



Politechnika  
Śląska

Politechnika Śląska w Katowicach  
Wydział Inżynierii Materiałowej

mgr inż. Paweł Tracz

**Modernizacja produkcji elektrody zbiorczej dla przemysłu  
energetycznego**

*Rozprawa doktorska*

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Waclawiak  
Promotor pomocniczy: dr inż. Joanna Lisok

Katowice, 2023

## Streszczenie

Poniższa praca pt. „Modernizacja produkcji elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego” zajmuje się tematyką wytwarzania paneli elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego. Tematyką badań było opracowanie studium wykonalności nowego produktu, z uwzględnieniem analizy technicznej, ekonomicznej oraz oceny ryzyka projektu inwestycyjnego.

Przyjęto hipotezę badawczą uznającą, że możliwe jest wytworzenie nowej elektrody zbiorczej o zmniejszonej masie, przy zachowaniu jej waloru użytkowego i jednoczesnym obniżeniu jednostkowego kosztu wytworzenia. Opracowanie projektu i wdrożenie do produkcji zoptymalizowanego produktu, prowadzi do uzyskania przez przedsiębiorstwo przewagi konkurencyjnej, jak również umocnienia jego pozycji rynkowej.

Wskaźniki materiałochłonności i energochłonności produkcji oraz zysk operacyjny przedsiębiorstwa mogą zostać znacząco poprawione poprzez implementację zaproponowanych zmian modernizacyjnych w obszarze parku maszynowego przedsiębiorstwa produkcyjnego.

Praca skupia się na opracowaniu projektu elektrody zbiorczej elektrofiltru suchego, jak również analizie danych procesowych, w szczególności badaniu wpływu parametrów wsadu technologicznego na wybrane tolerancje wykonania gotowego wyrobu.

W pracy zaprojektowano stacje wielotaktowego gięcia rolkowego 3 profili elektrod zbiorczych: Sigma III, ZT24 i rynnowego. Modelowanie profilowania przeprowadzono dla 3 gatunków stali: DC01, Corten A i nierdzewnej 1.4541 oraz 3 grubości taśmy: 1,5, 1,25 i 1,0 mm.

W pracy wykorzystano dane procesowe udostępnione przez duży koncern energetyczny. Ważną część pracy stanowi pogłębiona analiza statystyczna właściwości wsadu technologicznego, cech geometrycznych gotowego wyrobu oraz ich wzajemnej korelacji.

Do celów obliczeniowych posłużono się m.in. arkuszem kalkulacyjnym, zaawansowanym oprogramowaniem do analizy danych Minitab, oprogramowaniem wspomagającym obliczenia inżynierskie: COPRA RF i COPRA FEA oraz GOM Inspect.

Na podstawie wyników pracy stwierdzono, że możliwe jest opracowanie etapów złożonego procesu projektowania i produkcji elektrody o mniejszej grubości, od analizy istniejącej linii technologicznej, właściwości wsadu technologicznego, przez zaprojektowanie stacji wielotaktowego gięcia rolkowego, wykonanie symulacji procesu gięcia, po wstępne sprawdzenie geometrycznych cech produktu oraz wybranej właściwości użytkowej decydującej o skuteczności oczyszczania ze zgromadzonego popiołu. Przeprowadzona analiza ekonomiczna potwierdziła opłacalność takiej modernizacji.

**Słowa kluczowe:** elektroda zbiorcza, wielotaktowe gięcie rolkowe, analiza danych procesowych, analiza techniczna i ekonomiczna procesu produkcyjnego, ocena ryzyka projektu inwestycyjnego

## Abstract

The paper entitled "Modernisation of the production of the collecting electrode plate for the energy industry" deals with the issue of producing collecting electrode panels being a component of an electrostatic precipitator. The subject matter of the research is focused upon the development of a new product feasibility study, which comprises technical and economic analysis, as well as market analysis together with the risk assessment of an investment project.

The research is based on the hypothesis that it is possible to develop and put onto the market a new collecting electrode plate whose mass has been reduced, while at the same time its utility value has been preserved and the unit cost of production reduced. The development project and its implementation resulting in the production of the optimised product leads to the improvement of the company's competitiveness, as well as to strengthening its market position.

The indicators of material and energy consumption of the production process, as well as the company's operating profit may be significantly improved by the implementation of the proposed modernisation changes in the area of the machinery park of a production company.

The paper focuses upon the development of a project of the collecting electrode plate employed in an electrostatic precipitator, and looks at the analysis of the process data, in particular at the study of the impact of the technological input parameters on selected tolerances of manufacturing the complete product.

The task involved designing stations for multi roll forming processes intended for 3 types of collecting electrode plane profiles, i.e. Sigma III, ZT24 and trough. The modelling of profiling was carried out for 3 grades of steel: DC01, Corten A and stainless steel 1.4541, and for 3 thicknesses of strip: 1.5, 1.25 and 1.0 mm.

The paper utilises the process data provided by a large energy consortium. What is an important part of the paper is an in-depth statistical analysis of the technological properties of the charge, the geometric features of the complete product, and their mutual correlations.

For the purpose of the research, the following were employed: MS Excel spreadsheet, Minitab an advanced software for data analysis, and software supporting engineering calculations, i.e. COPRA RF, COPRA FEA, and GOM Inspects.

Basing on the research results, it was concluded that it is feasible to develop the stages of the complex process of designing and manufacturing an electrode with a thinner thickness, starting from the analysis of the existing technological line and the properties of the technological charge, through the designing of multi roll forming stations, and carrying out simulations of the bending process, up to the initial examination of the geometrical features of the product, and the inspection of a selected functional property determining the effectiveness of removing collected ashes. The conducted economic analysis confirmed the profitability of such modernisation.

**Keywords:** collecting electrode, multi roll forming process, analysis of the process data, technical and economic analysis of the production process, risk assessment of the investment project

## Spis treści

1. Wprowadzenie.....	6
2. Teza i zakres pracy .....	7
3. Uwarunkowania prawne w dziedzinie ochrony powietrza .....	9
4. Proces odpylania i podział urządzeń odpylających.....	10
5. Opis konstrukcji odpylaczy elektrostatycznych.....	11
5.1 Działanie elektrofiltru.....	11
5.2 Warunki pracy elektrofiltru .....	13
5.3 Obudowa i wyposażenie komory elektrofiltru.....	18
5.4 Elektryczny zespół zasilający i sterowanie.....	22
5.5 Znaczenie składu gazu oraz jego możliwy wpływ na skuteczność elektrofiltru.....	23
5.6 Usuwanie osadu pyłu z elektrod .....	26
5.7 Sprawność odpylania.....	29
6. Sytuacja na rynku energetycznym i tendencje rozwojowe budowy elektrofiltrów.....	30
6.1 Producenci krajowi i zagraniczni .....	30
6.2 Kierunki rozwojowe .....	30
6.3 Nowe zastosowania elektrofiltrów .....	35
7. Stan badań dotyczących konstrukcji, działania i projektowania elektrofiltrów.....	39
7.1 Symulacje numeryczne wytwarzania .....	39
7.2 Symulacje numeryczne eksploatacji.....	44
7.3 Badania modelowe w skali i rzeczywiste .....	48
8. Opis elektrody zbiorczej .....	49
8.1 Kształt.....	49
8.2 Zagadnienia materiałowe.....	50
8.3 Metoda wytwarzania .....	54
8.4 Podstawowy parametr użytkowy .....	57
8.5 Wskaźniki ilościowe wykorzystywane przy projektowaniu elektrofiltru.....	60
9. Szczegółowa analiza sposobu wytwarzania elektrody zbiorczej .....	64
9.1 Zakup materiału oraz przygotowanie procesu produkcyjnego .....	64
9.2 Opis linii produkcyjnej .....	67
9.3 Magazynowanie i spedycja.....	70
9.4 Kontrola jakości wytwarzania.....	72
10. Analiza statystyczna właściwości wsadu technologicznego i tolerancji wykonania elektrod zbiorczych w procesie wielotaktowego gięcia rolkowego .....	76
10.1 Podstawowa statystyka opisowa właściwości materiału przeznaczonego do produkcji .....	76

10.2 Badanie zależności pomiędzy składem chemicznym wsadu technologicznego a tolerancjami wykonania gotowego wyrobu.....	86
10.3 Wpływ właściwości mechanicznych wsadu technologicznego na tolerancje wykonania elektrod zbiorczych .....	109
11. Modelowanie numeryczne profilowania elektrody zbiorczej.....	122
11.1 Opis stosowanego oprogramowania.....	122
11.2 Zakres modelowania numerycznego .....	123
11.3 Opracowanie projektów rozwinięcia kształtowników i ich wstępna weryfikacja.....	124
11.4 Konstrukcja rolek profilujących.....	131
11.5 Parametry wsadu technologicznego definiowanego w symulacji numerycznej metodą elementów skończonych.....	133
11.6 Ustawienia symulacji numerycznej w zakresie danych materiałowych, procesowych oraz dyskretyzacji modeli numerycznych.....	135
11.7 Analiza odkształceń na krawędziach profilowanych kształtowników.....	139
11.8 Ocena stopnia pocienienia materiału oraz zmiany szerokości pasma giętego podczas wielotaktowego gięcia rolkowego .....	142
11.9 Weryfikacja opracowanych modeli numerycznych w zakresie wystąpienia pęknięć .....	147
11.10 Identyfikacja stanu naprężenia i odkształcenia w procesie profilowania .....	150
11.11 Analiza wpływu wsadu technologicznego na wartość kąta sprężynowania dla przyjętych założeń projektowych.....	160
11.12 Określenie sił występujących podczas profilowania oraz oszacowanie pracy wykonanej na gięciu elektrod zbiorczych.....	167
12. Analiza podstawowych wielkości geometrycznych elektrod zbiorczych na podstawie otrzymanych modeli numerycznych.....	171
13. Ocena cechy użytkowej elektrod zbiorczych na podstawie analizy numerycznej drgań własnych i wymuszonych .....	181
14. Ekonomiczne aspekty procesu produkcyjnego w określonych warunkach warsztatowych .....	188
15. Analiza czynników wpływających na zmniejszenie wielkości i jakości produkcji oraz zysku przed wprowadzeniem zmian modernizacyjnych .....	194
16. Propozycja zmian modernizacyjnych oraz ocena opłacalności produkcji i ryzyka projektu inwestycyjnego.....	196
17. Podsumowanie.....	202
Bibliografia i wykaz norm .....	206
Spis rysunków .....	218
Spis tablic.....	223
Załącznik 1 .....	226
Załącznik 2.....	228
Załącznik 3.....	230

## 1. Wprowadzenie

Rynek energii na świecie i w Polsce zmienia się dynamicznie. Duży wpływ na obecną sytuację w sektorze energetycznym ma niewątpliwie inwazja Rosji na Ukrainę. Udział odnawialnych źródeł energii w polskim miksie energetycznym systematycznie rośnie, natomiast nie jest to poziom pozwalający na szybkie odejście od energetyki konwencjonalnej. W latach 2021-2022 w Polsce z węgla wytworzone zostało ~75% energii elektrycznej. Udział OZE to zaledwie 16,1% całkowitej produkcji. Rozwiązaniem alternatywnym dla obecnego miksu energetycznego jest uruchomienie pierwszych elektrowni atomowych w Polsce, które zaplanowano na 2033 r. Wobec powyższego w perspektywie kolejnych 10-15 lat na rynku krajowym, ale również europejskim należy spodziewać się tzw. przejściowego renesansu węgla w energetyce, który może być gwarantem utrzymania przez poszczególne państwa bezpieczeństwa energetycznego oraz rezerw energetycznych.

Taka sytuacja wymusi rozpoczęcie w branży energetycznej inwestycji w szczególności związanych z modernizacjami bloków energetycznych oraz elektrociepłowni w celu zapewnienia ich dyspozycyjności. W dniu 28 kwietnia 2017 r. zgodnie z unijną dyrektywą zostały przyjęte tzw. konkluzje BAT (Best Available Techniques) dla dużych obiektów spalania (LPC), wprowadzające restrykcyjne wymogi w szczególności w zakresie dopuszczalnych wartości emitowanych zanieczyszczeń [27, 174]. Weszły one w życie w 2021 r. W konsekwencji elektrownie węglowe jak również zakłady przemysłowe zostały zobligowane dostosować swoje instalacje do nowych standardów emisji zanieczyszczeń.

Transformacja energetyczna wytyczona przez Komisję Europejską wyznacza restrykcyjne normy emisji szkodliwych spalin. W dniu 5 kwietnia 2022 r. KE przedstawiła projekt rewizji dyrektywy o emisjach przemysłowych IED, który istotnie zwiększa obowiązki i nakłady inwestycyjne operatorów ciepłowni i elektrociepłowni węglowych.

Najwięksi gracze w branży energetycznej postrzegają ten fakt jako możliwość wypełnienia portfela zamówień i umocnienia swojej pozycji na rynku. Należy podkreślić, że obecnie brak jest na polskim rynku dużych inwestycji, dlatego można przypuszczać, że największe podmioty skupią swoją uwagę na modernizacji mniejszych obiektów energetycznych.

