- doświadczalne sprawdzenie poprawności procesu wtrysku, przy założeniu dokonanych w nim modyfikacji oraz przy użyciu wykonanej formy wtryskowej; w rozdziale 7 omówiono przygotowania do badań oraz plan eksperymentu, a w rozdziale 8 omówiono otrzymane wyniki,



- wykonanie porównawczej analizy ekonomiki produkcji, które zostało opracowane w rozdziale 9 wraz z komentarzem dotyczącym możliwości i potencjału komercjalizacji opracowanego rozwiązania.

W rozdziale 10 dokonano podsumowania całego zakresu prac badawczych, na podstawie których wyciągnięto wnioski końcowe. Ostatnia część rozprawy zawiera spis literatury, a także streszczenia w języku polskim i angielskim oraz załączniki.

### **3.3. Ograniczenia i założenia**

W pracy ograniczono się do rozważań metod przetwórstwa polimerów techniką wtrysku ciśnieniowego do formy. Doświadczalnej weryfikacji tezy dokonano jedynie przy użyciu biokompozytu. Dzisiejszy stan techniki przetwórstwa polimerów pozwala także na wtrysk elastomerów kauczukowych, materiałów termoutwardzalnych i chemoutwardzalnych ciekłych żywic silikonowych (LSR). Jednak te techniki wymagają specyficznych urządzeń i maszyn dostosowanych do przetwórstwa tych materiałów, a procesy technologiczne w znacznym stopniu różnią się od przetwórstwa polimerów termoplastycznych. Z powodu ograniczeń sprzętowych oraz potrzeby skoncentrowania działań w jednym obszarze badawczym, odstąpiono od rozeznania możliwości rozwoju wymienionych metod przetwórstwa polimerów. Dodatkowym argumentem podjęcia takiej decyzji było przyjęte założenie efektu oddziaływania środowiskowego. Skupiono się na użyciu materiałów mogących przyczynić się do zmniejszenia śladu węglowego w całym cyklu trwania produktu.

Z powodu ograniczeń finansowych i określonego budżetu badawczego, nie wykonano podobnych badań na innym produktach. Koszty wykonania form wtryskowych są na tyle wysokie, że wykonanie kolejnych form przeznaczonych do produkcji innych detali nie było już możliwe. Z tego samego powodu nie powtórzono badań z wykorzystaniem wtryskarki o innej sile zwarcia i formy wtryskowej o innej liczbie gniazd formujących. Zakłada się, że proces jest skalowalny i z powodzeniem może zostać zaimplementowany zarówno w mniejszych, jak i większych liniach produkcyjnych.

## **4. METODA TWINSHOT**

### **4.1. Analiza zagadnienia**

W wyniku szczegółowej analizy literatury w obszarze problematyki pracy zauważono brak publikacji wyników badań w zakresie wtrysku wieloetapowego, który następuje do oddzielnych gniazd formujących. Specyfika branży i wytwarzanego produktu powoduje, że bardzo często pojawiały się sytuacje, w których siła zamykania wtryskarki była niewystarczająca z powodu liczby gniazd formujących, a co za tym idzie, powierzchni detali, na które oddziałuje ciśnienie wtrysku. Z racji bardzo małych gabarytów produktów, bardzo często było możliwe skonstruowanie form wtryskowych o większej liczbie gniazd niż używana, ponieważ powierzchnia płyt mocujących maszyny nie była w pełni wykorzystana. Niestety, używana forma, ze swoją mniejszą (od możliwej do zaprojektowania) liczbą gniazd, już znajdowała się na granicy wystarczalności dostępnej siły zamykania. Zrozumiałym kierunkiem rozwoju przedsiębiorstwa produkcyjnego jest zwiększanie wydajności produkcji, a w przypadkach, gdy cała siła zamykania maszyny była już wykorzystana, powodowało to konieczność zakupu większej wtryskarki, która będzie w stanie obsłużyć formę wtryskową o większej liczbie gniazd. Naturalnie, większa wtryskarka posiada większe stoły mocujące, co stawia sytuację w punkcie wyjścia; ponownie można by skonstruować jeszcze większą formę wtryskową.

Skłoniło to do poszukiwań sposobu wykorzystania dostępnej przestrzeni stołów roboczych użytkowanych maszyn, aby zwiększyć wydajność produkcji, jednocześnie nie dokonując zmian w zakresie typoszeregu używanej wtryskarki. Pierwszą propozycją rozwiązania było zastosowanie form piętrowych, które posiadają 2 pary płyt formujących, umieszczonych wzdłuż wysokości formy. Taka konstrukcja powoduje wzajemne kompensowanie się sił wynikających z ciśnienia wtrysku, i pomimo dwukrotnego zwiększania liczby gniazd formujących, nie ma potrzeby dwukrotnego zwiększania siły zamykania (zaleca się zwiększenie siły zamykania o 10 %, względem formy tradycyjnej, posiadającej 1 parę płyt formujących). Niestety takie formy są bardzo skomplikowane w konstrukcji i obsłudze, co powoduje ich bardzo wysoki koszt wytworzenia i trudności w poprawnym dopasowaniu płyt formujących do siebie. Takie rozwiązania istnieją już od wielu lat [39]. Z powodu

wysokiego kosztu formy piętrowej, są one stosunkowo rzadko stosowane w praktyce przemysłowej.

## 4.2. Opis metody TwinShot

Analizując metodę wtrysku sekwencyjnego, która jest dedykowana do produktów wielkogabarytowych i polega na opóźnieniu otwierania poszczególnych dysz wtryskowych, aby przesunąć położenie linii łączenia frontów polimeru [39, 40], poddano rozważaniom czy dwie sekwencje wtrysku do dwóch grup gniazd formujących, które nastąpią zaraz po sobie, ale nadal w trakcie jednego procesu pracy wtryskarki (podczas jednego cyklu zamknięcia formy), przyniosą wzrost wydajności produkcji i jak wpłyną na potrzebną siłę zamykania. W odróżnieniu od autorskiej metody TwinShot, wtrysk kaskadowy jest zwykle używany w celu utrzymania kierunku i prędkości propagacji uplastycznionego polimeru w formie [40, 46]. Głównym celem jest wprowadzanie ciepłego polimeru (otwierając kolejne dysze wtryskowe) dopiero po przepłynięciu frontu materiału za daną dyszę wtryskową [37, 40]. Badana metoda TwinShot zakłada równoczesny wtrysk do połowy niezależnych gniazd formujących, a po jego zakończeniu, wykonanie wtrysku do pozostałych (jeszcze pustych) gniazd. Każde gniazdo formujące będzie wyposażone w jedną zamykaną igłowo dyszę wtryskową, a gniazda nie będą ze sobą połączone w żaden sposób. Założeniem fundamentalnym możliwości zastosowania metody TwinShot jest dostępność niewykorzystanej powierzchni montażowej na płytach mocujących wtryskarki, która umożliwi skonstruowanie i zamontowanie formy wtryskowej o większej liczbie gniazd. Układ sterowania wtryskarki musi zostać odpowiednio zmodyfikowany przez producenta, aby umożliwić sterowanie i kontrolę dwoma podprocesami wtrysku, z których każdy będzie posiadał możliwość ustawienia własnego:

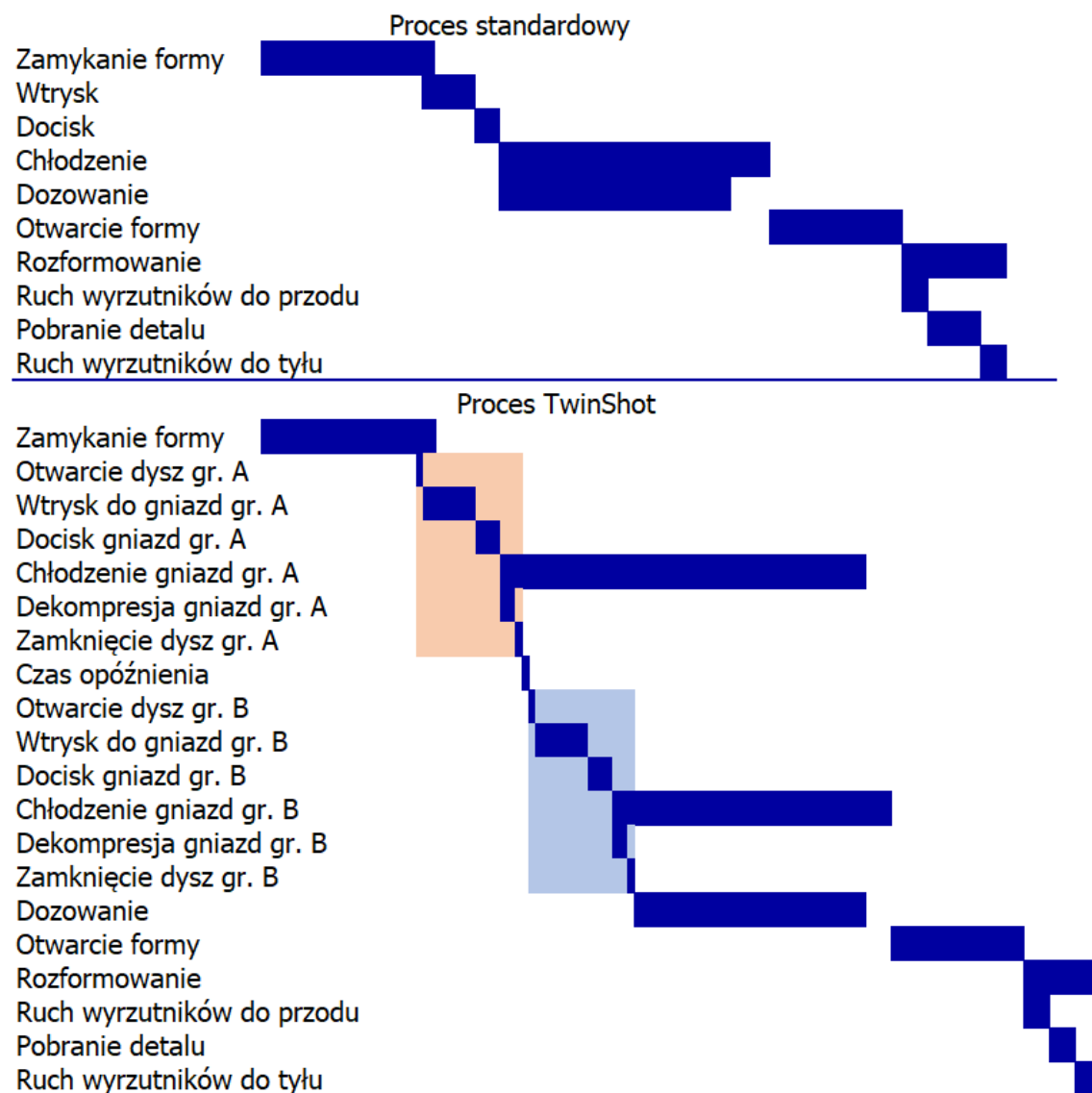
- stanu otwarcia i zamknięcia dysz wtryskowych,
- profilu prędkości wtrysku,
- maksymalnego ciśnienia wtrysku,
- punktu przełączenia z wtrysku na docisk,
- czasu trwania docisku,
- ciśnienia docisku,
- czasu chłodzenia,
- czasu opóźnienia pomiędzy dwoma podprocesami.

Rodzaj napędzania dysz wtryskowych musi zezwalać na ich niezależne sterowanie w dowolnej chwili. Znane są dysze napędzane pneumatycznie, hydraulicznie, elektrycznie oraz mechanicznie. Mechaniczny rodzaj sterowania nie będzie możliwy do wykorzystania w metodzie TwinShot, ponieważ dysze mechaniczne otwierają się automatycznie w momencie osiągnięcia konkretnej wartości ciśnienia stopu polimeru w rozdzielaczu i w dyszy wtryskowej. Taka specyfika działania uniemożliwi wtrysk tylko do wybranej połowy liczby gniazd formujących. Wybór pomiędzy pozostałymi metodami napędowymi wydaje się być bez znaczenia; każdy z nich jest wystarczająco dynamiczny, aby zastosować go w procesie TwinShot. Istotny jest symetryczny podział gniazd formujących na grupy A i B tak, aby zapewnić równomierne obciążenia kolumn wtryskarki podczas przeprowadzania procesów wtrysku. Nie jest dopuszczalne podzielenie gniazd na grupy według obszarów („góra – dół” lub „lewa – prawa”). Zaleca się podział co drugie gniazdo.

Na rys. 4.1 przedstawiono porównanie cyklogramu procesu TwinShot z procesem standardowym, opisanym w podrozdziale 2.6, który nie uwzględnia odjazdu agregatu wtryskowego w trybie pracy automatycznej, aby nie dopuścić do wycieku uplastycznionego polimeru z tulei wlewowej formy na skutek ciśnienia rezydualnego w rozdzielaczu GK.

Proces TwinShot zaczyna się od zamknięcia obu części formy wtryskowej i, w momencie osiągnięcia minimalnej siły zamykania, która jest wystarczająca do rozpoczęcia procesu wtrysku, następuje otwarcie dysz wtryskowych grupy A oraz wtrysk i docisk polimeru do gniazd formujących grupy A, po którym następuje dekompresja, aby łatwiej i szczelniej zamknąć dysze wtryskowe. Po zakończeniu podprocesu wypełniania gniazd grupy A, następuje czas opóźnienia podprocesów (np. w celu ustabilizowania ciśnienia pneumatycznego w instalacji zasilającej), a następnie są otwierane dysze grupy B, następuje wtrysk i docisk polimeru do gniazd formujących grupy B; ponownie jest wykonywana dekompresja w celu zmniejszenia ciśnienia resztkowego w cylindrze, i dysze grupy B są zamykane. Rozpoczyna się dozowanie i uplastycznianie stopu, który posłuży do kolejnego cyklu produkcyjnego, a po upływie zadanego czasu chłodzenia wyprasek z grupy B, forma otwiera się i następuje rozformowanie produktów i ich pobranie przez robota. Na cyklogramie widocznym na rys. 4.1 zaznaczono kolorem

pomarańczowym proces od otwarcia do zamknięcia dysz grupy A, a kolorem niebieskim – grupy B. Czas chłodzenia detali grupy A będzie zawsze dłuższy o czas opóźnienia oraz czas otwarcia dysz wtryskowych grupy B. Należy to uwzględnić w przypadku, gdy nadmierny czas chłodzenia może powodować zbyt duży skurcz wypraski, w wyniku którego mogą pojawić się problemy z rozformowaniem.



Rys. 4.1. Porównanie cyklogramów procesu standardowego oraz procesu TwinShot

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury zauważono brak publikacji ukazujących badania modyfikacji procesu wtrysku zgodnego z przedstawionym opisem. Autorską metodę nazwano zatem w ramach niniejszej pracy metodą „TwinShot” oraz postanowiono o przeprowadzeniu badań rozpoznających możliwości produkcyjne z wykorzystaniem opisanej techniki.

### 4.3. Możliwe zastosowania metody TwinShot

Należy zauważyć, że metoda TwinShot będzie mogła zostać zastosowana tylko w pewnych przypadkach, ponieważ ograniczenie dostępnej siły zamykania nie zawsze jest jedynym czynnikiem uniemożliwiającym zwiększenie wydajności produkcji. Innymi przeszkodami mogą być na przykład ograniczenia wynikające z maksymalnej prędkości wtrysku, wysokości montażowej formy czy objętości dozowania. Warty zaznaczenia jest jednak fakt, że stosowanie metody TwinShot przyniesie korzyści także w przypadku niewystarczającej prędkości wtrysku, którą dysponuje dany agregat wtryskowy, ponieważ często większa forma wtryskowa nie będzie posiadała więcej niż dwukrotności liczby gniazd formujących, co po podzieleniu na dwie grupy, spowoduje mniejszą liczbę gniazd, która jest wypełniania w danej chwili. Będzie to skutkowało zwiększeniem prędkości płynięcia polimeru w gnieździe formującym, ponieważ nastawa profilu prędkości wtrysku podzieli się na mniejszą liczbę jednocześnie napełnianych wyprasek.

Niewątpliwą korzyścią stosowania metody TwinShot będzie zwiększenie efektywności produkcji w jednostce czasu – na przykład w sztukach na godzinę. Równie ważnym aspektem będzie możliwe zwiększenie prędkości wtrysku w przeliczeniu na jedno gniazdo formujące, ponieważ wtrysk będzie przeprowadzany jednocześnie do mniejszej liczby gniazd. Stratą natomiast będzie wydłużenie czasu cyklu o czas trwania drugiego podprocesu wtrysku i docisku. Należy także pamiętać o różnicy w czasie chłodzenia wyprasek z obu podgrup procesowych. Wypraski wtryskiwane jako pierwsze będą chłodziły się dłużej od wyprasek wtryskiwanych w drugiej kolejności.

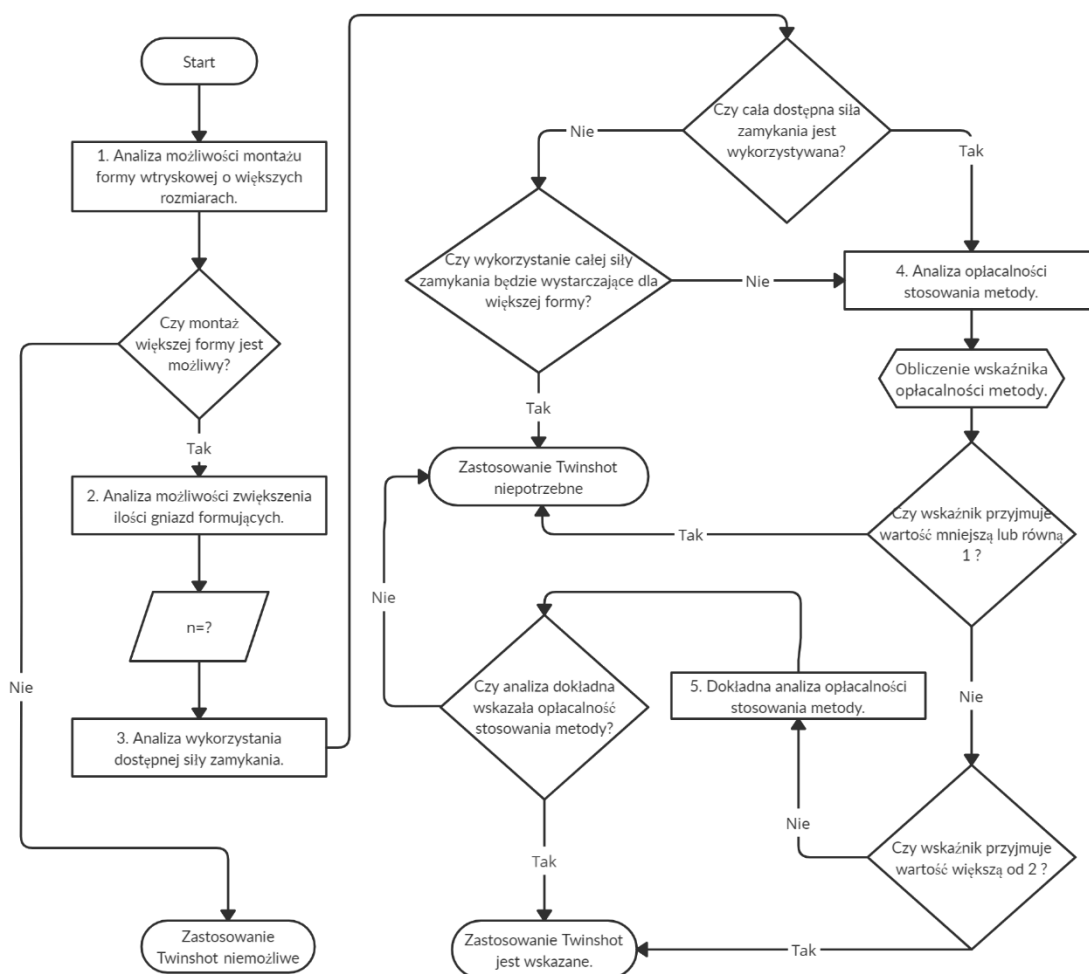
Trzeba zdawać sobie również sprawę ze zwiększonych kosztów inwestycji w formę wtryskową (wyposażoną w zamknięte igłowo dysze wtryskowe), jednak częściowo skompensuje to mniejszy poziom inwestycji w samą maszynę (o mniejszej sile zamykania), co przynosi korzyść nie tylko ekonomiczną, ale także organizacyjną w postaci mniejszego zapotrzebowania powierzchni produkcyjnej.

Metoda TwinShot nie wpłynie na bezpieczeństwo produkcji i nie ingeruje w strefy niebezpieczne maszyny [47].

Aby w sposób powtarzalny i jednoznaczny móc oszacować opłacalność zastosowania metody TwinShot, opracowano wskaźnik obliczeniowy, którego wynik pomoże ocenić racjonalność zastosowania i tym samym wspomóc proces decyzyjny. W tym celu przeprowadzono teoretyczny bilans zysków i strat, który został zweryfikowany w wyniku przeprowadzonych badań.

## 5. ALGORYTM DECYZYJNY STOSOWANIA METODY TWINSHOT

W celu uproszczenia oraz przyspieszenia procesu podejmowania decyzji dotyczących stosowania metody TwinShot w procesie produkcyjnym, opracowano algorytm decyzyjny, przedstawiony na rys. 5.1, który ma na celu usystematyzowanie podejścia weryfikacyjnego.



Rys. 5.1. Algorytm decyzyjny w postaci schematu blokowego

Fundamentalnym warunkiem stosowania metody TwinShot jest możliwość zamontowania formy wtryskowej o większej liczbie gniazd (wyposażonych w igłowo zamykane dysze wtryskowe), a co za tym idzie często także o większym gabarycie. Jest to pierwszy etap analizy. Jeżeli montaż większej formy jest możliwy, należy sprawdzić o ile gniazd można zwiększyć krotność formy wtryskowej, a następnie

upewnić się, czy siła zamykania, która jest obecnie wykorzystywana, lub którą dysponuje wtryskarka, nie jest nadal wystarczająca do zwiększonej liczby gniazd. Dopiero po sprawdzeniu tych założeń można wyliczyć wstępny wskaźnik weryfikacji opłacalności metody, a w przypadku wątpliwości, także przeprowadzić weryfikację dokładną. Otrzymany wynik pomoże jednoznacznie ocenić wpływ technologii na efektywność produkcji.

## 5.1. Wstępna weryfikacja opłacalności metody TwinShot

W ramach rozwoju innowacyjnej metody, opracowano autorski algorytm weryfikacji potencjalnej opłacalności zastosowania metody. W przypadku wielu przedsiębiorstw produkcyjnych jednym z głównych zamiarów jest optymalizacja kosztów w celu możliwości zaoferowania produktów w niższej cenie oraz zwiększenia zysków [48, 49, 50]. Nie bez znaczenia jest zatem aspekt ekonomiczny całej inwestycji i implementacji metody TwinShot w nowych lub istniejących liniach produkcyjnych.

Dokonano porównania stosunku całkowitych nakładów inwestycyjnych ( $I_c$ ) do godzinowej wydajności produkcyjnej ( $W_h$ ) w dwóch przypadkach: tradycyjnego procesu wtrysku oraz metody TwinShot. W tym celu określono metodę TwinShot jako weryfikowaną (parametry bis), a proces tradycyjny - jako metodę referencyjną (parametry prim). Wynik nazwano współczynnikiem weryfikacji wstępnej TwinShot ( $\omega$ ) co skutkowało otrzymaniem zależności (5.1).

$$\omega = \frac{\frac{I_c'}{W_h'}}{\frac{I_c''}{W_h''}} = \frac{I_c'}{W_h'} \cdot \frac{W_h''}{I_c''} = \frac{I_c' \cdot W_h''}{W_h' \cdot I_c''} \quad (5.1)$$

Otrzymana wartość jest liczbą bezwymiarową. Osiągnięcie parametru równego jeden będzie oznaczało brak różnic, a więc także brak celowości zastosowania metody TwinShot. Wartości mniejsze od jeden będą oznaczały brak korzyści jej stosowania, a wynik większy od jedności wskaże zasadność jej zastosowania.

Całkowity nakład inwestycyjny  $I_c$  należy określić jako sumę wszystkich wydatków, niezbędnych w procesie realizacji inwestycji, od jej rozpoczęcia do



uruchomienia produkcji, a więc przede wszystkim kosztu maszyny ( $I_M$ ), kosztu formy wtryskowej ( $I_F$ ), kosztu automatyzacji ( $I_A$ ) oraz kosztów pobocznych ( $I_P$ ):

$$I_c = I_M + I_F + I_A + I_P \quad (5.2)$$

Natomiast godzinowa wydajność produkcyjna  $W_h$  określa liczbę sztuk produktów możliwych do wykonania w ciągu jednej godziny i można ją wyliczyć używając całkowitego czasu trwania jednego cyklu ( $T_C$ ) oraz liczby gniazd formujących ( $n$ ). Zakłada się 100 % poprawność wykonanych wyprasek, dlatego we wzorze (5.3) odstąpiono od umieszczenia współczynnika odrzutu braków, który wskazywałby ile wyprasek w ciągu godziny zostało odrzuconych jako wybrakowane (niezgodne z kryterium jakościowym). Z uwagi na to, że czas cyklu najczęściej będzie wyrażony w sekundach, godzinę sprowadzono do równowartości w sekundach:

$$W_h = \frac{60 \cdot 60}{T_C} \cdot n = \frac{3600 \cdot n}{T_C} \quad (5.3)$$

Podstawiając równania (5.2) i (5.3) do (5.1), otrzymuje się zależność:

$$\omega = \frac{I_c' \cdot W_h''}{W_h' \cdot I_c''} = \frac{(I_M' + I_F' + I_A' + I_P') \cdot \frac{3600 \cdot n''}{T_C''}}{\frac{3600 \cdot n'}{T_C'} \cdot (I_M'' + I_F'' + I_A'' + I_P'')} \quad (5.4)$$

co po uporządkowaniu daje:

$$\omega = \frac{(I_M' + I_F' + I_A' + I_P') \cdot n'' \cdot T_C'}{(I_M'' + I_F'' + I_A'' + I_P'') \cdot n' \cdot T_C''} \quad (5.5)$$

Do celów wstępnej analizy można pominąć koszt automatyzacji oraz koszty poboczne, ponieważ ich różnica w zależności od metody będzie stosunkowo mała i będzie miała niewielkie znaczenie w obliczu wielokrotnie większych różnic kosztu formy. Zasadnym jest pozostawienie kosztu maszyny, ponieważ ten będzie różnił się o koszt implementacji sterowania TwinShot, a niekiedy także o różnicę

w koszcie większego agregatu wtryskowego, gdyby okazało się, że zwiokrotniona liczba gniazd formujących wymaga większych możliwości w zakresie dozowania materiału. Na podstawie przyjętych założeń opracowano uproszczony współczynnik weryfikacji wstępnej TwinShot ( $\Omega$ ):

$$\Omega = \frac{(I_M' + I_F') \cdot n'' \cdot T_C'}{(I_M'' + I_F'') \cdot n' \cdot T_C''} \quad (5.6)$$

Współczynnik  $\Omega$  obliczono w rozdziale 7.3.4, po wyliczeniu możliwej liczby gniazd formujących i wymaganej siły zamykania.

## 5.2. Dokładna weryfikacja opłacalności metody TwinShot

Możliwa jest także dokładniejsza weryfikacja opłacalności metody, która będzie oparta na częściowej kalkulacji produkcji, metodą szacunkową [51, 52]. Uznano, że po zastosowaniu metody, koszt wytworzenia produktów zmieni się w zakresach, które są zależne od wydajności produkcji oraz kosztu formy. Będą to zatem: koszt pracownika ( $K_P$ ), koszt energii elektrycznej ( $K_E$ ) oraz odpis amortyzacyjny formy ( $A_F$ ). Koszt pracownika  $K_P$  jest uzależniony od liczby pracowników zaangażowanych w proces produkcyjny ( $n_P$ ) oraz od kosztu osobogodziny ( $K_{Ph}$ ). Koszt energii elektrycznej  $K_E$  zależy od ilości zużytej energii elektrycznej w ciągu godziny pracy ( $n_E$ ) oraz od ceny tej energii ( $K_{EkWh}$ ). Koszt amortyzacji formy  $A_F$  jest rozłożeniem nakładów inwestycyjnych ( $I_F$ ) na prognozowaną żywotność formy wtryskowej, wyrażoną w liczbie cykli ( $Z_F$ ). Koszty te zdefiniowano w przeliczeniu na jedną wypraskę, za pomocą zależności (5.7), (5.8) i (5.9):

$$K_P = \frac{n_P \cdot K_{Ph}}{W_h} \quad (5.7)$$

$$K_E = \frac{n_E \cdot K_{EkWh}}{W_h} \quad (5.8)$$

$$A_F = \frac{I_F}{\dot{Z}_F \cdot n} \quad (5.9)$$

Podstawiając do zależności (5.7) oraz (5.8) wydajność godzinową ze wzoru (5.3), można otrzymać uszczegółowione postacie:

$$K_P = \frac{n_P \cdot K_{Ph}}{3600 \cdot n} = \frac{n_P \cdot K_{Ph} \cdot T_C}{3600 \cdot n} \quad (5.10)$$

$$K_E = \frac{n_E \cdot K_{EkWh}}{3600 \cdot n} = \frac{n_E \cdot K_{EkWh} \cdot T_C}{3600 \cdot n} \quad (5.11)$$

Jednostką równań (5.9-5.11) będzie waluta przyjęta do obliczeń, koniecznie spójna z walutą ujętą we wzorze (5.2). Wartym zaznaczenia jest fakt, że całkowity czas cyklu metody TwinShot można zdefiniować w odniesieniu do czasu cyklu metody podstawowej oraz czasu trwania wtrysku ( $T_w$ ), docisku ( $T_d$ ) oraz przesterowania zaworów wtryskowych ( $T_p$ ), który szacuje się, że nie powinien trwać dłużej niż 0,1 sekundy. Należy wtedy ujednotlić jednostkę czasu do sekundy:

$$T_C'' = T_C' + T_w + T_d + T_p \quad (5.12)$$

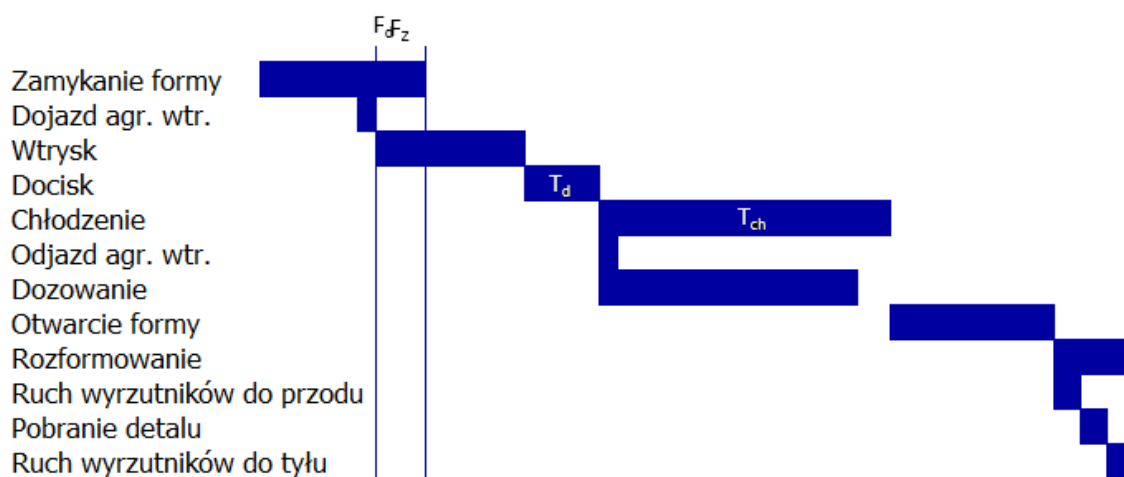
Przypisując parametry do weryfikowanych metod produkcji i nadając im odpowiednio cechy prim w odniesieniu do tradycyjnego procesu wtrysku (metoda referencyjna) oraz bis dla porównywanej metody TwinShot (podobnie jak podczas wstępnej weryfikacji), można obliczyć wartości każdego ze składników kosztowych, a następnie porównać je w przypadku obu metod. To porównanie zostało wykonane także po zakończeniu badań na wartościach rzeczywistych oraz zostało opisane w podrozdziale 9.1.

## 6. ANALIZA MOŻLIWOŚCI WDROŻENIA METODY TWINSHOT

Szerokie spektrum zastosowań wtryskarek do produkcji elementów polimerowych spowodowało, daleko idące, wyspecjalizowanie odmian procesu wtrysku, które przynoszą wymierne korzyści (np. ekonomiczne lub jakościowe) w danym obszarze zastosowań. Duża różnorodność materiałów i ich właściwości wymusza również indywidualne podejście do zagadnienia procesu. Wśród takich odmian można wyróżnić: wtryskiwanie z doprasowaniem, wtrysk proszków, mikrowtryskiwanie, wtrysk wielokomponentowy, wtrysk do formy piętrowej, wtrysk warstwowy typu „sandwich”, wtrysk z asystą gazu lub wody, wtrysk ze spienianiem, otryskiwanie, wtrysk z dekoracją (IML/IMD), wtrysk z rozdmuchem [53]. Dokonano wstępnej analizy możliwości zastosowania metody TwinShot w każdej z wymienionych odmian procesowych.

### 6.1. Wtryskiwanie z doprasowaniem

W przypadku wtrysku z doprasowaniem, po wtrysku materiału do formy następuje redukcja jej pojemności poprzez wsunięcie rdzenia hydraulicznego do gniazda formującego lub poprzez domknięcie formy, która w trakcie wtrysku nie była w pełni zaryglowana. Wtrysk taki przynosi szereg zalet w postaci polepszenia właściwości optycznych detalu czy zredukowania ciśnień procesowych. Cyklogram procesu wtrysku z dogniataniem przedstawiono na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Cyklogram procesu wtrysku z dogniataniem

Nie ma możliwości implementacji metody TwinShot w procesie wtrysku z doprasowaniem, ponieważ jest niezbędne częściowe otwarcie formy na początkowym etapie wtrysku.

## 6.2. Wtrysk proszków

Metoda wtrysku proszków została rozwinięta na potrzeby przetwórstwa proszków metali lub proszków ceramicznych, które do celu wtrysku są mieszane ze spoiwem polimerowym lub woskowym. Półprodukty wykonane na wtryskarce są nazywane „zielonymi detalami”, ponieważ wymagają dalszych procesów spiekania w celu osiągnięcia docelowych właściwości mechanicznych. We wstępnym procesie spiekania jest usuwane spoiwo, a w procesie ostatecznym następuje zestalenie proszku, zazwyczaj przeprowadza się to w temperaturach oscylujących w zakresie  $1\ 200\ ^\circ\text{C} \div 2\ 000\ ^\circ\text{C}$  [54]. Znane są także metody wtrysku wielokomponentowego proszków metali [55].

W tym przypadku istnieje możliwość implementacji metody TwinShot. Odstąpiono jednak od wykonywania grafu, ponieważ będzie on tożsamy z grafem procesu podstawowego; zmienia się tylko materiał i obróbka poprocesowa, która nie ma związku z główną metodą produkcji (wtryskiem).

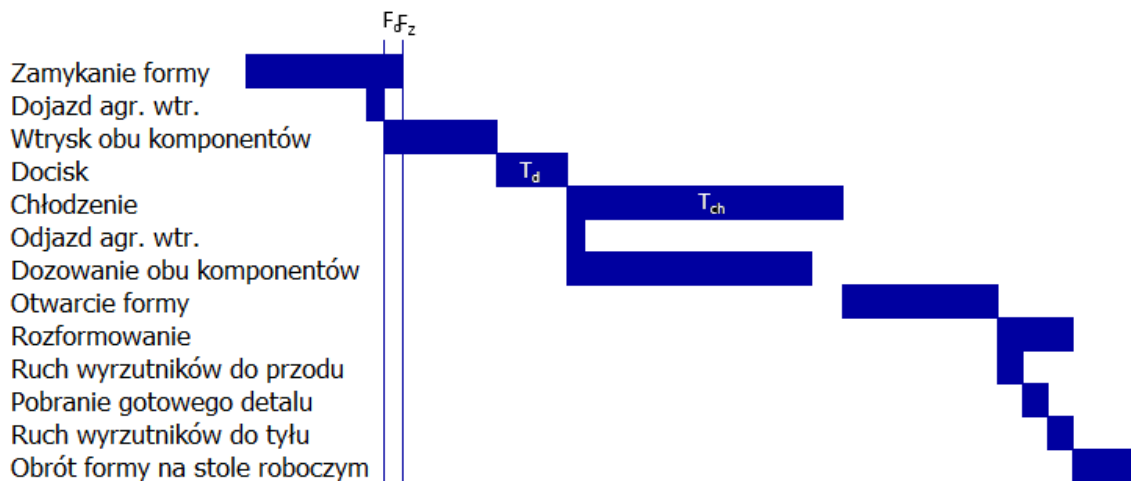
## 6.3. Mikrowtryskiwanie

Mikrowtryskiwanie to rodzaj procesu wyspecjalizowanego w produkcji bardzo małych elementów. Dawka wtryskowa na jeden cykl może zostać zmniejszona nawet do  $0,05\ \text{cm}^3$ . Aby zachować możliwie największą precyzję i wymaganą, stosunkowo wysoką prędkość wtrysku, często materiał dozuje się za pomocą ślimaka na czoło tłoczyska w drugim cylindrze. Tłoczysko, wykonując ruch posuwisty do przodu, generuje ciśnienie, które wpycha materiał do formy, następnie wycofuje się, aby umożliwić ponowne napełnienie cylindra wtryskowego [56]. Detale często są tak małe, że muszą być odbierane małym manipulatorem. Do celów kontroli jakości często jest niezbędna kamera powiększająca, która umożliwia wnikliwą analizę poprawności wykonania wypraski.

Z racji bardzo małych detali, w procesie mikrowtryskiwania bardzo rzadko występuje problem zbyt małej (nie wystarczającej) siły zamykania. Z reguły istnieje jej bardzo duża rezerwa. Powoduje to brak sensu stosowania metody TwinShot.

## 6.4. Wtrysk wielokomponentowy

Wtrysk wieloskładnikowy (otwarty) wymaga montażu przynajmniej dwóch cylindrów wtryskowych na jednej wtryskarce. Znane są różne metody montażu i ułożenia cylindrów względem siebie, co wpływa na konstrukcję formy wtryskowej. Agregaty wtryskowe mogą być także dostawiane tymczasowo do maszyn jednokomponentowych, umożliwiając tym samym wtrysk wielokomponentowy. Dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu podprocesów wtrysku, można uzyskać wypraskę składającą się z co najmniej dwóch materiałów, które są trwale ze sobą połączone. Istnieją różne metody wtrysku wielokomponentowego. Zasadniczo, po pierwszym procesie wtrysku, gniazdo formy musi pozyskać przestrzeń na kolejny materiał, co wymaga stosowania wysuwnych rdzeni, stołów obrotowych lub manipulatorów, które przekładają półprodukt do drugiego, większego gniazda formującego. Metoda jest używana często do dekorowania produktów lub wykonania wstawek z miękkiego materiału, aby zapewnić lepszy chwyt przedmiotu w dłoni lub wygodniejsze jego użytkowanie. Cyklogram wtrysku wielokomponentowego przedstawiono na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Cyklogram procesu wtrysku wielokomponentowego z obrotowym stołem roboczym

W tym przypadku ponownie zastosowanie metody TwinShot będzie bardzo trudne, ponieważ formy do wtrysku wielokomponentowego, z racji posiadania dodatkowych gniazd na wtrysk drugiego materiału, są bardzo duże gabarytowo, co bardzo często powoduje brak miejsca na dodatkowe gniazda formujące na stole montażowym maszyny.