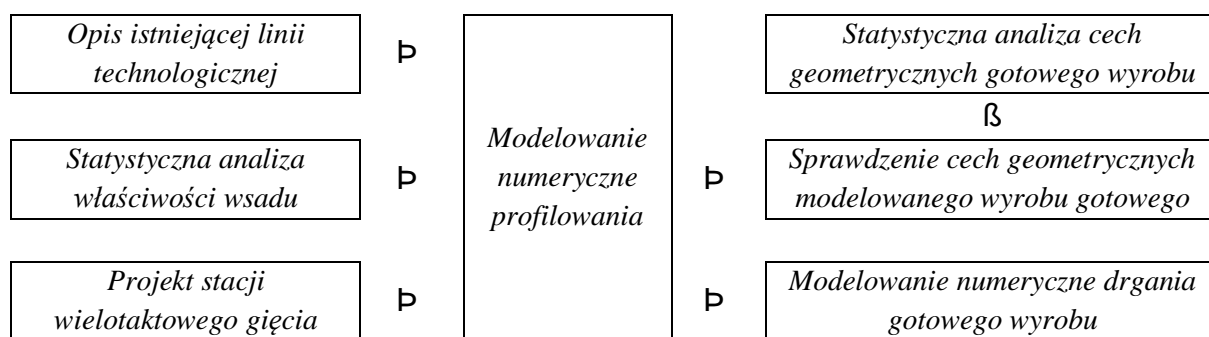
Elektrofiltry nadal będą stanowiły podstawowy sposób redukcji zanieczyszczeń do atmosfery. Z uwagi na znaczny wzrost cen usług i stali można oczekiwać umocnienia tendencji w zakresie optymalizacji konstrukcji tych urządzeń. Elektrody zbiorcze stanowią ponad 30% masy całkowitej elektrofiltru. Tak wysoki udział procentowy sprawia, że omawiany podzespół identyfikowany jest przez producentów tych urządzeń jako produkt o dużym potencjale optymalizacyjnym w odniesieniu do całkowitego kosztu wytworzenia.

## 2. Teza i zakres pracy

Autor pracy postawił sobie za cel wstępne opracowanie technologii produkcji nowej elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego. W założeniu elektroda ta ma być tańsza w produkcji od obecnie wykonywanej, gdyż w ten sposób wytwórca uzyskuje przewagę i dołącza do konkurencji międzynarodowej.

Tezą pracy jest stwierdzenie, że w oparciu o nowoczesne metody komputerowej symulacji, umożliwiające wariantową analizę procesu profilowania blachy, oraz analizę danych materiałowych, takich jak właściwości mechaniczne i skład chemiczny, możliwe jest opracowanie produkcji nowej, tańszej elektrody zbiorczej o mniejszej grubości od obecnie wytwarzanej.

**Cel merytoryczny:** opracowanie etapów złożonego procesu projektowania i produkcji elektrody o mniejszej grubości, od analizy istniejącej linii technologicznej, właściwości wsadu technologicznego, przez zaprojektowanie stacji wielotaktowego gięcia rolkowego, wykonanie symulacji procesu gięcia, po wstępne sprawdzenie geometrycznych cech produktu oraz wybranej właściwości użytkowej decydującej o skuteczności oczyszczania ze zgromadzonego popiołu. Wsad technologiczny tworzy blacha w kręgach w postaci taśmy.



**Cel użytkowy:** opracowanie statystyczne właściwości wsadu technologicznego, takich jak właściwości mechaniczne, skład chemiczny materiału i ich wpływu na cechy geometryczne gotowego wyrobu.

**Cel naukowy:** identyfikacja, poprzez modelowanie numeryczne, związku pomiędzy grubością blachy a przebiegiem procesu profilowania elektrod, określenie słabych i mocnych stron takiego modelowania.

Niezbędne etapy pracy obejmują:

- opis obecnej linii produkcji elektrod zbiorczych ze szczegółową inwentaryzacją dostępnych danych dotyczących materiałochłonności, energochłonności i warunków jakościowych;
- analizę statystyczną wpływu parametrów wsadu technologicznego na wybrane cechy geometryczne elektrod zbiorczych w oparciu o dane empiryczne;

- wybór wariantów obliczeniowych procesu wielotaktowego gięcia rolkowego ze względu dostępne gatunki oraz grubości taśmy stalowej;
- określenie technologicznych wskaźników wielotaktowego gięcia rolkowego analizowanych paneli elektrod osadczych;
- opracowanie kryteriów oceny rozwiązania profilowania pod względem kosztu materiału, zużycia energii elektrycznej i spełnienia warunków jakościowych;
- identyfikację czynników kształtujących całkowity koszt produkcji oraz propozycję zmian modernizacyjnych;
- końcowe sprawdzenie wybranego parametru użytkowego elektrody zbiorczej;
- ocenę projektu inwestycyjnego wraz z określeniem najważniejszych obszarów związanych z ryzykiem inwestycyjnym na podstawie analizy scenariuszy rynkowych.



### 3. Uwarunkowania prawne w dziedzinie ochrony powietrza

Problem utrzymania czystości powietrza atmosferycznego w okręgach przemysłowych dotyczy wszystkich uprzemysłowionych krajów na świecie. Budowa trwałych, ekonomicznych i wysokosprawnych urządzeń odpylających jest problemem inwestycyjnym i dotyczy wszystkich gałęzi przemysłu. Przyjęcie Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2010/75/EU z dn. 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych [35], potocznie zwanej IED (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola), jest tematem szczególnie istotnym dla polskich instalacji energetycznych. Wynikające z powyższego dokumentu zaostrzone standardy dopuszczalnej emisji poszczególnych rodzajów substancji, zmuszają sektor energetyczny do stosowania wysokosprawnych urządzeń odpylających, w tym elektrofiltrów. Od 2016 r. obowiązują nowe standardy koncentracji pyłów dla istniejących i nowych źródeł spalania paliw (tablice 1 i 2).

Krajowy rynek energetyczny cechuje wysoki udział węgla kamiennego i brunatnego w pokryciu potrzeb energetycznych, co bez skutecznego systemu oczyszczania spalin prowadziłoby do wysokiej emisji pyłów do atmosfery. W przypadkach odpylania dużych ilości gazów, zawierających wysokie stężenia zanieczyszczeń z procesów technologicznych, spalania paliw o niskiej kaloryczności i dużej zawartości balastu, nie można uzyskać wymaganych, wysokich skuteczności odpylania w sposób bardziej ekonomiczny niż za pomocą elektrofiltrów. Warto nadmienić, że wąskie grono producentów tych urządzeń jest zmuszone do poszukiwania przewag konkurencyjnych poprzez optymalizację konstrukcji ww. urządzeń, przy zachowaniu ich walorów użytkowych. Ma to istotne znaczenie szczególnie podczas uczestnictwa w przetargach na kompleksowe wykonanie instalacji „pod klucz” (projekt–produkcja–montaż–serwis).

Tablica 1. Graniczne koncentracje pyłu w spalinach dla źródeł istniejących (na podstawie [120])

Nominalna moc cieplna źródła [MW]	PYŁY [ $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ]				
	Węgiel		Paliwo ciekłe		Gaz
	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do i po 31.12.2015r.
50-100	100	30	50	30	5
100-300	100	25	50	25	5
300-500	100	20	50	20	5
>500	50	20	50	20	5

Tablica 2. Graniczne koncentracje pyłu w spalinach dla źródeł nowych (na podstawie [120])

Nominalna moc cieplna źródła [MW]	PYŁY [ $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ]				
	Węgiel		Paliwo ciekłe		Gaz
	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do 31.12.2015r.	Po 31.12.2015r.	Do i po 31.12.2015r.
50-100	50	20	50	20	5
100-300	30	20	30	20	5
300-500	30	10	30	10	5
>500	50	10	30	10	5

Źródło istniejące – źródło spalania paliw, dla którego pozwolenie na budowę wydano przed dniem 7 stycznia 2013 r. lub wniosek o wydanie takiego pozwolenia został złożony przed tym dniem, i które zostało oddane do użytkowania nie później niż w dniu 7 stycznia 2014 r. Przez źródło istniejące rozumie się także źródło spalania paliw, dla którego przed dniem 1 lipca 1987 r. zamiast pierwszego pozwolenia na budowę wydano odpowiednik takiego pozwolenia [120].

Źródło nowe – źródło spalania paliw, dla którego pozwolenie na budowę wydano po dniu 6 stycznia 2013 r., lub które zostało oddane do użytkowania po dniu 7 stycznia 2014 r. [120].

#### 4. Proces odpylania i podział urządzeń odpylających

Odpylanie jest procesem prowadzącym do trwałego oddzielenia rozdrobnionej fazy stałej (pyłu) od gazu niosącego (transportującego tą fazę). W procesach odpylania można wyróżnić następujące fazy [72]: kształtowanie ruchu gazu i ziaren pyłu; koagulacji, tj. łączenia ze sobą pojedynczych, drobnych ziaren w grupy, a więc tworzenia elementów o masie i wymiarach większych od masy i wymiarów pojedynczych ziaren; separacji rozumianej, jako trwałe oddzielenie pyłu od gazu; ewakuacji i zagospodarowania oddzielonego pyłu.

Każda z tych faz może być przeprowadzana z wykorzystaniem różnych zjawisk i procesów fizykochemicznych. Połączenie tych zjawisk (procesów) określa rodzaj metody odpylania. Do usuwania zanieczyszczeń gazowych ze strumieni gazów stosowane są procesy: absorpcyjne, adsorbcyjne, spalania, kondensacyjne i biochemiczne lub ich kombinacje z udziałem innych procesów wspomagających. Wybór metody i technologii oczyszczania gazu zależy od rodzaju zanieczyszczeń, ich charakterystyki, wielkości strumienia gazu, wymaganej sprawności oczyszczania i uwarunkowań lokalnych [117, 171].

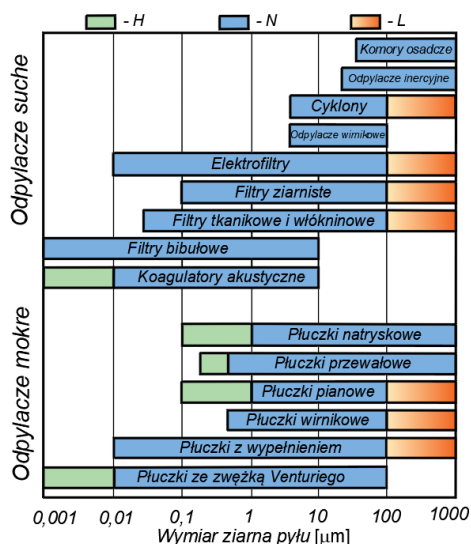
Urządzenia do odpylania gazów przemysłowych dzieli się na odpylacze mokre i suche. Podstawową klasyfikację odpylaczy przeprowadza się ze względu na zjawiska fizyko-chemiczne lub procesy wykorzystywane do wydzielania pyłu.

Można wyróżnić wśród nich m.in.: grawitacyjne (komory osadcze); bezwładnościowe (koncentratory i odpylacze inercyjne); odśrodkowe (cyklony); elektrostatyczne (elektrofiltry); filtracyjne (filtry workowe).

Ze względu na skuteczność działania odpylaczy stosuje się następujący podział [68]:

- odpylacze zgrubnego oczyszczania – stężenie zapylenia na wylocie  $> 50 \text{ mg/m}^3_n$ ;
- odpylacze średniego oczyszczania – stężenie zapylenia na wylocie  $40 \div 50 \text{ mg/m}^3_n$ ;
- odpylacze dokładnego oczyszczania – stężenie zapylenia na wylocie  $< 1 \div 2 \text{ mg/m}^3_n$ .

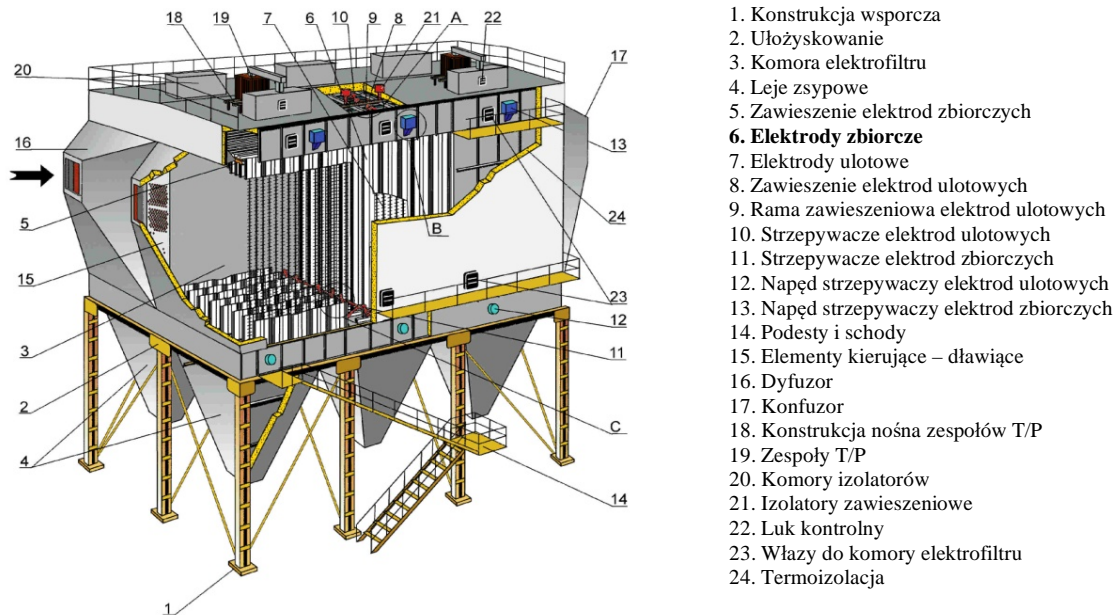
Niezależnie od sposobu klasyfikacji, cechą charakterystyczną wszystkich urządzeń odpylających jest skuteczność przedziałowa, charakterystyczna dla danego typu urządzenia, dlatego często stosowany jest podział odpylaczy, wynikający z zakresu ich stosowania w zależności od wymiarów ziaren pyłu.



Rys. 1. Możliwości separacyjne odpylaczy: N – zakres nominalny, H – zakres o wyższej skuteczności odpylania, L – odpylanie tańszymi metodami [72, 110]

## 5. Opis konstrukcji odpylaczy elektrostatycznych

Elektrofiltr jest urządzeniem o budowie typowej dla dużych przestrzennych konstrukcji mechanicznych. Jego działanie oparte jest na wykorzystaniu zjawisk elektrycznych. Stąd wywodzi się potocznie stosowany podział na część mechaniczną i elektryczną elektrofiltru [33-34]. Na rys. 2 przedstawiono budowę typowego elektrofiltru.

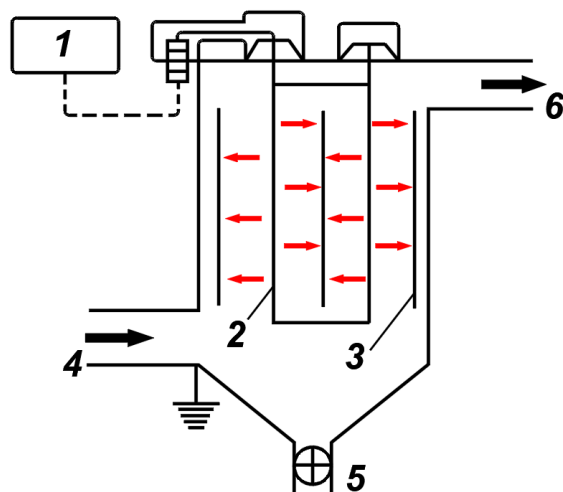


Rys. 2. Budowa typowego elektrofiltru o poziomym przepływie spalin [100]

W Polsce zainstalowanych jest ok. 600 średnich i dużych elektrofiltrów. Za średnie uważa się te w których natężenie przepływu odpylanych gazów mieści się w zakresie  $100 \div 200$  tys.  $m^3_n/h$ , natomiast duże – powyżej 200 tys.  $m^3_n/h$ . Zasadniczymi częściami składowymi elektrofiltru są: obudowa (komora), wyposażenie komory oraz elektryczny zespół zasilający.

### 5.1 Działanie elektrofiltrów

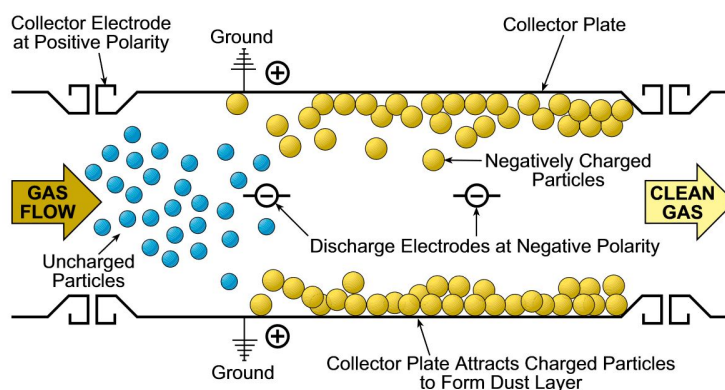
Elektrofiltr jest to urządzenie wykorzystujące zjawiska elektrostatyczne do odpylania gazów. Proces odpylania odbywa się w przestrzeni pomiędzy dwiema elektrodami przez którą przepływa strumień odpylanego gazu. W elektrofiltrach poziomych przepływ zapyłonego gazu jest ukierunkowany poziomo. Współczesne elektrofiltry umożliwiają zatrzymanie bardzo drobnych cząstek pyłów – areozoli (poniżej  $1 \mu m$ ) przy natężeniu przepływu spalin przekraczającym nawet  $2 \times 10^6 m^3_n/h$ . Działanie elektrofiltru oparte jest na oddziaływaniu pola elektrycznego na cząstki posiadające ładunek elektryczny. W procesie elektrycznego odpylania pyłu wystarczającym przybliżeniem jest uwzględnienie sił elektrycznych i sił oporu ośrodka gazowego [130-131]. Na rys. 3 pokazano schemat działania elektrofiltru. Zanieczyszczony ziarnami pyłu gaz doprowadzany jest do elektrofiltru kanałami spalin, a następnie przepływa przez silne pole elektryczne wytworzone pomiędzy elektrodami ulotowymi i zbiorczymi z prędkością  $1 \div 2$  m/s. Rzędy płyt elektrod zbiorczych (sekcje) pośrodku których znajdują się elektrody ulotowe zawieszono w komorze elektrofiltru w kierunku równoległym do kierunku przepływającej strugi zapyłonego gazu.



Rys. 3. Schemat działania elektrofiltru: 1-zespół zasilający, 2-elektrody emisyjne, 3-elektrody zbiorcze, 4-kanal doprowadzający zapyłony gaz, 5-lej zsypany, 6-kanal odprowadzający odpylony gaz [110]

Między uziemioną elektrodą zbiorczą, a elektrodą ulotową podłączoną do ujemnego bieguna źródła prądu wysokiego napięcia (do 100 kV) wytwarza się silne jednokierunkowe pole elektryczne. Po przekroczeniu krytycznej wartości napięcia (ok. 30 kV) przyłożonego na elektrody ulotowe, wokół ich powierzchni powstaje zjawisko ulotu będące źródłem elektronów – rys. 4. Elektrony te, poruszając się w kierunku elektrod przeciwnej biegunowości (elektrod zbiorczych), powodują jonizację gazu w przestrzeni międzyelektrodowej. Jony gazowe z kolei zderzając się z napotkanymi cząstkami pyłu lub przez dyfuzję powodują ich ładowanie.

Pod działaniem sił pola elektrycznego ujemnie naładowane cząstki przesuwają się w kierunku uziemionej elektrody zbiorczej. Po osiągnięciu powierzchni tej elektrody cząstki oddają pozyskany ładunek elektryczny i pozostają na niej do chwili, gdy bądź to wskutek działania siły ciężkości, bądź to w skutek strzepania zostaną stamtąd usunięte do lejów zsypanych umieszczonych w dolnej części elektrofiltru. Oczyszczony gaz uchodzi z komory. Opisany sposób działania odpylacza elektrostatycznego jest schematyczny. W rzeczywistości mechanizm działania tego urządzenia jest znacznie bardziej skomplikowany wskutek wielu zjawisk ubocznych występujących podczas ich eksploatacji.

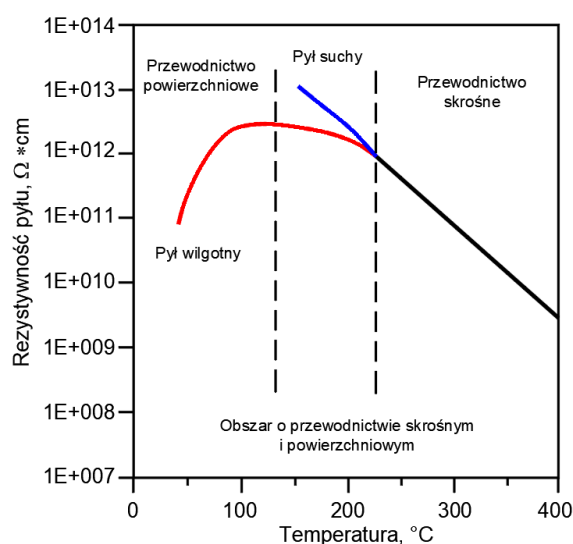


Rys. 4. Zasada jonizacji i odpylania gazu [58]

## 5.2. Warunki pracy elektrofiltru

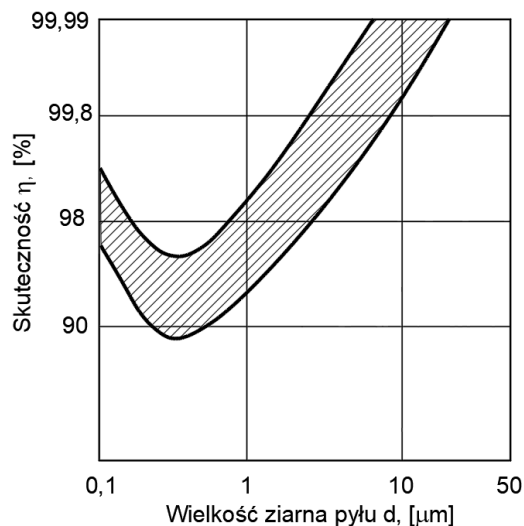
Elektrofiltr jest urządzeniem projektowanym indywidualnie do odpylania specyficznych dla danego źródła pylenia gazów. W związku z powyższym, zmiany poszczególnych parametrów ośrodka gazowo-pyłowego mogą mieć znaczny wpływ na skuteczność jego działania. Stężenie zapylenia gazów za elektrofiltrem jest bezpośrednio związane ze stężeniem zapylenia gazów dolotowych. W przypadku kotła zmiany parametrów paliwa powodują zmiany stężenia zapylenia gazów dolotowych, podobnie zmiany składu chemicznego paliwa i jego substancji mineralnej, wilgotności oraz nadmiaru powietrza w procesie spalania zmieniają wartość rezystywności pyłu, która w sposób istotny wpływa na skuteczność odpylania elektrofiltru. Rezystywność, inaczej opór elektryczny właściwy, charakteryzuje w sposób ilościowy zdolność materiału cząstki pyłu do przewodzenia prądu elektrycznego. Wielkość ta jest określona przez dwa mechanizmy: przewodność skrośną, która jest cechą materiałową cząstki, oraz przewodność powierzchniową, która zależy nie tylko od rodzaju materiału, ale również od reaktywności powierzchni i składników gazu [67].

Na rys. 5 pokazano typową zależność rezystywności pyłu od temperatury spalin. Rezystywność pyłu suchego zależy niemal wyłącznie od rezystywności ziaren i osiąga bardzo duże wartości w niskich temperaturach, a maleje wraz ze wzrostem temperatury. Niewielki wzrost wilgotności pyłu zmienia ten przebieg w istotny sposób. Pył wilgotny posiada w niskich temperaturach małą rezystywność z powodu znacznego przewodnictwa powierzchniowego prądu, zależnego od ilości wody zaadsorbowanej na powierzchni ziaren. Ze wzrostem temperatury wilgotność pyłu maleje, co pociąga za sobą wzrost jego rezystywności – rys. 5, przy czym coraz większą rolę zaczyna odgrywać przewodnictwo skrośne.



Rys. 5. Przykładowe charakterystyki zmian oporności właściwej pyłu dla różnych temperatur i wilgotności dla pyłu suchego i wilgotnego [34, 67]

Krytycznym obszarem odpylania dla pyłów wilgotnych jest temperatura w zakresie  $100\div 200^{\circ}\text{C}$ , w której występuje wyraźne maksimum rezystywności. W temperaturze powyżej  $200^{\circ}\text{C}$  o rezystywności decyduje już tylko przewodnictwo skrośne pyłu [34, 67]. Zmiany parametrów charakterystycznych pyłu tj. rozmiaru jego cząstek mogą być skutkiem zmian parametrów procesu spalania w kotle. Użytkownik elektrofiltru ma ograniczone możliwości wpływania na tego typu zmiany, ale powinien zdawać sobie sprawę z ich wpływu na skuteczność odpylania elektrofiltru. Na rys. 6 przedstawiono wpływ ziarnistości pyłu na skuteczność elektrofiltru.