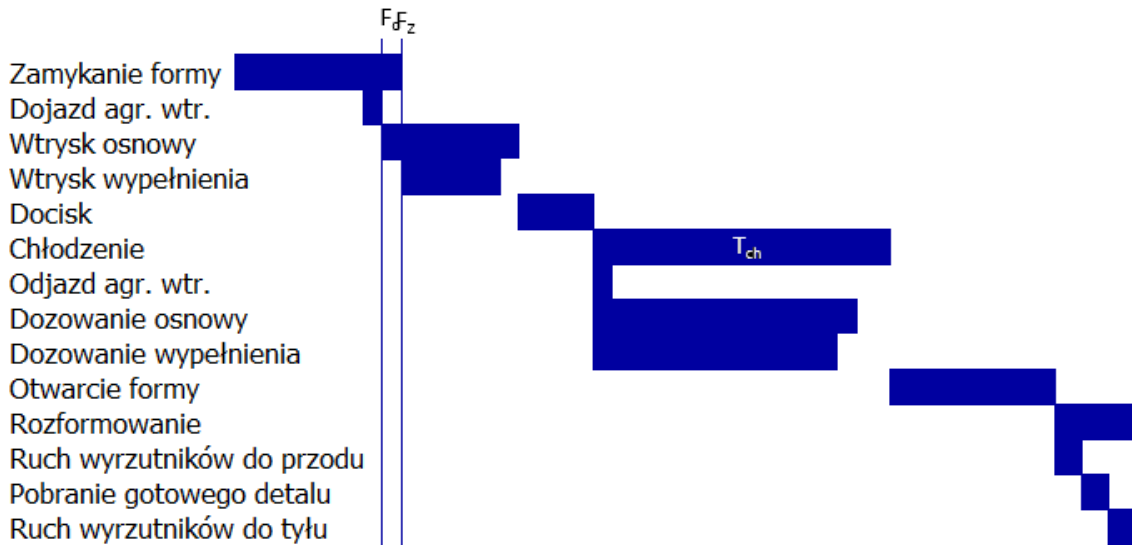
## 6.5. Wtrysk do formy piętrowej

Wtrysk z użyciem formy piętrowej to jedna z metod, której celem jest zwiększenie wydajności produkcji. Wtrysk następuje równocześnie do dwóch par płyt formujących, które są odpowiednio zamontowane w formie wtryskowej lub na dodatkowym stole pomocniczym wtryskarki. Technika ta wymaga bardzo skomplikowanej konstrukcji piętrowej formy wtryskowej, ponieważ układ wypychaczy oraz doprowadzenia materiału musi być zdublowany, co często jest wyzwaniem w kontekście miejsca i sposobu montażu lub przekazywania napędu. Poziom skomplikowania projektu oraz wykonania formy sprawiają, że jej koszt jest bardzo wysoki i często jest porównywalny z kosztem dwóch tradycyjnych form wtryskowych.

W tym przypadku istnieje możliwość zastosowania metody TwinShot i jeszcze lepszego wykorzystania dostępnej siły zwarcia. Szczególnie, że bardzo częstym ograniczeniem przy tego typu formach jest nie siła zamykania, a dostępna wysokość montażowa narzędzia w przestrzeni formy lub maksymalna dopuszczalna masa formy, co wymaga wyboru większej maszyny, której dostępna siła zamykania rzadko jest wykorzystana w całości. Cyklogram jest identyczny z podstawowym procesem wtrysku. Formowanie odbywa się równolegle w obu parach płyt formujących.

## 6.6. Wtrysk warstwowy typu „sandwich”

Wtrysk warstwowy typu „sandwich” jest rodzajem wtrysku wieloskładnikowego (zamkniętego) i zakłada wtrysk dwóch materiałów w taki sposób, że jeden tworzy osnowę wypraski, a drugi jej wypełnienie, które nie jest widoczne na powierzchni zewnętrznej. Aby uzyskać taki efekt, materiał jest wtryskiwany z dwóch cylindrów wtryskowych, poprzez jedną dyszę, do formy wtryskowej, z niewielkim opóźnieniem względem siebie. Można w ten sposób ukryć materiał o niższych właściwościach estetycznych wewnątrz materiału o cechach dekoracyjnych, co prowadzi do oszczędności ekonomicznych lub zwiększenia wytrzymałości mechanicznej produktu. Drugim zastosowaniem tej metody jest implementacja funkcjonalnej warstwy barierowej wewnątrz produktu (np. opakowania przeznaczonego do kontaktu z żywnością) [7, 53]. Proces wtrysku wieloskładnikowego, zamkniętego został przedstawiony na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Cyklogram procesu wtrysku warstwowego typu "sandwich"

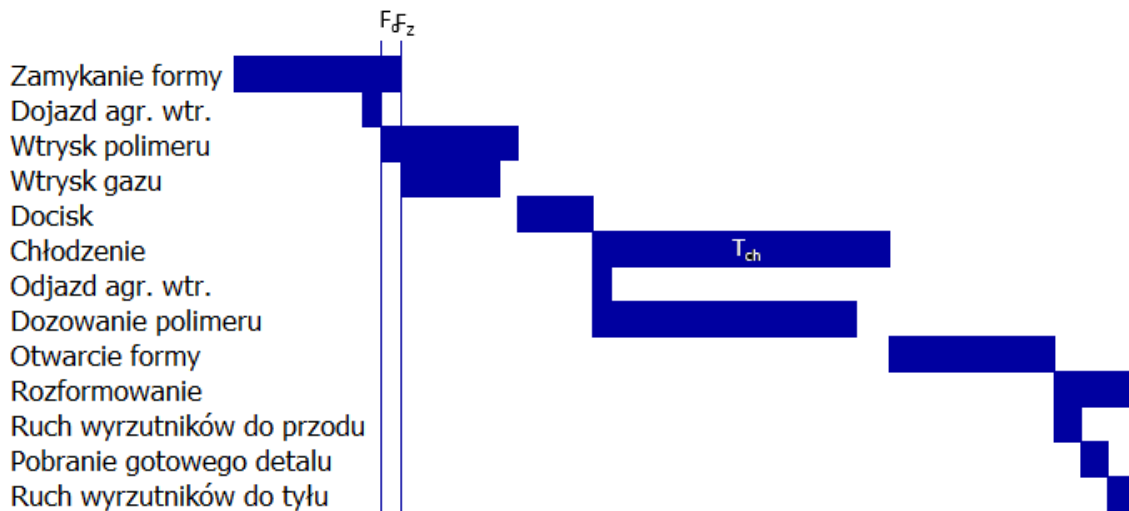
Metoda może zostać zastosowana, ponieważ istnieją rozwiązania form gorącokanałowych, które są przeznaczone do wtrysku warstwowego. Posiadają one specjalnie zaprojektowany układ dolotowy materiału, który gwarantuje otoczenie rdzenia przez osnowę. Konieczne będzie bardzo precyzyjne sterowania otwarciem dysz wtryskowych, aby zapewnić jednoczesny wtrysk dwóch niezmiyszanych materiałów w podziale na dwa procesy wtrysku, następujące po sobie.

## 6.7. Wtrysk z asystą gazu lub wody

Wtrysk z asystą gazu lub wody to proces zbliżony do wtrysku warstwowego typu „sandwich”, natomiast jego celem jest uzyskanie detalu pustego w środku. W tym celu, zamiast drugiego materiału, po częściowym wypełnieniu gniazda formującego materiałem bazowym, wtryskuje się gaz lub wodę, które to następnie są usuwane z wypraski przed jej rozformowaniem. Metoda ta przynosi znaczne oszczędności materiałowe w przypadku elementów grubo-ściennych i pozwala także uzyskać wypraski o niższym naprężeniu wewnętrznym, ponieważ ciśnienie wypełniające jest utrzymywane przez cały czas docisku, a medium to (woda lub gaz) nie zastyga, w przeciwieństwie do polimeru [57]. Na rys. 6.4 przedstawiono cyklogram wtryskiwania z asystą gazu.

Z racji bardzo małej popularności metody wtrysku z przetryskiem wody, nie analizowano tego rozwiązania pod kątem metody TwinShot. Zweryfikowano jednak





Rys. 6.4. Cyklogram procesu wtrysku z asystą gazu

możliwości zastosowania metody podczas wtrysku z asystą gazu, ponieważ ten proces jest powszechnie praktykowany. Metoda TwinShot może zostać zastosowana w takim przypadku.

## 6.8. Wtrysk ze spienianiem

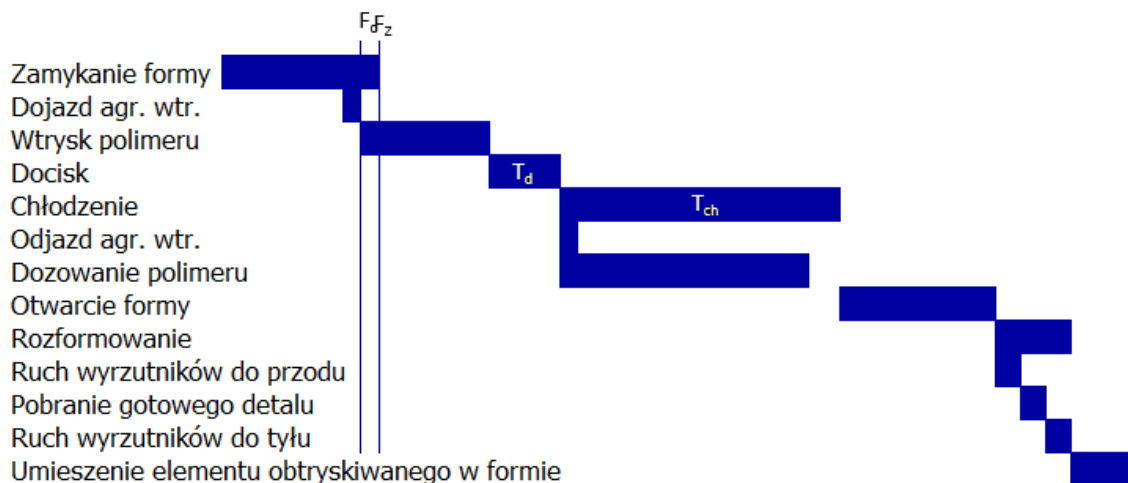
W przypadku wtrysku ze spienianiem (nazywanego także wtryskiem mikroporującym) istnieją dwie zasadnicze metody spieniania polimeru: metoda chemiczna, w której spienianie polimeru polega na reakcji chemicznej i z punktu widzenia cyklogramu, proces nie różni się od wtrysku standardowego polimeru, oraz metoda fizyczna, za pomocą sprężonego gazu, który jest wprowadzany do polimeru na etapie jego plastyfikacji, przed wtryskiem do formy. Jako czynnika spieniającego używa się najczęściej azotu lub dwutlenku węgla. Reakcja z polimerem powoduje uzyskanie struktury porowatej wewnątrz wypraski. Powierzchnie zewnętrzne produktu są gładkie [1].

W tym przypadku istnieje możliwość zastosowania metody TwinShot, ponieważ jest wtryskiwana homogeniczna mieszanka spienionego materiału, a więc, w przeciwieństwie do np. wtrysku „Sandwich”, wtryskiwany polimer jest jednorodny w trakcie całego cyklu wtrysku. Należy jedynie zadbać o równomierne spienianie materiału w trakcie całego dozowania. Cyklogram tej metody jest spójny z podstawowym procesem wtrysku. Dodatkowym atutem stosowania metody TwinShot w przypadku wtrysku ze spienianiem jest powszechne użytkowanie dysz zamykanych w takiej produkcji, ponieważ w trakcie dekompresji, gaz zawarty

w materiale przebywającym w rozdzielaczu gorąco-kanalowym i dyszach wtryskowych nie może ulec rozprężeniu. Częste stosowanie zamykanych dysz wtryskowych w znacznym stopniu niweluje różnicę inwestycyjną zastosowania metody TwinShot.

## 6.9. Otryskiwanie

Otryskiwanie jest metodą przeznaczoną do celów produkcji detali konstrukcyjnych, które przenoszą znaczne obciążenia i umożliwia oblanie elementów wzmacniających, jak np. zbrojenia czy metalowe tuleje gwintowane. Elementy te wkłada się do formy wtryskowej w specjalnie zaprojektowane gniazda. W trakcie procesu wtrysku front polimeru oblepia element, co powoduje jego bardzo silne połączenie. Cyklogram procesu otryskiwania pokazano na rys. 6.5.

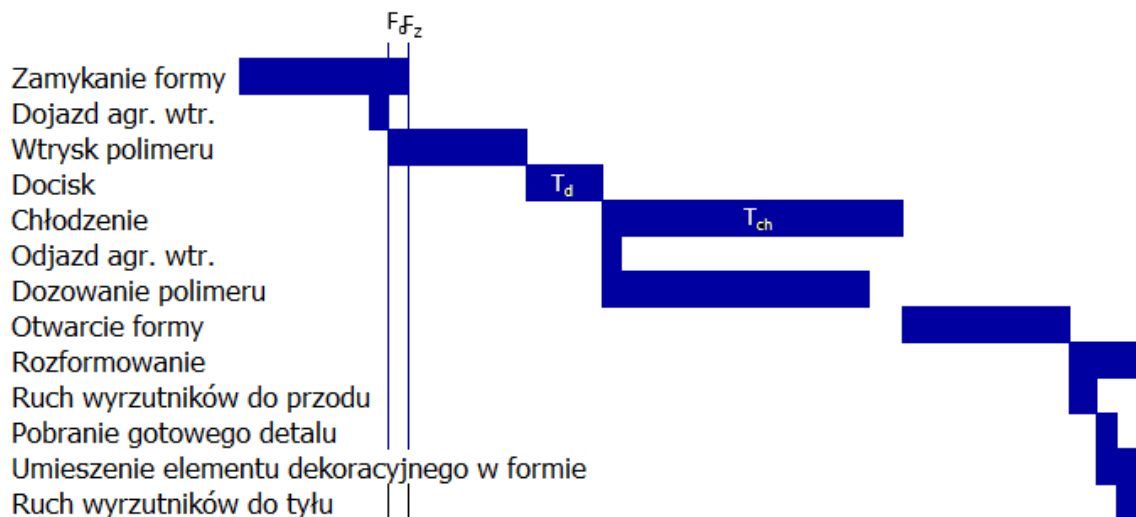


Rys. 6.5. Cyklogram procesu wtrysku z otryskiem elementów

Otryskiwanie jest kolejną metodą wtrysku, w której TwinShot znajdzie zastosowanie. Wszystkie gniazda formujące muszą być wyposażone w elementy otryskiwane w trakcie otwarcie formy, a następnie sam wtrysk może być rozdzielony pomiędzy dane gniazda formujące. W przypadku projektowania procesu otryskiwania z uwzględnieniem metody TwinShot, należy pamiętać o różnych wartościach czasu chłodzenia dla każdej grupy gniazd. Może to powodować różnice w naprężeniach wewnętrznych wokół otryskiwanych elementów i tym samym prowadzić do deformacji poprocesowych jak np. pęknięcia polimeru. W przypadku, gdy elementy otryskiwane są ogrzewane przed procesem, trzeba pamiętać o opóźnieniu drugiego wtrysku, co spowoduje nieznaczne różnice temperatury elementów podczas ich otryskiwania.

## 6.10. Wtrysk z dekoracją (IML / IMD)

W przypadku wtrysku z dekoracją istnieje kilka technik dekorowania elementów polimerowych. Najpopularniejszymi z nich są metody etykietyzacji wewnątrz formy (IML – In Mould Labelling) oraz dekoracji za pomocą drukowanej folii (IMD – In Mould Decoration). W obu przypadkach, do matryc wtryskowych wprowadza się etykietę lub folię, która w trakcie procesu wtrysku jest nadtapiana i trwale łączy się z odpowiednio dobranym polimerem. W przypadku techniki IML, pojedyncze etykiety są wkładane do gniazda za pomocą robota. Najczęściej spotykanym zastosowaniem tej techniki jest produkcja opakowań do żywności, natomiast etykiety nie muszą pełnić roli czysto dekoracyjnej, ponieważ mogą to być również etykiety RFID. W przeciwieństwie do dekorowania elementów za pomocą druku, po procesie wtrysku techniką IML / IMD nie jest już wymagana żadna dodatkowa operacja. W metodzie IMD, po otwarciu formy i pobraniu detalu, folia jest rozwijana z roli zamontowanej nad formą i rozciągana nad gniazdem formującym. W trakcie zamykania formy, folia zostaje naciągnięta poprzez drugą połówkę formy i dalszy zamysł procesu jest zbliżony [41]. Przebieg procesu wtryskiwania z dekoracją przedstawiono na rys. 6.6.

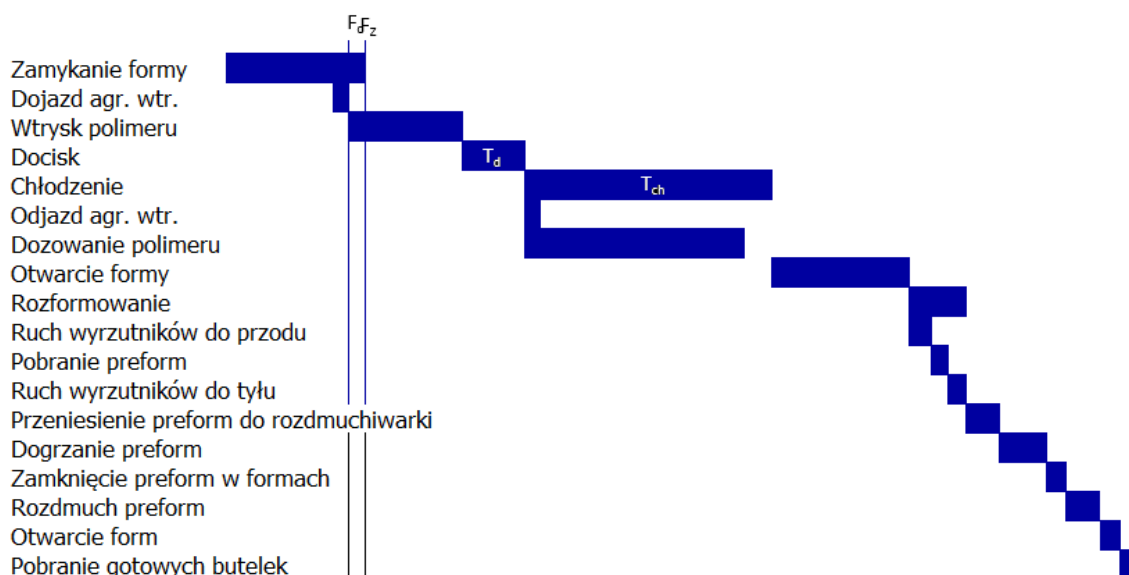


Rys. 6.6. Cyklogram procesu wtrysku z dekoracją IML / IMD

Podobnie jak w przypadku obtrysku, do wtrysku z dekoracją metoda TwinShot może zostać zastosowana, a wszystkie gniazda muszą być wyposażone w etykietę w trakcie otwartej formy, natomiast sam proces wtrysku może zostać podzielony na 2 etapy – zgodnie z metodą.

## 6.11. Wtrysk z rozdmuchem

Wtrysk z rozdmuchem jest wykorzystywany do wszelkiego rodzaju pojemników i opakowań cienkościennych. W pierwszej operacji produkcji powstaje półprodukt, tzw. „preforma”, która często zawiera gotowy kołnierz technologiczny oraz gwint. Następnie proces zakłada ogrzanie obszaru poniżej kołnierza technologicznego i wprowadzenie sprężonego powietrza pod dużym ciśnieniem, co powoduje rozdmuchanie rozgrzanego polimeru na ścianki formy rozdmuchowej. Obie operacje mogą być wykonane na tej samej maszynie (wtryskarko-rozdmuchiarka) lub na dwóch oddzielnych: wtryskarce oraz rozdmuchiwarce. Jest to metoda używana np. do produkcji butelek PET do napojów [58]. Przebieg procesu został przedstawiony na rys. 6.7.



Rys. 6.7. Cyklogram procesu wtrysku z rozdmuchiwaniem

Technika TwinShot może z powodzeniem zostać użyta do produkcji preform na wtryskarce. Jest to obszar, w którym wydajność jest bardzo ważnym czynnikiem w kalkulacji produkcji i konkurencyjności producentów na rynku, a więc metoda ma szanse przynieść wymierne korzyści ekonomiczne i technologiczne. Dalszej analizie należy poddać możliwości zastosowania tej metody na wtryskarko-rozdmuchiwarce, jednak zdecydowano o niewłączaniu tego w zakres rozprawy z racji ograniczenia obszaru badawczego do zakresu wtryskarek.

## **7. PRZYGOTOWANIA DO BADAŃ PROCESU TWINSHOT**

Następnym krokiem, po teoretycznej części analitycznej, było doświadczalne sprawdzenie możliwości wykonania opisanego cyklu technologicznego. W ramach przygotowań opracowano metodykę badań, dobrano elementy układu pomiarowego, określono mierzone wartości oraz zdefiniowano kryteria oceny wyników doświadczenia. Następnie przygotowano plan eksperymentu, wybrano polimer, który posłużył do badań, skonstruowano oraz zlecono wykonanie badawczej formy wtryskowej, jak również zaprojektowano i wykonano sterownik dysz wtryskowych.

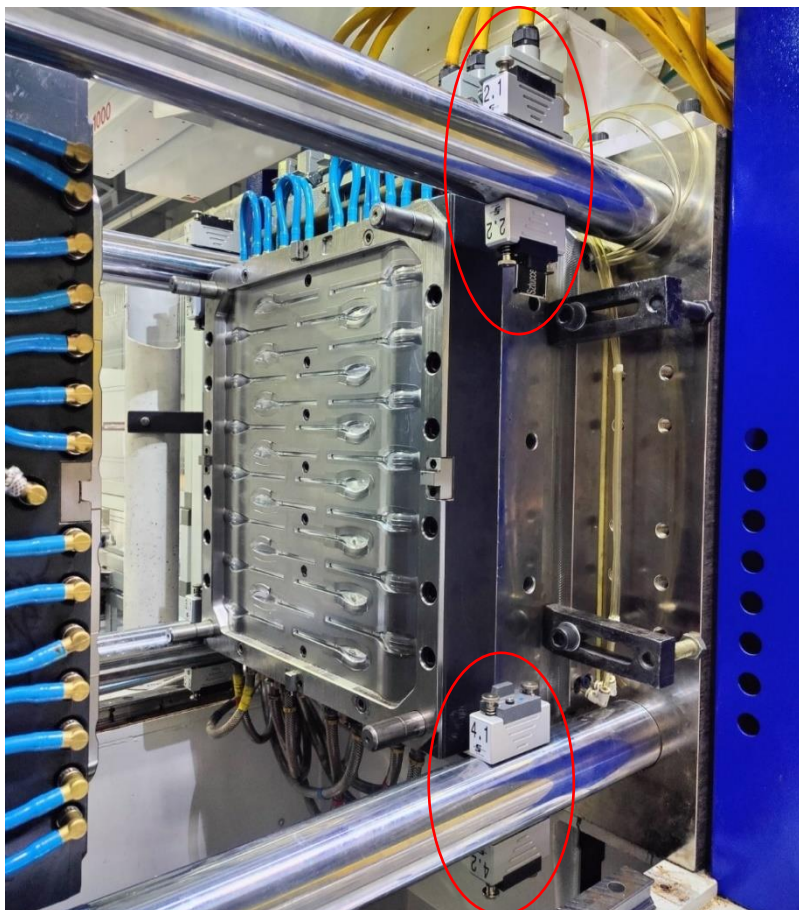
### **7.1. Określenie wartości pomiarowych i opis układu pomiarowego**

Wartością, która jest łatwa do zmierzenia i ma bezpośredni wpływ na powodzenie procesu wtrysku, jest siła zamykania, czyli siła, z jaką obie połówki formy wtryskowej są ze sobą zwierane w trakcie procesu wtrysku.

Siła zamykania będzie monitorowana w postaci odkształcenia powstałego podczas stanu naprężenia kolumn układu zamykania wtryskarki. Wszystkie wydłużenia powstałe w trakcie pracy maszyny powstają w wyniku oddziaływania obciążeń użytkowych, posiadają charakter jednostronny (odzewowo-tętniący) i mieszczą się w zakresie odkształceń sprężystych [59]. Tym samym jest możliwe zastosowanie prawa Hooke'a do obliczeń wytrzymałościowych [60, 61, 62].

Do pomiaru odkształcenia użyto 8 sztuk czujników tensometrycznych firmy Gefran / Sensormate, model QE1008W-SET, które są dedykowane do pomiarów na kolumnach wtryskarek lub pras. Poza wysoką dokładnością pomiarową oraz powtarzalnością wyników, odznaczają się one także wygodnym i szybkim systemem montażowym, z wykorzystaniem bardzo silnych magnesów, które dociskają tensometryczny element pomiarowy do powierzchni kolumny wtryskarki. Na każdej kolumnie montuje się jedną parę czujników, które muszą być zamontowane w odstępach 180° wokół osi kolumny. Aby zapewnić wiarygodność pomiaru, odstęp

między czujnikiem, a płytą montażową wtryskarki nie może wynieść mniej niż wartość średnicy kolumny [63]. Czujniki łączą się za pomocą bezprzewodowej transmisji LR-WPAN w paśmie ISM 2,4 GHz, według standardu IEEE 802.15.4, z modułem odbiorczym, który za pośrednictwem portu USB jest połączony z komputerem PC [64]. Używając dedykowanego oprogramowania Inspectmate można odczytywać wartości odkształceń, które po podaniu średnicy kolumny, są także przeliczane na siłę zamykania w 2 różnych jednostkach. Jest również możliwe kreślenie wykresów przebiegu wielkości odkształcenia i siły zamykania w czasie, a także wyeksportowanie i zapisanie zbioru danych z całego okresu pomiarowego w pliku „.csv” [65]. Kompletne stanowisko badawcze pokazano na rys. 7.1, na którym umiejscowienie czujników zaznaczono na czerwono.



Rys. 7.1. Widok stanowiska badawczego wraz z czujnikami Gefran / Sensormate

Po montażu czujników na kolumnach, dokonuje się zerowania czujników przy zachowaniu otwartej formy wtryskowej. Czujniki w ten sposób przyjmują chwilowy stan jako punkty odniesienia, a ich wskazania są zerowane. Następnie, po

zamknięciu formy i rozciągnięciu kolumn, czujniki wykrywają tę zmianę, pokazując to w postaci odkształcenia względem stanu otwartej formy wtryskowej. W celu upewnienia się o poprawności montażu czujników, dokonano kilka próbnych zamknięć formy. Powtarzalność odczytów siły zamykania świadczyła o poprawnym zamocowaniu czujników na kolumnach wtryskarki, a całe stanowisko badawcze było gotowe do rozpoczęcia pomiarów.

## **7.2. Zdefiniowanie kryteriów oceny**

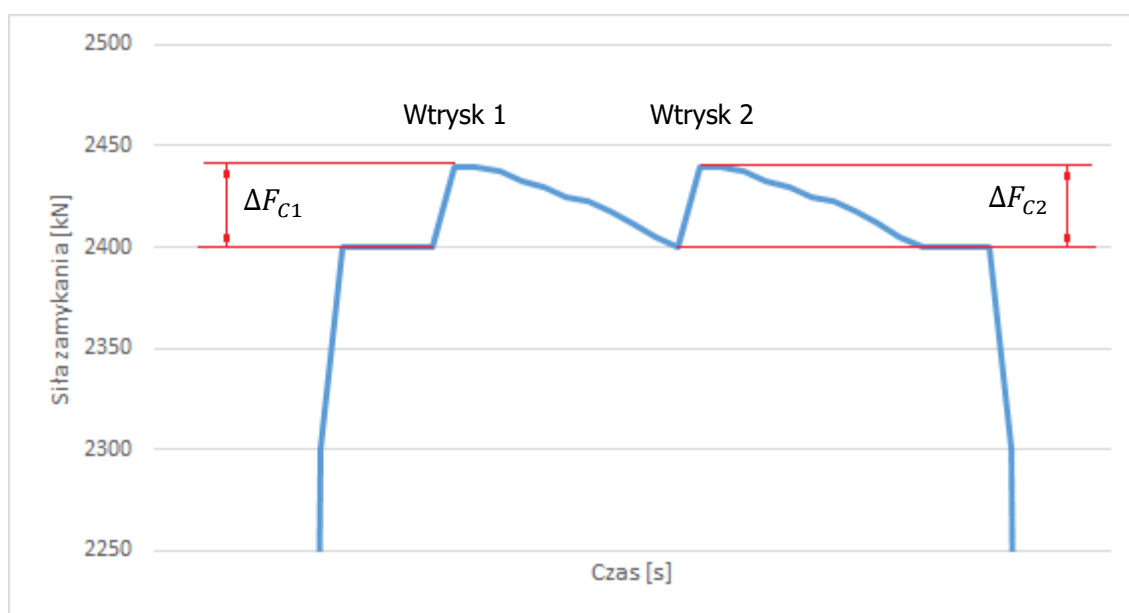
W celu weryfikacji tezy pracy posłużono się czterema zasadniczymi kryteriami oceny, które zdefiniowano w tym rozdziale. Zostaną one wykorzystane do oceny zgodności zmodyfikowanego procesu produkcyjnego. Aby proces mógł zostać uznany za poprawny, wymagane będzie osiągnięcie zgodności z każdym z czterech kryteriów.

Pierwsze kryterium jest związane z ogólną oceną poprawności wykonania wypraski i jest przeprowadzane na podstawie oceny wizualnej wypraski. Zakłada ono poprawne wypełnienie całego detalu, całkowity brak nadlewek oraz obszarów niedolanych. Produkty będą porównywane z wypraskami wykonanymi metodą tradycyjną, w poprawnych warunkach procesowych. Takie postępowanie zapewnia o prawidłowym wykonaniu formy wtryskowej, w związku z czym, jeśli powstaną nadlewy, nie będą one uwarunkowane niedokładnościami wykonawczymi narzędzia, lecz niepoprawnym procesem produkcyjnym.

Zostanie również porównana masa wyprasek, która posłuży dwóm celom. Pierwszy z nich określi, czy proces produkcyjny jest stabilny i tym samym może w ogóle zostać poddany dalszej ocenie. Stabilność procesu zostanie zmierzona za pomocą współczynnika zmienności, którego wartość poniżej 0,32 % potwierdza wysoką powtarzalność procesu [66]. Drugim celem będzie ewaluacja masy samej wypraski i porównanie jej z masą produktu wykonanego w procesie referencyjnym. Różnica masy wyprasek wykonanych obiema metodami nie powinna wynosić więcej niż 1,0 %.

Kolejnym kryterium będzie wartość przyrostów sił zamykania podczas procesu wtrysku. Normalnym zjawiskiem jest wzrost wymienionej siły w momencie fazy

wtrysku i docisku, gdy pojawia się ciśnienie wewnątrz gniazda formującego, które w wyniku oddziaływania na ściany formy wtryskowej powoduje siłę przeciwdziałającą sile zamykania formy [67, 68, 69, 70]. Z racji samoryglującej się charakterystyki zamka kolanowego, siła ta oddziałuje na kolumny wydłużając je, co może być widoczne na pomiarze jako chwilowy wzrost siły zamykania. W przypadku procesu wtrysku prowadzonego metodą TwinShot są spodziewane dwa, chwilowe wzrosty siły zamykania, pokazane na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Spodziewany przebieg wartości siły zamykania w czasie

Aby móc bezpiecznie założyć, że modyfikacja procesu wtryskowego nie zmienia zasadniczo warunków przetwórczych, wzrost siły zamykania podczas drugiego wtrysku nie może być większy od siły zamykania podczas pierwszego wzrostu o więcej, niż 10 % wartości chwilowego wzrostu, a więc:

$$\Delta F_{C2} \leq 110 \% \cdot \Delta F_{C1} \quad (7.13)$$

Ewentualna różnica rzędu 10 % wartości chwilowego wzrostu siły zamykania nie powinna spowodować znaczących różnic w procesie produkcyjnym i może równie dobrze wynikać z dokładności pomiarowej lub zakłóceń środowiskowych w czasie



pomiaru (np. drgań). Jednocześnie wartość przyrostu siły zamykania nie może być większa niż 2,0 % siły zamykania przed wtryskiem [66].

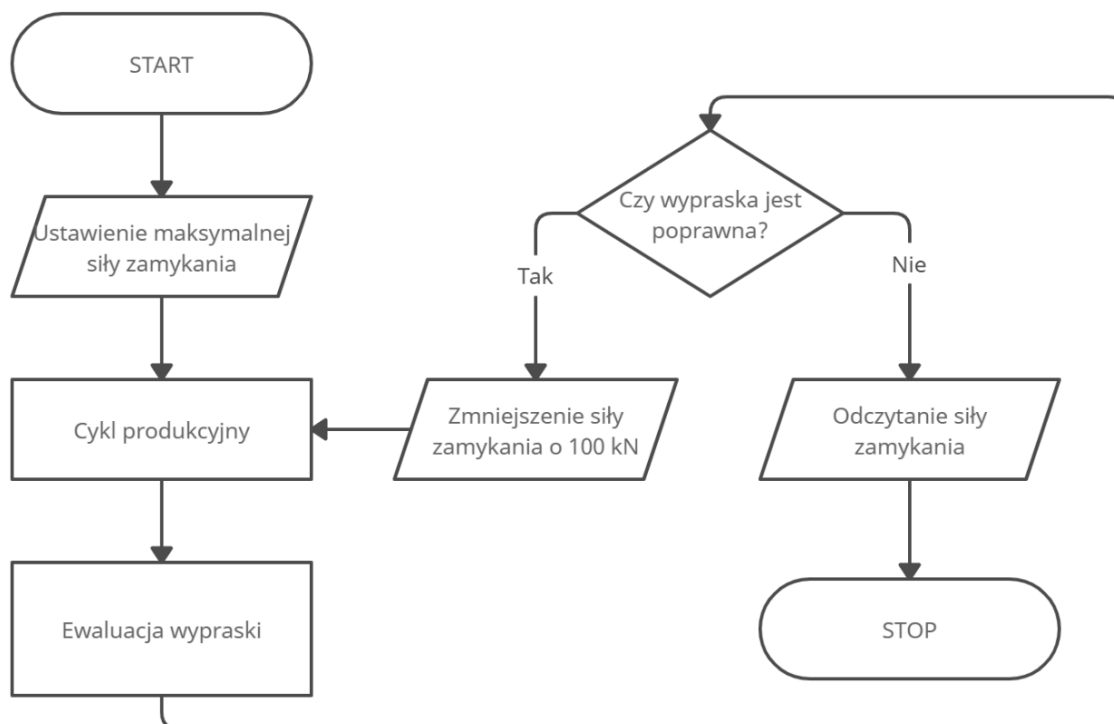
### 7.3. Plan eksperymentu

W celu weryfikacji poprawności postawionych tez, wykonano prototypową cełę produkcyjną, opartą na założeniach procesu wtrysku TwinShot. Rozpoczęto od wyboru detalu oraz polimeru, na których będą przeprowadzane próby. Zaprojektowano oraz zlecono wykonanie formy prototypowej, a następnie formy badawczej, która będzie docelowym narzędziem użytym podczas badań.

Doświadczalne sprawdzenie poprawności tezy wymaga referencji i punktu odniesienia [71, 72], do którego będzie można porównać detale otrzymane w wyniku procesu TwinShot. W celu wykonania referencji, zostanie przeprowadzony cykl produkcyjny, obejmujący tylko taką liczbę gniazd formujących, która zostanie wyliczona jako poprawna, zgodnie z dotychczasowym opisem w literaturze. Wyliczenia zostaną przedstawione w podrozdziale 7.3.4. Detale te będą zachowane jako wzorcowe. Następnie zostanie zmodyfikowany proces produkcyjny według opracowanej metody, opisanej w rozdziale 4 i zostaną przeprowadzone kolejne cykle produkcyjne, przy wykorzystaniu wszystkich dostępnych gniazd formujących oraz maksymalnej możliwej siły zamykania – przy jednoczesnym monitorowaniu odkształcenia kolumn wtryskarki. Detale wykonane obiema metodami zostaną poddane ocenie opisanej w podrozdziale 7.2.

Dalszym etapem będzie stopniowe obniżanie siły zamykania wtryskarki w krokach co 100 kN, aż do momentu, w którym przy użyciu zredukowanej siły zamykania, detale zostaną uznane za niepoprawne lub kiedy wartości chwilowego przyrostu siły zamykania zaczną osiągać wartości niekorzystne dla układu kolanowego wtryskarki, a więc narażą podzespoły układu zamykania na awarię, np. pęknięcie sworznia, kolumny lub kolana. Osiągnięta w ten sposób siła zamykania zostanie porównana do siły, która wynika z obliczeń wymaganej siły zwarcia podczas wtryskiwania metodą tradycyjną, przy uwzględnieniu całkowitej liczby użytych gniazd w procesie TwinShot. Takie porównanie zobrazuje wartość wymaganej siły

zamykania, która została zredukowana dzięki zastosowaniu metody TwinShot. W celu ułatwienia i usystematyzowania procesu badawczego przygotowano prosty algorytm obrazujący drugi etap badań. Algorytm ten przedstawiono na rys. 7.3.



Rys. 7.3. Algorytm drugiego etapu badań

Pomiary będą rejestrowane przez nieprzerwany okres 25 cykli produkcyjnych, na ustabilizowanym procesie technologicznym, który zapewni wiarygodność wyników, a tym samym będzie możliwe ich porównywanie między sobą. Cykl pomiarowy będzie powtarzany z coraz mniejszymi siłami zamykania, a wszystkie cykle zostaną wykonane jeden po drugim, co powinno zapewnić możliwie wysoką powtarzalność i jednorodność stopu polimeru i warunków otoczenia. Przed przystąpieniem do analizy wyników, zebrane wartości pomiarowe zostaną zwalidowane w celu oceny stabilności procesu. W przypadku masy wypraski, walidacja nastąpi za pomocą odchylenia standardowego, które powinno wynieść mniej niż 0,02 [73] i współczynnika zmienności, który powinien być niższy od 0,32 % [66]. W momencie osiągnięcia pierwszej błędnej wypraski, zostanie odczytana siła zamykania, która będzie już niewystarczająca do przeprowadzenia poprawnego procesu produkcyjnego z wykorzystaniem metody TwinShot.

### **7.3.1. Wybór detalu**

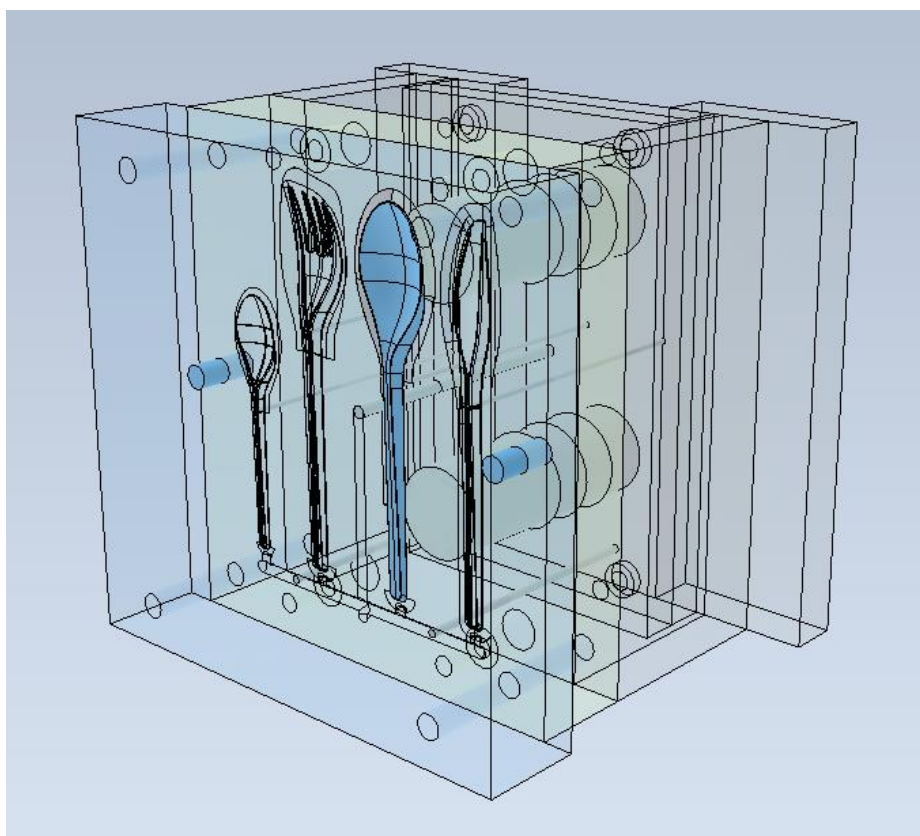
Jako detal testowy wybrano sztucze wielorazowe, wykonane z polimeru, które z racji zmian branżowych [74] są produktem z dużym potencjałem rynkowym. Zgodnie z trendami i zagadnieniami opisanymi w rozdziale 1, dotychczasowe sztucze jednorazowe są rozpatrywane jako produkt przyczyniający się do zanieczyszczenia planety i Unia Europejska, na mocy Dyrektywy SUP [74], wprowadza ograniczenia oraz zakazy dotyczące wybranych produktów jednorazowego użytku. Alternatywą dla artykułów wycofywanych z obrotu mają być ich wielorazowe odpowiedniki. Sytuacja ta dotyczy także wspomnianych sztucców, które z powodzeniem znajdują zastosowanie w przeróżnych punktach gastronomicznych w wielu państwach na całym świecie. Nawyki dotyczące żywienia poza domem wydają się być tak silne, że niezbędnym jest opracowanie nowoczesnego odpowiednika zakazywanych produktów. Wielokrotność użytkowania sztucców powinna przyczynić się do obniżenia ilości surowca wprowadzanego na rynek, co przełoży się na mniejszy ślad węglowy i w mniejszym stopniu wpłynie na wykorzystanie zasobów naturalnych planety.

### **7.3.2. Konstrukcja prototypowej formy wtryskowej**

Forma wtryskowa wykonana w technice zamykanych igłowo dysz wtryskowych jest stosunkowo drogim środkiem technicznym, dlatego często projektuje się prototypowe formy wtryskowe, aby przekonać się o poprawności projektowej nowego detalu i poddać go dalszym ewaluacjom przed wykonaniem ostatecznego narzędzia produkcyjnego [75]. Można w tym celu użyć także drukarek 3D, które mogą wykonać detale prototypowe bez konieczności wykonywania formy testowej. Jednak w tym przypadku zdecydowano o wykonaniu prototypów z wykorzystaniem formy testowej, co wykorzystano także do wyboru ostatecznego materiału. Niestety drukarki 3D wykorzystują inne polimery niż rozważane do produkcji sztucców.

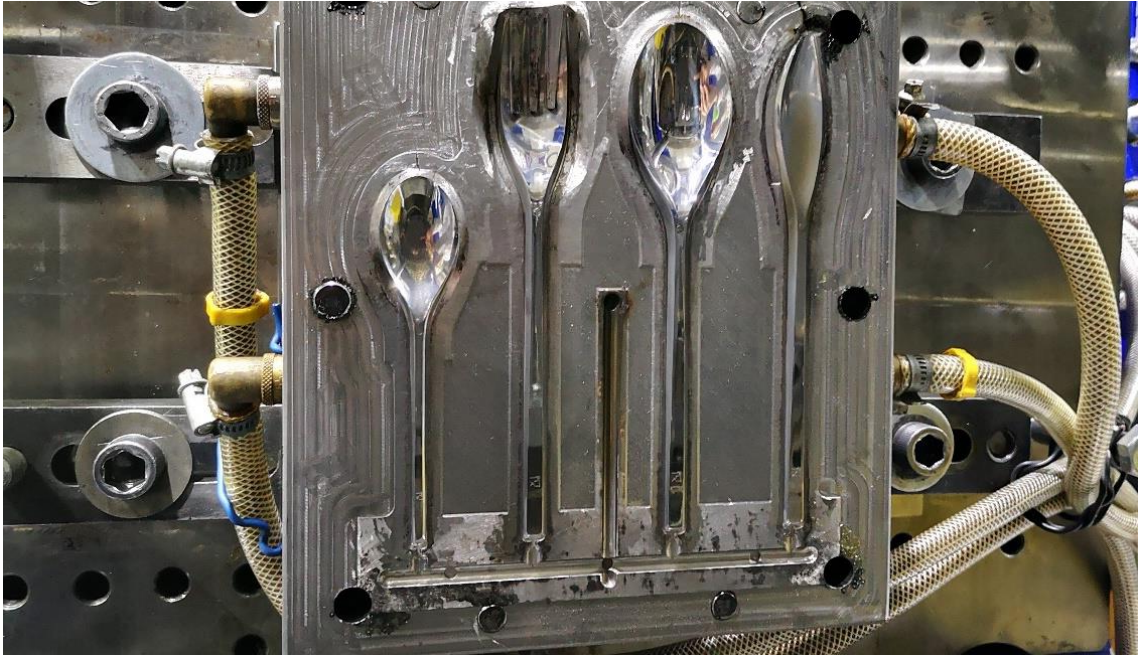
W celu dokonania oceny wizualnej kształtu i ergonomii produktów, po zaprojektowaniu detali, zaprojektowano w środowisku Autodesk Inventor wraz z modułem Moldflow prostą formę prototypową, którą następnie wykonano

w technice zimnokanałowej. Jej zadaniem było jedynie wykonanie małej serii próbnej detali. Dlatego też było możliwe jej wykonanie ze stali ulepszonej, bez zamiaru jej utwardzania za pomocą hartowania (co jest powszechne w przypadku seryjnych narzędzi produkcyjnych). Umożliwiło to szybszą obróbkę i krótszy czas realizacji formy prototypowej. Projekt komputerowy formy prototypowej pokazano na rys. 7.4.

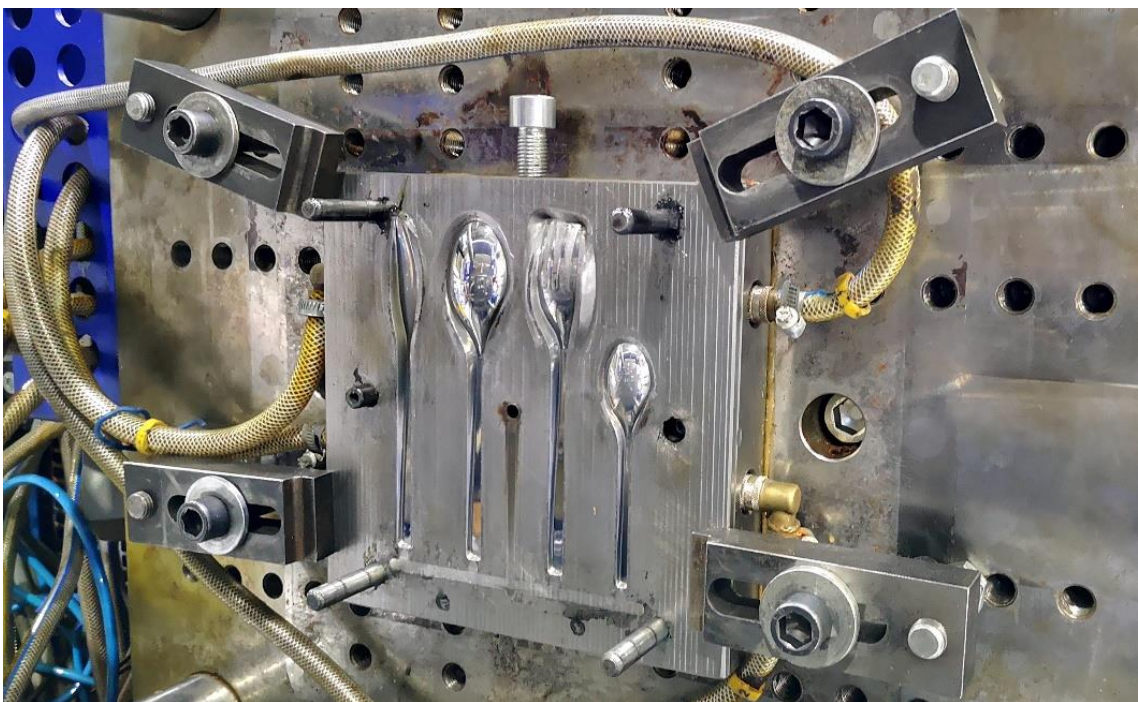


Rys. 7.4. Projekt CAD prototypowej formy wtryskowej

Po dokonaniu próbnych wtrysków niezbędne było naniesienie poprawek konstrukcyjnych do projektu samych detali oraz wykonanie drugiej formy prototypowej, która posłużyła także do wyboru polimeru badawczego, opisanego w podrozdziale 7.6. Na rys. 7.5 i 7.6 pokazano gotową formę prototypową, po montażu na wtryskarce. Na rys. 7.5 jest widoczna część stemplowa, a na rys. 7.6 pokazano część matrycową. Do wtrysków prototypowych wykorzystano wtryskarkę Wittmann-Battenfeld EcoPower 110/750 i przetwarzano polimery opisane w podrozdziale 7.3.3.



Rys. 7.5. Prototypowa forma wtryskowa przygotowana do prób  
– część stemplowa



Rys. 7.6. Prototypowa forma wtryskowa przygotowana do prób  
– część matrycowa

Druga seria próbna pokazała skuteczność wprowadzonych zmian konstrukcyjnych detali i tym samym było możliwe rozpoczęcie prac nad docelową formą produkcyjną, które zostały opisane w podrozdziałach 7.3.4 oraz 7.3.5.

### 7.3.3. Wybór polimeru

Kolejnym ważnym krokiem było wybranie polimeru, na którym zostaną przeprowadzone badania. Zgodnie z celem użytkowym, opisanym w podrozdziale 3.1, materiał powinien być bardziej przyjazny dla środowiska, niż dotychczasowe rozwiązania tradycyjne (polistyren). Ślad węglowy i wpływ na ekosystem był jednym z kryteriów wyboru. W tabelicy 7.1 przedstawiono materiały poddane próbom.

Tablica 7.1. Spis testowanych materiałów

Próbka A	SK Impact PP B391G
Próbka B	LyondellBasell Moplen HP500N
Próbka C	Dufor Ecoclear E04 100
Próbka D	SK Random PP R380Y
Próbka E	Lotte Chemical Ranpelen J-590K
Próbka F	Cortex Biomind CCB02E4
Próbka G	Gaia Biodolomer Cutlery
Próbka H	StoraEnso DuraSense Pure L40
Próbka I	BASF ecovio IA1652

Drugim, jednak nie mniej istotnym czynnikiem była odporność termiczna, ponieważ produkty będą miały zastosowanie także do spożywania potraw ciepłych, a więc muszą zachować swoją wytrzymałość mechaniczną także w wymagających warunkach pracy w ciepłym otoczeniu. Zdecydowano o przeprowadzeniu prób wytrzymałości termicznej według własnej procedury sprawdzającej producenta sztućców. Bazując na wieloletnim doświadczeniu, producent wykorzystuje wyniki badania temperatury mięknienia wg Vicat'a (ISO 306) jedynie do wstępnej analizy przydatności surowca. Z racji na specyficzne zastosowanie detalu, producent często opiera się na badaniach doświadczalnych według własnej procedury.

Trzecim, również bardzo ważnym wymaganiem było bezpieczeństwo użytkownika, a więc przede wszystkim certyfikat potwierdzający dopuszczenie materiału do kontaktu z żywnością oraz jak najniższy poziom migracji chemicznej do



płynów modelowych, zgodnie z rozporządzeniem komisji Unii Europejskiej 2020/1245 [76]. Badanie to ma na celu zapewnienie bezpieczeństwa podczas użytkowania sztućców, w postaci kontroli nad wydzieleniem z materiału, szkodliwych związków chemicznych, które mogłyby przedostać się do spożywanej żywności, a następnie wraz z nią, do organizmu człowieka.

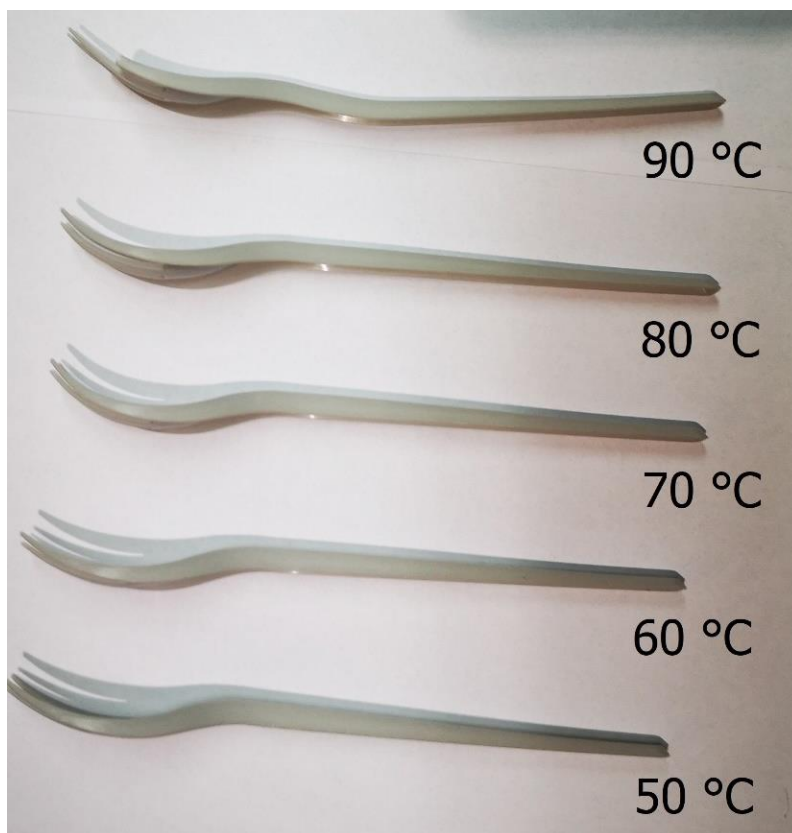
Kryterium termiczne: wskazana jest jak najwyższa odporność termiczna. Wymagana jest odporność na temperaturę przynajmniej 80 °C, za co przyznaje się 1 punkt. Każde dodatkowe 5 °C skutkuje przyznaniem kolejnego punktu. Próbę przeprowadza się w postaci zanurzenia produktu w podgrzanej wodzie na 5 minut oraz obserwacji jego odkształcenia podczas obciążenia siłą 5 N przez 15 sekund. Na rys. 7.7 są widoczne odkształcenia powstałe podczas próby wytrzymałości termicznej.



Rys. 7.7. Próbki C po badaniu kryterium termicznego

Aż 9 z 10 badanych materiałów, w wyniku oddziaływującej siły obciążenia, wykazywało znaczny wzrost podatności na odkształcenia wraz z podwyższaniem temperatury. Podczas badań z wykorzystaniem wyższych temperatur, materiały stawały się bardziej elastyczne, a odkształcenia trwałe. Ciekawy efekt zaobserwowano podczas badania próbki F, która uległa znacznie mniejszym odkształceniom,

natomiast równocześnie stawała się bardziej krucha, aż do momentu pęknięcia wypraski. Stadium odkształceń pokazano na rys. 7.8.



Rys. 7.8. Próbkki F po badaniu kryterium termicznego

Kryterium przetwórcze: podczas przetwórstwa z parametrami zgodnymi z zaleceniami producenta materiału, oczekuje się łatwego wypełniania gniazd formujących oraz maksymalnego ciśnienia wtrysku na poziomie ok. 120-140 MPa. Punkty przyznaje się zgodnie ze skalą, podaną w tabelicy 7.2. Jest to kryterium narzucone przez producenta sztućców i bazuje na jego wieloletnim doświadczeniu i tajemnicy produkcyjnej. Nie dopuszcza się ciśnienia powyżej 170 MPa.

Tablica 7.2. Skala punktacji kryterium przetwórczego materiału

Poniżej 130 MPa	5 punktów
130-139,9 MPa	4 punkty
140-149,9 MPa	3 punkty
150-159,9 MPa	2 punkty
160-170 MPa	1 punkt



W tabelicy 7.3 zestawiono wyniki badań materiałowych oraz ich oceny. W przypadku, gdy materiał otrzymał zero punktów w teście odporności termicznej, nie poddawano go dalszej analizie pod kątem kryterium przetwórczego.

Tabela 7.3. Punktacja wyników testów materiałowych

<b>Materiał</b>	<b>Odporność termiczna</b>	<b>Ocena odporności termicznej</b>	<b>Maksymalne ciśnienie wtrysku</b>	<b>Ocena maks. ciśnienia wtrysku</b>	<b>Suma punktów</b>
Próbka A	65 °C	0	zaprzesano dalszej analizy		
Próbka B	75 °C	0	zaprzesano dalszej analizy		
Próbka C	60 °C	0	zaprzesano dalszej analizy		
Próbka D	85 °C	2	115 MPa	5	7
Próbka E	80 °C	1	110 MPa	5	6
Próbka F	80 °C	1	125 MPa	5	6
Próbka G	60 °C	0	zaprzesano dalszej analizy		
Próbka H	100 °C	5	135 MPa	4	9
Próbka I	60 °C	0	zaprzesano dalszej analizy		

Na podstawie dokonanej punktacji wskazano materiał H: StoraEnso DuraSense Pure L40 jako najlepszy spośród testowanych materiałów, i tym samym został on wybrany do dalszych prac badawczych. W tabelicy 7.4 zebrano podstawowe własności wybranego polimeru [77].

Tabela 7.4. Właściwości polimeru StoraEnso Pure L40

Zawartość wypełniacza drewnianego	40 %
Gęstość wg ISO 1183	1,06 g/cm <sup>3</sup>
Wytrzymałość na rozciąganie wg ISO 527-2/50	39 MPa
Moduł Younga wg ISO 527-2/2	4300 MPa
Moduł sprężystości przy zginaniu wg ISO 178	3800 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu wg ISO 527-2/50	1,8 %
Udarność Charpy bez karbu wg ISO 179/1eU	12 kJ/m <sup>2</sup>

Wybrany materiał jest biokompozytem składającym się w 60 % z polipropylenu (dokładny typ polipropylenu stanowi tajemnicę firmy StoraEnso) oraz w 40 % z naturalnego wypełniacza, jakim jest drewno pochodzące z obróbki skrawaniem w przemyśle meblarskim. Trociny, będące odpadem w procesie obróbki ubytkowej drewna, są poddawane dodatkowemu mieleniu, a następnie mieszane i łączone z polipropylem. Tym samym sztuczce wielorazowe, wykonane z tego polimeru, przyczynią się do wprowadzenia o 40 % mniej masy surowca polimerowego do obiegu, niż sztuczce wykonane bez wypełniacza naturalnego.

#### **7.3.4. Założenia konstrukcyjne badawczej formy wtryskowej**

Po wybraniu materiału, który zostanie użyty podczas przeprowadzonych badań oraz zatwierdzeniu ostatecznego kształtu detalu, przystąpiono do projektowania formy badawczej. Proces projektowy rozpoczęto od zebrania wymagań oraz fazy koncygowania. Jednym z początkowych kroków było określenie maszyny, która posłuży do przeprowadzenia badań. Została wybrana wtryskarka firmy Wittmann-Battenfeld, model EcoPower 240/750, cechująca się maksymalną siłą zwarcia 2400 kN. Korzystając z jej dokumentacji techniczno-ruchowej, pozyskano dane dotyczące wielkości stołów montażowych, a więc tym samym, możliwych największych wymiarów gabarytowych formy wtryskowej.

Następnie określono możliwą liczbę gniazd formujących. Dokonano tego na dwa sposoby; pierwszy zakładający dotychczasowe praktyki konstrukcyjne opisane w literaturze [37]. Jedną z podstawowych metod jest wyliczenie potrzebnej siły zamykania ( $F_z$ ) na podstawie powierzchni, na którą oddziałuje ciśnienie wtrysku ( $S_{RZ}$ ), liczby gniazd ( $n$ ) oraz współczynnika, dobieranego z tablicy, uwzględniającego wskaźnik płynięcia materiału MFI ( $RCT_{MFI}$ ) [37]:

$$F_z = S_{RZ} \cdot n \cdot RCT_{MFI} \quad (7.14)$$

Detal posiada pole powierzchni rzutu na płaszczyznę podziału formy, wynoszące 2250 mm<sup>2</sup>. Z tablicy doboru współczynnika przeliczeniowego siły zamykania na

podstawie wskaźnika płynięcia materiału [37] wybrano  $5,9 \text{ kN/cm}^2$ . Podstawiając całość do wzoru (7.14) otrzymuje się:

$$2400 \text{ kN} = 22,5 \text{ cm}^2 \cdot n \cdot 5,9 \text{ kN/cm}^2 \quad (7.15)$$

co po przekształceniach daje:

$$n = \frac{2400 \text{ kN}}{22,5 \text{ cm}^2 \cdot 5,9 \text{ kN/cm}^2} \approx 18,08 \quad (7.16)$$

A więc w ramach standardowego procesu wtrysku, wybrana maszyna może poprawnie pracować z 18-krotną formą wtryskową, wykonaną pod obrany detal.

Drugi sposób zakładał sprawdzenie możliwej liczby gniazd wtryskowych na podstawie dostępnego miejsca na stołach montażowych maszyny, a więc inaczej mówiąc, wynikającej z możliwego, największego gabarytu formy wtryskowej. Prześwit poziomy pomiędzy kolumnami wtryskarki wynosi  $670 \text{ mm}$  [78], a więc za maksymalną szerokość formy obrano wartość  $660 \text{ mm}$ . Długość stołu roboczego wynosi  $955 \text{ mm}$  [79], a zatem za maksymalną długość formy obrano wartość  $925 \text{ mm}$ . Istotnym problemem na etapie projektowania było zmieszczenie jak największej liczby gniazd formujących na stole wtryskarki, która posłuży do przeprowadzenia badań. Ostatecznie zdecydowano się na nietypowe rozmieszczenie gniazd formujących, które umożliwiło umieszczenie 28 gniazd formujących w obrębie formy o przyjętych wymiarach. Powierzchnia mocująca formy wynosi  $610500 \text{ mm}^2$ , a powierzchnia robocza stołu montażowego wtryskarki  $639850 \text{ mm}^2$ ; stanowi to  $95,4 \%$  wykorzystania dostępnej powierzchni, co można uznać za bardzo wysoki stopień wykorzystania. Dokonano weryfikacji obliczeniowej masy formy (wyliczenie projektowe Autodesk Inventor:  $1444,4 \text{ kg}$ ) z maksymalną dopuszczalną masą formy, wyspecyfikowaną w instrukcji użytkownika ( $2400 \text{ kg}$ ) [80]. Następnie sprawdzono dostosowanie agregatu wtryskowego do obsługi projektowanej formy. Zaleca się, aby dawka wtryskowa mieściła się w zakresie  $0,2 \div 0,7$  maksymalnej dawki uplastyczniana. Zastosowanie tej zasady zapewni: wystarczającą dawkę wtryskową, poduszkę technologiczną stopu polimeru po zakończeniu fazy wtrysku

oraz odpowiednie uplastycznienie zimnych granulek materiału. Dokonano wyliczenia teoretycznej masy wtrysku ( $m_{WTR}$ ) w przypadku projektowanej formy badawczej i w przypadku przetwórstwa polistyrenu, korzystając ze wzoru, który uwzględnia masę widelca ( $m_W$ ), masę noża ( $m_N$ ), liczbę gniazd formujących ( $n$ ), gęstość polimeru WPC ( $\rho_{WPC}$ ) oraz gęstość polistyrenu ( $\rho_{PS}$ ), [37]:

$$m_{WTR} = \frac{(m_W + m_N) \cdot n}{\rho_{WPC}} \cdot \rho_{PS} \quad (7.17)$$

co po podstawieniu wartości liczbowych daje:

$$m_{WTR} = \frac{(4,1 + 3,55) \cdot 14}{1,06} \cdot 0,95 \approx 96 \text{ g} \quad (7.18)$$

Aby przy użyciu tej formy spełnić zalecenie wykorzystywania części dawki maksymalnej (20 % ÷ 70 %), należy użyć agregatu, którego maksymalna masa wtryskiwania nie przekroczy:

$$\frac{m_{WTR}}{0,2} = \frac{96 \text{ g}}{0,2} = 480 \text{ g} \quad (7.19)$$

a równocześnie nie będzie niższa niż:

$$\frac{m_{WTR}}{0,7} = \frac{96 \text{ g}}{0,7} \approx 137,1 \text{ g} \quad (7.20)$$

Agregat wtryskowy wykorzystywanej maszyny charakteryzuje się maksymalną dawką wtrysku o masie 402,2 g w przypadku polistyrenu, co mieści się w obliczonym zakresie i będzie zgodne z zaleceniem. Porównywano masy maksymalnych dawek wtryskowych przeliczonych do przypadku polistyrenu, ponieważ takie wartości są najczęściej podawane przez producentów wtryskarek w kartach katalogowych.

Wykonano wstępną weryfikację opłacalności metody TwinShot, o której wspomniano w podrozdziale 5.1, w dwóch przypadkach. Pierwszy z nich zakładał

porównanie innowacyjnego procesu z procesem standardowym z wykorzystaniem formy o większej liczbie gniazd formujących niż wyliczone z kryterium siły zamykania - 18 gniazd. Drugi przypadek porównywał metodę TwinShot z procesem standardowym, który zakładał użycie formy wtryskowej o takiej samej liczbie gniazd jak w metodzie TwinShot, to jednak wymagałoby użycia wtryskarki o większej sile zamykania (kryterium liczby gniazd formujących i siły zamykania). Porównanie zakłada brak konieczności technologicznej stosowania zamykanych dysz wtryskowych w procesach standardowych. Założenie takie doprowadzi do zwiększenia wydatków inwestycyjnych, koniecznych do zastosowania metody TwinShot. W przypadku, gdyby inne okoliczności (np. charakterystyka polimeru) wymagały użycia zamykanych dysz wtryskowych w procesach standardowych, różnice inwestycyjne pomiędzy procesami będą dużo mniejsze, a tym samym stosowanie metody TwinShot będzie korzystniejsze w jeszcze większej liczbie przypadków. Oszacowano czas cyklu w każdym rozważanym przypadku, wyliczono wydajność produkcyjną, siłę zamykania przypadającą na 1 gniazdo formujące, zebrano koszty inwestycyjne na podstawie ofert producentów urządzeń, a następnie obliczono wskaźniki  $\omega$  oraz  $\Omega$ . Całość przedstawiono w tabelicy 7.5.

Tabela 7.5. Obliczanie wskaźników weryfikacji wstępnej

Kryterium procesu	Kryterium siły zamykania	Metoda Twinshot	Kryterium liczby gniazd formujących
Wtryskarka	Ecopower 240/750	Ecopower 240/750	Ecopower 400/2100
Forma	Otwarte dysze GK	Zamykane dysze GK	Otwarte dysze GK
Siła zwarcia (w kN)	2400	2400	4000
Liczba gniazd formujących (w sztukach)	18	28	28
Siła zamykania na 1 gniazdo formujące (w kN)	133	171	143
Czas cyklu (w sekundach)	10	11	10
Wydajność produkcyjne (Szt./h)	6480	9164	10080
Koszt maszyny (w €)	€ 266 850	€ 266 850	€ 457 380
Koszt formy wtryskowej (w €)	€ 80 000	€ 136 000	€ 112 000
Koszt automatyzacji (w €)	€ 39 850	€ 39 850	€ 41 300
Całkowity koszt inwestycji (w €)	€ 386 700	€ 442 700	€ 610 680
<b>Weryfikacja Wstępna</b>			
$\omega$	1,24		
$\omega$		1,25	
<b>Weryfikacja Wstępna uproszczona</b>			
$\Omega$	1,22		
$\Omega$		1,28	

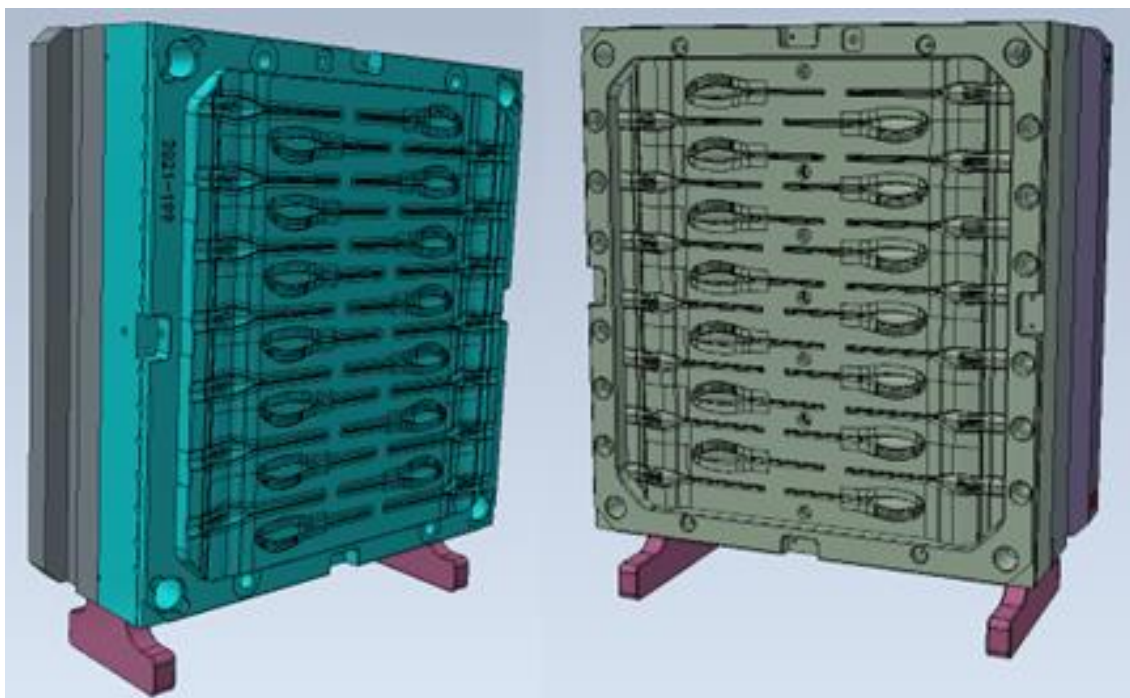
W obu przypadkach porównawczych uproszczony wskaźnik weryfikacji wstępnej i wskaźnik weryfikacji wstępnej osiągnęły zbliżone wartości w okolicy 1,25. Oznacza to istnienie przesłanek wskazujących na korzyści ze stosowania metody TwinShot. Tym samym, weryfikacja wstępna jednoznacznie wskazała na zasadność stosowania metody TwinShot w analizowanych procesach produkcyjnych, co potwierdziło zasadność dalszego prowadzenia badań.

Osiągnięcie bardzo zbliżonych wartości wskaźników: weryfikacji wstępnej oraz uproszczonej weryfikacji wstępnej potwierdza zasadność uproszczenia obliczeń w postaci pominięcia w analizie: kosztów automatyzacji oraz kosztów pobocznych. Pominięte wartości nie wpływają w znaczący sposób na wynik wskaźnika, natomiast ich pominięcie może przyczynić się do przyspieszenia procesu decyzyjnego dotyczącego słuszności stosowania metody TwinShot.

Podstawowym założeniem modyfikacji procesu jest możliwość sterowania stanem otwarcia i zamknięcia dysz wtryskowych. Wymusza to stosowanie dysz wtryskowych zamykanych igłowo. Kierując się kryterium minimalizacji kosztów zakupu gotowych komponentów, wybrano dysze sterowane pneumatycznie. Pierwotnie zdecydowano o podzieleniu wszystkich gniazd formujących na 2 obiegi, sterowane niezależnie, jednak z racji obawy o wydajność przepływu instalacji pneumatycznej, a konkretnie zaworów, postanowiono podzielić wszystkie dysze na 4 obiegi pneumatyczne, każdy z niezależnym zaworem sterującym, które będą sterowane parami, co pozwoli na jednoczesne otwarcie lub zamknięcie połowy wszystkich gniazd formujących. Takie rozwiązanie jest również korzystne z punktu widzenia technologicznego i operacji wiercenia kanałów pneumatycznych w płycie mocującej formy wtryskowej, ponieważ rozmieszczenie gniazd formujących przewiduje 4 rzędy produktów, po 7 sztuk w każdym rzędzie. Z tego względu, w trakcie cyklu referencyjnego, pozostanie w użyciu 14 gniazd formujących (2 rzędy po 7 gniazd), a nie 18 - jak obliczono wcześniej. Dodatkowym atutem takiego zabiegu będzie zwiększenie naddatku siły zamykania ponad wyliczone wartości minimalne. Tym samym zwiększy się jakość porównań procesów TwinShot do procesu referencyjnego.

### 7.3.5. Projekt formy wtryskowej oraz symulacje komputerowe

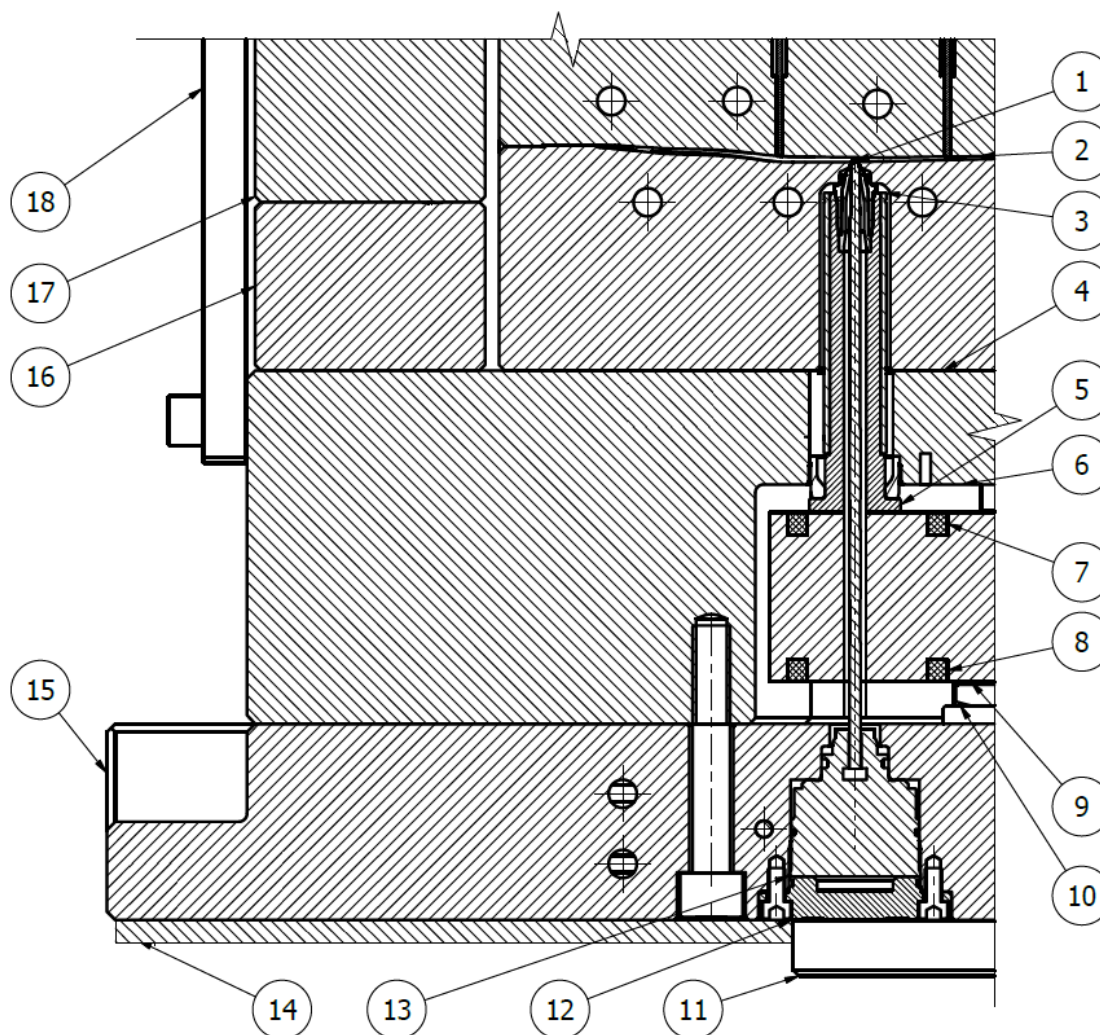
Projekt formy wtryskowej wykonano w środowisku Autodesk Inventor Professional, wraz z modułem Mold Design. Gotowy projekt przedstawiono na rys. 7.9.



Rys. 7.9. Projekt formy badawczej

Podczas projektowania przykładano dużą wagę do wyboru komponentów o wysokiej jakości, co w założeniu ma się przełożyć na niezawodność i długą żywotność formy. W celu zapewnienia precyzji składania formy, zaprojektowano zwiększoną liczbę elementów centrujących, a słupy i tuleje prowadzące dobrano o zwiększonej średnicy [38]. Powiększenie rysunku złożeniowego przedstawiające przekrój w obszarze dyszy wtryskowej pokazano na rys. 7.10. Elementy układu gorąco-kanalowego zostały zakupione z firmy YUDO, która dostarczyła uproszczone bryły 3D elementów w celu ich implementacji do projektu formy (sposób ochrony własności intelektualnej konstrukcji podzespołów układu gorących kanałów). Zdecydowano o konstrukcji opartej na technice wlewu przez rozdzielacz pośredni, czołowy. Na rys. 7.10 poszczególnymi pozycjami zaznaczono następujące podzespoły

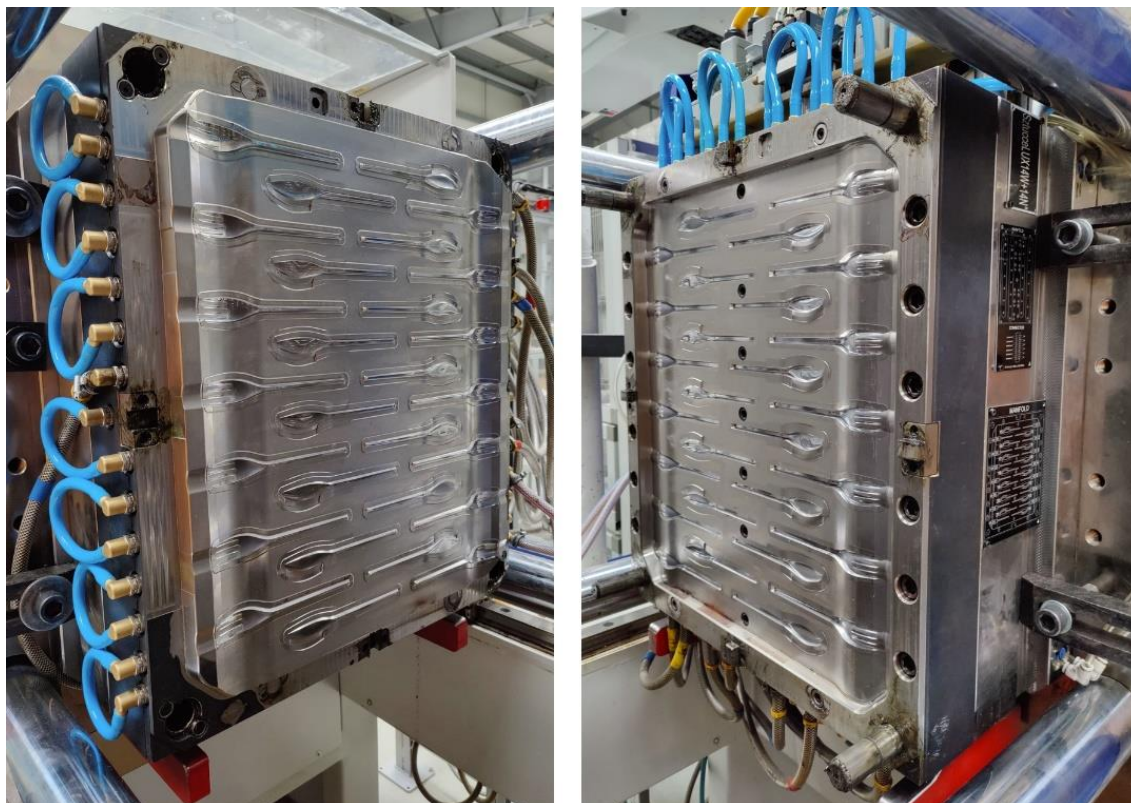
formy wtryskowej: 1 – igła zamykająca dyszę wtryskową, 2 – gniazdo formujące, 3 – grzałka dyszy wtryskowej, 4 – płyta formująca, 5 – dysza wtryskowa, 6 – płyta dystansowa, 7 i 8 – grzałki rozdzielacza, 9 – rozdzielacz gorących kanałów, 10 - tuleja wlewowa razem z grzałką, 11 – pierścień centrujący, 12 – pokrywa siłownika, 13 – siłownik pneumatyczny napędu iglicy zamykającej, 14 – płyta termoizolacyjna, 15 – płyta mocująca, 16 i 17 – obudowa korpusu formy, 18 – zabezpieczenie transportowe.



Rys. 7.10. Powiększenie rysunku złożeniowego przedstawiające przekrój w obszarze dyszy

Wykonanie formy wtryskowej, według utworzonego w pracy projektu, zlecono firmie, wyspecjalizowanej w obróbce metali, posiadającej w tym zakresie duże doświadczenie i odpowiednie kwalifikacje. Wykonaną formę badawczą przedstawiono na rys. 7.11.