Rys. 6. Wpływ ziarnistości pyłu na skuteczność elektrofiltru [148]

Znaczenie wielkości ziaren pyłu w procesie jego wytrącania w elektrofiltrze jest dwojakie [133, 148, 171]: wielkość ziarna pyłu wpływa na mechanizm jego ładowania (dyfuzyjny, zderzeniowy), a w konsekwencji na wielkość ładunku elektrycznego i wydajność odpylania; z wielkością ziarna pyłu związany jest proces adhezji warstwy pyłu do elektrody zbiorczej oraz „upakowanie” (porowatość) warstwy pyłu na elektrodzie.

Pyły drobne ( $<1 \mu\text{m}$ ) wykazują dużą zdolność adhezyjną do elektrody zbiorczej i tworzą warstwę o dużej porowatości. Zjawiska te powodują utrudniony proces regeneracji elektrod. W odpylaniu gazów pochodzących ze spalania węgla kamiennego w kotłach energetycznych występują pyły polidispersyjne. Drobne pyły ( $<1 \mu\text{m}$ ) są rezultatem kondensacji par np. metali alkalicznych (Li, Na, K). Pary te kondensują częściowo na powierzchni dużych ziaren pyłu, które są substancją mineralną zawartą w węglu. Powstała część występuje w rozdrobnionej formie podmikronowej i wchodzi w reakcje z innymi pyłami np. krzemionką tworząc krzemiany sodu, ściśle przylegając do powierzchni elektrody. Do ich usunięcia wymagane są przyspieszenia na powierzchni płyt elektrod powyżej  $100 \text{ g}$  [148].

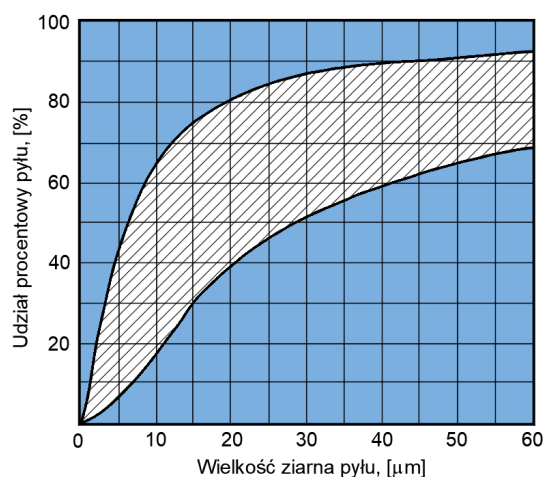
Osiągnięcie i utrzymanie optymalnej skuteczności odpylania elektrofiltru wymaga zachowania następujących warunków:

- utrzymania w pełnej sprawności wyposażenia wewnętrznego tj. zachowania równomiernej podziałki międzyelektrodowej, prawidłowej pracy strzepowaczy oraz zachowania stanu technicznego części mechanicznej odpylacza zgodnie z zaleceniami producenta;

- realizowania zgodnie z zaleceniami karty nastaw urządzenia cykli pracy strzepywaczy, monitorowania oraz optymalizacji pracy tego podzespołu;
- regularnego odprowadzania wytrąconego pyłu z lejów tak, aby nie przekraczać poziomu wyznaczonego przez zainstalowane czujniki zapylenia lejów zsypanych (tzw. praca „przy pustym leju”) z jednoczesnym wyeliminowaniem zasysania powietrza do wnętrza leja;
- utrzymania szczelności komory elektrofiltru, w szczególności wszystkich włączów i poszycia dachowego z jednoczesnym zachowaniem drożności systemów przewietrzania izolatorów wysokiego napięcia;
- utrzymania termoizolacji w dobrym stanie technicznym;
- zapewnienia takich warunków pracy elektrofiltru przy których nie są przekroczone projektowe parametry spalin (ciśnienie projektowe i temperatura spalin na wlocie do elektrofiltru);
- zasilania energią elektryczną wysokiego napięcia wszystkich pól elektrofiltru;
- poprawnej pracy wszystkich zespołów zasilających wysokiego napięcia z jego automatyczną regulacją tak, aby zapewnić pracę zespołów na najwyższym możliwym do uzyskania poziomie napięcia przy znamionowym prądzie obciążenia bez przeskoków (tak, aby zespół pracował na swoich optymalnych parametrach);
- prawidłowej i zgodnej z zaleceniami producenta eksploatacją urządzeń pomocniczych, takich jak: ogrzewanie izolatorów wysokiego napięcia, ogrzewanie izolatorów obrotowych, systemu przedmuchiwanie izolatorów.

### Koncentracja i skład frakcyjny pyłów

Jednym z podstawowych czynników wpływających na proces odpylania we wszystkich odpylaczach jest rozkład ziarnowy pyłu. Dobór odpowiedniego typu odpylacza przeprowadzany jest głównie w zależności od charakterystyki pyłu, który ma być strącony. Przy projektowaniu elektrofiltrów bierze się pod uwagę nie tylko stężenie pyłów w gazach, ale również z uwagi na selektywność elektrofiltru w zakresie odpylania najdrobniejszych frakcji pyłowych, ich skład frakcyjny i chemiczny. Typowy zakres spotykanych składów frakcyjnych pyłów z węgla kamiennego spalane go w kotłach pyłowych przedstawia rys. 7.



Rys. 7. Zakres spotykanych składów frakcyjnych pyłów z węgla kamiennego spalane go w kotłach pyłowych [100]

Z punktu widzenia pracy elektrofiltru korzystnym jest, aby ziarna pyłu wchodzące do komory elektrofiltru miały względnie duże ziarno, ponieważ skuteczność odpylania szybko rośnie wraz z wzrostem ziarna. Korzystnym jest również, gdy rozkład wymiarów ziaren jest stosunkowo szeroki. Potwierdzają to doświadczenia eksploatacyjne, a wynika to z korzystniejszych warunków do koagulacji pyłu. Często obserwuje się duże aglomeraty pyłu złożone z grubych ziaren oblepionych bardzo drobnymi [11, 138].

### **Prędkość przepływu**

Sprawność elektrofiltru zależna jest od prędkości przepływu gazu przez elektrofiltr. Ze wzrostem ilości przepływającego przez elektrofiltr gazu sprawność jego zmniejsza się, natomiast, gdy ilość przepływającego gazu maleje sprawność elektrofiltru wzrasta. Stosowane w elektrofiltrach praktyczne prędkości przepływu wynoszą poniżej 2 m/s – średnio ok. 1 m/s, zależnie od rodzaju układu gazowo-pyłowego i żądanej skuteczności odpylania. Dla różnych rodzajów spalin (z węgla kamiennego, węgla brunatnego, spalanie odpadów, hutnictwo) projektuje się różne prędkości przepływu spalin. Prędkość przepływu gazu musi być mniejsza od prędkości porywanego pyłu [64]. Istnieją dwa poglądy na modelowanie pola prędkości gazu w komorze elektrofiltru.

Do lat 90-tych był rozpowszechniany pogląd, że rozkład gazu w przekroju poprzecznym komory powinien być maksymalnie wyrównany. Im jest on bardziej wyrównany, tym wyższą uzyskuje się skuteczność odpylania. W praktyce za równomierny uważa się taki przepływ, w którym różnice prędkości w poszczególnych punktach przekroju pola elektrycznego nie przekraczają 10÷20%, przy spadku ciśnienia w elektrofiltrze 100÷300 Pa [64].

W latach 90-tych zapoczątkowano badania nad wpływem skośnego rozkładu prędkości gazu w komorze elektrofiltru na skuteczność odpylania. Na rynku krajowym badania takie realizowała m.in. Fabryka Elektrofiltrów Elwo S. A. Badania wykazały, że odpowiednio nierównomierne uformowane pole prędkości przepływającego gazu podwyższa skuteczność odpylania w stosunku do wyrównanych rozkładów prędkości gazu. Do chwili obecnej zagadnienie to jest przedmiotem badań teoretycznych i doświadczalnych wielu podmiotów z branży energetycznej, jak również jednostek naukowych dysponujących systemami komputerowymi do analiz numerycznych CFD (Computer Fluid Dynamics) [137]. Bazując na opiniach praktyków z tej dziedziny można wnioskować, że równomierny rozkład strumienia spalin w przekroju poprzecznym komory odpylacza jest na chwilę obecną częściej uwzględniany w założeniach projektowych [100]. W konsekwencji w większości instalacji krajowych stosuje się właśnie taki model przepływu spalin.

### **Oporność elektryczna**

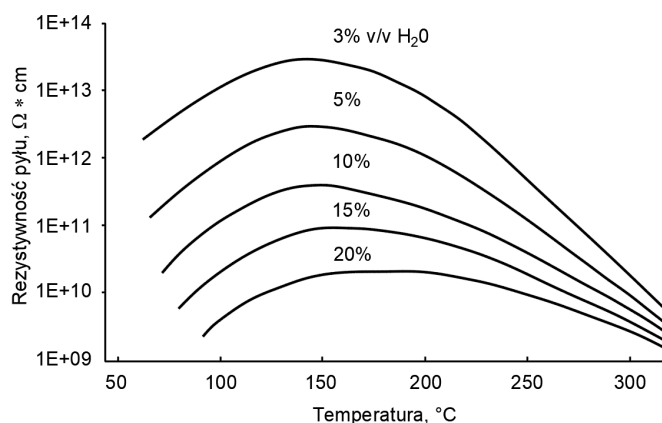
Oporność elektryczna pyłu wywiera duży wpływ na przebieg procesu odpylania w elektrofiltrze. Wysoka oporność elektryczna pyłu powoduje dławienie ulotu elektrody i wpływa bardzo niekorzystnie na gęstość prądu w elektrofiltrze, powodując ulot wsteczny i obniżenie skuteczności odpylania. Korzystny w procesie odpylania elektrostatycznego zakres oporności właściwej pyłu mieści się w granicach od  $10^8$  do  $10^{12}$  Wcm. Pyły o niższej i wyższej oporności właściwej nastroczą przy odpylaniu trudności [37, 100].



## Temperatura i wilgotność

Temperatura gazu jest z wielu względów istotna dla konstrukcji i pracy elektrofiltru. Od temperatury zależą materiały użyte do jego budowy. Do temperatury ok. 400<sup>0</sup>C używa się zwykłej stali węglowej zarówno na obudowę i wyposażenie wewnętrzne. Przy temperaturze rzędu 500<sup>0</sup>C dobiera się gatunki stali nierdzewnej lub stopowej. Wyższe temperatury wymagają zastosowania stopów wysokoniklowych. Na etapie doboru i projektowania elektrofiltru należy zwrócić uwagę na zróżnicowaną rozszerzalność cieplną, szczególnie w przypadku obiektów zaprojektowanych do pracy w wysokich temperaturach. Dotyczy to gazów odpylanych w energetyce i metalurgii metali kolorowych. Nieuwzględnienie powyższej informacji może prowadzić do powstania odkształceń termicznych poszczególnych podzespołów i w konsekwencji do obniżenia skuteczności odpylania [104]. Błędem projektowym może być również nie uwzględnienie problemu udarności czy też podatności do spawania stosowanych gatunków stali. W niskich temperaturach (poniżej kwaśnego punktu rosy) konieczne jest oszacowanie zagrożenia wystąpienia zjawiska korozji, aby zapewnić urządzeniu rozsądną ekonomicznie dyspozycyjność.

Innym czynnikiem wynikającym z temperatury i mającym wpływ na parametry elektryczne, a tym samym na skuteczność odpylania jest fakt, że wraz ze wzrostem temperatury dochodzi do wzrostu energii kinetycznej cząstek gazu co skutkuje wzrostem natężenia prądu ulotu, ale kosztem zredukowanego napięcia przebicia [118]. W wielu przypadkach konieczne staje się zredukowanie temperatury poprzez wprowadzenie wody do strumienia odpylanego gazu, aby w ten sposób zmniejszyć oporność elektryczną popiołu do poziomu w którym zjawisko jonizacji wstecznej ulegnie osłabieniu [118]. Na rys. 8 przedstawiono typową rezystywność popiołu dla różnej zawartości wilgoci w gazie w pewnym zakresie temperatur.



Rys. 8. Zmiana rezystywności popiołu lotnego wraz ze zmianą temperatury gazu i jego wilgotności [118]

Z rys. 8 wynika, że wzrost wilgotności silnie wpływa na obniżenie rezystywności popiołu. W wyższych temperaturach krzywe zbliżają się do siebie, natomiast w niższych wpływ wilgotności na rezystywność popiołu jest bardzo widoczny. Wilgotność gazu w połączeniu z zawartością siarki w paliwie powoduje bardzo silny wzrost sił adhezji i kohezji. Objawia się to nadmiernym obrastaniem elektrod elektrofiltru. Zjawisko to jest najbardziej zauważalne w ostatnich strefach odpylania [12].