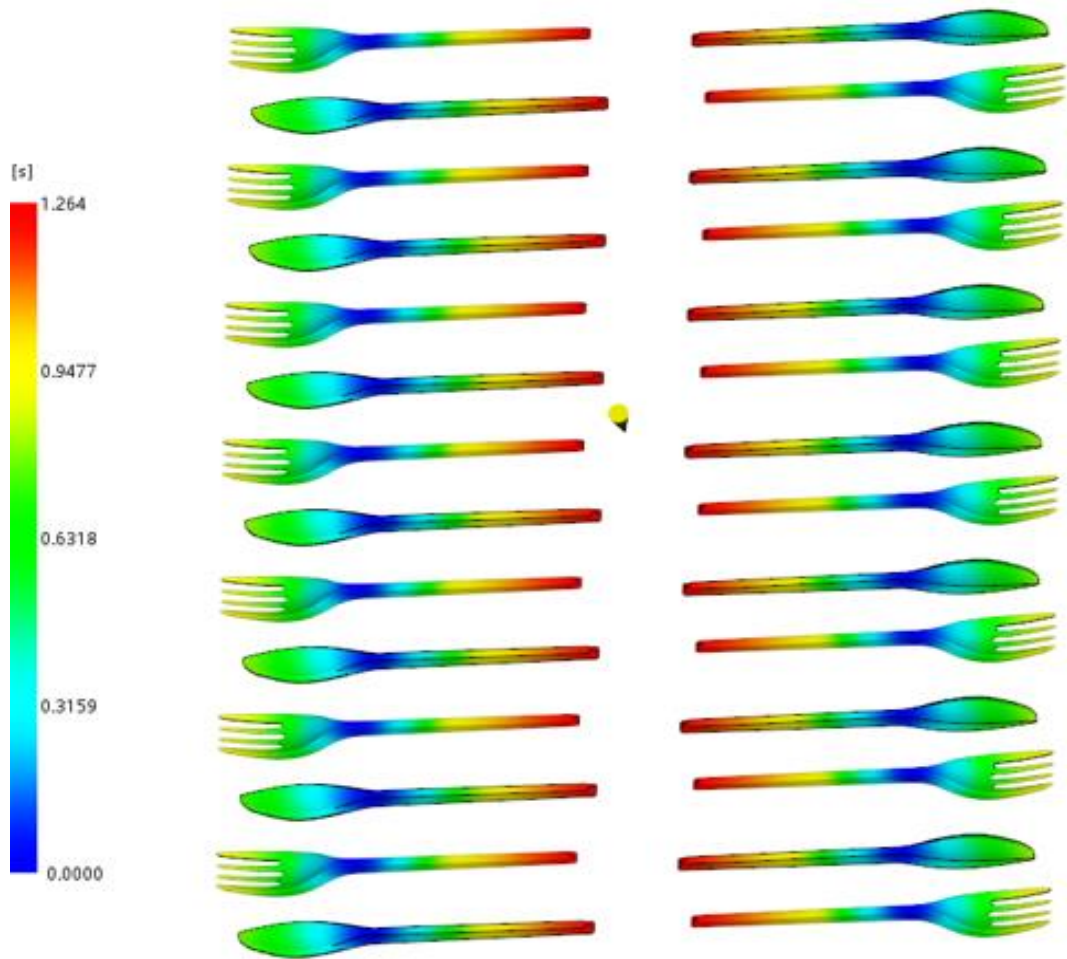




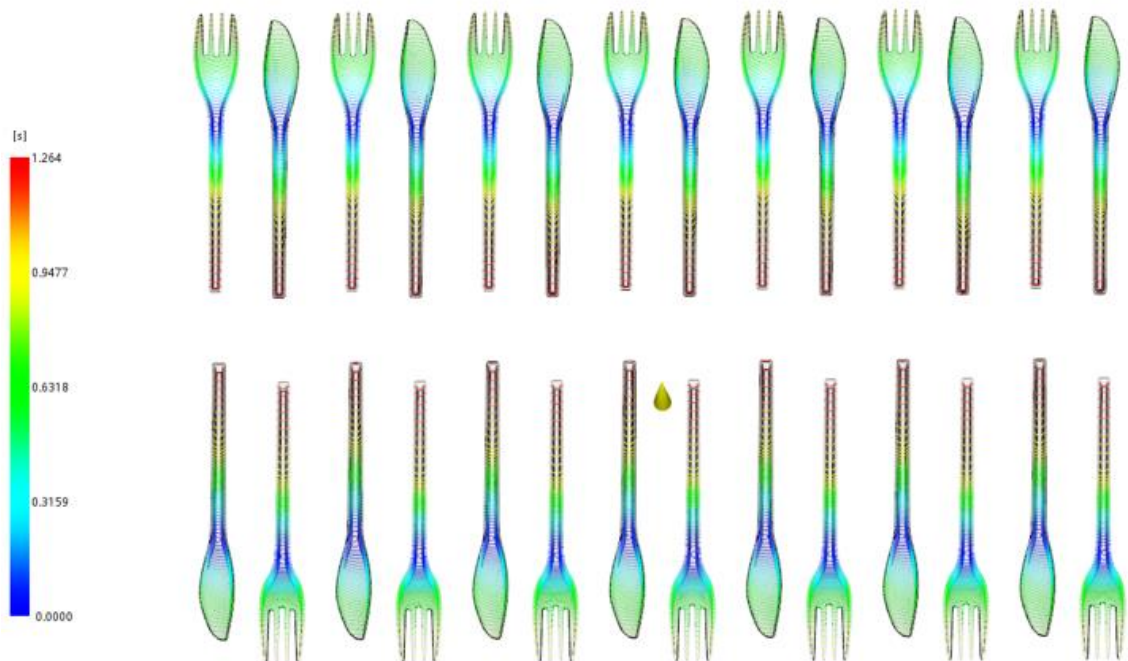
Rys. 7.11. Wykonana forma badawcza

Podczas całego procesu projektowania wspomaganego komputerowo, wykorzystano także dostępne metody obliczeniowe oraz symulacyjne, wspomagane komputerowo. Wszystkie działania wykonano w środowisku Autodesk Inventor, wraz z modułem symulacyjnym Moldflow.

Po zatwierdzeniu plików zawierających modele 3D detali, rozpoczęto od sprawdzenia wyliczonej komputerowo masy oraz objętości produktów. Masy były bardzo zbliżone z masami detali prototypowych, a po podzieleniu przez gęstość polimeru, objętości również osiągnęły zbliżone wartości do wartości podanych przez oprogramowanie. Ustawiono warunki brzegowe wykonywanej symulacji, dokonano dyskretyzacji modeli na trójkątne elementy skończone i przeprowadzono obliczenia symulacyjne. Na rys. 7.12 i rys. 7.13 jest widoczna wizualizacja wyniku symulacji czasu napełniania gniazd formujących. Obszary niebieskie wskazują początek wtryskiwania, a obszary czerwone końcową fazę wypełniania gniazd. W centrum obszaru niebieskiego zlokalizowana jest dysza wtryskowa każdego gniazda.



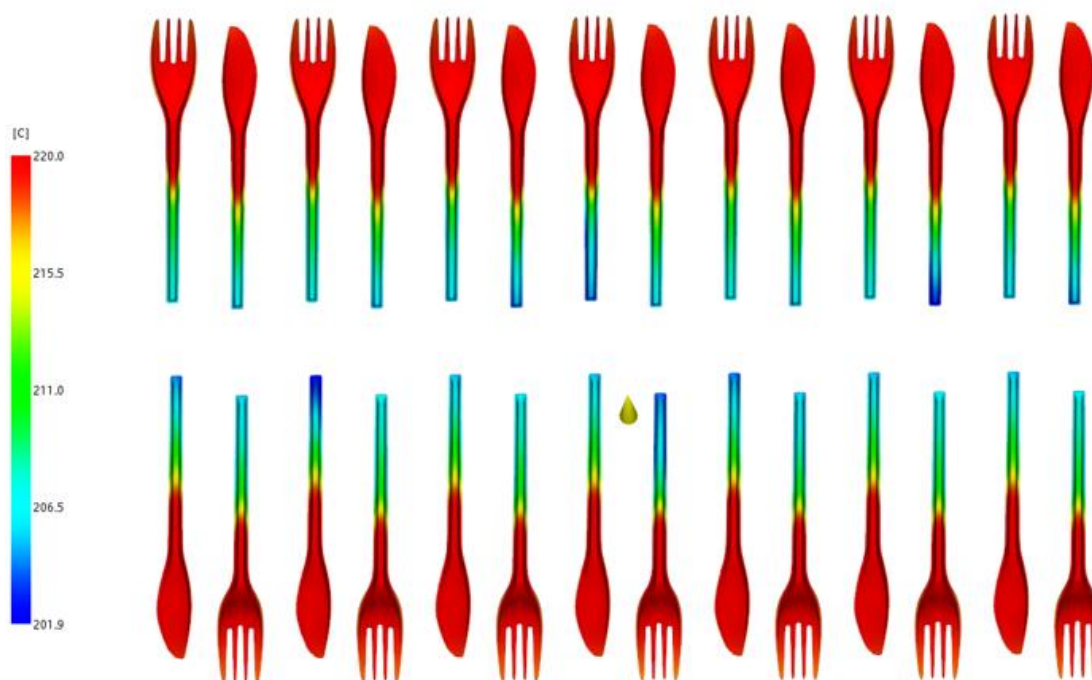
Rys. 7.12. Wyniki symulacji czasu wypełnienia gniazd formujących



Rys. 7.13. Wyniki symulacji czasu wypełnienia gniazd formujących

Jest zauważalna różnica w czasie wypełniania obu stron gniazda. Obszary zaznaczone na czerwono będą wypełnione później, w efekcie czego, prędkość płynięcia frontu polimeru oraz jego temperatura na czole materiału będą niższe, co mogłoby niekorzystnie wpłynąć na poprawność wykonania wypraski [81]. W następstwie tej symulacji zdecydowano o korekcie położenia punktu wtryskowego (dyszy wtryskowej) w gniazdach formujących, przesuając je o 10 mm w kierunku osi formy, aby zapewnić bardziej symetryczny proces napełniania obu końców gniazda formującego.

Dłuższy czas wypełniania jednego obszaru gniazda powoduje też znaczne obniżenie temperatury czoła polimeru, co jest widoczne na rys. 7.14. Na rys. 7.15 jest widoczna analiza węzłów cieplnych. Kolorem czerwonym są zaznaczone obszary wyprasek, które wymagają najdłuższego czasu chłodzenia.

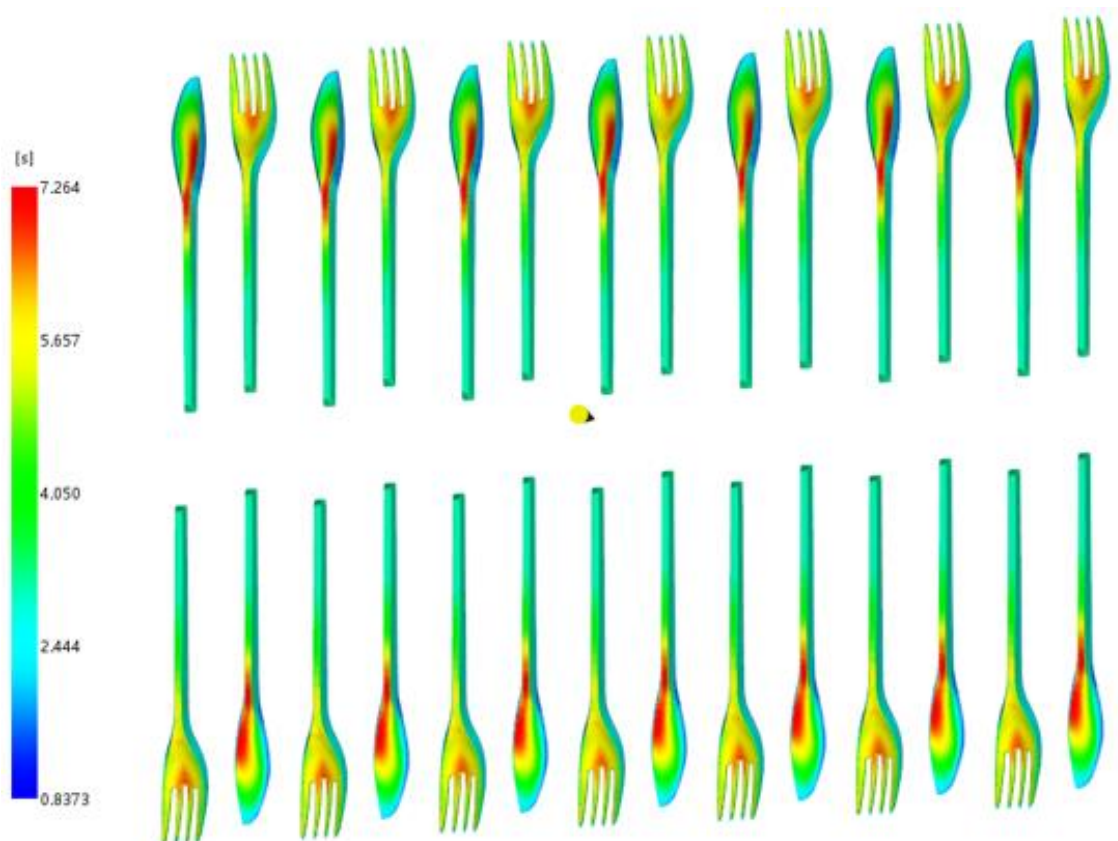


Rys. 7.14. Wyniki symulacji temperatury stopu podczas wypełniania gniazd formujących

Na tej podstawie zmodyfikowano układ wodnego chłodzenia formy, aby zintensyfikować chłodzenie najbardziej wymagających obszarów. Kanały wodne zaprojektowano z możliwie dużą średnicą, aby zwiększyć powierzchnię wymiany ciepła. Dokonano także analizy odkształcenia wyprasek w wyniku działania skurczu przetwórczego. Z uwagi na geometrię widelca w części ustnej, w przypadku niewystarczającego czasu chłodzenia, istnieje ryzyko odkształcenia zębisk widelca, które



mogą zostać skrzywione u podstawy – w obszarze zaznaczonym na czerwono na rys. 7.15. Nadmierny skurcz wtórny w okolicy tego obszaru spowoduje zbliżenie końcówek zębisk widelców do siebie (symetrycznie względem wzdłużnej płaszczyzny symetrii detalu). Z powodu kształtu przekroju poprzecznego noża w obszarze wymagającym najdłuższego chłodzenia, skurcz przetwórczy w tym obszarze powinien spowodować poważnego odkształcenia, nawet w przypadku niewystarczającego czasu chłodzenia.



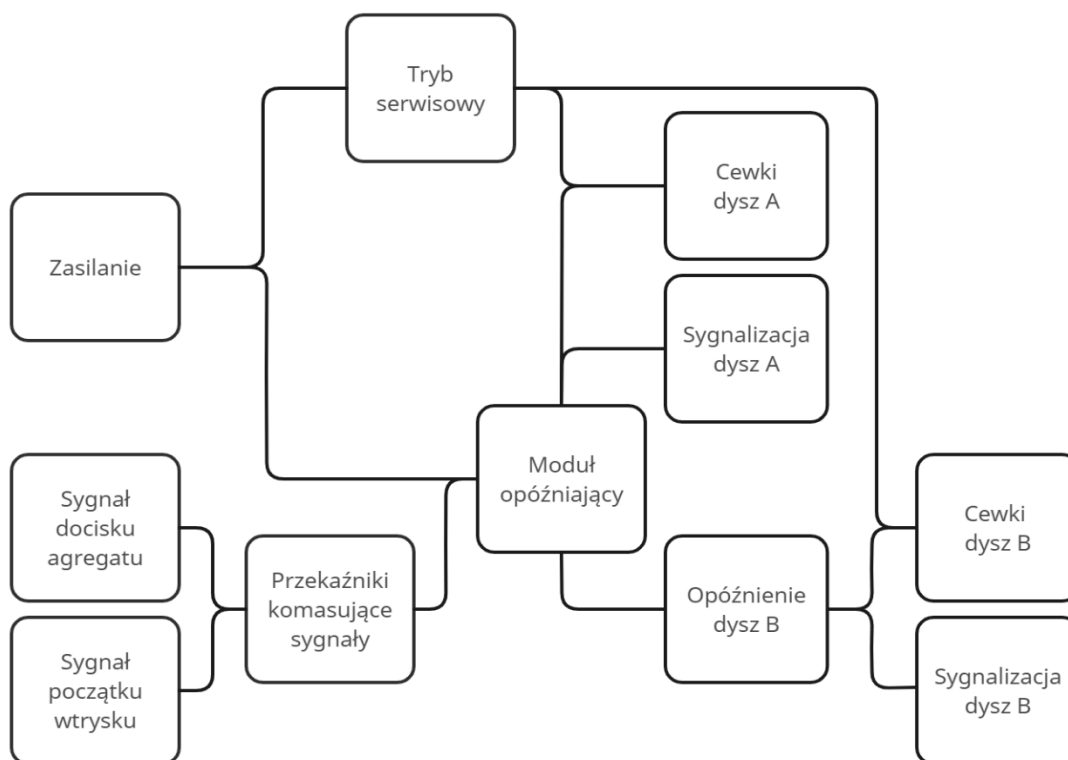
Rys. 7.15. Wyniki symulacji węzłów cieplnych

Następnie dokonano ponownej symulacji, która potwierdziła złagodzenie opisanych zagrożeń w wyniku zmiany położenia dyszy wtryskowej w gnieździe formującym. Symulacje powtarzano kilkakrotnie, zmieniając parametry procesowe i obserwując ich wpływ na wyniki symulacji. Odnotowano wartości, które zostały użyte do przeprowadzenia ostatecznej symulacji, oraz odczytano parametry obliczone w ramach jej przebiegu. Zostały one użyte jako parametry początkowe podczas pierwszego uruchomienia formy wtryskowej.

Po zakończeniu etapu symulacji przystąpiono do konstrukcji sterownika dysz wtryskowych.

### 7.3.6. Konstrukcja sterownika dysz wtryskowych

Wymagane w testowanej, autorskiej metodzie niezależne sterowanie obwodami pneumatycznymi dysz wtryskowych generuje potrzebę posiadania niezależnego sterownika z możliwością dowolnej parametryzacji momentu i czasu otwarcia dysz. Schemat ideowy układu sterowania przedstawiono na rys. 7.16. Z uwagi na wysoką dynamikę procesu wtrysku, jest wymagana wysoka rozdzielczość sterownika, z możliwością ustawiania czasów z dokładnością do 0,01 s oraz jego wysoka powtarzalność. Pierwotnie oparto rozwiązanie na sterowniku logicznym (PLC), co dawałoby wiele możliwości konfiguracji i ustawień, jednak zmiany kodu programu byłyby czasochłonne. Ostatecznie zdecydowano się na użycie cyfrowego modułu opóźniającego, który posiada możliwość niezależnego sterowania dwoma przekaźnikami, a jego obsługa i parametryzacja jest znacznie prostsza i szybsza.



Rys. 7.16. Schemat ideowy sterownika zamykanych dysz gorąco-kanalowych

Wybrany moduł to MaxWell MWT100. Posiada on wiele możliwości parametryzacji i konfiguracji swojego funkcjonowania. Start jego działania

wyzwalają dwa sygnały pochodzące z wtryskarki: sygnał osiągnięcia ciśnienia docisku agregatu wtryskowego oraz sterowany sygnał cyfrowy, którego start określono na początek wtrysku. Oba sygnały są komasowane za pomocą połączonych szeregowo dwóch przekaźników Finder 36.11.9.024.4011. Przekaźniki, kontrolowane przez moduł opóźniający, są bezpośrednio połączone z zaworami pneumatycznymi, zamontowanymi na formie wtryskowej. W celu ułatwienia obsługi, dodano sygnalizację stanu dysz wtryskowych: otwarte / zamknięte, która jest realizowana przez diody LED. Dodatkową funkcjonalnością jest możliwość ręcznego otwarcia wszystkich dysz, na przykład w celach serwisowych, za pomocą przełącznika bistabilnego. System jest zasilany ze stałego napięcia sterowniczego 24 V wtryskarki. Całość została zamknięta w obudowie przemysłowej Elektroplast Nasielsk Industrial IP65, a przewody do i z obudowy przechodzą przez dławnice PG-7, które zapewniają szczelność obudowy i ochronę przed kurzem oraz wilgocią. Wykonany sterownik pokazano na rys. 7.17.



Rys. 7.17. Sterownik zamykanych dysz gorąco-kanalowych

Następnie podłączono sterownik do układu sterowania wtryskarki oraz do cewek sterujących zaworami pneumatycznymi.

## **8. BADANIA PROCESU WTRYSKU, PROWADZONEGO METODĄ TWINSHOT**

Wykonano badania zgodnie z założonym planem, opisanym w podrozdziale 7.3, w wyniku których otrzymano zamieszczone tu wyniki.

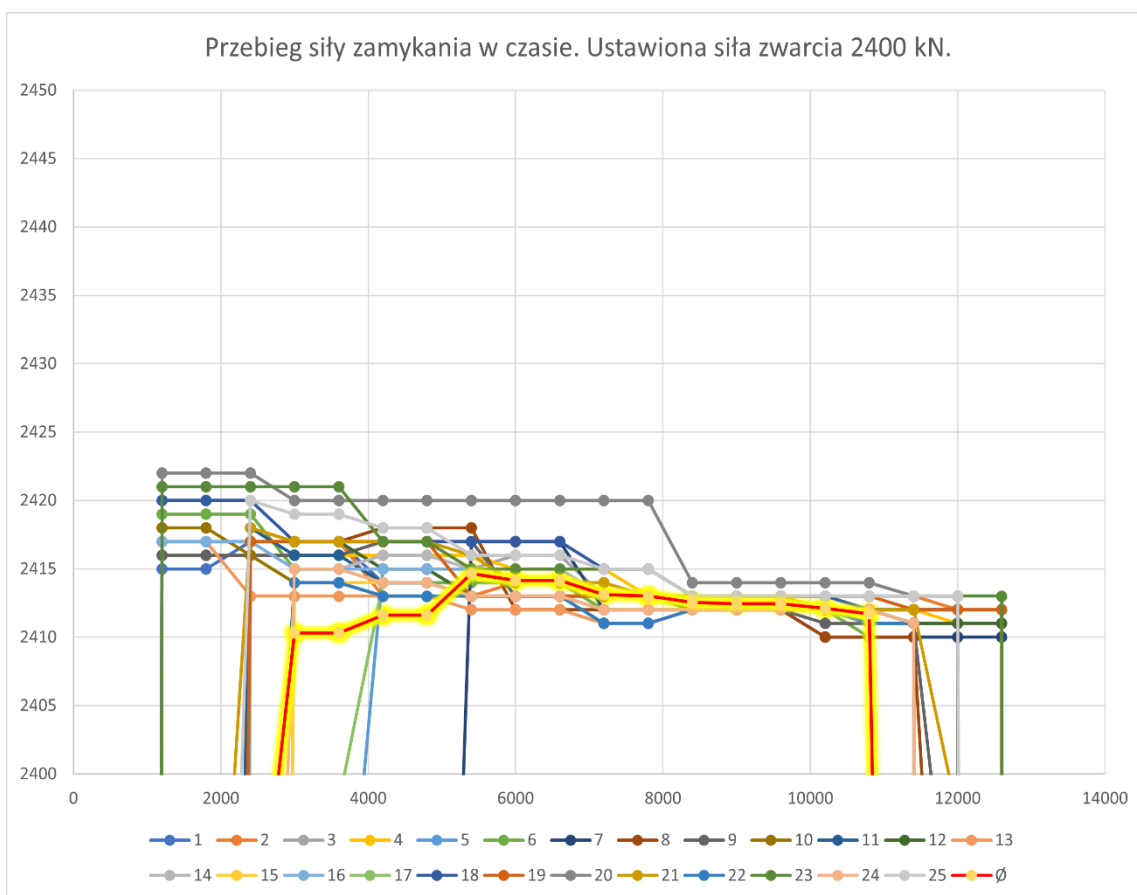
Zamontowano formę badawczą na wtryskarce oraz wykonano czynności przygotowawcze do rozpoczęcia badań [82]. Pierwszym krokiem po montażu i kalibracji układu pomiarowego było ustawienie stabilnego procesu wtrysku, który zgodnie z opisem w podrozdziale 7.3.4 wykorzystywał 14 gniazd w badawczej formie wtryskowej, oraz całkowitą dostępną siłę zamykania 2400 kN. Rozpoczęto proces z parametrami uzyskanymi w drodze symulacji, a następnie je dostosowano metodą analogii do form wtryskowych, produkujących podobne wypraski [83]. Konieczne było podniesienie ciśnienia wtrysku oraz docisku względem wartości przyjętych w symulacji. W celu oceny stabilności procesu, obserwowano powtarzalność parametrów takich jak: ciśnienie przełączenia z fazy wtrysku na docisk, wielkość poduszki resztkowej oraz czas dozowania.

Następnie otwarto pozostałe 14 gniazd formujących i dostosowano parametry produkcyjne do wszystkich używanych gniazd (28 sztuk). Konieczne było zwiększenie dawki wtryskowej oraz zwiększenie profilu prędkości wtrysku. Oba te procesy zakładały tradycyjny schemat produkcyjny, czyli jeden wtrysk oraz jeden docisk podczas jednego cyklu zamknięcia formy wtryskowej.

Aktywacja metody TwinShot wymusiła przeprogramowanie schematu działania oraz wartości procesowych sterownika dysz wtryskowych, a także parametrów samej wtryskarki w zakresie wtrysku i docisku (wykonanie dwóch cykli wtrysku i docisku podczas jednego cyklu zamknięcia formy). Po ustabilizowaniu procesu i wykonaniu pomiarów zmniejszono siłę zamykania z 2400 kN do 2300 kN i powtórzono badania. Schemat działania kontynuowano aż do osiągnięcia błędnego procesu, po którym to przerwano dalsze badania, ponieważ chwilowe wzrosty siły zamykania ( $\Delta F_C$ ) osiągnęły wartości niebezpieczne dla maszyny, które mogły skutkować jej uszkodzeniem, jak np. pęknięcie kolumny czy łączników kolanowych układu zamykania. Następnie badania powtórzono z wykorzystaniem dodatkowego czujnika i dalszej analizie poddano tylko wykonane ponownie badania.

## 8.1. Analiza wartości pomiarowych

Podczas analizy wartości pomiarowych uzyskanych za pomocą czujników Sensormate zauważono, że pomimo dostępności pola ustawienia częstotliwości próbkowania, niemożliwa jest jej zmiana, ponieważ niezależnie od wpisanych wartości w wymienionym polu, próbki są zawsze zbierane co 600 milisekund, co uniemożliwia czytelne pokazanie zjawisk zachodzących w układzie. Co więcej, czujniki uśredniają wartość pomiarową do wartości średniej kwadratowej (RMS) z podanego okresu próbkowania. Jest to także powód, dla którego wartości pomiaru były w pewnych momentach zaniżone lub pojawiały się z opóźnieniem. Dynamika pomiaru nie została dopasowana do dynamiki zjawiska, co jest widoczne na przykład na rys. 8.1, gdzie wartości na początku i końcu cyklu zwierania formy odbiegały od średniej pomiarów ze wszystkich cykli, co jest sprzeczne z wysoką powtarzalnością procesu (w zakresie setnych części sekundy).



Rys. 8.1. Przebieg wartości pomiarowych procesu standardowego, 14 gniazd, siła zamykania 2400 kN



Postanowiono zatem o powtórzeniu badań z wykorzystaniem dodatkowego czujnika indukcyjnego firmy Balluff model BAW M12MG2, który mierzył wartość wydłużenia kolumny za pomocą pomiaru pośredniego. Tym samym powstał drugi, niezależny tor pomiarowy. Z każdej próby badawczej odkładano grupę reprezentatywną wyprasek, którą poddawano ważeniu na wadze KERN CM 60-2N o parametrach pomiarowych, zestawionych w tabelicy 8.1.

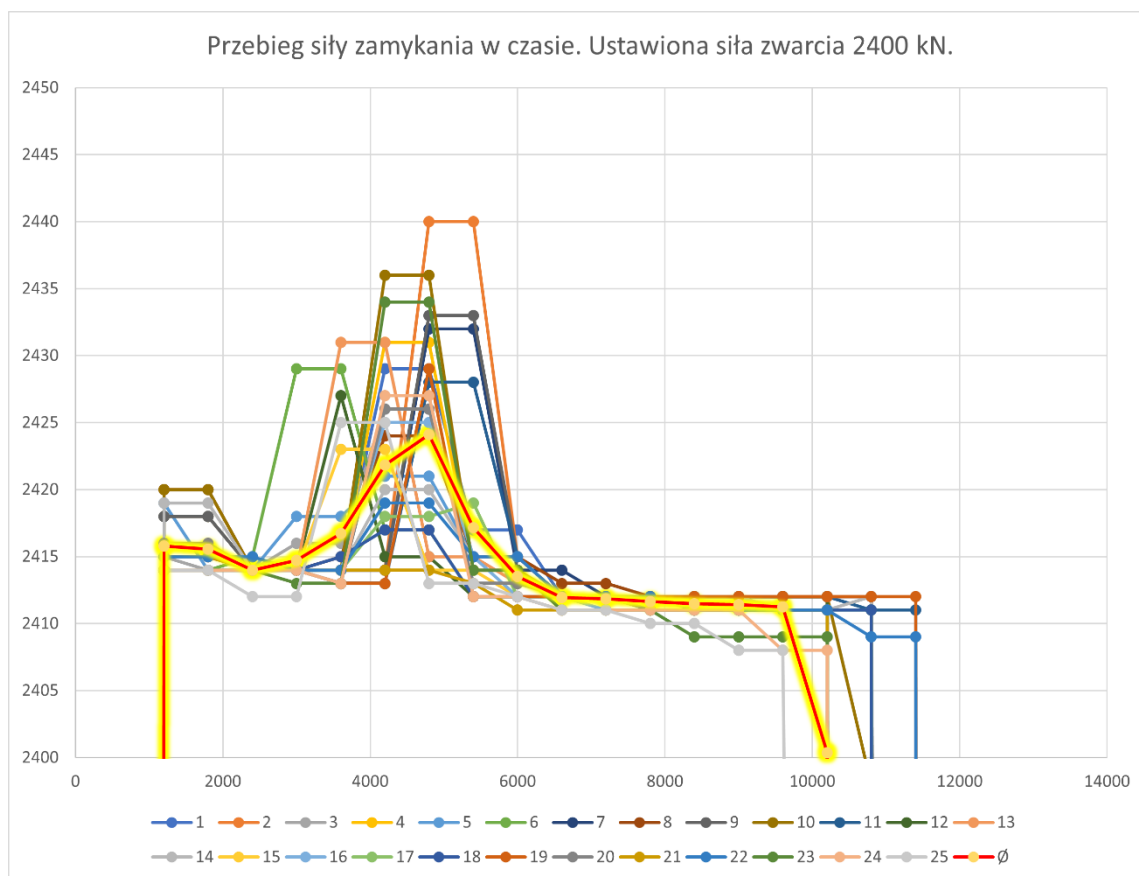
Tabela 8.1. Dane techniczne wagi KERN CM 60-2N

Działka elementarna	0,01 g
Liniowość	±0,015 g
Powtarzalność	±0,01 g

Ważenia dokonano w temperaturze pokojowej, 48 h po zakończeniu badań. Przed rozpoczęciem ważenia wyprasek odczekano 5 minut po włączeniu wagi, zgodnie z zaleceniem producenta, aby waga ustabilizowała się termicznie [84].

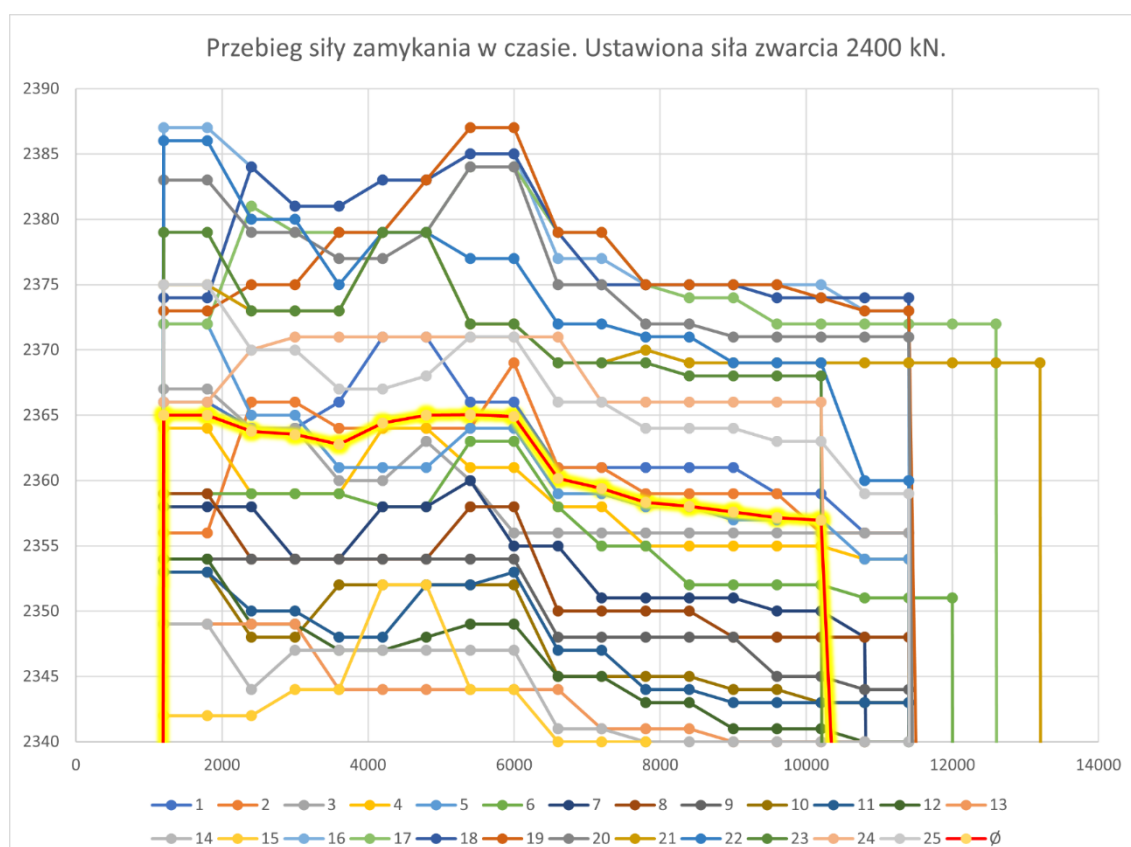
Pierwszym procesem był proces referencyjny, metodą tradycyjną, wykorzystujący 14 gniazd produkcyjnych oraz siłę zamykania o wartości 2400 kN, co po przeliczeniu na 1 detal skutkowało siłą zamykania 171,4 kN. Zgodnie z oczekiwaniami, uzyskane wartości siły zamykania były bardzo stabilne, a chwilowy wzrost siły zamykania był niewielki. Na rys. 8.1 przedstawiono przebieg wartości siły zamykania w trakcie procesu, z którego zauważalny był tylko jeden obszar wartości szczytowej siły zamykania – w okolicy momentu przełączenia pomiędzy fazą wtrysku (około 5 sekundy pomiaru), a etapem docisku. Średni chwilowy wzrost siły zamykania wynosił 16 kN, co jest niską wartością. Wyniki charakteryzowały się dużą powtarzalnością i podobieństwem pomiędzy kolejnymi cyklami. Masy wyprasek odznaczały się małą zmiennością i stosunkowo niską wartością. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelicy Z.1, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelicy Z.2, razem z obliczonymi wartościami średnimi, miarą odchylenia standardowego oraz współczynnikiem zmienności.

Drugi proces również wykorzystywał metodę tradycyjną i siłę zamykania 2400 kN, lecz tym razem już wszystkie gniazda były napełniane jednocześnie. Od razu były zauważalne znacznie większe chwilowe wartości siły zamykania, które na podstawie odczytu z czujnika indukcyjnego wynosiły 60 kN i tym samym przekraczały dopuszczalną tolerancję 2 % siły zamykania. Na tej podstawie proces nie mógł zostać uznany za poprawny. Wartości szczytowe zostały także zarejestrowane przez czujniki Sensormate i są widoczne na rys. 8.2. Nastąpił zdecydowany wzrost masy wyprasek w porównaniu do cyklu poprzedniego, co jest spowodowane zwiększonym polem powierzchni działania ciśnienia wtrysku, które generuje siłę rozpierającą obie połówki formy wtryskowej i tym samym powiększenie przestrzeni gniazd formujących. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelicy Z.3, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelicy Z.4. Po zakończeniu pomiarów tego procesu, zatrzymano na chwilę maszynę, aby dostosować niezbędne parametry do techniki TwinShot.



Rys. 8.2. Przebieg wartości pomiarowych procesu standardowego, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN

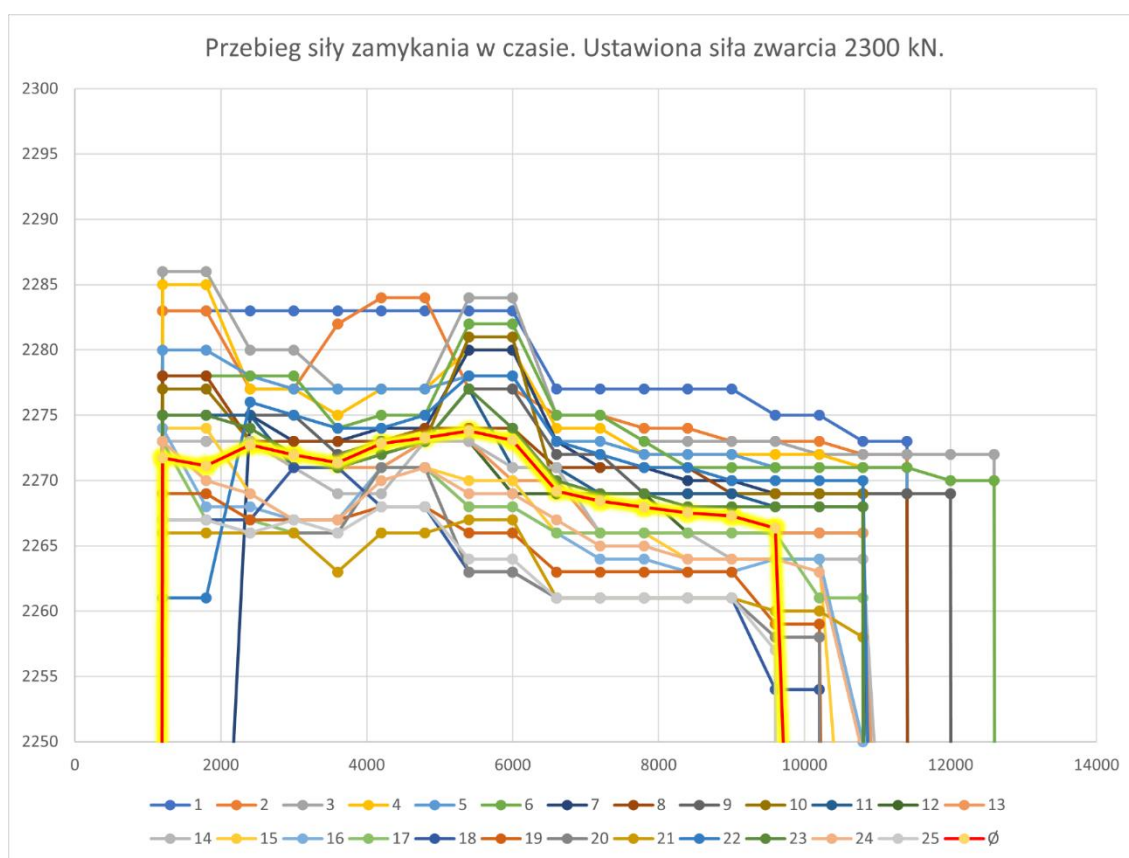
Następne procesy zostały przeprowadzone metodą TwinShot. Pierwszy z nich został przeprowadzony przy użyciu pełnej siły zamykania 2400 kN, a przebieg wartości pomiarowych pokazano na rys. 8.3. Dwa procesy wtrysku były widoczne w postaci chwilowego zwiększenia siły zamykania w okresie do około 4000 ms. Kolejny wzrost następował w okolicy 5000-6000 ms. Można zauważyć, że drugi wzrost był większy od pierwszego, co oznacza, że gniazda wypełnione w pierwszym procesie wtrysku, pomimo zastygnięcia materiału oraz zamknięcia dysz wtryskowych, nadal zachowywały pewną wartość ciśnienia rezydualnego, która w połączeniu z drugim procesem wtrysku generowała większy wzrost siły zamykania. Średni chwilowy wzrost siły zamykania wynosił 10 kN i była to jedna z najniższych wartości podczas wszystkich prób. Różnica zakresu wartości pomiarowych wynikała z chwilowego postoju maszyny, potrzebnego do zmiany procesu standardowego na proces TwinShot. Wraz z kolejnymi cyklami, forma rozgrzewała się i w wyniku rozszerzalności cieplnej, siła zamykania nieznacznie wzrastała. Różnica wzrostu siły zamykania (spowodowana przez rozgrzewającą się formę) była jednak na tyle



Rys. 8.3. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN

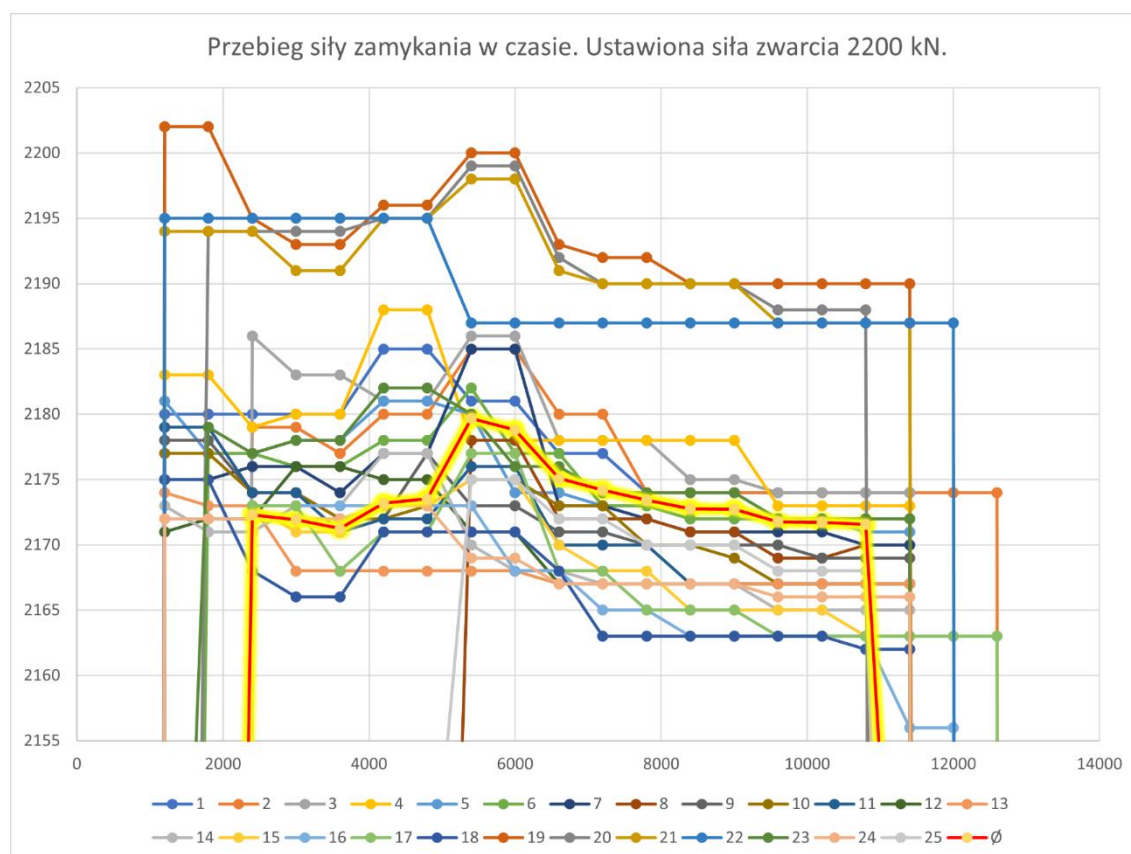
mała w porównaniu do całkowitej wartości siły, że odstąpiono od powtarzania badań. Trend wartości był dostatecznie widoczny. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tablicy Z.5, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tablicy Z.6.

Kolejny proces zakładał już pierwsze obniżenie ustawionej wartości siły zamykania o 100 kN – do wartości 2300 kN, a przebieg wartości pomiarowych pokazano na rys. 8.4. Rozrzut wartości pomiarowych pomiędzy cyklami był już znacznie mniejszy, ponieważ forma nie nagrzewała się już tak intensywnie jak podczas wcześniejszych prób. Widoczne były ponownie dwa chwilowe wzrosty siły zamykania: przed 3-cią oraz przed 6-tą sekundą pomiaru. Wartość średniego chwilowego wzrostu siły zamykania utrzymywała się na podobnym poziomie jak podczas wcześniejszej próby: 10 kN. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tablicy Z.7, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tablicy Z.8.



Rys. 8.4. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2300 kN

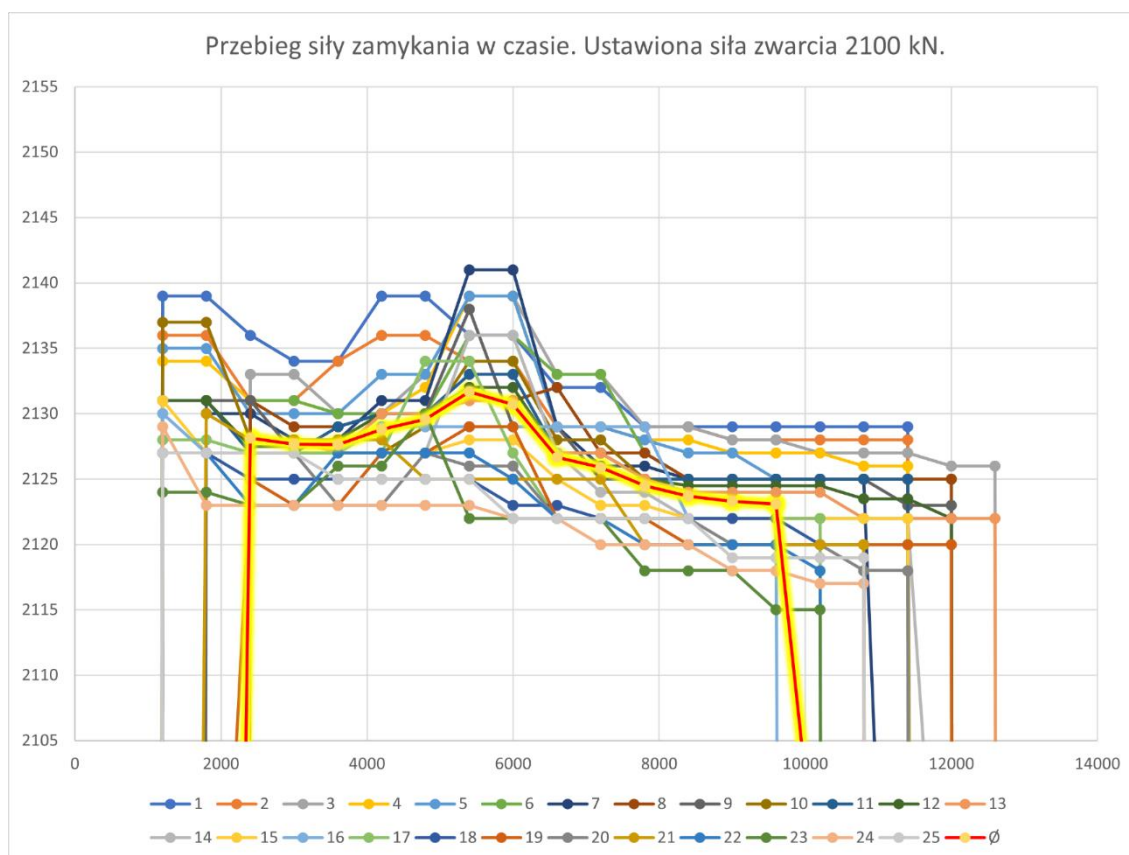
Dalsze obniżenie ustawionej siły zamykania o 100 kN (do wartości 2200 kN), nie spowodowało znaczących zmian w procesie. Przebieg siły zamykania został przedstawiony na rys. 8.5. Średni chwilowy wzrost siły zamykania wynosił w dalszym ciągu 10 kN, co stanowi mniej niż 0,5 % ustawionej siły zamykania. Prawdopodobnie doszło do zakłócenia w systemie pomiarowym podczas cyklu numer 22, ponieważ w trakcie całego czasu trwania tego cyklu zmierzona siła zamykania przyjęła jedynie dwie różne od siebie wartości. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelicy Z.9, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelicy Z.10.



Rys. 8.5. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2200 kN

Następna redukcja siły zamykania do wartości 2100 kN także nie przyniosła istotnych zmian względem poprzednich procesów. Przebieg siły zamykania został pokazany na rys. 8.6. Pomiarzy są względem siebie jeszcze bardziej powtarzalne, co świadczy o ustabilizowaniu się temperatury formy. Uśredniony chwilowy przyrost siły zamykania wyniósł 15 kN, co nadal mieściło się w dopuszczalnej tolerancji.

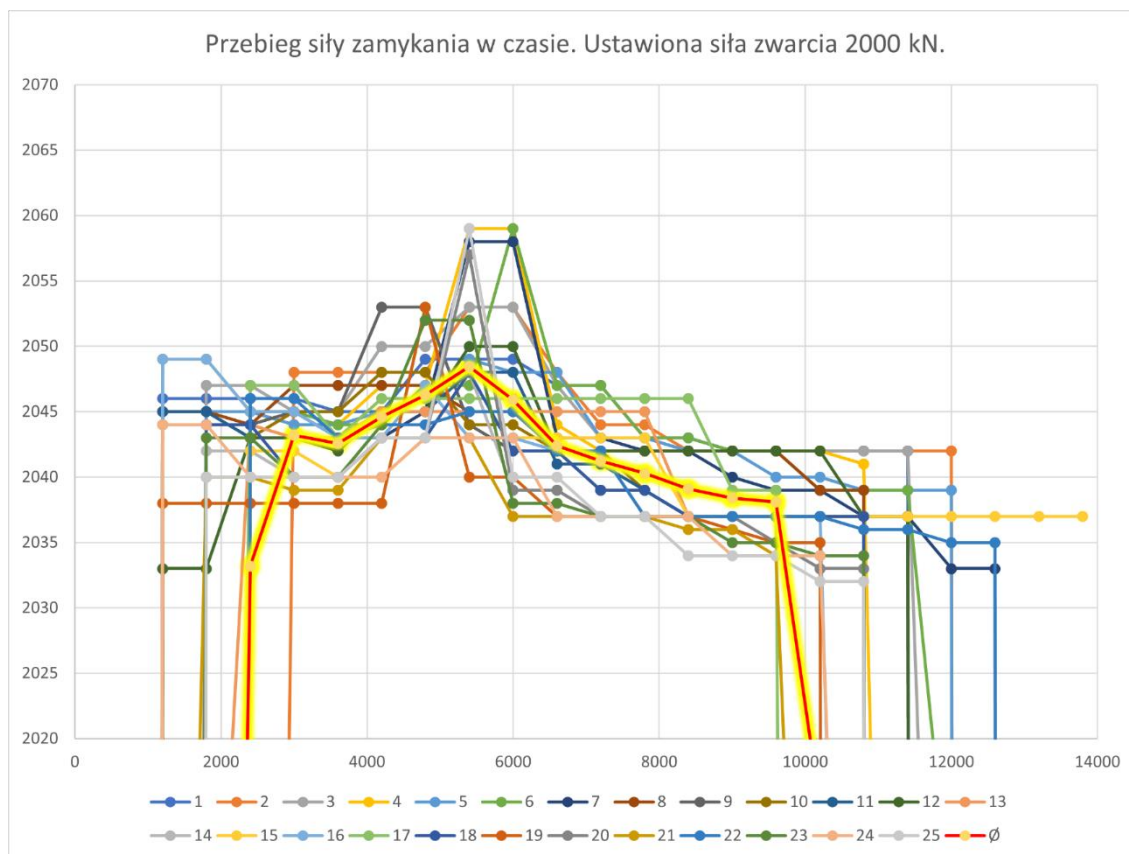
Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelicy Z.11, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelicy Z.12.



Rys. 8.6. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2100 kN

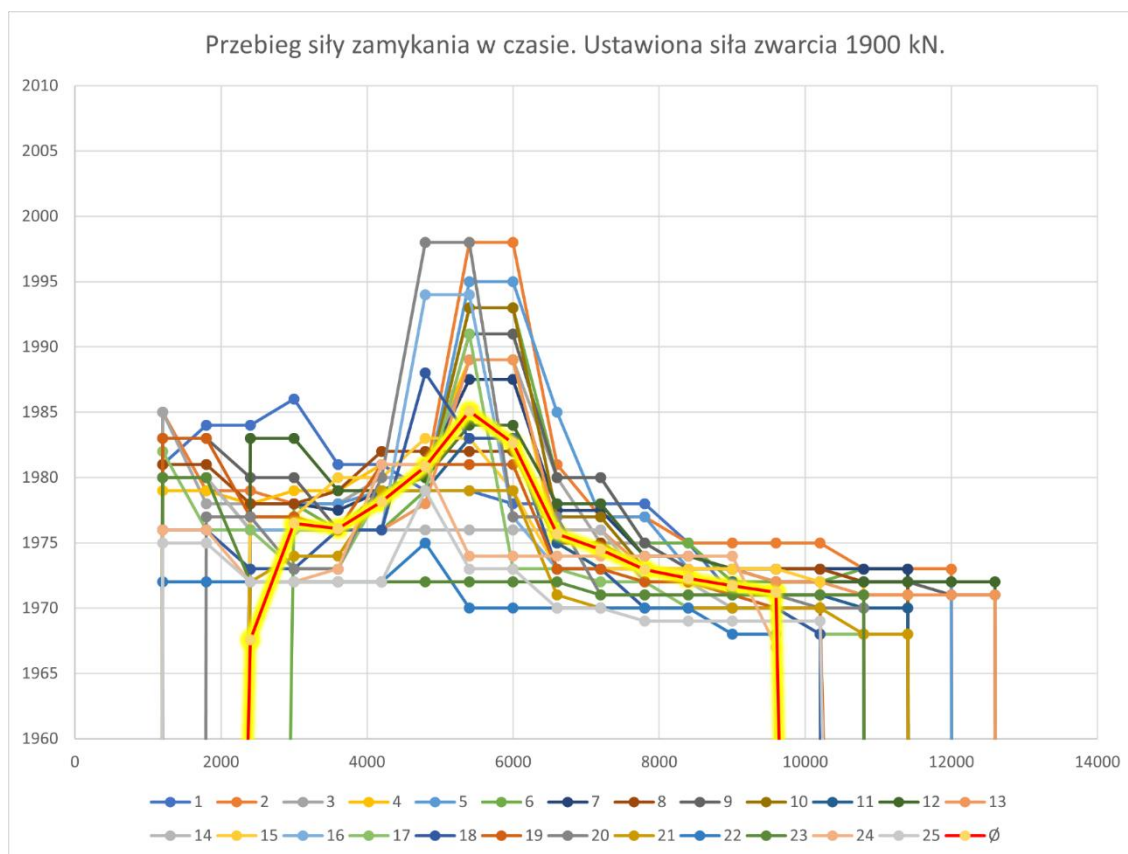
Kolejne obniżenie siły zamykania do wartości 2000 kN w dalszym ciągu zapewniało poprawność wykonania wyprasek. Przebieg zmierzonej siły zamykania przedstawiono na rys 8.7. Uśredniony chwilowy wzrost siły zamykania osiągnął wartość 26 kN, co jest wartością zaznaczenia względem poprzednich procesów. Jednak, w dalszym ciągu, wartość mieściła się w zakresie tolerancji. Jeden z czujników zaczął funkcjonować z pewnym opóźnieniem względem pozostałych, co jest zauważalne w postaci opóźnienia narastania siły zamykania w okolicy 2. sekundy pomiaru, a także przedwczesnego zmniejszania się całkowitej siły zamykania w końcowych etapach przypadku pewnych cykli pomiarowych. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelicy Z.13, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelicy Z.14.





Rys. 8.7. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2000 kN

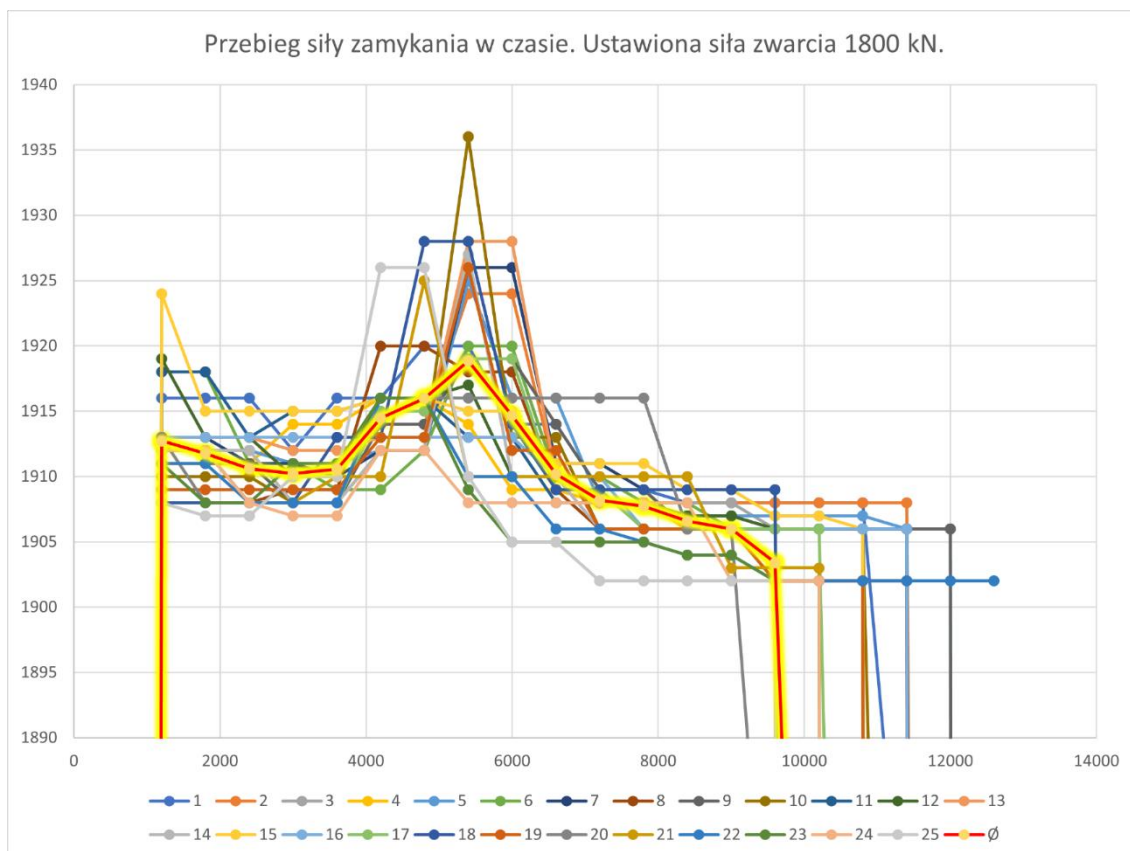
Następna próba odznaczała się obniżeniem ustawionej siły zamykania do 1900 kN. Przebieg wartości pomiarowych pokazano na rys. 8.8. Poprawność wykonania wyprasek nadal pozostała bez zmian. Średni chwilowy wzrost siły zamykania wyniósł 27 kN, a więc różnica względem poprzedniego badania była pomijalna, a sama wartość nadal pozostawała w zakresie tolerancji. W dalszym ciągu było widoczne opóźnienie jednego z czujników, utrzymujące się zarówno na początku pomiarów, jak i na ich końcu. Mogły się do tego przyczynić rozładowujące się akumulatory czujnika, jednak, aby nie przerywać badań (w celu zachowania porównywalnych warunków przetwórczych), zdecydowano o zmianie położenia odbiornika USB, co w efekcie doprowadziło do zmniejszenia dystansu pomiędzy nim, a czujnikiem, który powodował opóźnienie odczytu. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelcy Z.15, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelcy Z.16.



Rys. 8.8. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1900 kN

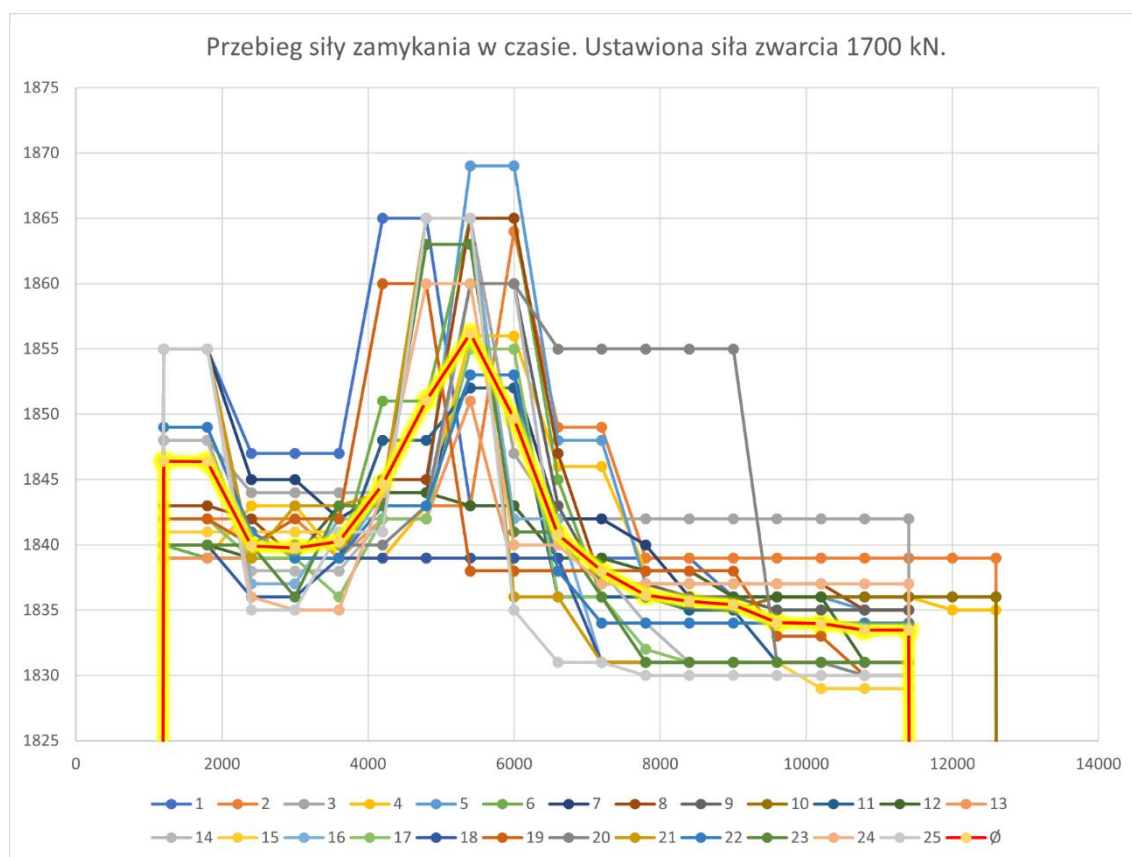
Kolejne obniżenie siły zamykania skutkowało ustawieniem siły na poziomie 1800 kN. Uśredniony chwilowy wzrost siły zamykania ponownie zwiększył się tylko o 1 kN do 28 kN. Wartość nadal mieściła się w tolerancji, bowiem wynosiła ok. 1,55 % całkowitej siły zamykania (przy dopuszczalnej tolerancji 2 %). Dwa procesy wtrysku były jeszcze lepiej widoczne na przebiegu siły zamykania, przedstawionym na rys. 8.9: pierwszy niezwłocznie po zamykaniu, a drugi rozpoczynający się przed 4-tą sekundą pomiaru, i osiągający wartości szczytowe przed 6-tą sekundą cyklu pomiarowego. Zmiana położenia odbiornika sygnału zlikwidowała opóźnienia na początku cykli pomiarowych, jednak opóźnienia są nadal widoczne w końcowej fazie pomiarów. Opóźnienia nie występowały w obszarze zwiększonej siły zamykania. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelicy Z.17, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelicy Z.18.





Rys. 8.9. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1800 kN

Ostatni cykl pomiarowy przeprowadzono na ustawionej sile zamykania 1700 kN. W dalszym ciągu otrzymany proces produkcyjny był stabilny i powtarzalny, a wypraski spełniały założenia kryterium jakościowego. Odnotowany został jednak kolejny wzrost masy wypraski, który spowodował już niezgodność kryterium masy detali. Na rys. 8.10 przedstawiono przebieg wartości pomiarowych. Podwójny proces wtrysku jest jeszcze lepiej widoczny. Średnia wartość chwilowego wzrostu siły zamykania przybrała znacznie większą wartość: 60 kN, co wykraczało poza dopuszczalną tolerancję 2 % całkowitej siły zamykania. Tym samym drugie kryterium oceny nie zostało spełnione. Postanowiono o zakończeniu badań, zgodnie z algorytmem przedstawionym w podrozdziale 7.3 na rys. 7.3. Poszczególne wartości pomiarowe siły zamykania są dostępne w załączniku w tabelcy Z.19, a wyniki ważenia wyprasek zestawiono w tabelcy Z.20.



Rys. 8.10. Przebieg wartości pomiarowych procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1700 kN

Wszystkie cykle pomiarowe podsumowano, a najważniejsze wartości pomiarowe zestawiono na karcie wyników, pokazanej w tabelicy 8.2.

Tablica 8.2. Karta wyników badań

L.P.	Typ procesu	Liczba gniazd (n)	Siła zamykania (w kN)	Siła zamykania / 1 gniazdo (w kN)	Odczyt Balluff (w kN)	Peak Balluff (w kN)	Tolerancja 2% (w kN)	$\Delta F_c$ Balluff (w kN)	Odczyt Sensormate (w kN)	Wypraska poprawna?
1.	Tradycyjny	14	2400	171,4	2407	2423	48,14	16	2115	TAK
2.	Tradycyjny	28	2400	85,7	2405	2465	48,1	60	2411-2440	TAK
3.	Twinshot	28	2400	171,4	2413	2423	48,26	10	2365	TAK
4.	Twinshot	28	2300	164,3	2290	2300	45,8	10	2280	TAK
5.	Twinshot	28	2200	157,1	2170	2180	43,4	10	2190	TAK
6.	Twinshot	28	2100	150,0	2080	2095	41,6	15	2120	TAK
7.	Twinshot	28	2000	142,9	1968	1994	39,36	26	2040	TAK
8.	Twinshot	28	1900	135,7	1873	1900	37,46	27	1970	TAK
9.	Twinshot	28	1800	128,6	1784	1812	35,68	28	1910	TAK
10.	Twinshot	28	1700	121,4	1680	1740	33,6	60	1840	TAK

Natomiast wartości średnie przebiegów siły zamykania zestawiono w tablicy 8.3.

Tablica 8.3. Podsumowanie wyników pomiarowych siły zamykania.  
Pomiar czujnikami Sensormate

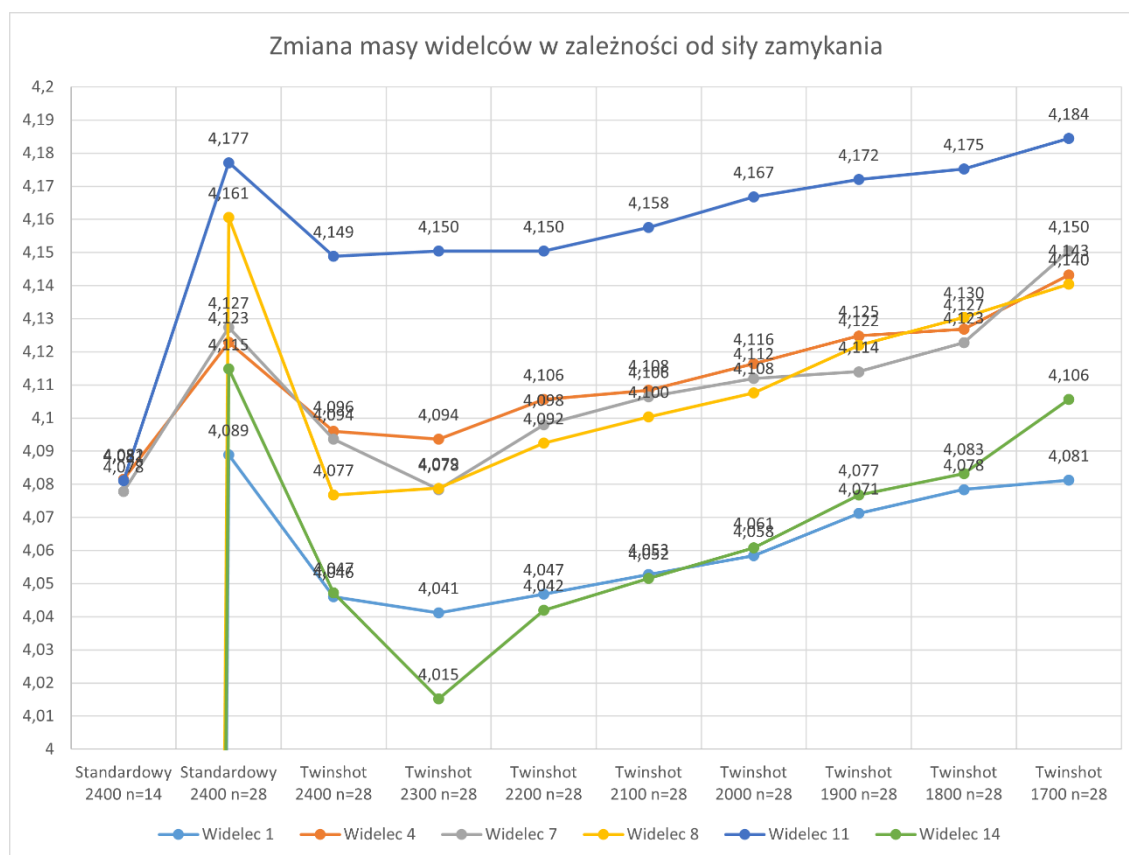
Proces:	Standard	Standard	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot
Liczba gniazd [n]:	14	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Siła zamykania [kN]:	2400	2400	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	1700
0	-3	3	1	-7	-15	-5	-11	-13	-16	-19
600	-3	12	1	39	-15	-4	-2	1	11	-18
1200	2196	2416	2365	2272	1951	1764	1539	1756	1913	1846
1800	2196	2416	2365	2271	1975	1898	1828	1821	1912	1846
2400	2382	2414	2364	2273	2172	2128	2033	1968	1911	1840
3000	2410	2415	2364	2272	2172	2128	2043	1976	1910	1840
3600	2410	2417	2363	2271	2171	2128	2043	1976	1911	1840
4200	2412	2422	2364	2273	2173	2129	2045	1978	1914	1845
4800	2412	2424	2365	2273	2174	2130	2046	1981	1916	1851
5400	2415	2417	2365	2274	2180	2132	2048	1985	1919	1856
6000	2414	2414	2365	2273	2179	2131	2046	1983	1915	1850
6600	2414	2412	2360	2269	2175	2127	2042	1976	1910	1841
7200	2413	2412	2359	2268	2174	2126	2041	1975	1908	1838
7800	2413	2412	2358	2268	2173	2124	2040	1973	1908	1836
8400	2413	2411	2358	2268	2173	2124	2039	1972	1907	1836
9000	2412	2411	2358	2267	2173	2123	2038	1972	1906	1835
9600	2412	2411	2357	2266	2172	2123	2038	1971	1903	1834
10200	2412	2400	2357	2175	2172	2092	2015	1805	1817	1834
10800	2412	1336	2284	1990	2172	1909	1883	1611	1589	1833
11400	2245	721	2192	1357	2116	1573	1148	1225	1006	1833
12000	1876	119	1009	663	656	985	690	552	547	427
12600	1032	17	660	259	192	323	359	319	146	371
13200	-5	1	106	0	-17	-5	104	-5	-7	-21
13800	-7	0	0	-4	-18	-5	159	-14	-17	-22
$F_{C\text{ PEAK}}$	2415	2424	2365	2274	2180	2132	2048	1985	1919	1856
$F_{C\text{ MIN}}$	2410	2400	2357	2266	2171	2123	2033	1968	1903	1833
$\Delta F_C$	4	24	8	7	8	9	15	18	15	23
Dop. $\Delta F_C$	48,21	48,01	47,14	45,33	43,42	42,46	40,66	39,35	38,07	36,67

Podczas wszystkich procesów badawczych zostało zachowane kryterium opisane w podrozdziale 7.2 równaniem 7.13. Chwilowy wzrost siły zamykania przekroczył dopuszczalną tolerancję 2 % całkowitej siły zamykania w dwóch przypadkach: procesy standardowego z wszystkimi 28 gniazdami, oraz w trakcie procesu TwinShot z ustawioną siłą zamykania 1700 kN. W obu przypadkach chwilowy wzrost siły zamykania osiągnął podobną wartość 60 kN, co pozwala na zestawienie obu procesów razem. Można na tej podstawie stwierdzić, że proces TwinShot obniżył siłę zamykania wymaganą do pracy z formą będącą przedmiotem badań o 700 kN. Zmierzone wartości sił podsumowano także w tablicy 8.4.

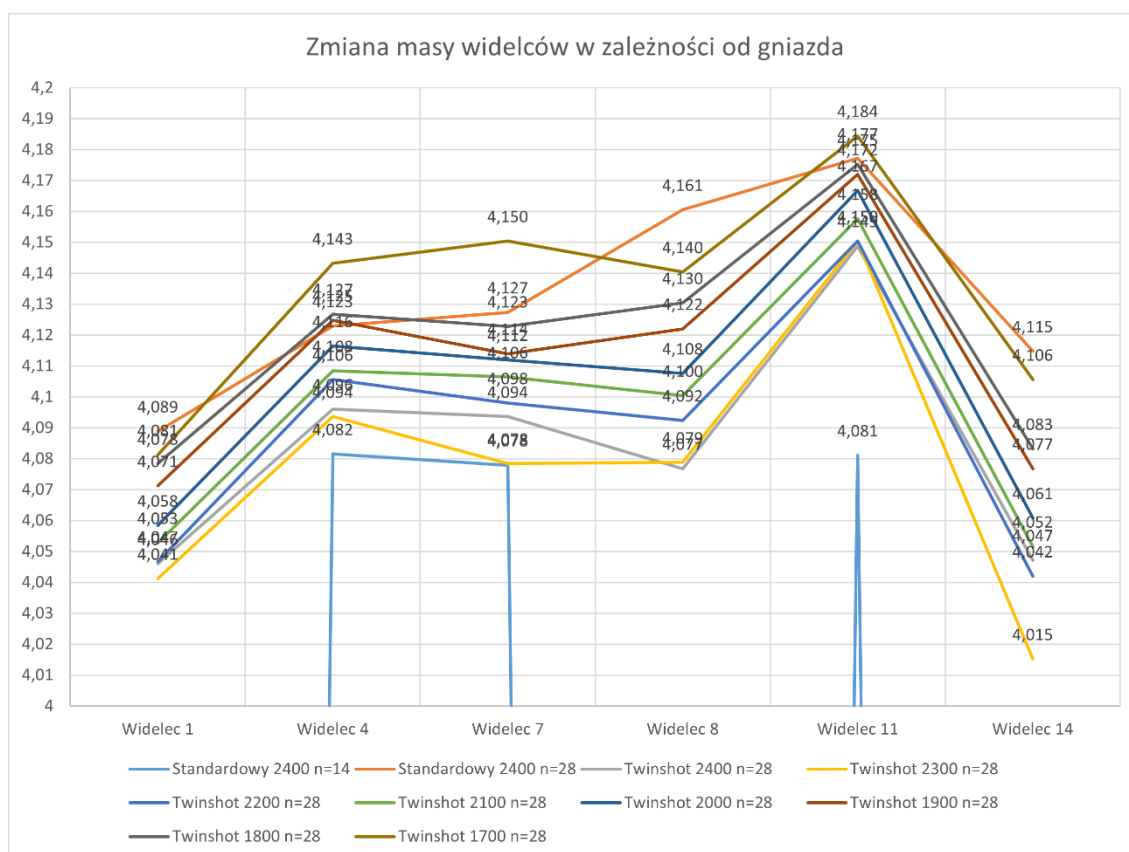
Tablica 8.4. Tablica zestawiająca wartości sił zamykania

Proces	F <sub>c</sub>	F <sub>c PEAK</sub> Balluff	ΔF <sub>c</sub> Balluff	F <sub>c PEAK</sub> Sensormate	ΔF <sub>c</sub> Sensormate
Standard n14 2400 kN	2407	2423	16	2414,64	4,32
Standard n28 2400 kN	2405	2465	60	2424,12	23,76
Twinshot n28 2400 kN	2413	2423	10	2365,04	8,08
Twinshot n28 2300 kN	2290	2300	10	2273,8	7,44
Twinshot n28 2200 kN	2170	2180	10	2179,68	8,44
Twinshot n28 2100 kN	2080	2095	15	2131,68	8,58
Twinshot n28 2000 kN	1968	1994	26	2048,44	15,24
Twinshot n28 1900 kN	1873	1900	27	1985,06	17,5
Twinshot n28 1800 kN	1784	1812	28	1918,84	15,44
Twinshot n28 1700 kN	1680	1740	60	1856,2	22,72

Jest także zauważalny powolny wzrost masy wyprasek wraz z obniżaniem siły zamykania, co pokazuje stopniowy proces zbliżania się do maksymalnego wykorzystania dostępnej siły zamykania. Zmiana mas wyprasek „Widelec” została przedstawiona na rys. 8.11, w zależności od siły zamykania, a na rys. 8.12 w zależności od konkretnego gniazda formującego, należącego do grupy reprezentatywnej.



Rys. 8.11. Zmiana masy wypraski „Widelec” w zależności od siły zamykania

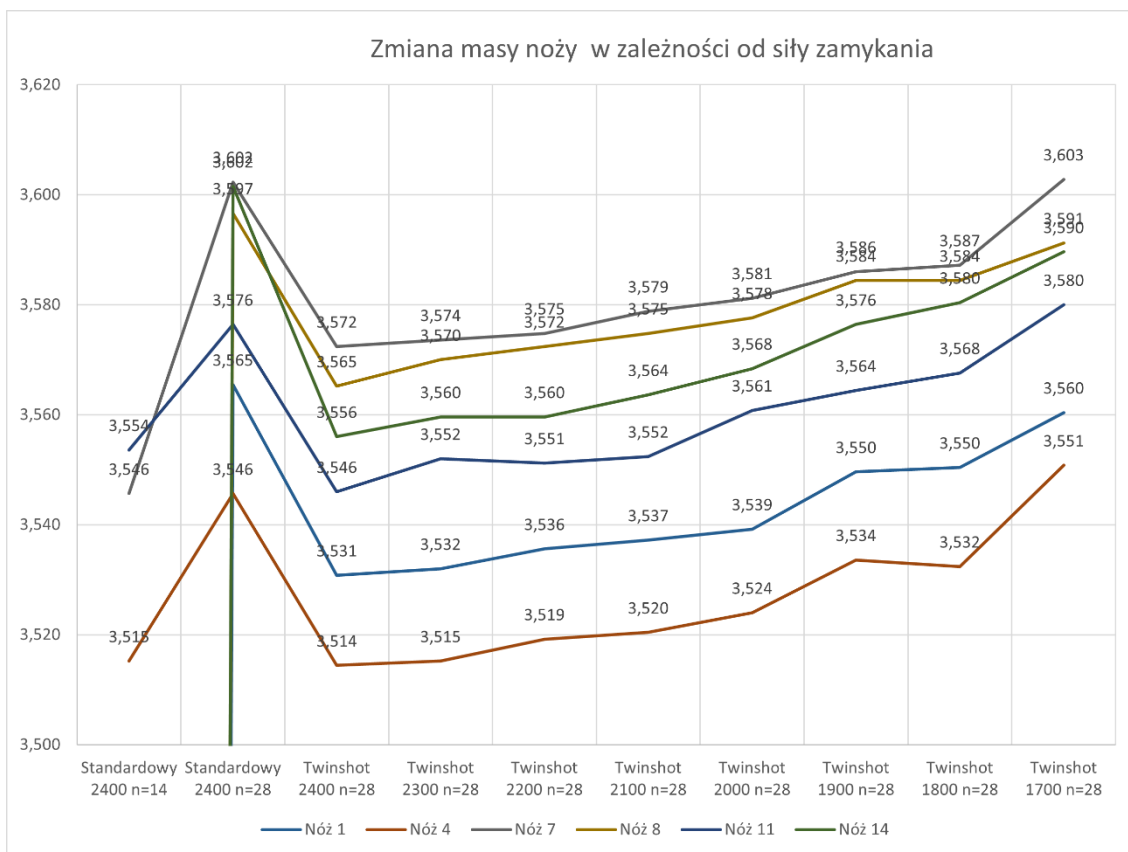


Rys. 8.12. Zmiana masy wypraski „Widelec”, w zależności od gniazda formującego

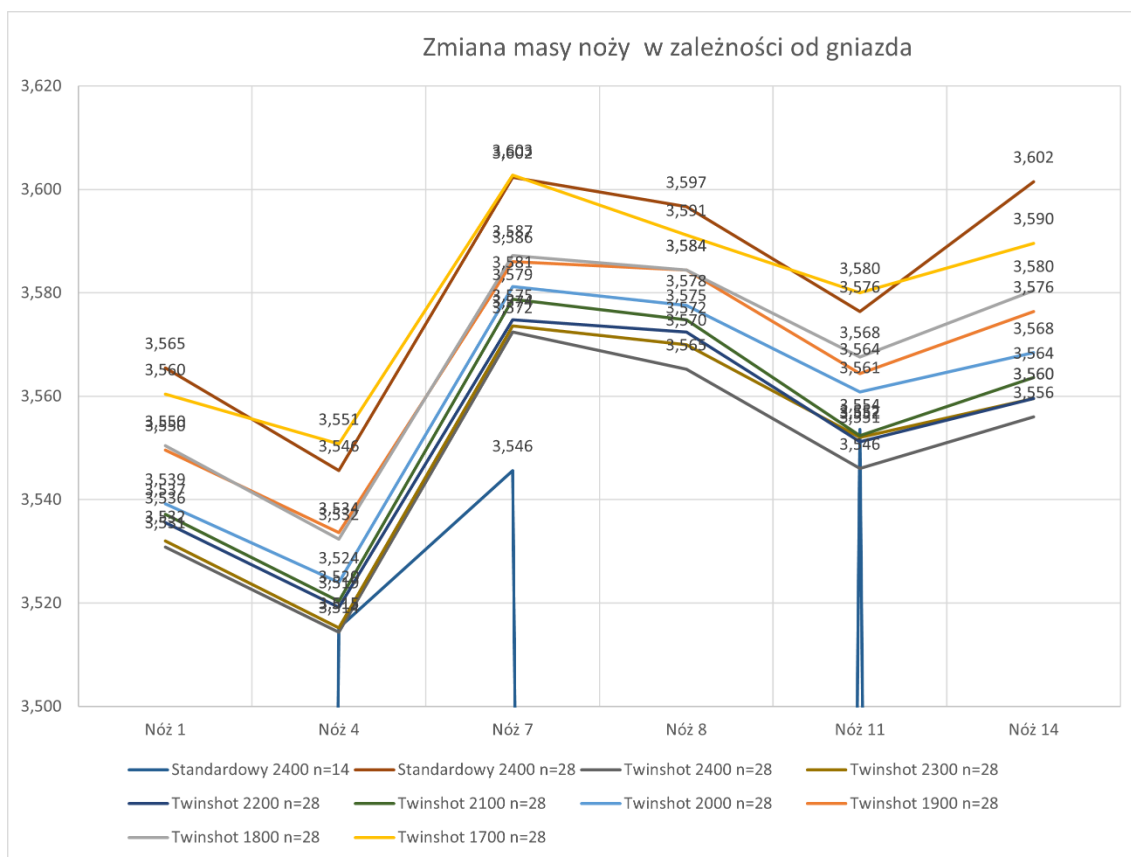
Na rys. 8.13 pokazano zmianę masy wypraski „Nóż” w zależności od ustawionej siły zamykania, a na rys. 8.14 jest widoczna korelacja masy wypraski z konkretnym gniazdem produkcyjnym z grupy reprezentatywnej.