### 5.3 Obudowa i wyposażenie komory elektrofiltru

Zasadniczymi częściami składowymi elektrofiltru są: obudowa (komora), wyposażenie komory oraz elektryczny zespół zasilający. Poniżej przedstawiono krótki opis poszczególnych podzespołów mechanicznych elektrofiltru. Elektrodom zbiorczym poświęcono osobny podrozdział. Obudowa (komora) wykonana jest ze stali i posadowiona na konstrukcji wsporczej poprzez system łożysk stałych, kierunkowych i swobodnych umożliwiających jej przemieszczanie (kompensację) po rozszerzeniu pod wpływem zmian temperatury. Wyposażenie komory elektrofiltru zależy od jego typu. W elektrofiltrach typu suchego wyposażenie komory elektrofiltru stanowią: zespół elektrod ulotowych, zespół elektrod zbiorczych, zawieszenie elektrod, strzepywacze elektrod zbiorczych i ulotowych, oraz napęd strzepywaczy. W górnej części komory mieszczą się izolatory wysokiego napięcia, dolna część wyposażona jest w jeden lub kilka lejów zbiorczych.

Od projektu komory zależy w dużym stopniu efekt odpylania i cena urządzenia. Projektant musi zdecydować o: liczbie stref w komorze; stosunku wysokości  $H$  do długości komory  $L$  (geometria komory); podziałce międzyelektrodowej; powierzchni osadczącej elektrod zbiorczych; prędkości przepływu strumienia zapyłonego gazu; sposobie regeneracji elektrod zbiorczych i ulotowych. Dobór stosunku długości  $L$  komory do jej wysokości  $H$  jest wynikiem kompromisu. Zależy przed wszystkim od charakterystyki odpylanego gazu. Konstruktorzy często bazują na danych archiwalnych zaczerpniętych z innych projektów. Według [146] dla małych i średnich elektrofiltrów stosunek  $L/H$  przyjmuje się około 1, dla dużych elektrofiltrów stosunek ten wynosi około 1,2. Z uwagi na rozkład przyspieszeń drgań mechanicznych na powierzchniach płyt elektrod zbiorczych i wtórny unos pyłu, wysokość pola nie powinna przekraczać 15 m. Współcześnie budowane duże elektrofiltry posiadają wysokość komory ok. 17 m i długość strefy ok. 5 m.

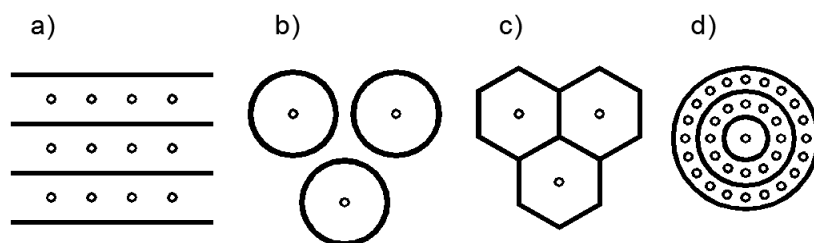
Leje zsypowe o kształcie ostrosłupa, podwieszane do dolnej części komory pełnią rolę zsypu dla pyłu wytrąconego w elektrofiltrze, odprowadzanego dalej przez instalację odpopielania. Wypad pyłu do lejów zbiorczych (w poszczególnych strefach elektrofiltru) nie jest jednakowy. W pierwszej strefie wynosi średnio ok. 90% wag. W każdej strefie elektrofiltru wytrąca się ok. 90% wag. pyłu przenieszonego przez gaz do danej strefy. Przy cykliczności strzepywania elektrod zbiorczych rzędu kilku cykli na godzinę, w krótkim czasie (2-3 minut) spada do leja pierwszej strefy pył o objętości 1–2 m<sup>3</sup> [33-34]. Leje podobnie jak inne elementy elektrofiltru wykonane są z prefabrykowanych elementów stalowych montowanych i spawanych w całości na miejscu budowy. Leje posiadają wewnątrz przegrody utrudniające przepływ spalin przez lej poniżej układu elektrod, co ogranicza wtórne porywanie wytrąconego już pyłu. Instalacja ogrzewania lejów ma za zadanie niedopuszczenie do nadmiernego obniżenia temperatury zebranego w lejach popiołu. Popiół o zbyt niskiej temperaturze (<70<sup>0</sup>C) zalegający w lejach ma tendencję do zbrylania się i zawieszania na ścianach leja co w konsekwencji utrudnia jego odprowadzenie przez system odpopielania [33-34].

Przewody dolotowe i wylotowe (konfuzor, dyfuzor) wyposażone są w elementy kierująco-dławiące złożone z szeregu łopatek kierujących oraz perforowanych płyt wyrównawczych w celu zapewnienia równomiernego rozkładu prędkości przepływu zapyłonego gazu na wlocie do elektrofiltru. Jako elementy wyrównujące przepływ gazu występują sita jedno lub wielorzędowe lub tzw. żaluzje z regulowaną wielkością okna.

Przewody wylotowe w kształcie konfuzorów eliminują stosowanie progów zaporowych bądź innych elementów wyrównawczych przepływu na wylocie gazu z elektrofiltru. Współcześnie konstrukcja przewodów dolotowych i elementów kierująco-wyrównawczych projektowana jest na podstawie symulacji numerycznych indywidualnie dla każdego elektrofiltru.

Izolacja termiczna jest istotnym elementem gwarantującym prawidłowe warunki pracy elektrofiltru stanowiącym osłonę przed wpływem warunków atmosferycznych. Izolację wykonuje się na wszystkich zewnętrznych powierzchniach elektrofiltru, a jej rodzaj uzależniony jest od temperatury przepływającego gazu, jego kwasowego punktu rosy oraz otoczenia. Jakość i staranność wykonania izolacji wpływa w dużej mierze na żywotność elektrofiltru i stabilność jego pracy. Zazwyczaj termoizolacja wykonana jest z wełny mineralnej, okryta płaszczem z blachy stalowej trapezowej ocynkowanej o grubości 0,75 mm, powlekanej jednostronnie lakierem poliestrowym.

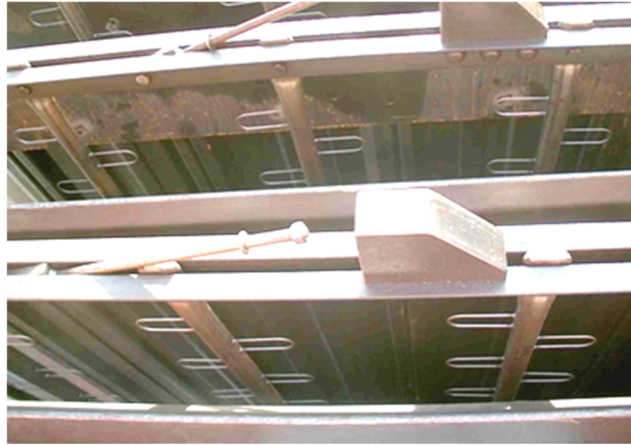
Układ elektrod ulotowych i zbiorczych stanowi jeden z najważniejszych podzespołów wyposażenia wewnętrznego komory elektrofiltru. W zależności od wzajemnego usytuowania elektrod rozróżniamy następujące układy elektrod: płaski, współśrodkowy, rurowy lub plastrowy – rys. 9. Szerokie zastosowanie zyskał tzw. układ płaski (rys. 10-11), który może być stosowany przy zarówno poziomym jak i pionowym przepływie gazu przez komorę elektrofiltru, natomiast pozostałe układy stosowane są tylko w elektrofiltrach pionowych [68, 117-118, 133]. **Najczęściej w sektorze energetycznym stosowane są elektrofiltry suche, poziome z płaskim układem elektrod – rys. 10-11.**



Rys. 9. Układy elektrod w elektrofiltrze: a) płaski, b) rurowy, c) plastrowy, d) współśrodkowy [68]



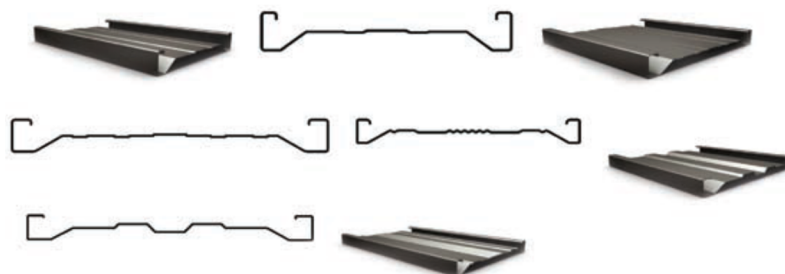
Rys. 10. Płaski układ elektrod (elektroda zbiorcza typu Sigma i elektroda ulotowa ramowa taśmowa) [10]



Rys. 11. Płaski układ elektrod (elektroda zbiorcza typu Sigma i elektroda ulotowa typ U) [10]

Elektrody zbiorcze obok elektrod ulotowych są najważniejszymi elementami elektrofiltru. Na rynku krajowym i zagranicznym dostępnych jest wiele odmian elektrod zbiorczych i ulotowych. Elektrody zbiorcze służą do zgromadzenia wytrąconego z aerozoli pyłu, a następnie drogą wzbudzenia w nich drgań (tzw. strzepywania), pył ten jest usuwany, wpada do leji zbiorczych. Wzbudzenie drgań następuje przez uderzenie młotka przerzutowego osiowo w belkę wzbudzającą. Elektroda zbiorcza musi mieć wysoką zdolność zbiorczą w każdych warunkach ruchowych. Główni producenci urządzeń odpylających stosują profilowane elektrody zbiorcze typu Sigma – rys. 12. Taki kształt profilu elektrody osadczą łączy w sobie podstawowe zalety: dużą sztywność i sprężystość, zapewniające efektywne strzepywanie, korzystną charakterystykę dynamiczną, ograniczenie wtórnego pylenia, korzystne przestrzenie chwytne przeszkadzające w porywaniu już oddzielonego pyłu.

Elektrody zbiorcze typu Sigma zawieszane są w górnej belce nośnej, gdzie mają ograniczoną możliwość skręcenia. Sztywno połączone z drągiem strzepującym za pomocą specjalnych łączników, elektrody osadczą typu Sigma, umożliwiają osiągnięcie podczas strzepywania przyspieszeń rzędu 100÷140 g. Skuteczność wyłapywania pyłów przez elektrody zbiorcze, łatwość ich oczyszczania z pyłu zależą nie tylko od kształtu elektrody, ale także od materiału z którego jest wykonana [36-37, 68, 100, 171].



Rys. 12. Elektroda zbiorcza typu Sigma [100]

Odpowiednio dobrany rodzaj elektrody ulotowej ułatwia w znacznym stopniu powstanie zjawiska ulotu, a tym samym emisję wolnych elektronów. Przy rozwiązaniach konstrukcyjnych elektrod ulotowych uwzględnia się szczególnie wpływ temperatury, korozji oraz zmęczenia materiałowego wskutek strzepywania pyłów. Charakterystyka prądowo – napięciowa elektrofiltru zależy w głównej mierze od kształtu elektrod emitujących.

Różnego typu elektrody charakteryzują się różnym natężeniem prądu ulotu, a więc i gęstością prądu w polu elektrostatycznym dla identycznego napięcia zasilającego [65-66]. Najpopularniejszym rozwiązaniem, które występują w krajowych i zagranicznych instalacjach jest konstrukcja elektrody ulotowej w postaci cienkościennej rury z przyspawanymi elementami emisyjnymi w postaci prętów o małej średnicy tzw. elektroda „gwoździowa”, nazywana w literaturze RDE – rys. 13. Na rynku występują ponadto elektrody ulotowe z elementami emisyjnymi w postaci drutu ukształtowanego w sprężynę, zamocowane w specjalnej konstrukcji ramowej – rys. 13.



Rys. 13. Różne typy elektrod ulotowych w postaci cienkościennej rury z elementami emitującymi w postaci prętów oraz elektroda ulotowa w postaci drutu ukształtowanego w sprężynę – produkcja EWES [76, 96]

Przed wprowadzeniem na rynek powyższego rozwiązania konstrukcyjnego powszechnie stosowane były elektrody ulotowe ostrzowe w postaci taśmy umiejscowionej w ramie napinającej (rys. 14). Z uwagi na problem pęknięcia taśmy ostrzowej, która zwisając stykała się z elektrodą zbiorczą, powodując zwarcie układu danej strefy, zastąpiono to rozwiązanie znacznie prostszą konstrukcją. Elektrody ulotowe w postaci rury z elementami emisyjnymi pozwalają na łatwe kształtowanie charakterystyki prądowo – napięciowej poprzez zmianę rozstawu i kształtu elementów emisyjnych na rurze.



Rys. 14. Elektroda ulotowa w postaci taśmy kolczastej zamocowanej w ramie – efekt uszkodzenia (zerwania taśmy) [10]

Elektrody te cechują się dużą trwałością, wysokim poziomem gęstości prądu ulotu oraz korzystnymi właściwościami w przypadku pojawienia się zjawiska wtórnego ulotu. W elektrofiltrze wielopolowym stosowane są zwykle dwa lub więcej typów elektrod emitujących. W pierwszej strefie stosuje się mniejszą podziałkę międzyelektrodową oraz elektrody wytwarzające znaczne gęstości prądu w komorze. W kolejnych strefach, wraz ze zmniejszeniem się ilości pyłu w komorze, stosuje się elektrody o małym spływie prądu i większej podziałce międzyelektrodowej. Odnotowano przypadki wyposażania elektrofiltrów w ten sam rodzaj elektrod emitujących bez zwracania uwagi na podziałkę międzyelektrodową i własności ośrodka pyłowo – gazowego.