Na każdym z rys. 8.11-8.14 linie trendu są spójne ze sobą i przejawiają cechy charakterystyczne dla każdego gniazda lub procesu, co świadczy o dokładnościach wykonawczych formy wtryskowej, a także o silnej korelacji masy detalu z wartościami wzrostu siły zamykania [85, 86]. Zachowanie spójnego trendu wszystkich gniazd potwierdza także powtarzalność procesów badawczych TwinShot, gdzie jedyną zmienną była siła zamykania. Przekroczenie dopuszczalnej masy wystąpiło w przypadku dwóch cykli.

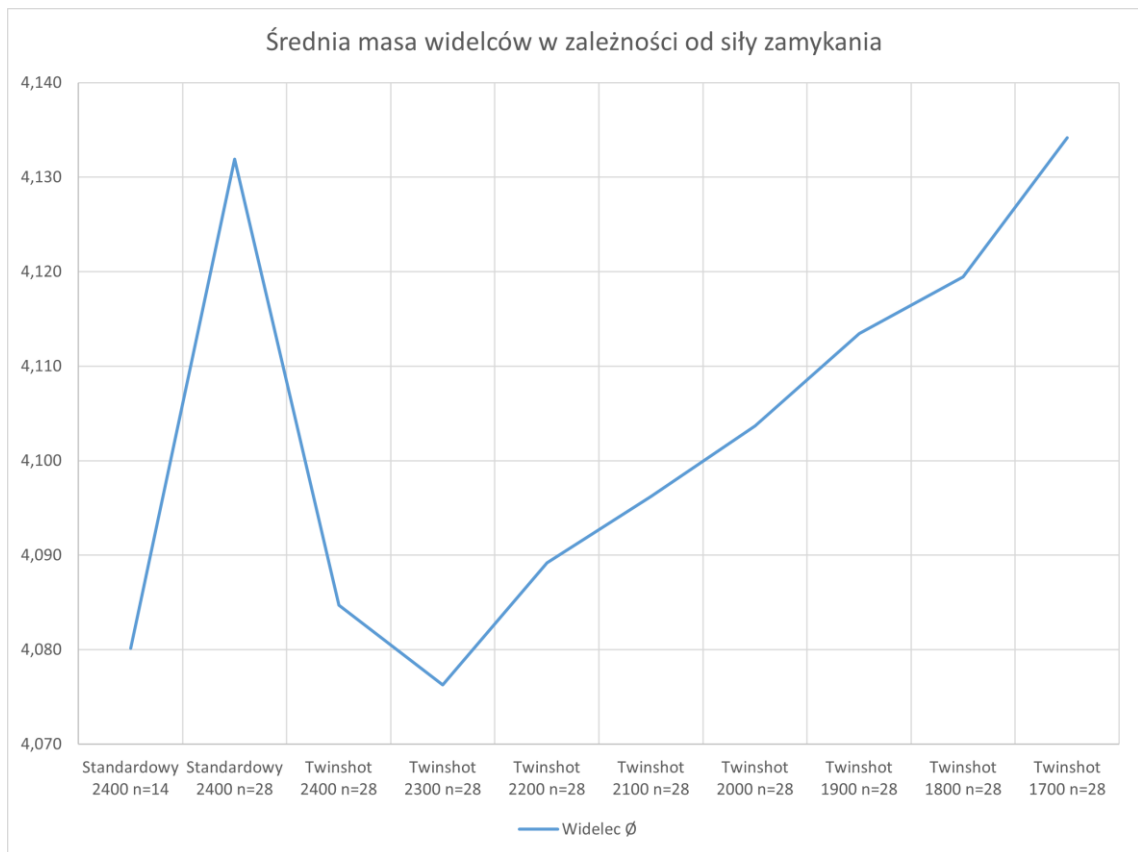
Wszystkie wartości pomiarowe mas wyprasek zostały zestawione w tabelicy 8.5, gdzie także wyliczono masy średnie, pokazane na rys. 8.15 (w przypadku wypraski „Widelec”) oraz rys. 8.16 (w przypadku wypraski „Nóż”). W tabelicy 8.5 wyliczono także wzrost procentowy masy względem masy wyprasek uzyskanych za pomocą procesu referencyjnego, oraz odchylenie standardowe.



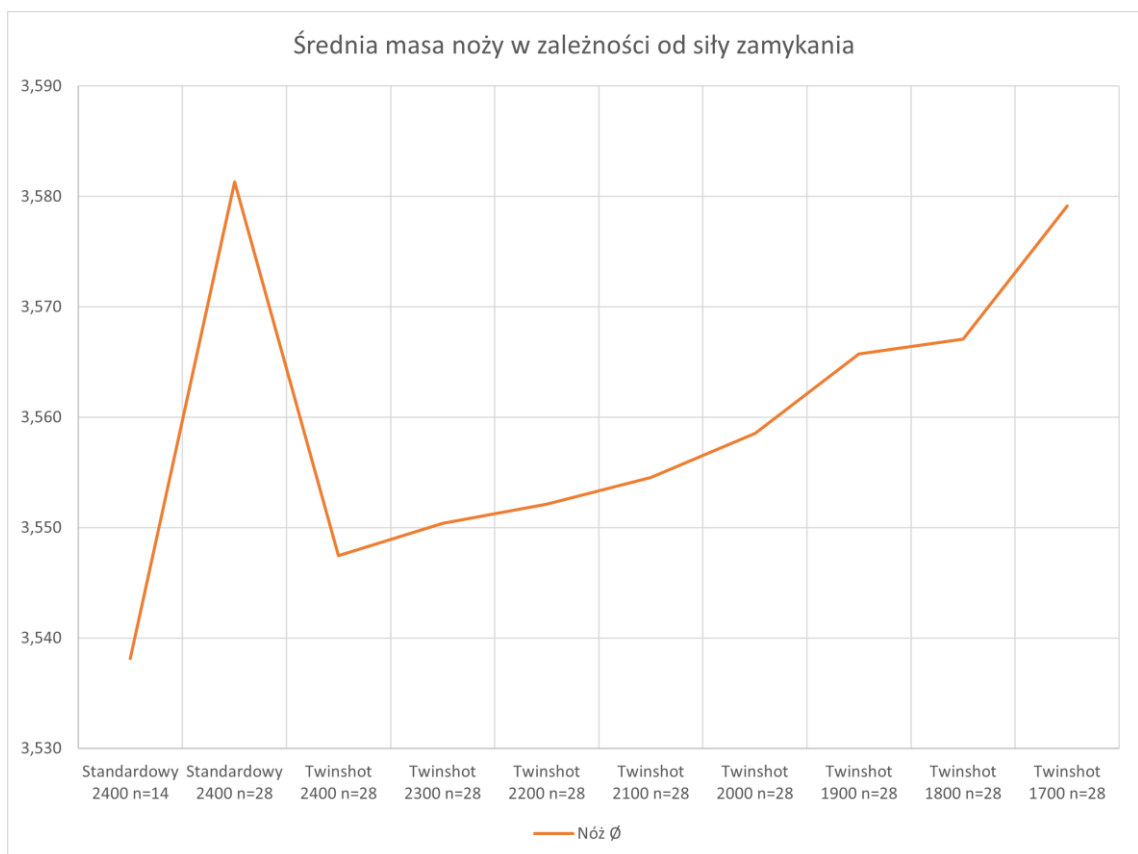
Rys. 8.13. Zmiana masy wypraski „Nóż” w zależności od siły zamykania



Rys. 8.14. Zmiana masy wypraski „Nóż”, w zależności od gniazda formującego



Rys. 8.15. Średnia masa wypraski „Widelec” w zależności od siły zamykania



Rys. 8.16. Średnia masa wypraski „Nóż” w zależności od siły zamykania



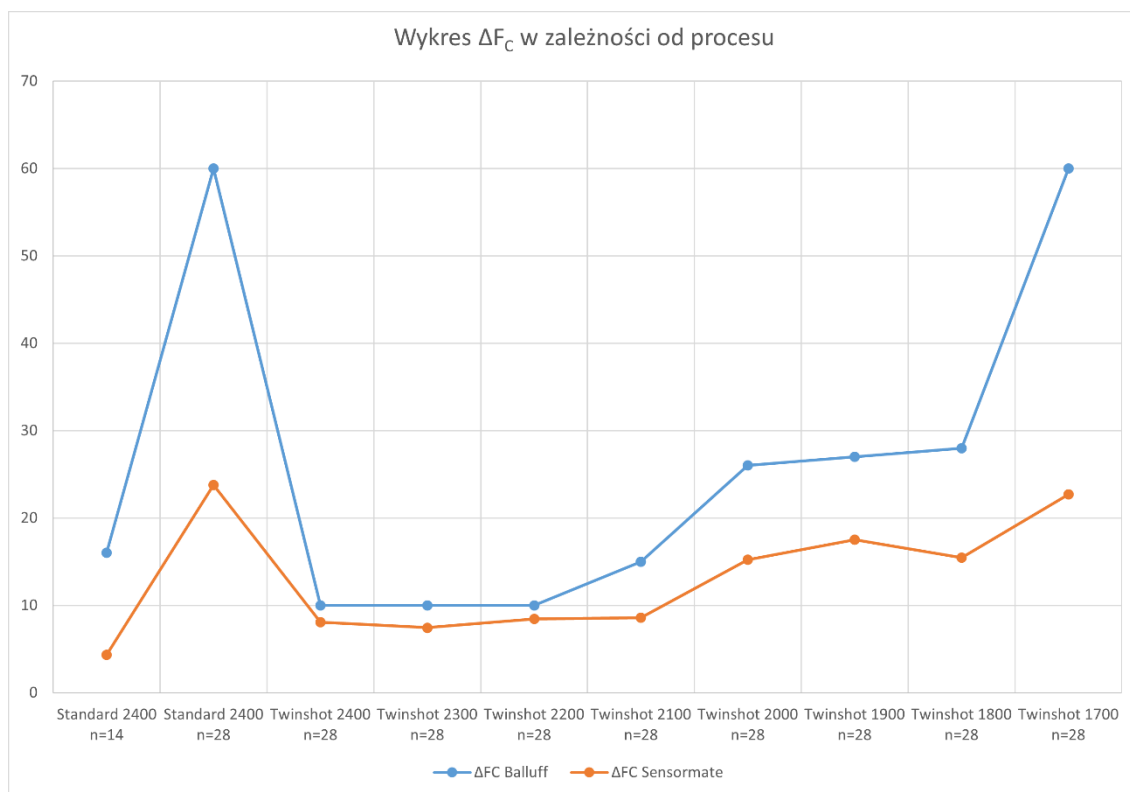
Tablica 8.5. Zestawienie mas wyprasek

Proces:	Standardowy	Standardowy	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot	Twinshot
Siła zamykania (w kN):	2400	2400	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	1700
Widelec 1	-	4,089	4,046	4,041	4,047	4,053	4,058	4,071	4,078	4,081
Widelec 4	4,082	4,123	4,096	4,094	4,106	4,108	4,116	4,125	4,127	4,143
Widelec 7	4,078	4,127	4,094	4,078	4,098	4,106	4,112	4,114	4,123	4,150
Widelec 8	-	4,161	4,077	4,079	4,092	4,100	4,108	4,122	4,130	4,140
Widelec 11	4,081	4,177	4,149	4,150	4,150	4,158	4,167	4,172	4,175	4,184
Widelec 14	-	4,115	4,047	4,015	4,042	4,052	4,061	4,077	4,083	4,106
Nóż 1	-	3,565	3,531	3,532	3,536	3,537	3,539	3,550	3,550	3,560
Nóż 4	3,515	3,546	3,514	3,515	3,519	3,520	3,524	3,534	3,532	3,551
Nóż 7	3,546	3,602	3,572	3,574	3,575	3,579	3,581	3,586	3,587	3,603
Nóż 8	-	3,597	3,565	3,570	3,572	3,575	3,578	3,584	3,584	3,591
Nóż 11	3,554	3,576	3,546	3,552	3,551	3,552	3,561	3,564	3,568	3,580
Nóż 14	-	3,602	3,556	3,560	3,560	3,564	3,568	3,576	3,580	3,590
Widelec $\sigma$	4,080	4,132	4,085	4,076	4,089	4,096	4,104	4,113	4,119	4,134
Widelec $\Delta/n0$	0,00%	1,27%	0,11%	-0,10%	0,22%	0,39%	0,58%	0,82%	0,96%	1,32%
Widelec $\sigma$	0,002	0,029	0,035	0,042	0,037	0,036	0,037	0,034	0,032	0,033
Nóż $\sigma$	3,538	3,581	3,547	3,550	3,552	3,555	3,559	3,566	3,567	3,579
Nóż $\Delta/n0$	0,00%	1,22%	0,26%	0,35%	0,40%	0,46%	0,58%	0,78%	0,82%	1,16%
Nóż $\sigma$	0,017	0,021	0,020	0,021	0,020	0,021	0,021	0,019	0,020	0,018

Analizując rys. 8.17, na którym przedstawiono wzrost chwilowej maksymalnej siły zamykania w zależności od ustawionej siły zamykania, można zauważyć zwiększenie kąta nachylenia linii wykresów w stosunku do procesu używającego siły zamykania 2100 kN. Świadczy to o stopniowym zbliżaniu się do wartości granicznych zapasu nadwyżki siły zamykania nad siłami pochodzącymi z procesów wtrysków i docisków. Zatem procesy TwinShot, wykorzystujące siłę zamykania z przedziału 2400 kN ÷ 2100 kN, są traktowane jako procesy zalecane, natomiast z zakresu 2000 kN ÷ 1700 kN – jako procesy w warunkach dopuszczalnych, jeśli dane przedsiębiorstwo zaakceptuje większy wzrost masy wyprasek. Warty zaznaczenia jest jednak fakt, że badana forma wtryskowa nie mogła zostać już wykorzystana na wtryskarkach o sile zamykania mniejszej niż 2400 kN, ponieważ gabaryt montażowy formy jest większy od stołów montażowych takich maszyn.

Jest zauważalny bardzo duży przyrost chwilowego wzrostu siły zamykania pomiędzy procesami TwinShot o sile zamykania 1800 kN oraz 1700 kN. Wskazuje to na obecność minimalnej, koniecznej do poprawnego procesu siły zamykania w przedziale pomiędzy tymi wartościami. W przypadku dalszego obniżenia siły zamykania, istniało uzasadnione ryzyko tak dużego, chwilowego odseparowania połówek formy wtryskowej, które umożliwiłoby wypłynięcie polimeru z gniazd formujących i nagły przetrzask po dużej powierzchni formy wtryskowej. Takie zjawisko obciążałoby także w znacznym stopniu układ kolanowy i kolumny wtryskarki.





Rys. 8.17. Wykres zmian wzrostów siły zamykania wraz ze zmianami ustawionej siły zamykania

Wszystkie wartości zostały poddane ocenie zgodnej z kryteriami opisanymi w punkcie 7.2. W rezultacie zatem, zamiast planowanych czterech kryteriów, uzyskano ich pięć, ponieważ maksymalną wartość chwilową siły zamykania analizowano na podstawie wyników zebranych obiema metodami pomiarowymi. Tym samym 2 z 10 badanych procesów zostały uznane za nieprawidłowe, ponieważ przekroczyły możliwe, dopuszczalne wartości maksymalnej siły zamykania, a jeden z procesów dodatkowo skutkowałam wypraskami o zbyt wysokiej masie. Oceny podsumowano w tabelicy 8.6.

Tablica 8.6. Tablica ocen procesów produkcyjnych

Proces	Liczba gniazd	Stabilność procesu	Kryterium						Ocena końcowa	Komentarz
			Jakości	Masy	$\Delta F_c < 110\%$	$\Delta F_c 1$	$\Delta F_c$ Sensormate	$\Delta F_c$ Balluff		
Standardowy 2400	14	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	-
Standardowy 2400	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Niezgodne	Proces niepoprawny	-
Twinshot 2400	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki zalecane
Twinshot 2300	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki zalecane
Twinshot 2200	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki zalecane
Twinshot 2100	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki zalecane
Twinshot 2000	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki dopuszczalne
Twinshot 1900	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki dopuszczalne
Twinshot 1800	28	Tak	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Proces poprawny	Warunki dopuszczalne
Twinshot 1700	28	Tak	Zgodne	Niezgodne	Zgodne	Zgodne	Zgodne	Niezgodne	Proces niepoprawny	-

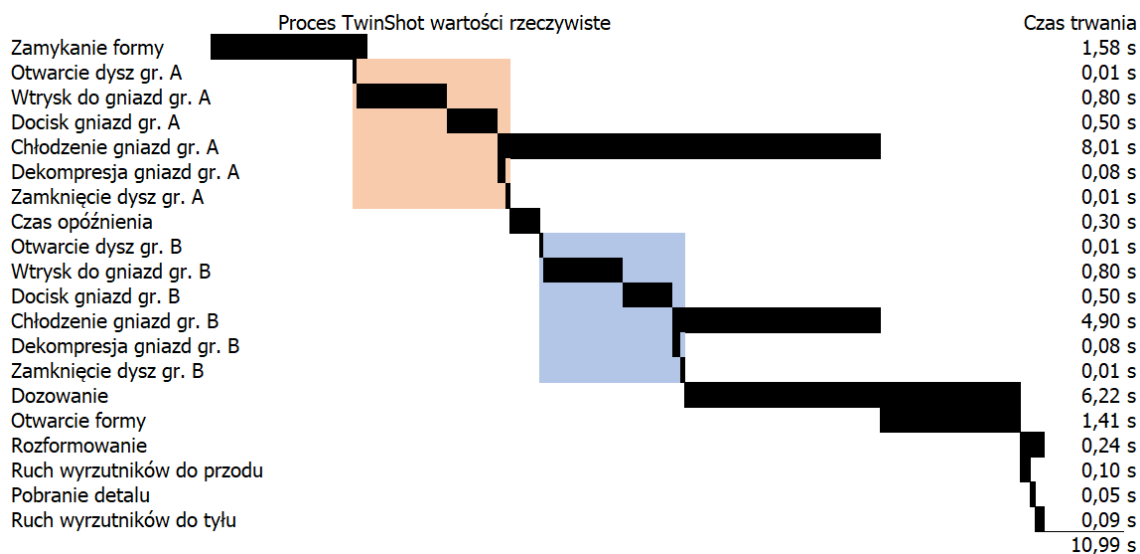
Po zastosowaniu metody TwinShot zauważono na niektórych detalach wykonanych przy użyciu siły zamykania w zakresie 2400 kN ÷ 2200 kN przypalenia na końcu drogi płynięcia polimeru. Świadczy to o zwiększeniu prędkości wtrysku, o którym wspomniano w podrozdziale 4.3. Wada ta jednak ustąpiła samoczynnie przy niższych wartościach siły zamykania, ponieważ poprawiła się wtedy zdolność do samoczynnego odpowietrzania się gniazd formujących podczas wtrysku, gdyż płyty formujące nie były już ze sobą tak mocno dociśnięte [87, 88]. Wada ta nie spowodowała niezgodności jakościowej, ponieważ wypraski były wypełnione poprawnie, a wada wizualna jest bardzo łatwa do wyeliminowania w wyniku nieznacznego zmniejszenia prędkości wtrysku lub obniżenia temperatury stopu [89]. Jednak w celu zachowania jak najwyższego podobieństwa porównywanych do siebie procesów badawczych, nie wprowadzono żadnych korekt profilu prędkości wtrysku podczas wykonywanych badań.

Najważniejsze parametry procesowe użyte do procesów badawczych przedstawiono w tablicy 8.7.

Tablica 8.7. Najważniejsze parametry procesowe podczas badań

Siła zamykania	2400 ÷ 1700 kN
Profil prędkości wtrysku	Stały: 65 mm · s <sup>-1</sup>
Ciśnienie przełączenia wtrysku na docisk	94,5 MPa
Ciśnienie i czas trwania docisku	93 MPa przez 0,5 s
Czas chłodzenia	6,5 s
Przeciwcisnienie dozowania	1,6 MPa
Droga dekompresji przed dozowaniem	10 mm
Droga dozowania	107 mm
Droga dekompresji po dozowaniu	2 mm

Ostateczny cyklogram procesu TwinShot przyjął postać pokazaną na rys. 8.18.



Rys. 8.18. Cyklogram uzyskanego procesu TwinShot

Wartym zaznaczenia jest fakt, że o ile w procesie TwinShot wykonuje się dwa podprocesy wtrysku i docisku w porównaniu do procesu standardowego, to w przypadku metody TwinShot czas każdego z obu podprocesów wtrysku może być krótszy, niż czas wtrysku w procesie standardowym. Wynika to z mniejszej dawki wtryskiwania, która jest potrzebna na połowę gniazd formujących – pod warunkiem, że proces technologiczny zezwoli na szybsze napełnianie gniazd formujących, niż ma to miejsce w procesie standardowym. W dalszym ciągu wszystkie podprocesy TwinShot będą trwały dłużej niż jeden wtrysk i docisk w procesie standardowym.

Stosowanie dysz wtryskowych zamykanych igłowo pozwala także na przeprowadzenie procesu dozowania podczas otwierania i zamykania formy, co prowadzi do oszczędności czasowych względem stosowania form bez zamykanych dysz lub maszyny niewyposażonej w dyszę zamykającą na cylindrze wtryskowym. Może to okazać się przydatne także w momencie, gdy agregat wtryskowy ma ograniczoną wydajność plastyfikacji materiału.

Całkowity czas cyklu prowadzonego metodą TwinShot wyniósł niespełna 11 sekund, podczas gdy proces standardowy trwał 10 sekund. Stanowi to mniejsze wydłużenie całkowitego czasu cyklu, niż zakładano pierwotnie w rozważaniach zamieszczonych w podrozdziale 5.2, w równaniu 5.12, ponieważ nie dokonano redukcji prędkości napełniania gniazd formujących po zastosowaniu metody TwinShot (w przeciwieństwie do założeń w równaniu 5.12).

## 9. ZASTOSOWANIE PRZEMYSŁOWE METODY TWINSHOT

### 9.1. Dokładna weryfikacja opłacalności metody

Po przeprowadzeniu badań, dokonano dokładnej weryfikacji opłacalności metody, używając do tego celu wartości rzeczywistych. Wykorzystano w tym celu wzory opisane w podrozdziale 5.2, na podstawie których wyliczono dwie składowe koszty produkcji, które są silnie zależne od wydajności produkcji. Wyniki zestawiono w tabelicy 9.1.

Tablica 9.1. Obliczanie kosztów produkcji

Kryterium procesu	Kryterium siły zamykania	Metoda Twinshot	Kryterium liczby gniazd formujących
Wtryskarka	Ecopower 240/750	Ecopower 240/750	Ecopower 400/2100
Liczba gniazd formujących (w sztukach)	18	28	28
Liczba pracowników	1	1	1
Koszt godziny pracy 1 pracownika (w PLN)	30 zł	30 zł	30 zł
Wydajność godzinowa produkcji (szt./h)	6480	9164	10080
<b>Koszt pracownika KP (PLN/1000 szt.)</b>	4,63 zł	3,27 zł	2,98 zł
Ilość energii elektrycznej (w kWh)	25	25	30
Koszt energii elektrycznej (zł/1 kWh)	1,00 zł	1,00 zł	1,00 zł
Wydajność godzinowa produkcji (w szt./h)	6480	9164	10080
<b>Koszt energii KE (PLN/1000 szt.)</b>	3,86 zł	2,73 zł	2,98 zł

Dane przedstawione w tabelicy 9.1 wskazują w czytelny sposób, że najmniej efektywnym ekonomicznie rodzajem produkcji jest wykorzystanie wtryskarki o sile zamykania 2400 kN i formy wtryskowej z 18 gniazdami formującymi. Z racji najniższej wydajności takiego gniazda produkcyjnego, koszty kształtują się na najwyższym poziomie spośród 3 rozważanych przypadków. Z racji, że wspomniane koszty są odwrotnie proporcjonalnie uzależnione od wydajności produkcyjnej, przyjmują najniższy poziom w przypadku wykorzystania wtryskarki o sile zwarcia 4000 kN i użyciu formy 28-krotnej. Natomiast wartym zauważenia jest kompromis, który oferuje metoda TwinShot. Koszty produkcji są tu nieznacznie wyższe, niż w przypadku większej maszyny (ponieważ czas cyklu jest nieznacznie dłuższy), jednak należy pamiętać, że nakłady inwestycyjne potrzebne w przypadku innowacyjnej metody są znacznie niższe i koniecznym jest podkreślenie dużo niższych

kosztów produkcji, które oferuje ta metoda względem procesu tradycyjnego na tej samej wtryskarce (2400 kN).

Rozszerzono rozważania pokazane w podrozdziale 7.3.4, oszacowano przewidywaną żywotność układu, na podstawie której wyliczono odpis amortyzacyjny, przypadający na 1 000 000 sztuk wyprodukowanego wyrobu oraz drugi odpis, pokazujący godzinowy koszt pracy maszyny. Rozszerzono w ten sposób tablicę 7.4 o wymienione dane, do postaci tablicy 9.2.

Tablica 9.2. Obliczenia wartości odpisów amortyzacyjnych

Kryterium procesu	Kryterium siły zamykania	Metoda Twinshot	Kryterium liczby gniazd formujących
Wtryskarka	Ecopower 240/750	Ecopower 240/750	Ecopower 400/2100
Forma	Otwarte dysze GK	Zamykane dysze GK	Otwarte dysze GK
Siła zwarcia (w kN)	2400	2400	4000
Liczba gniazd formujących (w sztukach)	18	28	28
Siła zamykania na 1 gniazdo formujące (w kN)	133	171	143
Czas cyklu (w sekundach)	10	11	10
Wydajność produkcyjne (Szt./h)	6480	9164	10080
Koszt maszyny (w €)	€ 266 850	€ 266 850	€ 457 380
Koszt formy wtryskowej (w €)	€ 80 000	€ 136 000	€ 112 000
Koszt automatyzacji (w €)	€ 39 850	€ 39 850	€ 41 300
Całkowity koszt inwestycji (w €)	€ 386 700	€ 442 700	€ 610 680
Przewidywana żywotność linii prod. (liczba cykli)	50 000 000	50 000 000	50 000 000
Odpis amortyzacyjny na 1 000 000 Szt. (w €)	€ 429,67	€ 316,21	€ 436,20
Odpis amortyzacyjny na godzinę (w €)	€ 2,78	€ 2,90	€ 4,40
<b>Weryfikacja Wstępna</b>			
$\omega$	1,24		
$\omega$		1,25	
<b>Weryfikacja Wstępna uproszczona</b>			
$\Omega$	1,22		
$\Omega$		1,28	

Proces standardowy z 18-krotną formą wtryskową odznacza się najniższymi kosztami inwestycyjnymi, ale także najniższą wydajnością produkcji, co wpływa na wartość odpisu amortyzacyjnego. W porównaniu do niego, zastosowanie metody TwinShot zwiększy niezbędne nakłady inwestycyjne tylko o 14 %, a wydajność produkcji wzrośnie aż o 41 %, co przekłada się na znacznie niższe odpisy amortyzacyjne. Z kolei proces standardowy z 28-krotną formą wtryskową wymaga zastosowania większej wtryskarki, co w znacznym stopniu zwiększa koszty inwestycji. Różnice nie są proporcjonalne i pomimo znacznie większej wydajności produkcyjnej, niż w przypadku formy 18-krotnej, wartość odpisów amortyzacyjnych jest wyższa. Porównując metodę TwinShot do procesu standardowego można

stwierdzić, że pozwoli ona zaoszczędzić aż 28 % kosztów inwestycji, co będzie obciążone spadkiem wydajności produkcji tylko o 9 %.

Wszelkie rozważania prowadzą do wniosku, że stosowanie metody TwinShot jest ekonomicznie uzasadnione i opłacalne, ponieważ przynosi wymierne korzyści finansowe w zakresie poprawy wydajności i efektywności produkcji.

## **9.2. Możliwości zastosowań**

Proces produkcyjny techniką TwinShot znajdzie zastosowanie przede wszystkim podczas produkcji elementów z wykorzystaniem formy wielogniazdowej, a w szczególności w sytuacjach, w których wtryskarka nie dysponuje wystarczającą siłą zamykania, do obsługi takiej formy wtryskowej w procesie standardowym.

Przedmiotem doświadczenia były wypraski w postaci sztućców, jednak z podobnym powodzeniem technika ta może posłużyć do zwiększenia efektywności produkcji opakowań z sektora spożywczego, takich jak pojemniki na margarynę lub szeroko rozumiany nabiał, ale także naczyń, jak na przykład szklanki, kieliszki czy filiżanki. Innymi przykładami potencjalnego zastosowania metody TwinShot będą elementy elektrotechniczne, wtyczki, gniazda, obudowy, zabawki dla dzieci, artykuły kuchenne i gospodarcze (jak np. pojemniki, miski, wiadra), strzykawki, próbówki.

## **9.3. Możliwości komercjalizacyjne**

Innowacyjność oraz duży potencjał handlowy spowodował zainteresowanie producenta wtryskarek Wittmann-Battenfeld w dokładnym rozpoznaniu możliwości komercjalizacji technologii i oferowania jej na etapie zamawiania maszyny, jako wyposażenie opcjonalne. Będą prowadzone dalsze rozmowy w tym zakresie.

Równolegle są prowadzone czynności, mające na celu uzyskanie zgłoszenia patentowego w kategorii wynalazku. Po zakończeniu postępowania prawnego w tym zakresie, planowany jest powrót do rozmów handlowych z producentem wtryskarek, aby kontynuować prace komercjalizujące technologię procesu TwinShot w środowisku przemysłowym na skalę światową.

## **10. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ**

Cele zostały osiągnięte przez wykonanie wszystkich zaplanowanych badań oraz pozyskanie z nich próbek pomiarowych, które zostały poddane analizie i opisane w rozdziale 8.

### **10.1. Weryfikacja tezy pracy**

Teza pracy została potwierdzona przez osiągnięcie stabilnego i poprawnego procesu wtrysku z zastosowaniem opracowanej i opisanej w dysertacji metody TwinShot, czego przykładem jest m. in. proces badawczy metodą TwinShot z wykorzystaniem siły zamykania 1800 kN.

### **10.2. Wnioski**

Po przeprowadzeniu badań sformułowano następujące wnioski:

- Współczynnik weryfikacji wstępnej, zarówno w formie podstawowej, jak i uproszczonej, pomaga w podjęciu decyzji o celowości zastosowania metody TwinShot.
- Metoda TwinShot jest możliwa do zastosowania w różnych odmianach procesu wtrysku polimerów.
- Wiele nowoczesnych materiałów, mających na celu zmniejszenie śladu środowiskowego, charakteryzuje się niską odpornością na temperaturę oraz niską wytrzymałością mechaniczną.
- Czujniki Gefran QE1008W-SET posiadają duży okres próbkowania i nie pokazują tym samym krótkotrwałych zmian w wydłużeniu kolumn wtryskarki.
- Jest możliwe przeprowadzenie dwóch następujących po sobie procesów wtrysku w ramach jednego cyklu otwarcia i zamknięcia formy wtryskowej.

- Dzięki metodzie TwinShot jest możliwe wykorzystanie formy wtryskowej z liczbą gniazd formujących, która byłaby zbyt duża w przypadku wykorzystania tradycyjnego procesu wtrysku na tej samej maszynie.
- Metoda TwinShot pozwoliła na pracę z badawczą formą wtryskową przy użyciu siły zamykania mniejszej o 700 kN w porównaniu do standardowego procesu wtryskiwania. Stanowi to obniżenie siły zwarcia o ok. 30 %.
- Metoda TwinShot pozwala znacząco zwiększyć wydajność produkcji, zachowując przy tym znacznie mniejsze nakłady finansowe niż w przypadku uruchomienia większego gniazda produkcyjnego.
- Dzięki metodzie TwinShot jest możliwa do uzyskania wyższa prędkość wypełniania gniazd formujących, co może okazać się pomocne także w przypadkach, w których parametry układu plastyfikującego nie są wystarczające w przypadku procesu standardowego.
- Wykorzystując metodę TwinShot, liczba cykli otwierania i zamykania formy zmniejsza się od 30 % do 50 %, co w znaczący sposób wpłynie na wydłużenie żywotności układu zamykania maszyny, a w przypadku systemów kolanowych – także na żywotność panewek i sworzni.
- Z powodu zmniejszonej liczby cykli otwierania i zamykania formy zostanie zmniejszone zużycie środków smarnych, co stanowi dodatkową korzyść finansową.
- Wraz z obniżaniem siły zamykania zwiększa się chwilowy wzrost siły zamykania podczas fazy wtrysku i docisku, co świadczy o początkach otwierania formy wtryskowej na skutek panującego ciśnienia, w wyniku czego rośnie masa wyprasek.
- Metoda TwinShot pozwala znacząco zmniejszyć nakłady inwestycyjne, potrzebne do zbudowania wydajnej linii produkcyjnej.
- Dzięki wykorzystaniu metody TwinShot jest możliwe zmniejszenie niezbędnej powierzchni na hali produkcyjnej, ponieważ umożliwia ona wybór mniejszej wtryskarki.
- W trakcie drugiego w kolejności procesu wtrysku w ramach metody TwinShot jest niezbędna wyższa siła zamykania niż w przypadku pierwszego wtrysku,



ponieważ zastygający polimer w gniazdach nadal posiada pewne ciśnienie resztkowe (rezydualne).

- Metoda TwinShot wydłuża czas cyklu o wartość, która może być mniejsza niż dwukrotność czasu trwania etapów wtrysku i docisku w procesie standardowym.
- Stosowane na potrzeby metody TwinShot zamykane igłowo dysze wtryskowe zezwalają na dozowanie i uplastycznianie materiału w cylindrze wtryskowym także przy otwartej formie wtryskowej.
- Jednym z podstawowych ograniczeń stosowania metody TwinShot jest dostępność wolnej powierzchni stołów montażowych wtryskarki, która musi umożliwiać montaż większej formy wtryskowej.
- Spójny trend wzrostu mas wyprasek wraz ze zmniejszaniem siły zamykania świadczy o stabilności procesów badawczych, a także o dokładnościach wykonawczych formy wtryskowej i dobrym stanie mechanicznym wtryskarki.
- Odległość odbiornika USB względem czujników Sensormate może mieć wpływ na czas odpowiedzi czujników i tym samym powodować opóźnienia w transmisji danych (zawierających wartości pomiarowe).
- Niezależnie od ustawień czasu próbkowania w oprogramowaniu Inspectmate, czujniki zapisują wartości pomiarowe w cyklu 600 ms.
- Opracowany proces technologiczny TwinShot stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, cechuje się innowacyjnością konstrukcyjną oraz technologiczną.
- Wyniki badań naukowych znajdują zastosowanie w sferze gospodarczej poprzez możliwość wykorzystania procesu TwinShot w praktyce przemysłowej.

## LITERATURA

1. PLASTECH 2000: Technologie wtryskiwania. Jakość i efektywność. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 2000.
2. Tsai C.-C., Hsieh S.-M. i Kao H.-E.: Mechatronic design and injection speed control of an ultra high-speed plastic injection molding machine. Mechatronics. 19, 2009.
3. Brydson J.: Plastics Materials. Butterworth-Heinemann, Woburn, 1999.
4. Szabo F., Suplicz A. i Kovacs J. G.: Development of injection molding simulation algorithms that take into account segregation. Powder Technology. 389, 2021.
5. Siva R., Nemali S. S., Kunchapu S. K., Gokul K. i Kumar T. A.: Comparison of Mechanical Properties and Water Absorption Test on Injection Molding and Extrusion - Injection Molding Thermoplastic Hemp Fiber Composite. Materialstoday: Proceedings. 47, 2021.
6. Rabek J. F.: Współczesna wiedza o polimerach. Tom 1, Budowa strukturalna polimerów i metody badawcze. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2019.
7. Baur E., Osswald T. A. i Rudolph N.: Plastics Handbook : The Resource for Plastics Engineers 5th Edition. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2019.
8. Plastech '97: Tworzywa konstrukcyjne nowej generacji. Przetwórstwo i zastosowanie. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 1997.
9. Plastics Europe: Plastics - the facts 2022. Plastics Europe, Bruksela, 2022.
10. UNCTAD: Plastics Database. [Baza danych] Październik 2020.
11. Barrowclough D., Birkbeck C.D. i Christen J.: Global trade in plastics insights from the first life-cycle trade database. UNCTAD Research Paper No. 53 UNCTAD/SER.RP/2020/12. United Nations Conference on Trade and Development, Genewa, 2020.
12. Plastics Europe: Tworzywa – Fakty 2021. Plastics Europe, Bruksela, 2021.
13. Niessner N.: Recycling of Plastics. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2022.

14. Barrowclough D. i Birkbeck C.D.: Transforming the Global Plastics Economy: The Role of Economy Policies in the Global Governance of Plastic Pollution. *Social Sciences* 11(1). 2022.
15. Greco A., Maffezzoli A. i Forleo S.: Rotational molding of bio-polymers. *AIP Conference Proceedings*. 2014.
16. Chen W.-Y., Suzuki T. i Lackner M.: *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Cham : Springer International Publishing AG, 2017.
17. Gupta N., Ramkumar PL. i Sangani V.: An approach toward augmenting materials, additives, processability and parameterization in rotational molding: a review. *Materials and Manufacturing Processes*. 35, 2020.
18. Bahl S., Dolma J., Singh J. i Sehgal S.: Biodegradation of plastics: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*. 39, 2020.
19. Alpla: Cykl życia jednostkowego opakowania - Packaging Unit Life Cycle Assessment (LCA). Hard : Alpla, 2019.
20. Czerniawski B. i Czerniawski J.: *Opakowania z tworzyw sztucznych produkowane i stosowane w Polsce - Perspektywa historyczna*. Business Image, Warszawa, 2012.
21. Rauwendaal C.: *Understanding Extrusion*. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2019.
22. Wagner Jr. J. R., Mount III E. M. i Giles Jr. H. F.: *Extrusion. The Definitive Processing Guide and Handbook*. Norwich : William Andrew, 2013.
23. Rauwendaal C.: *Polymer Extrusion*. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2013.
24. *Plastech '99: Wytłaczanie tworzyw sztucznych*. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 1999.
25. Jachowicz T. i Klepka T.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Ćwiczenia laboratoryjne. Część 2*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2012.
26. Walsh E., Horst J. H. ter i Markl D.: Development of 3D printed rapid tooling for micro-injection moulding. *Chemical Engineering Science*. 235, 2021.
27. Surace R., Pagano C., Bellantone V., Gatti S., Castellani L., Vighi M., Stoclet G., Sechi S., Fassi I., Baldi F.: Injection vs micro-injection molding of nano-particle filled polyamide 6: Moldability and structuring. *Polymer*. 230, 2021.
28. Li D., Zhang Y., Liu Y., Regi F., Brix Doest M. E. i Tosello G.: Injection moulding of mechanical micro-manufactured structures for optically encoding plastic surfaces. *Optical Materials*. Volume 123, 2022.

- 
29. Khosravani M. R., Nasiri S. i Reinicke T.: Intelligent knowledge-based system to improve injection molding process. *Journal of Industrial Information Integration*. 25, 2022.
  30. Othman M. H., Hasan S. i Shaari M. F.: Development and structural analysis of injection moulding-hydraulics clamping unit testing system. *Applied Mechanics and Materials*. 315, 2013.
  31. Goodship V., Middleton B. i Cherrington R.: *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality*. William Andrew, Norwich, 2016.
  32. Agassant J.-F., Avenas P., Carreau P., Vergnes B. i Vincent M.: *Polymer Processing Principles and Modelling*. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2017.
  33. Vukovic M., Stemmler S., Hornberg K., Abel D. i Hopmann C.: Adaptive model-based predictive control for cross-phase cavity pressure control in injection molding. *Journal of Manufacturing Processes*. 77, 2022.
  34. Chen J.-Y., Zhuang J.-X. i Huang M.-S.: Monitoring, prediction and control of injection molding quality based on tie-bar elongation. *Journal of Manufacturing Processes*. 46, 2019.
  35. Huang M.-S., Nian S.-C., Chen J.-Y. i Lin C.-Y.: Influence of clamping force on tie-bar elongation, mold separation and part dimensions in injection molding. *Precision Engineering*. 51, 2018.
  36. Zhongbao C. i Lih-Sheng T.: Adaptive online quality control for injection-molding by monitoring and controlling mold separation. *Polymer Engineering and Science*. 46, 2006.
  37. Catoen B. i Rees H.: *Injection Mold Design Handbook*. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2021.
  38. Zawistowski H. i Frenkler D.: *Konstrukcja form wtryskowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.
  39. Beaumont J.P.: *Runner and Gating Design Handbook*. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2019.
  40. Frenkler D. i Zawistowski H.: *Gorące kanały w formach wtryskowych. Dobór i użytkowanie*. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 1998.
  41. *Plastech '94: Kierunki rozwoju technologii wtrysku*. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA, Warszawa, 1994.

- 
42. Madan J., Mani M., Lee J. H. i Lyons K. W.: Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: Injection Molding Case Study. *Journal of Cleaner Production*. 105, 2014.
  43. Bociąga E.: Kryteria wyboru metody wtryskiwania. *Polimery*. 55, 2010.
  44. Wang H.S. i Wang Y.N.: Cost estimation of plastic injection molding parts through integration of PSO and BP neural network. *Expert Systems with Applications*. 40, 2013.
  45. Konkol J.: Wprowadzenie do praktycznego planowania eksperymentu. [aut. książki] Polska StatSoft. StatSoft Polska, Kraków, 2008.
  46. Kerkstra R. i Brammer S.: *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide*. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2021.
  47. Burlet-Vienney D., Chinniah Y. i Pizarro-Chong A.: Design of an Intelligent Tool for the Observation and Follow-Up of Lockout Procedures during Maintenance Activities on Industrial Machines. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 4, 2014.
  48. Brandenburg H.: *Zarządzanie projektami*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
  49. Czechowski L., Dziworska K., Gostkowska-Drzewicka T., Górczyńska A. i Ostrowska E.: *Projekty Inwestycyjne: finansowanie, metody i procedury oceny*. ODDK, Gdańsk, 1997.
  50. Flak W., Henzel H., Krotla W., Marcinek K., Stosur E. i Walica H.: *Vademecum inwestora: przygotowanie i wykonawstwo inwestycji rzeczowych*. Górnicza Izba Przemysłowo-Handlowa, Katowice, 1996.
  51. Karbownik A.: *Zarządzanie Projektami Inwestycyjnymi*. Politechnika Śląska, Zabrze, 2005.
  52. Sobczyk M.: *Matematyka Finansowa: podstawy teoretyczne, przykłady, zadania*. Placet, Warszawa, 2011.
  53. Bociąga E.: *Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
  54. Yavari R. i Khorsand H.: Numerical and experimental study of injection step, separation, and imbalance filling in low pressure injection molding of ceramic components. *Journal of the European Ceramic Society*. 41, 2021.

- 
55. Antusch S., Commin L., Mueller M., Piotter V. i Weingaertner T.: Two component tungsten powder injection molding – An effective mass production process. *Journal of Nuclear Materials*. 447, 2014.
  56. Speranza V., Liparoti S., Pantani R. i Titomanlio G.: Prediction of morphology development within micro-injection molding samples. *Polymer*. 228, 2021.
  57. Su H.Y., Nian S.C. i Huang M.S.: Reducing ghost marks in injection-molded plastic parts by using external gas-assisted holding pressure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 66, 2015.
  58. Plastech '98: Formowanie wyrobów z tworzyw sztucznych metodą rozdmuchiwania. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 1998.
  59. Moritzer E. i Neumann M.: Process monitoring and optimisation in injection moulding with the aid of new measuring sensors. SPE ANTEC, Nowy Jork, 1999.
  60. Zhao Y., Zhao P., Zhang J., Huang J., Xia N. i Fu J.: On-line measurement of clamping force for injection molding machine using ultrasonic technology. *Ultrasonics*. 91, 2019.
  61. Zhang J., Zhao P., Zhao Y., Huang J., Neng X. i Fu J.: On-line measurement of cavity pressure during injection molding via ultrasonic investigation of tie bar. *Sensors and Actuators*. 285, 2019.
  62. Zhao P., Zhang J., Zhao Y., Huang J., Xia N. i Fu J.: Cavity pressure measurement during injection molding via ultrasonic technology. SPE ANTEC, Detroit, 2019.
  63. Gefran / Sensormate AG: QE1008-W-SET Operating Manual. Gefran spa, Aadorf, 2021.
  64. Gefran / Sensormate AG: QE1008-W-SET Product datasheet. Gefran spa, Aadorf, 2021.
  65. Sensormate AG: Inspectmate v4.0.3 Betriebsanleitung. Sensormate AG, Aadorf, 2016.
  66. Schiller G. F.: A Practical Approach to Scientific Molding. Carl Hanser Verlag, Monachium, 2018.
  67. Chen J.-Y., Liu C.-Y. i Huang M.-S.: Tie-bar elongation based filling-to-packing switchover control and prediction of injection molding quality. *Polymers*. 11(7), 2019.

- 
68. Chen J.-Y., Huang M.-S., Nian S.-C. i Tseng C.-C.: Quality index design for online monitoring injection molding process. SPE ANTEC, Detroit, 2019.
  69. Liou G.-Y., Su W.-J., Cheng F.-J., Chang C.-H., Tseng R.-H., Hwang S.-J., Peng H.-S., Chu H.-Y.: Optimize injection-molding process parameters and build an adaptive process control system based on nozzle pressure profile and clamping force. *Polymers*. 15(3), 2023.
  70. Chen J.-Y., Tseng C.-C. i Huang M.-S.: Quality index design for online monitoring polymer injection molding. *Advances in Polymer Technology: Intelligent Technologies for Polymer Injection Molding*. 1, 2019.
  71. Jańczewski D., Różycki C. i Synoradzki L.: Projektowanie procesów technologicznych: matematyczne metody planowania eksperymentów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2020.
  72. Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu: planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2022.
  73. Neter J., Wasserman W. i Whitemore G.A.: *Applied Statistics*. Allyn & Bacon, Boston, 2000.
  74. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej: DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2019/904 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie zmniejszenia wpływu niektórych produktów z tworzyw sztucznych na środowisko. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, Bruksela, 2019.
  75. *Plastech '96: Szybkie wdrażanie i produkcja małoseryjna wyprasek (Rapid Prototyping)*. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 1996.
  76. Komisja Unii Europejskiej: ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) 2020/1245 z dnia 2 września 2020 r. w sprawie zmiany i sprostowania rozporządzenia (UE) nr 10/2011 w sprawie materiałów i wyrobów z tworzyw sztucznych przeznaczonych do kontaktu z żywnością. *Dziennik urzędowy Unii Europejskiej*, Bruksela, 2020.
  77. Stora Enso Timber AB: *DuraSense® Pure Fact Sheet*. Stora Enso Timber AB, Hyltebruk, 2019.
  78. Wittmann Battenfeld GmbH: *Guide 2017/2018*. Wittmann Battenfeld GmbH, Köttingbrunn, 2017.

- 
79. Wittmann Battenfeld GmbH: EcoPower 55-300 t. Wittmann Battenfeld GmbH, Kottingbrunn, 2014.
  80. Wittmann Battenfeld GmbH: Dokumentacja Techniczno Ruchowa EcoPower 240/750. Wittmann Battenfeld GmbH, Kottingbrunn, 2013.
  81. Gao R. X., Tang X., Gordon G. i Kazmer D. O.: Online product quality monitoring through in-process measurement. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*. 63, 2014.
  82. Zawistowski H. i Zięba S.: Ustawianie procesu wtrysku. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA, Warszawa, 1995.
  83. Volke J., Reit M. i Heim H.-P.: Parameter recommendation for injection molding based on similarity analysis of injection molded parts. *Journal of Manufacturing Processes*. 95, 2023.
  84. KERN & Sohn GmbH: Instrukcja obsługi Taschenwaage CM 60-2N. KERN & Sohn GmbH, Balingen, 2018.
  85. Chen J.-Y., Liu C.-Y. i Huang M.-S.: Enhancement of injection molding consistency by adjusting velocity/pressure switching time based on clamping force. *Polymer Processing*. 5, 2019.
  86. Su W.-J., Peng H.-S., Hwang S.-J., Pan P.-S. i Ong J.-B.: The effect of clamping force on product quality: a study on platen deformation. *SPE ANTEC, The virtual edition*, 2020.
  87. Huang M.-S. i Lin C.-Y.: A novel clamping force searching method based on sensing tie-bar elongation for injection molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 109, 2017.
  88. Chen J.-Y., Yang K.-J. i Huang M.-S.: Optimization of clamping force for low-viscosity polymer injection molding. *Polymer Testing*. 90, 2020.
  89. Johannaber F.: Wtryskarki Poradnik Użytkownika. PLASTECH Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa, 2000.



## **STRESZCZENIE**

W pracy podjęto próbę zwiększenia wydajności produkcji wyprasek zmodyfikowaną metodą przetwórstwa polimerów, za pomocą wtrysku wysokociśnieniowego.

Praca zawiera wprowadzenie do tematyki, przegląd literatury oraz analizę obecnych procesów technologicznych przetwórstwa polimerów. Został zdefiniowany cel i zakres pracy oraz postawiono tezę pracy. W pracy opisano stosowanie innowacyjnej modyfikacji standardowego procesu wtrysku polimeru, która pozwala w większym stopniu zwiększyć wydajność produkcji, niż niezbędne w tym celu nakłady inwestycyjne.

W ramach przygotowań do badań opracowano algorytm decyzyjny stosowania autorskiego procesu technologicznego, który sugeruje, czy użycie tej metody jest celowe i opłacalne. Następnie przeanalizowano różne odmiany procesów wtrysku pod kątem możliwości implementacji nowoczesnej metody wtrysku.

W celu przeprowadzenia badań dokonano określenia badanych wartości i opisano układ pomiarowy, zdefiniowano kryteria oceny eksperymentu oraz wykonano jego plan. Wybrano detal badawczy w postaci sztućców wielokrotnego użytku, skonstruowano oraz wykonano prototypową formę wtryskową, a następnie po wyborze polimeru, który posłużył do docelowych badań, zaprojektowano oraz zbudowano docelową, badawczą formę wtryskową. Do jej obsługi było również niezbędne dokonanie syntezy sterownika zamykanych dysz gorącokanałowych.

W rezultacie przeprowadzonych badań potwierdzono słuszność tezy poprzez osiągnięcie stabilnego i poprawnego procesu wtrysku z wykorzystaniem opisanej metody TwinShot. Udowodniono, że jest możliwe przeprowadzenie dwóch następujących po sobie procesów wtrysku w ramach jednego cyklu otwarcia i zamknięcia formy wtryskowej, co prowadzi do wielu korzyści: produkcyjnych, procesowych, technicznych, technologicznych, ekonomicznych oraz organizacyjnych.

Opracowana w dysertacji technologia TwinShot zawiera istotne cechy innowacyjności konstrukcyjnej oraz technologicznej, posiada duży potencjał komercjalizacji i zastosowania w praktyce przemysłowej.

## **ABSTRACT**

The dissertation attempts to increase the efficiency of production process with a modified polymer processing method using high-pressure injection moulding.

The thesis includes an introduction to the topic, a literature review and an analysis of current polymer processing processes. The aim and scope of the work are defined and the thesis is set. The work describes the use of an innovative modification of a standard polymer injection moulding process, which makes it possible to increase production efficiency to a greater extent than the investment required for this purpose.

In preparation for the study, a decision algorithm for the use of the proprietary process was developed, which suggests whether it is valid and cost-effective to use this method. Subsequently, different variations of injection moulding processes were also analysed with regard to the feasibility of implementing a modern injection moulding method.

In order to carry out the research, the test values were defined and the measurement system was described, the criteria for evaluating the experiment were defined and the experimental plan was made. A test piece in the form of reusable cutlery was selected, a prototype injection mould was constructed and built, and then, following the selection of the polymer used for the target tests, a target research injection mould was designed and built. To operate it, it was also necessary to devise and build a controller for the valve gate hot runner nozzles.

As a result of the research, the thesis was confirmed by achieving a stable and correct injection moulding process using the described TwinShot method. It was proven that it is possible to carry out two consecutive injection processes within one cycle of opening and closing the injection mould, what leads to several advantages: production, process, technical, technological, economic and organisational.

The TwinShot technology developed in the dissertation contains important features of structural and technological innovation and has great potential for commercialisation and application in industrial practice.

## **ZAŁĄCZNIK**

W załączniku zawarto następujące tablice:

- Tablica Z.1. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu standardowego, 14 gniazd, siła zamykania 2400 kN
- Tablica Z.2. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces standardowy, 14 gniazd, siła zamykania 2400 kN
- Tablica Z.3. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu standardowego, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN
- Tablica Z.4. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces standardowy, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN
- Tablica Z.5. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN
- Tablica Z.6. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN
- Tablica Z.7. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2300 kN
- Tablica Z.8. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2300 kN
- Tablica Z.9. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2200 kN
- Tablica Z.10. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2200 kN
- Tablica Z.11. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2100 kN
- Tablica Z.12. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2100 kN
- Tablica Z.13. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2000 kN
- Tablica Z.14. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 2000 kN
- Tablica Z.15. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1900 kN
- Tablica Z.16. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1900 kN
- Tablica Z.17. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1800 kN
- Tablica Z.18. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1800 kN
- Tablica Z.19. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1700 kN
- Tablica Z.20. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot, 28 gniazd, siła zamykania 1700 kN

Tablica Z.1. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu standardowego,  
14 gniazd, siła zamykania 2400 kN

Czas pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Ø	
600	-6	-7	-2	-8	-7	5	-5	-6	-8	0	-4	-9	-11	0	-5	0	0	0	-8	-6	5	0	0	0	0	0	-3
1200	2415	1746	1439	2416	1752	2419	1373	2417	2416	2418	2269	2119	2417	2126	2117	2417	2011	2420	2118	2422	2368	2319	2421	2221	2221	2320	2196
1800	2415	1746	1439	2416	1752	2419	1373	2417	2416	2418	2269	2119	2417	2126	2117	2417	2011	2420	2118	2422	2368	2319	2421	2221	2221	2320	2196
2400	2417	2417	2417	2416	2380	2419	2321	2417	2416	2416	2416	2417	2413	2415	2414	2415	2399	2420	2417	2422	2418	2367	2421	2318	2420	2382	2410
3000	2417	2417	2417	2416	2380	2419	2321	2417	2416	2416	2416	2417	2413	2415	2414	2415	2398	2417	2417	2420	2417	2414	2421	2415	2419	2410	2410
3600	2417	2417	2417	2416	2380	2419	2321	2417	2416	2414	2416	2417	2413	2415	2414	2415	2398	2417	2417	2420	2417	2414	2421	2415	2419	2410	2410
4200	2414	2413	2415	2416	2415	2414	2321	2418	2417	2413	2414	2415	2413	2416	2414	2415	2414	2417	2417	2420	2417	2413	2417	2414	2418	2412	2412
4800	2414	2413	2415	2416	2415	2414	2321	2418	2417	2413	2414	2415	2413	2416	2414	2415	2414	2417	2417	2420	2417	2413	2417	2414	2418	2412	2412
5400	2413	2414	2415	2416	2413	2414	2417	2418	2417	2413	2413	2413	2412	2415	2413	2415	2413	2417	2413	2420	2416	2413	2415	2413	2416	2415	2415
6000	2413	2414	2416	2415	2413	2414	2417	2418	2417	2413	2413	2413	2412	2415	2413	2414	2414	2417	2413	2420	2414	2413	2415	2413	2416	2414	2414
6600	2413	2414	2416	2415	2413	2414	2417	2418	2417	2413	2413	2413	2412	2415	2413	2414	2414	2417	2413	2420	2414	2413	2415	2413	2416	2414	2414
7200	2413	2413	2413	2415	2413	2412	2412	2412	2412	2413	2411	2412	2413	2411	2413	2412	2413	2412	2415	2413	2420	2414	2411	2415	2412	2415	2413
7800	2413	2413	2413	2413	2413	2412	2412	2412	2412	2413	2411	2412	2413	2411	2413	2412	2413	2412	2415	2413	2420	2414	2411	2415	2412	2415	2413
8400	2413	2413	2413	2413	2412	2412	2412	2412	2412	2413	2412	2412	2412	2413	2412	2413	2412	2415	2413	2420	2414	2411	2415	2412	2415	2413	2413
9000	2413	2413	2412	2413	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2413	2412	2413	2412	2415	2413	2420	2414	2411	2415	2412	2415	2413	2413
9600	2413	2413	2412	2413	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2413	2412	2413	2412	2415	2413	2420	2414	2411	2415	2412	2415	2413	2413
10200	2412	2413	2412	2413	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2413	2412	2413	2412	2415	2413	2420	2414	2411	2415	2412	2415	2413	2412
10800	2412	2413	2412	2413	2412	2412	2412	2412	2412	2411	2411	2412	2412	2412	2412	2411	2411	2411	2413	2414	2412	2412	2413	2412	2413	2412	2412
11400	2411	2413	2412	2412	2411	2410	2410	2410	2411	2411	2411	2411	2412	2412	2412	2411	2411	2411	2413	2414	2412	2412	2413	2412	2413	2412	2412
12000	2411	2412	2412	2411	-11	2410	2410	2356	2383	2411	2411	2411	2412	2412	1205	0	1863	2412	2412	2413	2412	2411	2413	2411	2413	2245	
12600	2411	-6	1486	102	-11	223	2410	2356	0	0	1316	2411	2412	2412	0	-7	2412	2412	2413	2397	-1	2413	1	2413	1876	1032	
13200	-10	-6	-9	-8	-5	-5	-9	-17	0	0	-3	-8	-2	-8	-3	-5	-5	-1	-9	3	0	0	-2	2	-5	-7	
13800	-10	-6	-9	-8	-5	-5	-9	-17	0	0	-3	-8	-2	-8	-3	-5	-5	-1	-9	3	0	0	-2	2	-5	-7	
F <sub>CP,PK</sub>	2417	2417	2417	2416	2415	2419	2417	2418	2417	2418	2418	2417	2417	2416	2414	2417	2414	2420	2417	2422	2418	2414	2421	2415	2420	2415	2415
F <sub>C,MIN</sub>	2411	2412	2412	2411	2411	2410	2410	2410	2411	2411	2411	2411	2411	2412	2411	2411	2411	2412	2412	2412	2412	2412	2411	2413	2410	2410	2410
ΔF <sub>C</sub>	6	5	5	5	4	9	7	8	6	7	7	6	6	4	3	6	3	8	5	9	6	3	8	4	7	4	
Dep. ΔF <sub>C</sub>	48,22	48,24	48,24	48,22	48,22	48,2	48,2	48,2	48,22	48,22	48,22	48,22	48,22	48,24	48,22	48,22	48,22	48,24	48,24	48,26	48,24	48,22	48,26	48,22	48,26	48,21	

Tablica Z.2. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces standardowy,  
14 gniazd, siła zamykania 2400 kN

Proces:		Standardowy											
Siła zamykania [kN]:		2400											
Liczba gniazd [n]:		14											
Detal:		Widelec					Nóż						
Gniazdo:		1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
Próbka:		1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1			4,08	4,08		4,08			3,51	3,54		3,56	
2			4,08	4,08		4,08			3,52	3,54		3,55	
3			4,07	4,07		4,08			3,51	3,54		3,55	
4			4,08	4,08		4,08			3,53	3,55		3,55	
5			4,09	4,08		4,08			3,51	3,55		3,56	
6			4,08	4,08		4,08			3,51	3,54		3,55	
7			4,08	4,07		4,09			3,51	3,55		3,56	
8			4,08	4,08		4,09			3,53	3,55		3,55	
9			4,09	4,08		4,08			3,52	3,54		3,55	
10			4,08	4,08		4,08			3,51	3,55		3,55	
11			4,08	4,08		4,08			3,52	3,54		3,55	
12			4,08	4,08		4,08			3,51	3,55		3,55	
13			4,08	4,07		4,08			3,51	3,54		3,55	
14			4,09	4,08		4,08			3,51	3,54		3,56	
15			4,08	4,08		4,08			3,53	3,54		3,55	
16			4,08	4,07		4,08			3,52	3,54		3,55	
17			4,08	4,08		4,08			3,52	3,55		3,56	
18			4,08	4,08		4,08			3,51	3,54		3,55	
19			4,09	4,08		4,08			3,52	3,54		3,55	
20			4,08	4,08		4,08			3,51	3,54		3,56	
21			4,08	4,08		4,08			3,52	3,53		3,55	
22			4,08	4,07		4,09			3,51	3,55		3,55	
23			4,09	4,08		4,08			3,51	3,55		3,56	
24			4,08	4,08		4,08			3,51	3,54		3,56	
25			4,08	4,08		4,08			3,51	3,55		3,56	
$\sigma$		-	0,005	0,004	-	0,003	-	-	0,007	0,006	-	0,005	-
$\bar{\varnothing}$		-	4,08	4,08	-	4,08	-	-	3,52	3,55	-	3,55	-
CV:		-	0,12%	0,10%	-	0,08%	-	-	0,20%	0,16%	-	0,14%	-
Total $\bar{\varnothing}$ :			4,080						3,54				

Tablica Z.3. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu standardowego, 28 gniazd, siła zamykania 2400 kN

Ciepłota pomiaru	Calkowita siła zamykania [kN]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
600	0	0	0	11	1	2	2	0	0	0	0	3	0	0	1	7	11	11	13	1	1	5	8	3	0	9	3			
1200	2420	2420	2415	2418	2419	2414	2418	2415	2418	2420	2414	2414	2414	2419	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2416	2414	2415	2414	2414	2414	2414	2416	2414	2416
1800	2420	2420	2414	2418	2414	2414	2418	2415	2418	2420	2414	2414	2414	2419	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2416	2414	2415	2414	2414	2414	2414	2416	2414	2416
2400	2414	2414	2414	2414	2414	2415	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414
3000	2414	2414	2416	2414	2418	2429	2414	2415	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414
3600	2414	2414	2416	2414	2418	2429	2414	2415	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414	2414
4200	2429	2414	2426	2431	2421	2417	2414	2424	2414	2436	2413	2415	2431	2420	2423	2425	2418	2417	2413	2426	2414	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424
4800	2429	2440	2426	2431	2421	2417	2432	2424	2433	2436	2428	2415	2415	2420	2414	2425	2418	2417	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
5400	2417	2440	2415	2414	2415	2412	2432	2415	2433	2414	2428	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
6000	2412	2415	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
6600	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
7200	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
7800	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
8400	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
9000	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
9600	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
10200	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2414	2415	2415	2414	2414	2412	2413	2415	2414	2415	2419	2412	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2422	2422	2425	2424	
10800	74	-7	278	657	288	5	2412	633	2412	2398	2411	5	2412	2412	0	2411	2411	2411	2412	265	742	2409	1818	-4	6	721	1336	2400		
11400	74	-7	278	657	288	5	1692	633	1886	2398	2411	5	0	216	0	277	314	0	2412	265	3	2409	1818	-4	6	721	1336	2400		
12000	-1	-5	0	254	0		1692	-2	4	0	94	0	0	216	0	277	314	0	2412	265	3	2409	1818	-4	6	721	1336	2400		
12600	-1	-5	0	254	0		6	-2	4	0	94	0	0	0	0	277	314	0	6	5	3	-6	0	0	0	0	119	17	1	
13200	0		5				0	0	0	0	-1								3	5		0	0	0	0	0	1	0	0	
13800																														
F <sub>FEAK</sub>	2429	2440	2426	2431	2421	2429	2432	2424	2433	2436	2428	2427	2431	2420	2423	2425	2419	2417	2429	2426	2414	2419	2434	2427	2425	2425	2424	2424	2424	
F <sub>C,MIN</sub>	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2412	2398	2411	2412	2412	2411	2411	2411	2411	2411	2412	2411	2411	2411	2409	2409	2408	2408	2400	2400	2400	
ΔF <sub>c</sub>	17	28	14	19	9	17	20	12	21	38	17	15	19	9	12	14	8	6	17	15	3	10	25	19	17	24	24	24		
Dop. ΔF <sub>c</sub>	48,24	48,24	48,24	48,24	48,24	48,24	48,24	48,24	48,24	47,96	48,22	48,24	48,24	48,22	48,22	48,22	48,22	48,22	48,24	48,22	48,22	48,18	48,18	48,16	48,16	48,01	48,01	48,01	48,01	

Tablica Z.4. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces standardowy,  
28 gniazd, siła zamykania 2400 kN

Proces:	Standardowy											
Siła zamykania [kN]:	2400											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Próbka: \ Gniazdo:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,08	4,13	4,13	4,18	4,17	4,12	3,57	3,54	3,60	3,59	3,58	3,60
2	4,09	4,12	4,13	4,18	4,17	4,12	3,56	3,53	3,60	3,59	3,57	3,60
3	4,08	4,13	4,12	4,16	4,17	4,12	3,56	3,55	3,60	3,59	3,56	3,60
4	4,09	4,12	4,13	4,16	4,19	4,12	3,56	3,55	3,60	3,60	3,59	3,60
5	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,12	3,55	3,54	3,60	3,58	3,58	3,60
6	4,09	4,13	4,13	4,15	4,18	4,11	3,57	3,55	3,59	3,60	3,57	3,59
7	4,09	4,12	4,13	4,16	4,19	4,11	3,57	3,55	3,60	3,60	3,58	3,60
8	4,08	4,12	4,13	4,16	4,18	4,12	3,56	3,55	3,60	3,60	3,57	3,60
9	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,12	3,56	3,54	3,60	3,60	3,57	3,60
10	4,09	4,13	4,12	4,16	4,18	4,11	3,56	3,55	3,60	3,60	3,58	3,60
11	4,10	4,13	4,13	4,16	4,17	4,11	3,56	3,54	3,60	3,59	3,57	3,60
12	4,09	4,12	4,13	4,17	4,16	4,12	3,57	3,55	3,60	3,60	3,58	3,60
13	4,10	4,12	4,13	4,16	4,17	4,12	3,56	3,54	3,59	3,59	3,58	3,60
14	4,09	4,13	4,13	4,16	4,18	4,12	3,56	3,54	3,60	3,59	3,57	3,60
15	4,09	4,13	4,12	4,16	4,17	4,12	3,56	3,54	3,60	3,59	3,58	3,60
16	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,11	3,56	3,54	3,61	3,60	3,57	3,60
17	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,11	3,56	3,55	3,60	3,60	3,57	3,60
18	4,09	4,12	4,12	4,16	4,18	4,12	3,56	3,55	3,60	3,60	3,57	3,59
19	4,09	4,13	4,13	4,16	4,17	4,12	3,57	3,54	3,60	3,59	3,57	3,60
20	4,10	4,12	4,14	4,16	4,20	4,12	3,57	3,54	3,60	3,59	3,57	3,59
21	4,10	4,13	4,13	4,15	4,17	4,11	3,57	3,54	3,60	3,59	3,58	3,60
22	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,12	3,56	3,54	3,60	3,59	3,57	3,60
23	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,11	3,57	3,55	3,60	3,59	3,58	3,60
24	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,11	3,56	3,54	3,60	3,59	3,57	3,60
25	4,09	4,13	4,12	4,16	4,18	4,11	3,57	3,54	3,60	3,60	3,57	3,60
$\sigma$	0,005	0,005	0,005	0,007	0,008	0,005	0,006	0,006	0,003	0,006	0,006	0,003
$\varnothing$ :	4,09	4,12	4,13	4,16	4,18	4,11	3,57	3,55	3,60	3,60	3,58	3,60
CV:	0,13%	0,12%	0,11%	0,16%	0,20%	0,12%	0,15%	0,16%	0,10%	0,16%	0,18%	0,09%
Total $\varnothing$ :	4,132						3,581					

Tablica Z.5. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2400 kN

Czas pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																												Ø
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
600	0	0	-3	-4	0	1	-8	-9	-14	0	-15	-16	-19	-14	24	16	18	18	18	13	9	15	14	7	1	1			
1200	2366	2356	2367	2364	2372	2359	2358	2359	2354	2353	2354	2349	2349	2342	2387	2372	2374	2373	2383	2375	2386	2379	2366	2375	2365				
1800	2366	2356	2367	2364	2372	2359	2358	2359	2354	2353	2354	2349	2349	2342	2387	2372	2374	2373	2383	2375	2386	2379	2366	2375	2365				
2400	2364	2366	2364	2359	2365	2359	2358	2354	2354	2348	2350	2349	2349	2344	2384	2381	2384	2375	2379	2373	2380	2373	2370	2370	2364				
3000	2366	2364	2360	2359	2361	2359	2354	2354	2354	2348	2348	2347	2344	2344	2381	2379	2381	2375	2379	2377	2373	2375	2373	2371	2370				
3600	2366	2364	2360	2364	2361	2358	2358	2354	2354	2352	2348	2347	2344	2344	2383	2379	2383	2379	2377	2373	2375	2379	2371	2367	2363				
4200	2371	2364	2360	2364	2361	2358	2358	2354	2354	2352	2348	2347	2344	2344	2383	2379	2383	2379	2377	2373	2375	2379	2371	2367	2364				
4800	2371	2364	2363	2364	2361	2358	2358	2354	2354	2352	2348	2347	2344	2344	2383	2379	2383	2379	2377	2373	2375	2379	2371	2367	2364				
5400	2366	2364	2360	2364	2361	2358	2358	2354	2354	2352	2348	2347	2344	2344	2383	2379	2383	2379	2377	2373	2375	2379	2371	2367	2364				
6000	2366	2369	2356	2361	2364	2363	2355	2358	2354	2352	2348	2347	2344	2344	2383	2379	2383	2379	2377	2373	2375	2379	2371	2367	2364				
6600	2361	2361	2356	2358	2359	2358	2355	2350	2348	2345	2347	2345	2344	2344	2385	2384	2385	2387	2379	2375	2369	2372	2371	2371	2365				
7200	2361	2361	2356	2358	2359	2358	2355	2350	2348	2345	2347	2345	2344	2344	2385	2384	2385	2387	2379	2375	2369	2372	2371	2371	2365				
7800	2361	2359	2356	2355	2358	2355	2351	2350	2348	2345	2347	2345	2344	2344	2385	2384	2385	2387	2379	2375	2369	2372	2371	2371	2365				
8400	2361	2359	2356	2355	2358	2355	2351	2350	2348	2345	2347	2345	2344	2344	2385	2384	2385	2387	2379	2375	2369	2372	2371	2371	2365				
9000	2361	2359	2356	2355	2358	2355	2351	2350	2348	2345	2347	2345	2344	2344	2385	2384	2385	2387	2379	2375	2369	2372	2371	2371	2365				
9600	2359	2356	2356	2355	2357	2352	2350	2348	2345	2344	2343	2341	2340	2339	2375	2374	2375	2375	2375	2372	2370	2371	2369	2366	2364				
10200	2359	2356	2356	2355	2357	2352	2350	2348	2345	2344	2343	2341	2340	2339	2375	2374	2375	2375	2375	2372	2370	2371	2369	2366	2364				
10800	2356	2356	2356	2355	2357	2352	2350	2348	2345	2344	2343	2341	2340	2339	2375	2374	2375	2375	2375	2372	2370	2371	2369	2366	2364				
11400	2356	2356	2356	2355	2357	2352	2350	2348	2345	2344	2343	2341	2340	2339	2375	2374	2375	2375	2375	2372	2370	2371	2369	2366	2364				
12000	2356	2356	2356	2355	2357	2352	2350	2348	2345	2344	2343	2341	2340	2339	2375	2374	2375	2375	2375	2372	2370	2371	2369	2366	2364				
12600	-5	1312	1656	-15	1188	2351	1982	2348	2344	2343	2343	2340	2340	2338	2373	2372	2374	2373	2371	2369	2360	780	267	2359	2192				
13200	-1	1	1	-13	-7	118	-17	1721	-22	-15	1503	218	-19	-28	-25	6	2372	1934	2173	1974	2369	6	12	267	-3				
13800	1	1	1	-4	-4	-9	-9	-14	-14	-15	-13	-19	-19	-19	16	19	16	4	4	10	2369	8	7	5	1				
13800	1	1	1	-4	-4	-9	-9	-14	-14	-15	-13	-19	-19	-19	16	19	16	4	4	10	2369	8	7	5	1				
F <sub>C</sub> PEAK	2371	2369	2367	2364	2372	2363	2360	2359	2354	2353	2353	2354	2349	2349	2387	2384	2385	2387	2384	2379	2386	2379	2371	2375	2365				
F <sub>C</sub> MIN	2356	2356	2356	2354	2354	2351	2348	2348	2344	2343	2343	2340	2340	2338	2373	2372	2374	2373	2371	2369	2360	2368	2366	2359	2357				
ΔF <sub>C</sub>	15	13	11	10	18	12	12	11	10	10	10	14	9	9	14	14	12	11	14	13	10	26	11	5	16				
Dop. ΔF <sub>C</sub>	47,12	47,12	47,12	47,08	47,08	47,02	46,96	46,96	46,88	46,86	46,86	46,8	46,8	46,8	46,76	47,46	47,44	47,48	47,46	47,42	47,38	47,2	47,36	47,32	47,14				



Tablica Z.6. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2400 kN

Proces:	Twinshot											
Siła zamykania [kN]:	2400											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Próbka: \ Gniazdo:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,06	4,11	4,10	4,08	4,15	4,05	3,53	3,51	3,58	3,57	3,54	3,56
2	4,07	4,10	4,09	4,08	4,15	4,06	3,53	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
3	4,06	4,10	4,09	4,07	4,15	4,07	3,53	3,51	3,57	3,56	3,54	3,56
4	4,07	4,10	4,09	4,08	4,15	4,07	3,52	3,51	3,58	3,57	3,54	3,53
5	4,06	4,10	4,11	4,08	4,16	4,07	3,53	3,51	3,58	3,57	3,55	3,56
6	4,06	4,11	4,11	4,08	4,14	4,05	3,53	3,51	3,57	3,57	3,54	3,56
7	4,06	4,10	4,11	4,08	4,15	4,06	3,53	3,51	3,57	3,57	3,54	3,56
8	4,03	4,11	4,09	4,08	4,15	4,04	3,53	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
9	4,05	4,11	4,11	4,09	4,16	4,04	3,54	3,51	3,58	3,56	3,54	3,56
10	4,04	4,10	4,09	4,08	4,15	4,04	3,53	3,51	3,57	3,56	3,54	3,56
11	4,04	4,10	4,11	4,08	4,15	4,04	3,53	3,51	3,56	3,57	3,55	3,56
12	4,04	4,10	4,09	4,06	4,15	4,02	3,54	3,52	3,57	3,56	3,55	3,55
13	4,04	4,09	4,09	4,06	4,13	4,05	3,53	3,52	3,57	3,57	3,56	3,55
14	4,04	4,09	4,10	4,06	4,15	4,04	3,53	3,52	3,57	3,56	3,54	3,56
15	4,04	4,09	4,08	4,08	4,15	4,04	3,53	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
16	4,04	4,10	4,08	4,08	4,15	4,05	3,52	3,52	3,57	3,55	3,55	3,53
17	4,03	4,10	4,08	4,09	4,14	4,05	3,54	3,51	3,57	3,56	3,54	3,56
18	4,04	4,08	4,08	4,08	4,14	4,04	3,53	3,52	3,57	3,56	3,55	3,56
19	4,03	4,08	4,09	4,08	4,15	4,05	3,53	3,52	3,57	3,57	3,55	3,56
20	4,03	4,09	4,09	4,08	4,15	4,04	3,53	3,52	3,58	3,56	3,55	3,54
21	4,04	4,09	4,08	4,06	4,16	4,04	3,53	3,51	3,58	3,56	3,55	3,56
22	4,04	4,07	4,10	4,06	4,14	4,04	3,54	3,52	3,57	3,57	3,56	3,56
23	4,05	4,09	4,10	4,09	4,15	4,04	3,53	3,51	3,57	3,57	3,54	3,56
24	4,05	4,10	4,09	4,09	4,15	4,04	3,53	3,52	3,57	3,57	3,54	3,56
25	4,04	4,09	4,09	4,07	4,15	4,05	3,53	3,52	3,57	3,56	3,54	3,56
$\sigma$	0,012	0,010	0,010	0,010	0,007	0,011	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,009
$\bar{\varnothing}$ :	4,046	4,096	4,094	4,077	4,149	4,047	3,531	3,514	3,572	3,565	3,546	3,556
CV:	0,30%	0,24%	0,25%	0,24%	0,16%	0,28%	0,14%	0,14%	0,14%	0,16%	0,18%	0,25%
Total $\bar{\varnothing}$ :	4,085						3,547					

Tablica Z.7. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2300 kN

Cena pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																												Ø	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
0	6	13	-2	9	-3	-6	3	-5	-1	-7	-6	-8	-11	-11	-12	-16	-26	-13	-18	-1	-9	-2	-2	-6	-13	-12	-7			
1200	2283	2286	2285	2280	2278	2278	2278	2275	2275	2277	2275	2273	2273	2273	2274	2274	2273	2267	2269	2267	2266	2261	2275	2273	2273	2267	2272			
1800	2283	2283	2286	2285	2280	2278	2278	2278	2275	2277	2275	2273	2273	2273	2274	2268	2267	2267	2269	2267	2266	2261	2275	2273	2273	2267	2272			
2400	2283	2277	2280	2277	2278	2278	2275	2273	2275	2271	2271	2271	2271	2271	2269	2267	2267	2267	2267	2266	2266	2275	2274	2274	2272	2267	2272			
3000	2283	2277	2280	2277	2277	2274	2273	2273	2272	2271	2271	2271	2271	2269	2267	2267	2266	2271	2267	2266	2266	2266	2274	2271	2267	2267	2272			
3600	2283	2282	2277	2275	2277	2274	2273	2273	2272	2271	2271	2271	2271	2269	2267	2267	2266	2271	2268	2268	2271	2266	2274	2272	2270	2267	2271			
4200	2283	2284	2277	2277	2277	2275	2274	2274	2273	2273	2273	2273	2273	2271	2271	2271	2268	2268	2268	2271	2266	2274	2272	2270	2268	2273	2273			
4800	2283	2277	2284	2280	2278	2282	2280	2274	2277	2281	2277	2273	2273	2273	2270	2268	2268	2263	2266	2263	2267	2278	2277	2270	2268	2274	2274			
5400	2283	2277	2284	2280	2278	2282	2280	2274	2277	2281	2277	2273	2273	2273	2270	2268	2268	2263	2266	2263	2267	2278	2277	2270	2268	2274	2274			
6000	2277	2275	2275	2274	2273	2275	2271	2271	2272	2269	2271	2269	2270	2271	2266	2266	2266	2261	2263	2261	2261	2272	2270	2270	2267	2264	2273	2269		
7200	2277	2275	2275	2274	2273	2275	2271	2271	2272	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2264	2266	2261	2263	2261	2261	2272	2272	2269	2265	2261	2268	2268		
8400	2277	2274	2273	2272	2272	2271	2271	2271	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2271	2269	2265	2261	2268	2268		
9000	2277	2273	2273	2272	2272	2271	2270	2270	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2270	2268	2264	2261	2267	2267		
9600	2275	2273	2273	2272	2271	2271	2269	2269	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2270	2268	2264	2261	2267	2267		
10200	2275	2273	2273	2272	2271	2271	2269	2269	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2270	2268	2264	2261	2267	2267		
10800	2273	2272	2272	2271	2271	2271	2269	2269	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2270	2268	2264	2261	2267	2267		
11400	2273	2272	2272	2271	2271	2271	2269	2269	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2270	2268	2264	2261	2267	2267		
12000	-4	-3	2272	556	741	2270	1532	2269	2269	-18	2101	2149	2177	2209	-9	-13	-22	-15	1972	271	2358	2085	-13	-12	0	1357	2272			
12600	-4	-3	2272	556	741	2270	1532	2269	2269	-18	2101	2149	2177	2209	-9	-13	-13	-13	-17	-14										
13200	-1	-2	-4	0	1	120	-3	-1	-8	-1	-11	-10	-9	-8	-12	-12	-13	-13	-17	-14										
13800	8		-4	-3	1	120	-2	-1	-8	-1	-11	-10	-11	-12	-12	-12	-13	-13	-17	-14										
F <sub>PEAK</sub>	2283	2284	2286	2285	2280	2282	2280	2278	2277	2281	2277	2273	2273	2273	2274	2274	2273	2271	2269	2271	2267	2278	2277	2273	2268	2274	2274			
F <sub>C,MIN</sub>	2273	2272	2272	2271	2271	2270	2269	2269	2269	2269	2269	2266	2266	2266	2264	2263	2266	2261	2263	2261	2261	2271	2270	2268	2264	2261	2267	2267		
ΔF <sub>C</sub>	10	12	14	14	9	12	11	9	8	12	9	7	7	9	10	11	12	17	10	13	9	17	9	10	11	7	7			
Dop. ΔF <sub>C</sub>	45,46	45,44	45,44	45,42	45,42	45,4	45,38	45,38	45,38	45,38	45,36	45,32	45,28	45,28	45,26	45,22	45,08	45,18	45,16	45,16	45,22	45,36	45,36	45,26	45,14	45,33	45,14			