#### **5.4 Elektryczny zespół zasilający i sterowanie**

Głównym zadaniem elektrycznego układu zasilania elektrofiltru energią wysokiego napięcia jest dostarczenie do elektrod ulotowych elektrofiltru energii elektrycznej niezbędnej do wywołania zjawiska wyładowania ulotowego (koronowego) oraz do wytwarzania silnego pola elektrycznego. W tym celu stosuje się elektryczne zespoły zasilające które składają się z dwóch części: zespołu transformatorowo-prostownikowego (T/P) oraz szafy zasilająca – sterowniczej zawierającej elementy zabezpieczeń, pomiaru, sterowania i regulacji. Zespoły zasilające stawiane są na dachu elektrofiltru lub w osobnym pomieszczeniu.

Regulacja wysokiego napięcia realizowana jest poprzez zastosowanie systemów mikroprocesorowych. Idea regulacji wysokiego napięcia polega na ciągłym utrzymywaniu napięcia przyłożonego pomiędzy elektrodą ulotową, a zbiorczą na poziomie możliwie najbliższym wartości granicznej, której przekroczenie powoduje lawinowe przebicie przestrzeni między elektrodami. Wartość ta zależy przede wszystkim od parametrów fizyko-chemicznych odpylanego medium, konstrukcji elektrofiltru oraz innych losowo-zmiennych zjawisk. Sposób wyznaczenia tej wartości polega na ciągłym jej kontrolowaniu poprzez automatyczne podnoszenie napięcia do poziomu powodującego wystąpienie pojedynczego przeskoku i w razie jego wykrycia obniżenie napięcia na czas dejonizacji przestrzeni międzyelektrodowej (co ma nie dopuścić do przebicia lawinowego i w konsekwencji do zwarcia łukowego) oraz ponowne stopniowe podnoszenie jego wartości. W ten sposób poziom wysokiego napięcia cały czas oscyluje w pobliżu wartości granicznej [37]. Konstrukcja wielostrefowa elektrofiltru umożliwia wyposażenie poszczególnych stref odpylania w odrębne zespoły zasilające. Przy odrębnym zasilaniu poszczególnych stref odpylania, wysokość napięcia zasilającego można w kolejnych strefach lepiej dostosować do występujących w nich warunków gazowo-pyłowych i tym samym uzyskać wyższą skuteczność odpylania niż przy zasilaniu całego elektrofiltru z jednego źródła wysokiego napięcia.

W rozwiązaniu konstrukcyjnym elektrofiltru możliwy jest podział elektryczny i mechaniczny strefy odpylania na dwie niezależne krótkie strefy. Podział elektrofiltru na większą liczbę niezależnie zasilanych obszarów odpylania, bliżej odwzorowuje rzeczywistą wartość napięcia przebicia, co w konsekwencji pozwala na osiągnięcie większej skuteczności odpylania [33-34, 136]. Każdy elektrofiltr wyposażony jest standardowo w instalacje zasilania i sterowania systemem strzepywaczy elektrod zbiorczych, ulotowych oraz strzepywaczy elementów kierująco-dławiących (opcjonalnie); instalację ogrzewania izolatorów zawieszeniowych i obrotowych; instalację ogrzewania lejów zsypanych; system kontroli pyłu w lejach; instalacje zasilania i sterowania systemem strzepywania ścinek lejów (gdy jest to

konieczne do prawidłowego odprowadzania pyłu); dodatkowa aparatura pomiarowa na kanałach spalin, dodatkowe napędy elektryczne związane z instalacją odprowadzania popiołu, przepustnice odcinająco-regulacyjne na kanałach spalin; system blokad – „Key Interlock System”. Lokalne systemy nadrzędnego sterowania pracą elektrofiltrów (zwane często jako systemy PLC elektrofiltrów), komputerowe systemy zdalnego sterowania, wizualizacji, archiwizacji i optymalizacji pracy elektrofiltrów zostały szerzej omówione w rozdziale 6.2.

### 5.5 Znaczenie składu gazu oraz jego możliwy wpływ na skuteczność elektrofiltru

Na etapie doboru elektrofiltru istotne znaczenie dla zespołu projektowego mają dane (parametry gwarantowane) dostarczone przez zamawiającego, takie jak: natężenie przepływu spalin, temperatura spalin, parametry fizyko-chemiczne spalin na wlocie do elektrofiltru, charakterystyka sprężonego powietrza, warunki klimatyczne, pożądane stężenie pyłu na wylocie z odpylacza. Skład chemiczny gazu ma decydujący wpływ na powstawanie i stabilny przepływ ładunków w elektrofiltrze.

Poniżej przedstawiono podział gazów (spalin) przyjmując jako kryterium ich zdolność do jonizacji cząstek gazu [62]:

- a) gazy elektryczniejemne (chlor, tlen, dwutlenek siarki) – charakteryzują się silnym powinowactwem do wytwarzania jonów ujemnych;
- b) gazy elektrododatnie (azot, wodór, argon) – posiadają słabe powinowactwo do wytwarzania jonów ujemnych.

Skład chemiczny pyłu oraz wydajność elektrofiltru związane są z opornością elektryczną wytrąconego w elektrofiltrze materiału. Opór elektryczny wytrąconych w elektrofiltrze cząstek może spowodować aż czterokrotną lub nawet większą różnicę w czasie przebywania cząstek w obszarze pola elektrycznego [117-118]. Na podstawie danych literaturowych można przyjąć następujący podział pyłów wg ich oporności właściwej (rezystywności) [67, 117-118]:

- a) pyły wysokorezystywne  $r > 10^{12}$  Wcm. Zachodzi zjawisko jonizacji wstecznej (ulot wsteczny) powodując znaczne obniżenie skuteczności odpylania. Jest ono ściśle związane z ze zmianami parametrów referencyjnych paliwa (węgli), jak również podejmowania przez elektrownie działań w kierunku obniżenia emisji dwutlenku siarki do atmosfery poprzez spalanie węgla o niskiej zawartości siarki lub dodawanie do komór spalania suchych sorbentów wapiennych [116];
- b) pyły o dobrej rezystywności do odpylania  $r = 10^8 \div 10^{12}$  Wcm. Wyróżniają się dobrą kohezją i małym unosem wtórnym (gazy o wilgotność powyżej 10%);
- c) pyły niskorezystywne  $r < 10^8$  Wcm. Pyły takie cechuje względnie łatwe ładowanie prądem ulotu, jednak po dotarciu do powierzchni elektrody szybko oddają ładunek i zostają odepchnięte w stronę strumienia gazu.

Obniżenie rezystywności pyłu z  $10^{12}$  do  $10^{11}$  Wcm podnosi skuteczność elektrofiltru w stopniu odpowiadającym obniżeniu emisji pyłu o 90%. Osiągnięcie tego samego efektu przez zwiększenie jednostkowej powierzchni osadczącej (SCA) wymagałoby dwu-do trzy krotnego wzrostu powierzchni elektrod zbiorczych [39].

Duże trudności w czasie eksploatacji elektrofiltrów nastęrczają technologie i paliwa, takie jak: spalanie węgla o dużej zawartości glinokrzemianów, odpylanie spalin z kotłów wielopaliwowych, spalających gazy i substancje odpadowe, a także odpylanie spalin z hutniczych taśm spiekalniczych i w hutnictwie metali nieżelaznych. Pyły energetyczne składają się głównie z glinokrzemianów o ziarnistości powyżej 5  $\mu\text{m}$ , podczas gdy pyły z taśm spiekalniczych (Huta Katowice) stanowią wysokie tlenki żelaza ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) o własnościach polarnych i ziarnistości  $d \leq 1 \mu\text{m}$  (powyżej 85%).

Z badań przeprowadzonych w opracowaniu [147] wynika, że charakterystyka fizykochemiczna pyłów z taśm spiekalniczych Huty Katowice w sposób istotny różni się od pyłów pochodzących z kotłów energetycznych opalanych węglem, stąd nie można bezpośrednio przenosić elektrofiltrów z energetyki do odpylania spalin z taśm spiekalniczych rud żelaza. W Polsce w elektrowniach i elektrociepłowniach spalane są trzy rodzaje węgla energetycznych [11, 14-15, 145, 149]: kamienny z zagłębia górnośląskiego i lubelskiego oraz brunatny.

### **Węgiel kamienny**

W pracy [14] przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych węgla pochodzących z kopalni: Bogdanka, Mysłowice i Ziemowit. Energetyczne parametry handlowe węgla z zagłębia górnośląskiego i lubelskiego praktycznie się nie różnią. Posiadają one zbliżoną wartość opałową, zawartość popiołu, wilgotność i siarki. W skład substancji mineralnych z zagłębia górnośląskiego wchodzi twarde skały zawierające piaskowce, natomiast w węglu z zagłębia lubelskiego substancję mineralną stanowią łupki ilaste (głina), których charakterystyczną cechą jest zawartość drobnoziarnistych ilów. W wysokiej temperaturze (pow.  $500^\circ\text{C}$ ) ulegają wypaleniu, w wyniku czego, w niskich temperaturach (poniżej  $200^\circ\text{C}$ ) wykazują dużą zdolność higroskopijną absorbując wilgoć z otoczenia.

Z tego też względu odznaczają się dużą przyczepnością do elektrod zbiorczych. Badania składu ziarnowego i powierzchni właściwej pyłu opublikowane przez [145] wykazały, że pył z kopalni Bogdanka jest drobnoziarnisty (dla III strefy odpylania 50% ziaren jest poniżej  $3,5 \mu\text{m}$ ) i o stosunkowo dużej powierzchni właściwej (dla III strefy  $4,65 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Pyły o takiej charakterystyce cechuje duża zdolność sorbcyjna substancji gazowych (pary wodnej i siarki) co sprzyja agregacji pyłu i przyczepności do powierzchni. W eksploatacji elektrofiltrów zlokalizowanych wzdłuż wschodniej granicy Polski i opalanych węglem z zagłębia lubelskiego występuje problem oklejania się elektrod pyłem, uniemożliwiając często poprawną pracę zainstalowanych tam elektrofiltrów. Powstała warstwa pyłu przypomina tłustą, lepłą substancję mocno związaną z powierzchnią elektrody. Jedynym sposobem jej usunięcia jest zastosowanie strumienia wody. Taki zabieg powtarzany jest cyklicznie co 2 miesiące. Z opracowania [15] wynika, że nawet wartość przyspieszenia na powierzchni płyt elektrod rzędu 200 g nie gwarantuje prawidłowej regeneracji elektrod osadczych. Potwierdzają to doświadczenia pracowników działu serwisu byłej Fabryki Elektrofiltrów ELWO S.A., którzy podczas modernizacji bloków energetycznych w Elektrowni Kozienice, zmuszeni byli zmierzyć się z szeregiem trudności już po oddaniu elektrofiltrów do eksploatacji m.in. ponownym dobozem odpowiedniej siły uderzenia podczas oczyszczania elektrod. W celu poprawy skuteczności odpylania stosuje się mieszanki paliwowe złożone z węgla górnośląskiego 40% i lubelskiego 60% lub okresowe dodawanie do paliwa gruboziarnistego kamienia wapiennego. Praktykowane jest również przemienne stosowanie węgla z zagłębia lubelskiego i górnośląskiego [145]. Pył pochodzący ze spalania węgla górnośląskiego w którym zawartość



siarki wynosi ok. 1%, posiada rezystywność w temp. ok. 140<sup>0</sup>C na poziomie  $r \sim 10^{10}$  Wcm. Taki pył dobrze się wytrąca w polu elektrycznym i nie wymaga specjalnej konstrukcji odpylacza. Dla uzyskania wyższej skuteczności odpylania ok. 99% wystarczy elektrofiltr trójstrefowy o jednostkowej powierzchni osadczą SCA=60 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/s [144, 148].

Pył pochodzący ze spalania węgla niskozasiarczonego S<1%, charakteryzuje się rezystywnością na poziomie  $r \geq 10^{12}$  Wcm. W takim przypadku, aby uzyskać wydajność rzędu 90%, konieczne jest zastosowanie kondycjonowania spalin lub zasilania impulsowego. Inną charakterystyczną cechą węgla kamiennych jest zawartość sodu i siarki. Jeżeli suma tych pierwiastków zawarta w węglu (siarki) i w popiele (sód) jest większa od 2%, to pył osadzony na elektrodzie zbiorczej posiada rezystywność poniżej 10<sup>10</sup> Wcm. W takim przypadku nie ma trudności z uzyskaniem skuteczności powyżej 99% w elektrofiltrach 3-strefowych. Jeśli natomiast suma siarki i sodu jest mniejsza od 2%, pył wykazuje rezystywność powyżej 10<sup>11</sup> Wcm. Elektrofiltr do uzyskania skuteczności powyżej 99% wymaga wtedy modyfikacji w konstrukcji np. wprowadzenie czwartej strefy w elektrofiltrze i zastosowanie powiększonej podziałki międzyelektrodowej [149].

### **Węgiel brunatny**

Cechą charakterystyczną węgla brunatnego jest jego duże zawilgocenie wynoszące ok. 60%, stąd w spalinach jest dużo pary wodnej. Pył ze spalania węgla brunatnego łatwo wytrąca się w polu elektrycznym, a wilgotność w gazie sprzyja zjawisku kohezji. W efekcie tego, podczas strzepywania elektrod zbiorczych nie występuje zjawisko unosu wtórnego. Skuteczność odpylania w elektrofiltrach 3-strefowych wynosi powyżej 99%. Bezzasadne jest stosowanie w tym przypadku podziałki międzyelektrodowej większej niż 300 mm. Komora elektrofiltru powinna być dobrze izolowana temperaturowo z uwagi na silne zjawisko korozji chemicznej [144, 147-148, 171].

### **Biomasa i mieszanki paliwowe**

Biomasa jest uznawana za trzecie co do wielkości naturalne źródło energii. Zaliczane jest do odnawialnych źródeł energii (OZE). W Polsce współspalanie węgla z biomasa swój dynamiczny rozwój zawdzięcza wsparciu państwa. Zobowiązania Polski wobec uwarunkowań międzynarodowych i prawnych, związanych z corocznym wzrostem, a docelowo osiągnięciem w 2020 r. poziomu 20% zużycia energii elektrycznej wyprodukowanej ze spalania źródeł odnawialnych, przyczyniły się do różnego rodzaju rozwiązań mających na celu osiągnięcie wymaganych założeń [44]. Wykorzystanie potencjału energetycznego biomasy pozwala na oszczędzanie dostępnych zasobów paliw nieodnawialnych. Biomasa jako paliwo energetyczne spalana jest w różnej formie.

Najwygodniejszą do spalania formą biomasy w kotłach energetycznych są: zrębki oraz rozdrobniona biomasa (trociny lub wióry) najlepiej scalone w postaci peletów lub brykietów kulistych [44, 83]. Właściwości fizykochemiczne biomasy powodują, że jest ona paliwem trudnym technologicznie. W procesie spalania biomasy bilans emisji CO<sub>2</sub> jest zerowy, ponieważ tyle się go emituje do atmosfery ile rośliny pobierają w procesie fotosyntezy. Ze względu na znikomą ilość siarki w biomacie, zastępowanie nią węgla wpływa korzystnie na obniżenie tlenków siarki, znacznie redukując problem odsiarczania spalin.

Ponadto przy spalaniu mieszanek paliwowych obserwuje się zmniejszenie ilości SO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> w spalinach oraz zmniejszoną ilość części palnych w popiele. Niezwykle istotnym

z punktu widzenia procesu współspalania mieszanek paliwowych (węgiel-biomasa) jest sposób przygotowania stabilnej jakościowo mieszanki oraz eksploatacyjna adaptacja istniejących układów technologicznych do własności uzyskanej mieszanki. W praktyce eksploatacyjnej znane są przypadki, gdzie duże wahania parametrów referencyjnych paliwa (mieszanki) uniemożliwiały stabilną pracę elektrofiltru, powodując jednocześnie przekroczenie wymaganego poziomu zapylenia na wyjściu z elektrofiltru. Udział procentowy biomasy w mieszance paliwowej wynosi  $<10\%$ . Zmiana składu fizykochemicznego popiołu lotnego powstałego w efekcie współspalania biomasy i węgla znacząco wpływa na pracę elektrofiltru. Dotyczy to powstawania osadów na elementach kierująco dławiących, elektrodach emisyjnych i osadczych [40]. Do głównych ograniczeń biomasy można wyróżnić:

- szeroki przedział wilgotności zmieniający się w zależności od rodzaju biomasy i okresu sezonowania (10÷60%), powodujący trudności ze stabilizacją procesu spalania. Według danych zamieszczonych w pracy [83] najkorzystniejszy jest poziom wilgotności  $<30\%$ ;
- wysoka zawartość części lotnych, powodująca szybki i trudny do kontroli przebieg procesu spalania.

Pod względem energetycznym można w uproszczeniu przyjąć, że 2 tony biomasy są równoważne 1 tonie węgla kamiennego.

### **Paliwa olejowe**

Duże wyzwanie dla firm zajmujących się projektowaniem elektrofiltrów stanowią paliwa olejowe, zawierające dodatki metali ciężkich (kadm, wolfram). Pył ze spalania paliw olejowych w połączeniu z wilgocią tworzy silnie przywierającą, trudną do oczyszczenia „maź” na powierzchni elektrod osadczych. Często zachodzi konieczność zastosowania mechanizmów udarowych w systemie góra/dół sekcji elektrod zbiorczych lub też innych rozwiązań np. mechanizmu udarowego generującego podwójny udar. Są to inwestycje trudne, wymagające dogłębnej wiedzy z zakresu budowy i eksploatacji elektrofiltrów.

### **5.6 Usuwanie osadu pyłu z elektrod**

Prawidłowa regeneracja elektrod zbiorczych i ulotowych w elektrofiltrach jest podstawowym warunkiem uzyskania wysokiej skuteczności odpylenia. Znanych jest kilka sposobów oczyszczania elektrod w elektrofiltrach [173]: metoda elektromagnetyczna, pneumatyczna, akustyczna, spłukiwanie oraz strzepywanie mechaniczne. Najszersze zastosowanie w instalacjach krajowych i zagranicznych znalazła metoda strzepywania mechanicznego. Elektrofiltry w których zastosowano metodę strzepywania mechanicznego osiągają sprawność ok. 99,9%. Należy podkreślić, że metoda akustyczna jest jedną z metod konkurencyjnych dla tej metody. Największą zaletą trąbek akustycznych zainstalowanych na dachu elektrofiltru jest wyeliminowanie mechanicznych uszkodzeń podzespołów elektrofiltru. W wielu elektrofiltrach trąbki akustyczne pracują wraz ze strzepywaczami mechanicznymi redukując w ten sposób ich zużycie lub całkowicie zastępują stare mechanizmy udarowe. Trąbki akustyczne generują duże fale dźwiękowe o częstotliwości od 350 do 60 Hz w celu oczyszczenia powierzchni elektrod ze zgromadzonego pyłu. Czas działania fali dźwiękowej wynosi kilka sekund w określonych odstępach czasu [134, 173]. Najczęściej stosowanymi urządzeniami do wymuszania drgań mechanicznych są różnego typu mechanizmy udarowe z młotkami obrotowo-przerzutowymi, uderzającymi w kowadła drągów strzepujących połączonych z płatami elektrod zbiorczych.

Młotki strzepywaczy umieszczone są na wałach obrotowych napędzanych silnikami elektrycznymi umieszczonymi na bocznej ścianie komory elektrofiltru. Dzięki spiralnemu usytuowaniu poszczególnych bijaków na wale ( $15\div 20^\circ$ ) następuje kolejne strzepywanie poszczególnych sekcji elektrod (tzw. system mijankowy). Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala ograniczyć porywanie osadzonego pyłu na płytach elektrod osadczych do strumienia przepływającego gazu (zjawisko wtórnej emisji). Unos wtórny definiowany jest wg [15] jako stosunek całej masy pyłu która zostanie uniesiona w czasie regeneracji jednej sekcji do masy pyłu osadzonego na elektrodzie zbiorczej w okresie do wystąpienia impulsu strzepującego. Ilość osadzonego pyłu na elektrodach zmienia się wzdłuż długości komory elektrofiltru. W pierwszej strefie elektrofiltru wytrącane są cząstki większe około 90% pyłu ze strumienia gazu, natomiast w dalszych pył drobnziarnisty silnie trzymający się do powierzchni elektrod – ziarna około i poniżej 1  $\mu\text{m}$ . Dla średniej wielkości elektrofiltru III-strefowego, odpylającego spaliny z kotłów energetycznych, średnie prędkości narastania warstwy pyłu na elektrodach zbiorczych wynoszą odpowiednio: I strefa – 1 mm/h, II strefa 0,25 mm/h, III strefa 0,02 mm/h. W związku z tym, intensywność strzepywania ulega zmniejszeniu od stref wejściowych w stronę stref wyjściowych. Optymalny okres oczyszczania tej samej elektrody zbiorczej nie może być mniejszy od czasu potrzebnego do osadzania odpowiedniej ilości pyłu na tej elektrodzie dla utworzenia masy skoagulowanego pyłu [15].

W praktyce eksploatacyjnej cykle strzepywania dla poszczególnych stref elektrofiltru ustala się doświadczalnie w fazie ruchu próbnego elektrofiltru. Ostateczne nastawy należy skorygować na drodze optymalizacji urządzenia. Rozróżnia się dwa podstawowe systemy strzepywania: ciągły (sekundowy) i okresowy. System ciągły polega na ciągłym obrocie wału napędowego z młotkami obrotowo-przerzutowymi czego konsekwencją są uderzenia bijaków w poszczególne sekcje elektrod w odstępach czasu (od 0,5 do 2 min) [173]. W przypadku elektrofiltrów III-strefowych dla systemu okresowego stosuje się wstępne nastawy cykli strzepywania: 7 minut pracy strzepywacza i przerwy w kolejnych strefach: 10, 20 i 40 minut [34, 173]. Wybór systemu strzepywania powinien być uzależniony od własności pyłu i parametrów pracy elektrofiltru. Regeneracja elektrod zbiorczych systemem ciągłym ma zastosowanie, gdy decydującym o skuteczności odpylania jest unos wtórny (niska wilgotność i wysokie temperatury gazu). Celowym jest wówczas stosowanie równomiernych impulsów strzepujących w czasie [15]. Jeżeli w okresie regeneracji obserwowany jest spadek skuteczności elektrofiltru spowodowany szybkim narastaniem warstwy pyłu na elektrodach, korzystniejszy jest system okresowy.

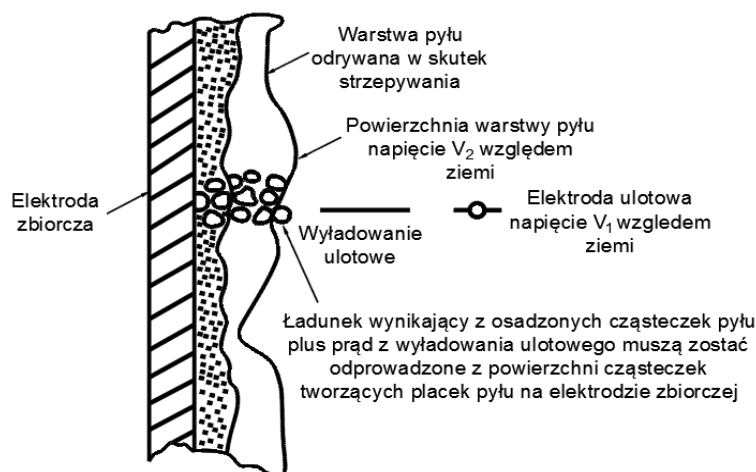
Możliwe jest zastosowanie dwóch omawianych systemów jednocześnie w zależności od rozkładu stężenia zapylenia i zmiany parametrów pyłu wzdłuż całej komory elektrofiltru. Nowoczesne układy sterowania pracą elektrofiltrów umożliwiają skojarzenie sterowania regeneracją elektrod z pracą regulatorów napięcia, a przy sterowaniu nadrzędnym również z pracą źródła zapylenia np. kotła energetycznego i pyłomierzy zainstalowanych za elektrofiltrem [15, 55]. Oczyszczanie elektrod przy zastosowaniu strzepywania mechanicznego można przyspieszyć stosując odpowiednie zabiegi: wyłączenie zasilnia elektrod ulotowych lub obniżenie napięcia do momentu osiągnięcia krytycznego napięcia ulotu elektrycznego, zmiana biegunowości elektrod, która może być jedno lub wielorazowa.

Zastosowanie zabiegów jw. prowadzi do stopniowego rozładowania powierzchni pyłu i w konsekwencji zaniku sił przyczepności [118, 173].

Na rys. 15 przedstawiono schemat nagromadzonego pyłu na elektrodzie zbiorczej. Warstwa pyłu osadzonego na elektrodzie zawiera warstwę pyłu trwale związaną z podłożem. Jest ona efektem powtarzających się cyklicznie włączeń i wyłączeń elektrofiltru w trakcie których temperatura przechodzi przez punkt rosy.

Taka warstwa przykryta jest warstwą luźnego pyłu osadzonego w niewielkim odstępie czasu. Podczas udaru mechanicznego oderwaniu ulega tylko część spodniej warstwy pyłu a nie pył bezpośrednio przytwierdzony do powierzchni elektrody. Trwale związana z podłożem warstwa pyłu zwiększa wymaganą grubość pyłu osadzonego na powierzchni elektrody zbiorczej, koniecznej do uzyskania optymalnej wielkości odrywanej bryły, gwarantującej jej dotarcie do leja zsypowego.