Tablica Z.8. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2300 kN

Proces:	Twinshot											
Siła zamykania [kN]:	2300											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Próbka: \ Gniazdo:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,03	4,09	4,08	4,08	4,16	4,02	3,53	3,52	3,56	3,58	3,55	3,57
2	4,03	4,09	4,09	4,08	4,16	4,01	3,54	3,51	3,57	3,56	3,56	3,56
3	4,04	4,10	4,09	4,08	4,15	4,01	3,54	3,51	3,57	3,58	3,55	3,56
4	4,05	4,10	4,07	4,08	4,15	4,04	3,53	3,51	3,57	3,57	3,53	3,56
5	4,05	4,10	4,07	4,08	4,15	4,00	3,53	3,51	3,57	3,56	3,56	3,56
6	4,04	4,10	4,06	4,06	4,15	4,02	3,53	3,51	3,58	3,57	3,56	3,56
7	4,04	4,08	4,09	4,08	4,15	4,01	3,54	3,52	3,57	3,57	3,56	3,56
8	4,05	4,10	4,09	4,08	4,15	4,00	3,53	3,53	3,57	3,57	3,55	3,56
9	4,05	4,08	4,08	4,08	4,15	4,02	3,53	3,52	3,58	3,57	3,55	3,55
10	4,04	4,10	4,08	4,09	4,15	4,01	3,53	3,51	3,57	3,58	3,55	3,55
11	4,02	4,10	4,09	4,08	4,15	4,04	3,54	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
12	4,03	4,08	4,09	4,10	4,16	4,03	3,53	3,51	3,58	3,57	3,55	3,56
13	4,05	4,08	4,10	4,09	4,15	4,02	3,53	3,51	3,58	3,57	3,55	3,56
14	4,04	4,10	4,07	4,09	4,15	4,02	3,53	3,51	3,57	3,57	3,56	3,56
15	4,05	4,10	4,07	4,08	4,15	4,00	3,53	3,53	3,57	3,57	3,55	3,56
16	4,05	4,10	4,08	4,09	4,16	4,03	3,53	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
17	4,04	4,09	4,09	4,07	4,15	4,00	3,53	3,51	3,58	3,57	3,55	3,56
18	4,05	4,09	4,08	4,09	4,16	4,01	3,53	3,51	3,58	3,57	3,56	3,56
19	4,04	4,09	4,08	4,07	4,15	4,02	3,53	3,51	3,57	3,57	3,54	3,56
20	4,04	4,09	4,08	4,06	4,15	4,02	3,53	3,53	3,58	3,57	3,56	3,56
21	4,04	4,10	4,06	4,05	4,15	4,01	3,53	3,52	3,58	3,57	3,56	3,56
22	4,04	4,10	4,06	4,08	4,14	4,01	3,53	3,52	3,57	3,57	3,54	3,56
23	4,04	4,10	4,07	4,07	4,14	4,01	3,53	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
24	4,04	4,09	4,07	4,08	4,14	4,01	3,53	3,52	3,58	3,56	3,56	3,56
25	4,04	4,09	4,07	4,08	4,14	4,01	3,54	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
$\sigma$	0,008	0,007	0,011	0,011	0,006	0,011	0,004	0,007	0,006	0,005	0,007	0,003
$\bar{\varnothing}$ :	4,041	4,094	4,078	4,079	4,150	4,015	3,532	3,515	3,574	3,570	3,552	3,560
CV:	0,19%	0,18%	0,27%	0,26%	0,14%	0,27%	0,11%	0,20%	0,16%	0,14%	0,21%	0,10%
Total $\bar{\varnothing}$ :	4,076						3,550					

Tablica Z.9. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2200 kN

Ciepłota pomiaru	Calkowita siła zamykania [kN]																												φ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473

Tablica Z.10. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2200 kN

Proces:	Twinshot											
Siła zamykania [kN]:	2200											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Próbka: \ Gniazdo:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,04	4,10	4,10	4,11	4,15	4,04	3,54	3,51	3,57	3,56	3,54	3,56
2	4,04	4,10	4,12	4,09	4,15	4,05	3,55	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
3	4,05	4,11	4,12	4,09	4,16	4,04	3,54	3,52	3,58	3,57	3,54	3,56
4	4,05	4,11	4,11	4,09	4,15	4,05	3,53	3,51	3,58	3,57	3,55	3,56
5	4,04	4,11	4,10	4,10	4,15	4,05	3,53	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
6	4,05	4,11	4,12	4,11	4,16	4,04	3,53	3,52	3,58	3,58	3,55	3,56
7	4,04	4,10	4,09	4,09	4,15	4,04	3,53	3,52	3,57	3,57	3,54	3,56
8	4,04	4,11	4,10	4,09	4,15	4,05	3,54	3,52	3,56	3,57	3,55	3,56
9	4,04	4,11	4,09	4,09	4,15	4,05	3,53	3,52	3,57	3,57	3,56	3,56
10	4,03	4,10	4,09	4,09	4,15	4,04	3,53	3,51	3,59	3,57	3,56	3,56
11	4,04	4,09	4,09	4,09	4,14	4,04	3,54	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
12	4,04	4,09	4,09	4,08	4,13	4,05	3,54	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
13	4,05	4,11	4,11	4,11	4,14	4,06	3,54	3,52	3,58	3,58	3,54	3,56
14	4,05	4,11	4,10	4,09	4,15	4,05	3,55	3,52	3,58	3,58	3,55	3,56
15	4,04	4,10	4,09	4,09	4,15	4,04	3,54	3,52	3,58	3,58	3,56	3,57
16	4,07	4,12	4,09	4,09	4,14	4,04	3,53	3,52	3,58	3,58	3,56	3,58
17	4,05	4,12	4,09	4,09	4,16	4,04	3,54	3,53	3,58	3,59	3,56	3,57
18	4,08	4,11	4,09	4,09	4,16	4,04	3,54	3,52	3,58	3,59	3,56	3,56
19	4,07	4,11	4,09	4,09	4,16	4,06	3,54	3,53	3,58	3,57	3,56	3,56
20	4,05	4,09	4,09	4,09	4,16	4,04	3,52	3,52	3,55	3,55	3,55	3,52
21	4,05	4,11	4,11	4,11	4,14	4,04	3,54	3,53	3,58	3,57	3,55	3,56
22	4,05	4,10	4,10	4,07	4,15	4,04	3,53	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
23	4,05	4,11	4,09	4,11	4,15	4,03	3,53	3,52	3,56	3,57	3,55	3,56
24	4,03	4,10	4,09	4,08	4,16	4,02	3,53	3,51	3,57	3,57	3,55	3,56
25	4,03	4,11	4,09	4,08	4,15	4,01	3,53	3,53	3,57	3,57	3,55	3,55
$\sigma$	0,012	0,008	0,011	0,010	0,008	0,011	0,007	0,006	0,009	0,008	0,007	0,010
$\varnothing$ :	4,047	4,106	4,098	4,092	4,150	4,042	3,536	3,519	3,575	3,572	3,551	3,560
CV:	0,29%	0,20%	0,26%	0,25%	0,19%	0,26%	0,20%	0,18%	0,24%	0,23%	0,18%	0,27%
Total $\varnothing$ :	4,089						3,552					

Tablica Z.11. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2100 kN

Cena pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																												Ø
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1200	2139	2136	1049	2134	2135	503	1238	344	50	2137	2131	2131	1671	1708	2127	2130	2128	2127	2061	1761	1760	2127	2124	2124	2123	2127	1764	2127	2127
1800	2139	2136	1049	2134	2135	503	1238	344	2131	2137	2131	1671	1708	2127	2130	2128	2127	2061	1761	1760	2127	2124	2124	2123	2127	1764	2127	2127	1898
2400	2136	2131	2133	2131	2130	2131	2130	2131	2131	2128	2127	2128	2128	2127	2127	2127	2127	2125	2125	2125	2127	2128	2123	2123	2123	2127	2128	2128	2128
3000	2134	2131	2133	2131	2130	2131	2128	2129	2127	2128	2127	2128	2127	2127	2127	2127	2127	2125	2125	2125	2127	2128	2123	2123	2123	2127	2128	2128	2128
3600	2134	2134	2130	2130	2130	2130	2128	2129	2127	2127	2129	2128	2127	2127	2127	2127	2127	2125	2125	2125	2127	2128	2123	2123	2123	2127	2128	2128	2128
4200	2139	2136	2130	2130	2130	2133	2130	2131	2130	2127	2130	2130	2127	2127	2127	2129	2129	2127	2125	2127	2123	2123	2126	2126	2123	2125	2129	2129	2129
4800	2139	2136	2133	2132	2133	2130	2131	2130	2130	2127	2130	2129	2129	2127	2127	2129	2129	2127	2125	2127	2123	2123	2126	2126	2123	2125	2130	2130	2130
5400	2136	2134	2139	2139	2139	2136	2141	2131	2138	2134	2133	2132	2131	2136	2128	2129	2134	2125	2129	2126	2125	2127	2122	2122	2123	2125	2132	2132	2132
6000	2136	2134	2139	2139	2139	2136	2141	2131	2129	2134	2133	2132	2131	2136	2128	2129	2127	2123	2129	2126	2125	2127	2122	2122	2123	2125	2132	2132	2131
6600	2132	2129	2133	2129	2129	2133	2126	2127	2125	2128	2127	2127	2127	2127	2127	2129	2122	2123	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2127	2127
7200	2129	2129	2129	2128	2128	2128	2126	2127	2125	2125	2125	2125	2124	2124	2123	2129	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2126	2126	2126
7800	2129	2129	2129	2128	2128	2128	2126	2127	2125	2125	2125	2125	2124	2124	2123	2129	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2126	2126	2126
8400	2129	2129	2129	2128	2128	2128	2126	2127	2125	2125	2125	2125	2124	2124	2123	2129	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124
9000	2129	2128	2128	2127	2127	2125	2125	2125	2125	2125	2125	2124	2124	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124	2124
9600	2129	2128	2128	2127	2127	2125	2125	2125	2125	2125	2125	2124	2124	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124	2124
10200	2129	2128	2127	2127	2125	2125	2125	2125	2125	2125	2125	2124	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124	2124
10800	2129	2128	2127	2126	2125	2125	2125	2125	2125	2125	2125	2124	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124	2124
11400	2129	2128	2127	2126	2125	2125	2043	2125	2123	2125	2125	2124	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124	2124	2124
12000	4	63	2126	1474	1433	2125	2043	2125	2123	2125	2125	2124	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2124	2124	2124	2124	2124
12600	4	63	2126	1474	2	-15	-6	-14	-10	1353	602	144	2122	2074	816	-10	728	-16	2120	-17	-11	814	247	-12	725	1573	1573	1573	1573
13200	-4	-3	-5	0	2	-15	-6	-14	-10	1353	602	144	2122	2074	816	-10	728	-16	2120	-17	-11	814	247	-12	725	1573	1573	1573	1573
13800	4	-5	-5	0	2	-15	-6	-14	-10	-5	47	-8	-17	-7	-8	-1	-9	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-6	323	323	323	323
F <sub>PEAK</sub>	2139	2136	2139	2139	2139	2136	2141	2132	2138	2137	2133	2132	2131	2136	2128	2129	2134	2127	2125	2127	2123	2123	2126	2126	2123	2125	2132	2132	2131
F <sub>EMN</sub>	2129	2128	2126	2126	2125	2125	2125	2125	2123	2125	2125	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2122	2120	2120	2127	2130	2127	2130	2127	2130	2127	2132
ΔF <sub>c</sub>	10	8	13	13	14	11	16	7	15	12	8	9	14	9	8	12	7	9	9	9	10	9	15	12	8	9	9	9	9
Dop. ΔF <sub>c</sub>	42,58	42,56	42,52	42,52	42,5	42,5	42,5	42,5	42,46	42,5	42,5	42,44	42,44	42,44	42,44	42,44	42,44	42,4	42,4	42,36	42,4	42,36	42,3	42,34	42,38	42,46	42,46	42,46	42,46

Tablica Z.12. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2100 kN

Proces:	Twinshot											
Siła zamykania [kN]:	2100											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Gniazdo: Próbka:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,07	4,11	4,12	4,11	4,16	4,06	3,53	3,51	3,58	3,58	3,55	3,56
2	4,05	4,12	4,10	4,09	4,15	4,04	3,53	3,51	3,58	3,58	3,56	3,57
3	4,07	4,11	4,11	4,11	4,16	4,06	3,54	3,52	3,57	3,57	3,55	3,56
4	4,04	4,11	4,10	4,09	4,14	4,04	3,53	3,52	3,57	3,57	3,55	3,57
5	4,07	4,11	4,10	4,11	4,16	4,06	3,53	3,52	3,58	3,57	3,55	3,57
6	4,05	4,11	4,10	4,11	4,16	4,05	3,54	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
7	4,06	4,11	4,10	4,10	4,16	4,05	3,54	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
8	4,04	4,10	4,10	4,09	4,16	4,05	3,54	3,52	3,58	3,57	3,56	3,56
9	4,04	4,11	4,09	4,09	4,17	4,04	3,53	3,53	3,58	3,58	3,55	3,56
10	4,05	4,10	4,09	4,09	4,15	4,04	3,54	3,51	3,57	3,58	3,56	3,56
11	4,05	4,11	4,10	4,09	4,15	4,04	3,54	3,52	3,58	3,58	3,56	3,57
12	4,06	4,10	4,11	4,12	4,16	4,05	3,54	3,52	3,58	3,58	3,55	3,56
13	4,04	4,11	4,09	4,09	4,16	4,05	3,54	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
14	4,04	4,11	4,09	4,09	4,15	4,04	3,54	3,51	3,58	3,57	3,55	3,56
15	4,06	4,10	4,12	4,11	4,17	4,06	3,54	3,52	3,58	3,58	3,55	3,56
16	4,05	4,11	4,11	4,09	4,16	4,05	3,53	3,52	3,58	3,57	3,55	3,57
17	4,04	4,11	4,11	4,09	4,16	4,04	3,54	3,51	3,58	3,57	3,56	3,56
18	4,05	4,12	4,12	4,11	4,15	4,06	3,54	3,52	3,58	3,58	3,55	3,56
19	4,05	4,11	4,12	4,12	4,17	4,05	3,54	3,52	3,58	3,57	3,55	3,57
20	4,07	4,10	4,12	4,12	4,17	4,09	3,54	3,53	3,58	3,58	3,56	3,57
21	4,05	4,12	4,11	4,09	4,15	4,06	3,54	3,54	3,58	3,57	3,55	3,56
22	4,05	4,10	4,12	4,09	4,16	4,06	3,53	3,53	3,58	3,58	3,55	3,56
23	4,07	4,11	4,12	4,11	4,16	4,04	3,54	3,52	3,58	3,58	3,55	3,57
24	4,03	4,10	4,12	4,08	4,16	4,06	3,54	3,52	3,58	3,57	3,55	3,56
25	4,07	4,11	4,09	4,12	4,14	4,05	3,54	3,53	3,58	3,58	3,55	3,57
$\sigma$	0,012	0,006	0,011	0,012	0,008	0,011	0,004	0,007	0,003	0,005	0,004	0,005
$\phi$ :	4,053	4,108	4,106	4,100	4,158	4,052	3,537	3,520	3,579	3,575	3,552	3,564
CV:	0,29%	0,15%	0,27%	0,30%	0,20%	0,28%	0,13%	0,20%	0,09%	0,14%	0,12%	0,13%
Total $\phi$ :	4,096						3,555					







Tablica Z.14. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 2000 kN

Proces:		Twinshot											
Siła zamykania [kN]:		2000											
Liczba gniazd [n]:		28											
Detal:		Widelec						Nóż					
Próbka:	Gniazdo:	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14	
1		4,06	4,12	4,13	4,10	4,17	4,07	3,54	3,52	3,58	3,58	3,56	3,57
2		4,05	4,12	4,12	4,10	4,17	4,04	3,54	3,53	3,58	3,57	3,56	3,57
3		4,06	4,12	4,11	4,10	4,16	4,07	3,54	3,53	3,58	3,58	3,56	3,57
4		4,08	4,13	4,10	4,10	4,17	4,06	3,55	3,52	3,59	3,57	3,57	3,57
5		4,07	4,12	4,10	4,10	4,18	4,07	3,54	3,53	3,59	3,57	3,58	3,57
6		4,07	4,12	4,10	4,12	4,16	4,08	3,54	3,54	3,59	3,58	3,57	3,57
7		4,06	4,11	4,11	4,11	4,15	4,07	3,54	3,53	3,58	3,58	3,55	3,57
8		4,06	4,11	4,11	4,09	4,16	4,04	3,53	3,52	3,58	3,58	3,55	3,57
9		4,06	4,12	4,10	4,11	4,17	4,05	3,53	3,51	3,58	3,58	3,56	3,56
10		4,06	4,12	4,11	4,09	4,18	4,05	3,54	3,52	3,58	3,57	3,58	3,56
11		4,04	4,10	4,11	4,10	4,17	4,05	3,53	3,52	3,58	3,58	3,56	3,56
12		4,04	4,10	4,10	4,12	4,17	4,04	3,54	3,52	3,58	3,58	3,55	3,57
13		4,05	4,12	4,12	4,12	4,15	4,05	3,53	3,52	3,58	3,58	3,56	3,57
14		4,04	4,11	4,11	4,12	4,16	4,06	3,54	3,52	3,58	3,58	3,56	3,57
15		4,04	4,12	4,11	4,12	4,15	4,06	3,54	3,52	3,58	3,58	3,56	3,56
16		4,05	4,11	4,12	4,12	4,16	4,06	3,53	3,51	3,57	3,58	3,56	3,56
17		4,06	4,12	4,11	4,12	4,17	4,06	3,53	3,53	3,57	3,58	3,56	3,56
18		4,05	4,12	4,13	4,12	4,17	4,06	3,54	3,52	3,58	3,58	3,56	3,56
19		4,05	4,12	4,13	4,10	4,17	4,07	3,54	3,52	3,59	3,58	3,56	3,57
20		4,07	4,12	4,10	4,10	4,17	4,07	3,54	3,53	3,58	3,57	3,56	3,57
21		4,07	4,12	4,10	4,10	4,17	4,07	3,55	3,53	3,59	3,58	3,56	3,57
22		4,06	4,12	4,10	4,12	4,17	4,07	3,54	3,53	3,58	3,58	3,56	3,58
23		4,08	4,12	4,13	4,10	4,17	4,06	3,56	3,53	3,58	3,57	3,56	3,58
24		4,07	4,10	4,13	4,12	4,17	4,07	3,55	3,53	3,58	3,58	3,56	3,57
25		4,06	4,12	4,11	4,09	4,18	4,07	3,53	3,52	3,58	3,58	3,55	3,58
$\sigma$		0,012	0,007	0,011	0,011	0,008	0,011	0,007	0,007	0,005	0,004	0,007	0,006
$\varnothing$ :		4,058	4,116	4,112	4,108	4,167	4,061	3,539	3,524	3,581	3,578	3,561	3,568
CV:		0,28%	0,18%	0,27%	0,27%	0,20%	0,27%	0,21%	0,20%	0,14%	0,12%	0,21%	0,17%
Total $\varnothing$ :		4,104						3,559					

Tablica Z.15. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 1900 kN

Czas pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999
0	-13	-11	-19	-13	-9	-15	-11	-14	-7	-14	-17	-11	-13	-15	-22	-10	3	-17	-15	-15	-15	-21	-22	-6	-16	-20	-13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
600	1981	1985	1985	1979	238	1752	1742	1981	1983	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
1200	1984	1979	1978	1979	238	1752	1742	1981	1983	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
1800	1984	1979	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
2400	1984	1979	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
3000	1986	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
3600	1981	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978	1978																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
4200	1981	1980	1980	1981	1979	1976	1979	1982	1979	1982	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
4800	1979	1980	1980	1981	1979	1975	1981	1982	1975	1982	1975	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
5400	1979	1998	1989	1989	1995	1993	1988	1982	1991	1993	1983	1984	1989	1976	1983	1994	1991	1977	1973	1983	1981	1981	1998	1979	1975	1972	1981	1985																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
6000	1978	1998	1989	1989	1995	1993	1988	1982	1991	1993	1983	1984	1989	1976	1983	1994	1991	1977	1973	1983	1981	1981	1998	1979	1975	1972	1981	1985																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
6600	1978	1981	1980	1975	1985	1980	1978	1975	1980	1977	1975	1975	1978	1976	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
7200	1978	1977	1975	1973	1977	1980	1978	1975	1980	1977	1973	1973	1978	1976	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
7800	1978	1977	1975	1973	1977	1980	1978	1975	1980	1977	1973	1973	1978	1976	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
8400	1975	1975	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
9000	1971	1975	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973	1973																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
9600	1971	1975	1973	1973	1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

Tablica Z.16. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 1900 kN

Proces:	Twinshot											
Siła zamykania [kN]:	1900											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Gniazdo: Próbka:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,06	4,12	4,09	4,11	4,17	4,06	3,55	3,54	3,59	3,58	3,57	3,58
2	4,06	4,12	4,09	4,09	4,17	4,07	3,55	3,54	3,58	3,58	3,56	3,57
3	4,06	4,12	4,09	4,10	4,17	4,07	3,55	3,54	3,58	3,58	3,56	3,58
4	4,07	4,13	4,11	4,11	4,17	4,07	3,54	3,52	3,58	3,58	3,57	3,57
5	4,06	4,12	4,12	4,10	4,17	4,06	3,54	3,53	3,59	3,58	3,57	3,58
6	4,07	4,11	4,12	4,12	4,17	4,07	3,54	3,53	3,58	3,59	3,56	3,58
7	4,09	4,13	4,12	4,13	4,18	4,07	3,56	3,53	3,58	3,58	3,56	3,57
8	4,09	4,13	4,12	4,14	4,17	4,08	3,56	3,53	3,59	3,59	3,58	3,57
9	4,06	4,12	4,10	4,13	4,17	4,07	3,56	3,53	3,58	3,59	3,57	3,58
10	4,09	4,12	4,12	4,13	4,18	4,08	3,54	3,54	3,58	3,58	3,56	3,57
11	4,09	4,13	4,13	4,13	4,18	4,08	3,56	3,54	3,59	3,59	3,57	3,58
12	4,06	4,12	4,10	4,13	4,16	4,07	3,56	3,53	3,59	3,60	3,57	3,58
13	4,08	4,12	4,12	4,12	4,18	4,09	3,56	3,55	3,58	3,58	3,57	3,56
14	4,06	4,11	4,10	4,12	4,16	4,07	3,55	3,54	3,59	3,59	3,56	3,58
15	4,06	4,14	4,12	4,13	4,17	4,08	3,55	3,53	3,59	3,58	3,55	3,58
16	4,06	4,13	4,12	4,13	4,18	4,08	3,55	3,53	3,58	3,58	3,57	3,58
17	4,06	4,13	4,13	4,13	4,17	4,09	3,55	3,53	3,59	3,59	3,56	3,57
18	4,06	4,11	4,10	4,12	4,16	4,07	3,55	3,53	3,59	3,58	3,56	3,58
19	4,09	4,13	4,12	4,12	4,18	4,07	3,53	3,54	3,59	3,59	3,56	3,57
20	4,09	4,13	4,12	4,12	4,17	4,07	3,55	3,53	3,59	3,58	3,57	3,58
21	4,08	4,13	4,12	4,14	4,17	4,10	3,55	3,52	3,59	3,58	3,56	3,58
22	4,08	4,14	4,12	4,13	4,18	4,07	3,55	3,54	3,59	3,58	3,56	3,58
23	4,08	4,13	4,12	4,11	4,18	4,10	3,55	3,54	3,59	3,59	3,57	3,58
24	4,06	4,13	4,13	4,13	4,17	4,07	3,55	3,53	3,59	3,59	3,56	3,58
25	4,06	4,12	4,12	4,13	4,17	4,11	3,54	3,53	3,58	3,58	3,56	3,58
$\sigma$	0,013	0,008	0,012	0,012	0,006	0,012	0,008	0,007	0,005	0,006	0,006	0,006
$\bar{\varnothing}$	4,071	4,125	4,114	4,122	4,172	4,077	3,550	3,534	3,586	3,584	3,564	3,576
CV:	0,31%	0,20%	0,30%	0,30%	0,15%	0,30%	0,22%	0,19%	0,14%	0,16%	0,18%	0,16%
Total $\bar{\varnothing}$ :	4,113						3,566					

Tablica Z.17. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 1800 kN

Czas pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	-16	-21	-3	-3	-11	-9	-13	-18	-22	-18	-20	-8	-20	-11	-12	-8	-12	-18	-13	-15	-23	-20	-20	-20	-22	-22	-27	-16		
600	358	-21	-3	-11	-9	-13	-18	-22	-18	-20	-8	-20	-11	-12	-8	-12	-18	-13	-15	-23	-20	-20	-20	-22	-22	-27	-16			
1200	1916	1912	1912	1911	1912	1918	1913	1912	1911	1910	1918	1919	1913	1912	1924	1913	1908	1908	1909	1913	1912	1912	1911	1911	1912	1908	1913			
1800	1916	1912	1912	1911	1912	1918	1913	1912	1911	1910	1918	1913	1913	1912	1915	1913	1908	1908	1909	1908	1912	1912	1911	1908	1912	1907	1912			
2400	1916	1912	1912	1911	1912	1911	1911	1908	1911	1910	1913	1913	1913	1912	1915	1913	1908	1908	1909	1908	1909	1908	1908	1908	1908	1907	1911			
3000	1912	1911	1911	1914	1911	1911	1911	1909	1908	1908	1915	1910	1912	1908	1915	1913	1908	1908	1909	1908	1909	1908	1908	1911	1907	1910	1910			
3600	1916	1911	1911	1914	1911	1909	1910	1909	1908	1908	1915	1910	1912	1908	1915	1913	1908	1913	1909	1908	1910	1908	1911	1907	1910	1910				
4200	1916	1914	1914	1916	1912	1909	1912	1920	1914	1912	1916	1916	1913	1912	1916	1913	1915	1913	1913	1916	1910	1916	1916	1912	1926	1914				
4800	1920	1914	1914	1914	1916	1912	1912	1920	1914	1912	1916	1916	1913	1912	1916	1913	1915	1928	1913	1916	1910	1910	1916	1912	1926	1916				
5400	1920	1924	1920	1914	1925	1920	1926	1918	1919	1914	1912	1913	1917	1928	1927	1915	1919	1928	1913	1916	1910	1910	1909	1908	1910	1919				
6000	1914	1924	1920	1909	1916	1920	1926	1918	1919	1913	1913	1910	1928	1910	1915	1913	1919	1914	1912	1916	1910	1910	1905	1908	1910	1915				
6600	1914	1910	1910	1909	1916	1910	1911	1909	1914	1913	1908	1910	1910	1910	1911	1910	1909	1909	1912	1916	1910	1906	1905	1908	1905	1910				
7200	1909	1908	1908	1908	1908	1908	1910	1911	1906	1909	1906	1908	1908	1906	1911	1910	1909	1909	1909	1906	1916	1910	1906	1908	1902	1908				
7800	1909	1908	1908	1908	1908	1908	1909	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1905	1908	1902	1908				
8400	1908	1908	1908	1906	1907	1908	1906	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1904	1904	1908	1902	1907			
9000	1908	1908	1908	1906	1907	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1904	1904	1908	1902	1906			
9600	1908	1908	1906	1906	1907	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1904	1904	1908	1902	1906			
10200	1908	1908	1906	1906	1907	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1904	1904	1908	1902	1906			
10800	1908	1908	1906	1906	1907	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1904	1904	1908	1902	1906			
11400	1870	1908	1906	1906	1907	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1907	1907	1906	1909	1906	1906	1909	1906	1906	1916	1910	1904	1904	1908	1902	1906			
12000	1870	1445	208	459	1906	784	1001	-28	1906	1778	253	-31	72	361	-18	1906	1765	1449	1902	1863	-20	1902	187	-25	204	1589				
12600	-20	-13	-20	-20	-16	784	1001	-16	-33	193	-20	-20	-16	-20	-17	-21	-13	-14	-14	-23	-23	-21	1902	-23	-26	547				
13200	-20	-13	-20	-20	-16	-16	-14	-16	-33	193	-20	-20	-16	-20	-17	-21	-13	-14	-14	-20	-19	-21	1902	-23	-26	547				
13800	-20	-13	-20	-20	-16	-16	-20	-20	-33	193	-20	-20	-16	-20	-17	-21	-13	-14	-14	-20	-19	-21	1902	-23	-26	547				
F <sub>C,HEK</sub>	1920	1924	1920	1916	1925	1920	1926	1920	1919	1936	1918	1919	1928	1927	1924	1913	1919	1928	1926	1916	1925	1916	1916	1912	1926	1916				
F <sub>C,MIN</sub>	1908	1908	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1906	1908	1902	1906	1903	1902	1902	1902	1902				
ΔF <sub>C</sub>	12	16	14	10	19	14	20	18	13	30	12	13	26	21	18	7	13	20	24	10	22	14	14	10	24	15				
Dep.ΔF <sub>C</sub>	38,16	38,16	38,12	38,12	38,12	38,12	38,12	38,04	38,12	38,12	38,12	38,12	38,04	38,12	38,12	38,12	38,12	38,16	38,04	38,12	38,06	38,04	38,04	38,04	38,04	38,07				

Tablica Z.18. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 1800 kN

Proces:	Twinshot											
Siła zamykania [kN]:	1800											
Liczba gniazd [n]:	28											
Detal:	Widelec						Nóż					
Próbka: \ Gniazdo:	1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
1	4,08	4,14	4,14	4,13	4,18	4,08	3,55	3,53	3,58	3,58	3,57	3,57
2	4,09	4,12	4,12	4,13	4,18	4,08	3,54	3,53	3,58	3,58	3,56	3,59
3	4,08	4,11	4,10	4,13	4,18	4,08	3,54	3,52	3,59	3,58	3,57	3,59
4	4,06	4,12	4,12	4,13	4,17	4,07	3,55	3,52	3,58	3,58	3,57	3,58
5	4,08	4,12	4,14	4,14	4,17	4,08	3,55	3,52	3,58	3,58	3,58	3,58
6	4,08	4,13	4,12	4,14	4,17	4,08	3,55	3,53	3,58	3,58	3,57	3,57
7	4,08	4,12	4,11	4,10	4,17	4,08	3,55	3,53	3,60	3,58	3,56	3,58
8	4,07	4,12	4,10	4,13	4,18	4,08	3,55	3,53	3,59	3,59	3,56	3,58
9	4,07	4,12	4,12	4,11	4,18	4,11	3,55	3,53	3,58	3,59	3,56	3,58
10	4,09	4,14	4,14	4,14	4,18	4,08	3,56	3,53	3,59	3,59	3,57	3,58
11	4,07	4,12	4,10	4,13	4,17	4,08	3,57	3,55	3,59	3,58	3,57	3,59
12	4,09	4,14	4,14	4,13	4,18	4,09	3,55	3,53	3,60	3,58	3,57	3,58
13	4,08	4,11	4,14	4,14	4,19	4,11	3,57	3,54	3,58	3,60	3,57	3,59
14	4,09	4,14	4,12	4,14	4,18	4,08	3,55	3,55	3,60	3,60	3,57	3,58
15	4,08	4,13	4,12	4,13	4,18	4,10	3,56	3,54	3,60	3,58	3,57	3,58
16	4,09	4,14	4,14	4,14	4,18	4,08	3,55	3,53	3,59	3,59	3,57	3,57
17	4,08	4,14	4,14	4,14	4,18	4,11	3,55	3,53	3,58	3,59	3,57	3,58
18	4,09	4,14	4,12	4,14	4,17	4,09	3,55	3,54	3,60	3,58	3,56	3,59
19	4,09	4,12	4,12	4,14	4,17	4,08	3,55	3,53	3,59	3,59	3,57	3,58
20	4,06	4,12	4,13	4,12	4,17	4,07	3,54	3,53	3,59	3,58	3,57	3,58
21	4,08	4,12	4,12	4,12	4,17	4,07	3,55	3,53	3,58	3,58	3,56	3,58
22	4,08	4,13	4,11	4,13	4,17	4,07	3,55	3,54	3,59	3,59	3,57	3,58
23	4,08	4,13	4,12	4,13	4,18	4,08	3,54	3,54	3,58	3,58	3,57	3,58
24	4,06	4,14	4,12	4,12	4,17	4,07	3,55	3,53	3,58	3,59	3,56	3,57
25	4,06	4,11	4,12	4,13	4,16	4,08	3,54	3,53	3,58	3,57	3,57	3,58
$\sigma$	0,010	0,010	0,013	0,010	0,006	0,012	0,008	0,008	0,008	0,007	0,005	0,006
$\varnothing$ :	4,078	4,127	4,123	4,130	4,175	4,083	3,550	3,532	3,587	3,584	3,568	3,580
CV:	0,25%	0,25%	0,31%	0,24%	0,15%	0,29%	0,22%	0,22%	0,22%	0,19%	0,14%	0,17%
Total $\varnothing$ :	4,119						3,567					

Tablica Z.19. Wyniki pomiarowe siły zamykania podczas procesu TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 1700 kN

Gas pomiaru	Całkowita siła zamykania [kN]																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28		
0																														
600	-18	-18	-20	-18	-13	-23	-10	-18	-20	-18	-23	-23	-12	-19	-23	-26	-18	-18	-20	-20	-15	-20	-19	-25	-15	-19				
1200	1855	1842	1848	1839	1855	1840	1855	1843	1839	1848	1855	1840	1839	1848	1841	1855	1842	1840	1842	1840	1855	1849	1840	1855	1855	1846				
1800	1855	1842	1848	1839	1855	1839	1855	1843	1839	1848	1855	1840	1839	1848	1841	1855	1842	1840	1842	1840	1855	1849	1840	1855	1855	1846				
2400	1847	1842	1844	1843	1839	1839	1845	1842	1839	1839	1839	1839	1839	1838	1841	1837	1839	1836	1840	1840	1839	1841	1840	1836	1835	1840				
3000	1847	1839	1844	1839	1839	1839	1842	1839	1839	1839	1839	1839	1839	1838	1841	1842	1836	1839	1842	1840	1843	1839	1836	1835	1835	1840				
3600	1855	1839	1844	1839	1844	1851	1844	1845	1842	1848	1848	1844	1842	1842	1841	1842	1842	1839	1842	1840	1844	1843	1843	1835	1841	1840				
4200	1865	1843	1865	1843	1844	1851	1844	1845	1842	1848	1848	1844	1842	1842	1842	1842	1842	1839	1842	1840	1844	1843	1843	1844	1841	1845				
4800	1843	1843	1847	1856	1869	1865	1853	1865	1860	1852	1852	1843	1851	1860	1865	1865	1855	1839	1838	1860	1843	1855	1843	1860	1865	1851				
5400	1839	1849	1842	1846	1848	1845	1842	1847	1843	1836	1836	1839	1838	1838	1836	1842	1836	1839	1838	1860	1836	1853	1841	1840	1865	1850				
6000	1839	1849	1842	1846	1848	1845	1842	1847	1843	1836	1836	1839	1838	1838	1836	1842	1836	1839	1838	1855	1836	1838	1841	1840	1865	1841				
6600	1839	1849	1842	1846	1848	1845	1842	1847	1843	1836	1836	1839	1838	1838	1836	1842	1836	1839	1838	1855	1836	1838	1841	1840	1865	1841				
7200	1839	1849	1842	1846	1848	1845	1842	1847	1843	1836	1836	1839	1838	1838	1836	1842	1836	1839	1838	1855	1836	1838	1841	1840	1865	1841				
7800	1839	1839	1842	1838	1836	1836	1836	1837	1837	1836	1836	1838	1834	1834	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
8400	1839	1839	1842	1838	1836	1836	1836	1837	1836	1836	1835	1838	1834	1831	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
9000	1836	1839	1842	1836	1836	1836	1836	1837	1836	1836	1835	1836	1834	1831	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
9600	1836	1839	1842	1836	1836	1836	1836	1837	1836	1836	1835	1836	1834	1831	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
10200	1836	1839	1842	1836	1836	1836	1836	1837	1836	1836	1835	1836	1834	1831	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
10800	1836	1839	1842	1836	1836	1836	1836	1837	1836	1836	1835	1836	1834	1831	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
11400	1836	1839	1842	1836	1836	1836	1836	1837	1836	1836	1835	1836	1834	1831	1831	1831	1831	1831	1838	1855	1831	1834	1831	1837	1830	1836				
12000	-22	1839	15	1835	1362	-31	1836	734	402	1836	-30	-18	1020	159	-26	-27	-28	-20	-24	-25	-26	-16	-18	-18	-26	427				
12600	1839	15	1835	1362	-24	1836	-16	-20	1836	-30	-18	1020	159	-26	-27	-28	-20	-24	-25	-26	-16	-18	-18	-26	427					
13200	-18	-14	-21	-24	-24	-23	-20	-16	-20	-18	-21	-15	-19	-26	-26	-26	-26	-22	-23	-22	-25	-19	-26	-15	-26	371				
13800	-18	-18	-21	-21	-21	-20	-20	-24	-20	-18	-21	-15	-19	-26	-26	-26	-26	-22	-23	-22	-25	-19	-26	-15	-26	371				
F <sub>CHAK</sub>	1865	1864	1865	1856	1869	1865	1855	1865	1860	1852	1855	1844	1851	1860	1865	1865	1855	1840	1860	1860	1865	1853	1863	1860	1865	1856				
F <sub>CHIN</sub>	1836	1839	1842	1835	1835	1835	1836	1835	1835	1835	1831	1831	1834	1831	1829	1831	1831	1831	1830	1830	1831	1831	1834	1831	1835	1830	1833			
ΔF <sub>C</sub>	29	25	23	21	34	30	19	30	25	17	24	13	17	29	36	34	24	9	30	30	34	19	32	25	35	23				
Dop. ΔF <sub>C</sub>	36/72	36/78	36/84	36/7	36/7	36/7	36/72	36/7	36/7	36/7	36/62	36/62	36/68	36/62	36/58	36/62	36/62	36/62	36/6	36/6	36/62	36/68	36/62	36/7	36/6	36/6				

Tablica Z.20. Wyniki pomiarowe masy wyprasek proces TwinShot,  
28 gniazd, siła zamykania 1700 kN

Proces:		Twinshot											
Siła zamykania [kN]:		1700											
Liczba gniazd [n]:		28											
Detal:		Widelec						Nóż					
Gniazdo:		1	4	7	8	11	14	1	4	7	8	11	14
Próbka:													
1	4,08	4,15	4,12	4,12	4,17	4,10	3,56	3,55	3,61	3,59	3,58	3,58	
2	4,08	4,16	4,15	4,14	4,19	4,10	3,55	3,56	3,61	3,59	3,58	3,58	
3	4,09	4,14	4,14	4,14	4,19	4,11	3,56	3,54	3,61	3,60	3,58	3,60	
4	4,09	4,14	4,15	4,14	4,19	4,12	3,56	3,56	3,61	3,58	3,59	3,60	
5	4,09	4,14	4,15	4,16	4,19	4,08	3,56	3,55	3,60	3,60	3,58	3,60	
6	4,06	4,14	4,16	4,13	4,19	4,12	3,56	3,56	3,61	3,60	3,59	3,60	
7	4,07	4,16	4,15	4,13	4,19	4,10	3,56	3,57	3,60	3,60	3,59	3,60	
8	4,08	4,14	4,14	4,14	4,19	4,09	3,56	3,57	3,61	3,60	3,57	3,60	
9	4,06	4,16	4,15	4,13	4,17	4,11	3,56	3,55	3,61	3,60	3,60	3,60	
10	4,07	4,14	4,15	4,14	4,18	4,10	3,56	3,55	3,61	3,59	3,57	3,59	
11	4,07	4,14	4,15	4,14	4,18	4,10	3,56	3,56	3,61	3,59	3,56	3,59	
12	4,07	4,13	4,15	4,14	4,17	4,09	3,55	3,56	3,61	3,59	3,59	3,58	
13	4,07	4,13	4,15	4,14	4,19	4,10	3,56	3,55	3,60	3,58	3,59	3,58	
14	4,09	4,14	4,15	4,14	4,17	4,10	3,56	3,55	3,59	3,59	3,58	3,58	
15	4,08	4,13	4,15	4,14	4,19	4,10	3,56	3,55	3,59	3,59	3,58	3,58	
16	4,06	4,13	4,15	4,14	4,19	4,10	3,56	3,53	3,59	3,58	3,58	3,60	
17	4,07	4,14	4,15	4,12	4,19	4,10	3,55	3,55	3,59	3,59	3,57	3,58	
18	4,09	4,15	4,17	4,14	4,19	4,12	3,57	3,53	3,59	3,59	3,57	3,58	
19	4,09	4,14	4,16	4,14	4,17	4,12	3,57	3,55	3,59	3,59	3,57	3,58	
20	4,10	4,14	4,15	4,14	4,19	4,11	3,57	3,55	3,61	3,58	3,57	3,58	
21	4,10	4,16	4,15	4,14	4,19	4,10	3,57	3,55	3,59	3,58	3,59	3,58	
22	4,10	4,13	4,17	4,14	4,17	4,12	3,56	3,55	3,62	3,60	3,59	3,60	
23	4,09	4,13	4,16	4,17	4,19	4,12	3,56	3,54	3,60	3,59	3,58	3,60	
24	4,09	4,16	4,14	4,14	4,19	4,12	3,56	3,54	3,60	3,60	3,58	3,60	
25	4,09	4,16	4,15	4,17	4,19	4,11	3,56	3,55	3,61	3,59	3,57	3,58	
σ	0,012	0,011	0,010	0,011	0,009	0,011	0,005	0,010	0,009	0,007	0,009	0,010	
∅:	4,081	4,143	4,150	4,140	4,184	4,106	3,560	3,551	3,603	3,591	3,580	3,590	
CV:	0,30%	0,26%	0,23%	0,28%	0,20%	0,27%	0,15%	0,28%	0,25%	0,20%	0,26%	0,27%	
Total ∅:	4,134						3,579						