Według [118] rozmiar oderwanego od powierzchni elektrody osadczącej kawałka zbrylonego pyłu (dla popiołu lotnego pochodzącego z elektrowni) powinien posiadać średnicę rzędu 1 mm, aby pokonać składową poziomą prędkości przepływającego gazu. Zgodnie z zaleceniami jednego z producentów elektrofiltrów [33-34] osady pyłów na elektrodach zbiorczych na poziomie 3 do 4 mm i ulotowych - 1 do 2 mm uważa się za mieszczące się w normie, przy czym na elektrodach ulotowych istotny jest czysty od pyłu koniec ostrza. Metalicznie czyste płyty elektrod zbiorczych świadczą o zbyt intensywnym strzepywaniu lub zbyt dużych prędkościach przepływu spalin. Nie dotyczy to pierwszych dwóch, trzech płyt elektrod osadczych w strefie dolotowej, które zazwyczaj są metalicznie czyste, oczyszczane spalinami o wysokim stężeniu zapylenia i dużej frakcji [33-34]. Na rys. 16 zobrazowano nadmierne narosty warstwy pyłu na elektrodach zaobserwowane podczas inspekcji elektrofiltru świadczące o nieprawidłowej pracy odpylacza.



Rys. 15. Schemat przedstawiający nagromadzony pył na elektrodzie zbiorczej [118]



a) b)  
Rys. 16. Nadmierne osady pyłu na elektrodach: a) zbiorczych, b) ulotowych, świadczące o nieprawidłowej pracy odpylacza (zdjęcie własne autora)

## 5.7 Sprawność odpylania

Sprawność odpylacza można określić stosunkiem ilości wytrąconego pyłu w odpylaczu do ilości pyłu zawartego w gazie surowym, przechodzącym przez odpylacz [117-118, 171]. Stopień odpylania (sprawność) elektrofiltru, przy odpowiednim doborze typu oraz jego wymiarów osiąga - w zależności od rodzaju pyłu - wartość do 99,99%. Teoretyczną sprawność elektrofiltru można wyrazić wzorem:

$$h = 1 - e^{-k/v} \quad (1)$$

gdzie:

$h$  – sprawność elektrofiltru;  $e$  – podstawa logarytmu naturalnego;  $v$  – prędkość przepływu gazu przez elektrofiltr, przyjmuje się od 0,2 do 4 m/s w zależności od szeregu czynników, a przede wszystkim od wielkości cząstek wytrącanego pyłu, typu elektrod zbiorczych oraz odżądanego stopnia odpylania;  $k$  – współczynnik uwzględniający parametry układu gazowo-pyłowego, warunki elektryczne panujące w elektrofiltrze oraz wymiary i konstrukcję danego elektrofiltru, m/s.

Obliczenie sprawności odpylania można przeprowadzić przy pomocy jednego z następujących wzorów:

$$\eta = \frac{\dot{m}}{\dot{m} + g_2 V_2} = \frac{g_1 - g_2}{g_1} = \frac{\dot{m}}{g_1 V_1} \quad (2)$$

gdzie:

$\dot{m}$  – masa wytrąconego w odpylaczu pyłu w ciągu godziny, kg/h;  $V_{1,2}$  – strumień gazu surowego (1) lub oczyszczonego (2), m<sup>3</sup>/h;  $g_{1,2}$  – koncentracja pyłu w gazie surowym (1) lub oczyszczonym (2), kg/m<sup>3</sup>.

## **6. Sytuacja na rynku energetycznym i tendencje rozwojowe budowy elektrofiltrów**

Obecnie głównymi aspektami decydującymi o wyborze dostawcy instalacji dla sektora energetycznego są: cena i możliwie szybki termin realizacji zlecenia, przy jednoczesnym zachowaniu walorów użytkowych dostarczanych urządzeń. Taka sytuacja rynkowa wymusza na producentach urządzeń odpylających podjęcie działań w kierunku poszukiwania przewag konkurencyjnych i szeroko pojętej optymalizacji konstrukcji swoich produktów.

Można zauważyć, że czasy monopolu w tej branży minęły, a szeroka grupa producentów urządzeń odpylających zaczyna poszukiwać sposobów na obniżenie całkowitego kosztu wytworzenia, co ma istotne znaczenie podczas przystępowania do przetargów na tzw. kompleksowe wykonawstwo "pod klucz", gdzie aktualnie decydują niewielkie punkty procentowe. Elastyczność i umiejętność szybkiego dostosowania się i reagowania na potrzeby rynku stały się istotnymi elementami budowania przewag w odniesieniu do konkurencji.

### **6.1 Producenci krajowi i zagraniczni**

Do grona wiodących, światowych podmiotów zajmujących się projektowaniem i produkcją elektrofiltrów należą: Castlet Ltd. (Wielka Brytania), Hamon (Stany Zjednoczone), Lodge Cottrell (Wielka Brytania), FLSmidth (Dania), Valmet Technologies Oy (Finlandia) oraz Steinmüller Babcock Environmental GmbH (Niemcy). Wśród krajowych podmiotów prym wiodą m.in. Rafako S.A., Balcke-Dürr Sp. z o.o., Alstom Power Sp. z o.o., Bipromet S.A., GEA Poland oraz nowo powstałe ELWO Engineering Sp. z o.o. Nie wolno w tym miejscu zapomnieć o dynamicznie rozwijającym się rynku azjatyckim oraz o mniej znanych markach, które z coraz większym powodzeniem rywalizują z bardziej uznanymi graczami na rynku energetycznym.

W większości przypadków podmioty te, nie będąc w stanie rywalizować z małymi firmami zajmującymi się prefabrykacją konstrukcji stalowych, zostały przekształcone w biura inżynieryjne i funkcjonują obecnie bez własnego zaplecza produkcyjnego. Bazując na własnym know-how dostawcy coraz częściej współpracują w zakresie usług kooperacyjnych w celu redukcji kosztu wytworzenia i spełnienia reżimów czasowych. Główne założenia jakościowe wynikające z norm branżowych z reguły są spełnione, ale coraz bardziej uwidacznia się tendencja zapewnienia „dostatecznego” poziomu jakości dostarczanych urządzeń, które nie powinny być zaprojektowane na wyrost.

### **6.2 Kierunki rozwojowe**

Tendencje rozwojowe w konstrukcji współczesnych odpylaczy elektrostatycznych zostały szczegółowo opisane w publikacji autora rozprawy doktorskiej [157].

Rozwój technologii w dziedzinie elektrofiltrów odbywa się w następujących kierunkach:

- optymalizacji konstrukcji (bardziej zwarta budowa);
- szerokości podziałki międzyelektrodowej;
- stabilizacji parametrów zapylnych gazów (kondycjonowanie);
- optymalizacji pracy (zmniejszenie poboru energii elektrycznej, przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia poszczególnych podzespołów);
- współpracy elektrofiltrów suchych z filtrami tkaninowymi (tzw. filtry hybrydowe).

## **Konstrukcja i technologia**

Trudno poszukiwać możliwości redukcji masy całej konstrukcji elektrofiltru w jej elementach nośnych. W ostatnich latach można zauważyć, że wyposażenie komory elektrofiltru jest głównym obszarem „odchudzenia” konstrukcji. Producenci dokonują optymalizacji części mechanicznej, tj. konstrukcji elektrod zbiorczych i ulotowych, mechanizmów strzepywania, belek zawieszonych i drągów strzepujących. Na uwagę zasługuje fakt zastępowania określonych elementów konstrukcji, ogólnodostępnymi profilami hutniczymi, upraszczającymi finalną konstrukcję i jednocześnie eliminującymi kosztowne operacje wynikające z procesu technologicznego ich wykonania, np. spawania lub obróbki plastycznej. Dotyczy to głównie belek zawieszonych elektrod zbiorczych i ulotowych oraz drągów strzepujących. Taki zabieg w znaczny sposób obniża koszt wykonania i pozwala redukować masę konstrukcji. Co więcej, coraz powszechniejsza staje się standaryzacja niektórych podzespołów konstrukcji elektrofiltru. Jako przykład można wymienić np. zastosowanie takiego samego rodzaju włazu w całym odpylaczu. Najnowszym trendem optymalizacji konstrukcji elektrofiltru jest zmiana grubości taśmy zimnowalcowanej stosowanej na elektrody zbiorcze.

Do 2000 r. do produkcji elektrod zbiorczych powszechnie stosowano taśmy stalowe zimnowalcowane o grubości 1,5 mm, ze stali o znacznie wyższych własnościach mechanicznych niż to ma miejsce aktualnie. Obecnie standardem jest stosowanie elektrod zbiorczych o grubości 1,25, a nawet 1,2 mm i długości do 16 m. Przedział szerokości stosowanych elektrod zbiorczych typu Sigma waha się od 420 do 850 mm z tendencją do stosowania szerokich elektrod. Pozwala to zredukować koszty materiałowe i wytworzenia. Determinuje to producentów elektrofiltrów do zmiany cech konstrukcyjnych całego układu strzepującego, w tym doboru prawidłowej masy młotków strzepywaczy wzbudzających drgania, sprawdzenia średnich wartości przyspieszeń układu elektrod oraz wyznaczenia pasma częstotliwości tych drgań [130]. Niejednokrotnie w praktyce producenci zmieniają w omawianym węzle konstrukcyjnym tylko grubość elektrody. Wiąże się to z dużym ryzykiem uzyskania niewystarczających wartości przyspieszeń drgań profilu oraz nierównomiernym ich rozkładem na całej powierzchni elektrody. Parametr ten decyduje o właściwym oczyszczaniu powierzchni osadczą elektrody na całej jej długości.

W założeniach projektowych obecnie projektowanych elektrofiltrów do odpylania gazów odlotowych z kotłów opalanych węglem kamiennym, rozpatrywana jest podziałka międzyelektrodowa 400÷500 mm [33-34]. Trudno jednoznacznie stwierdzić, czy w niedalekiej przyszłości wartość ta wzrośnie. Dobór optymalnej podziałki międzyelektrodowej jest na chwilę obecną zagadnieniem otwartym.

Wraz ze wzrostem podziałki międzyelektrodowej wzrastają tolerancje wykonania elektrofiltrów, co jest niewątpliwie zaletą tego zabiegu (mniejsze ryzyko wystąpienia tzw. przebić). Ponadto, zwiększony zakres podziałki międzyelektrodowej wpływa korzystnie na skuteczność odpylania, natomiast należy zaznaczyć, że wymaga stosowania wysokich napięć [33-34, 118, 157]. Dla zakresu 400÷500 mm wynosi on odpowiednio 106 i 125 kV.

### Kondycjonowanie spalin

Układy kondycjonowania spalin mają na celu podwyższenie skuteczności odpylania poprzez zmianę rezystywności wytrączanych z gazu cząstek pyłu. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem technicznym kondycjonowania spalin jest wdmuchiwanie gazowego  $\text{SO}_3$  do kanałów spalin za podgrzewaczem powietrza. W zależności od wielkości instalacji i dostępności surowców stosuje się materiał wyjściowy w postaci płynnej siarki, bądź dla małych obiektów w postaci ciekłego  $\text{SO}_2$ . W obu przypadkach instalacje charakteryzują się zwartą budową, mieszczą się w kontenerze o długości 5÷6 m (rys. 17), pełną automatyzacją ruchu i odstawiania oraz samoczynną regulacją wydajności. Najczęściej stosuje się surowiec w postaci płynnej siarki. Według literatury [39, 79-80], przy dawce  $\text{SO}_3$  prowadzącej do udziału trójtlenku siarki w spalinach w granicach 20–30 ppm możliwa jest redukcja emisji pyłu w zakresie 60÷90%. Na rys. 18 pokazano schemat instalacji kondycjonowania spalin na płynną siarkę.

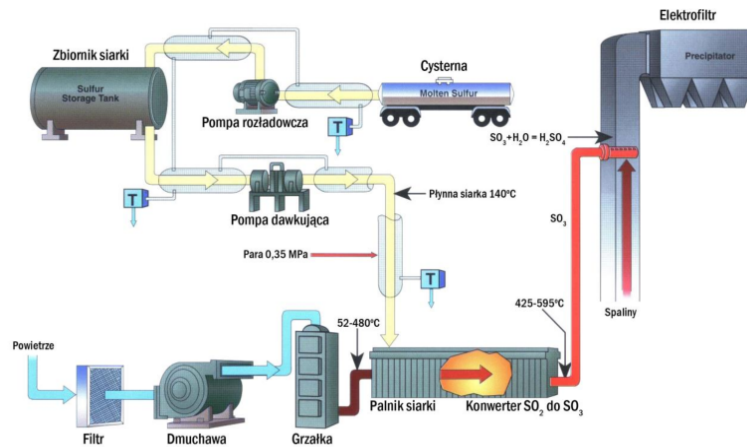


Rys. 17. Kontener z instalacją kondycjonowania spalin [39]

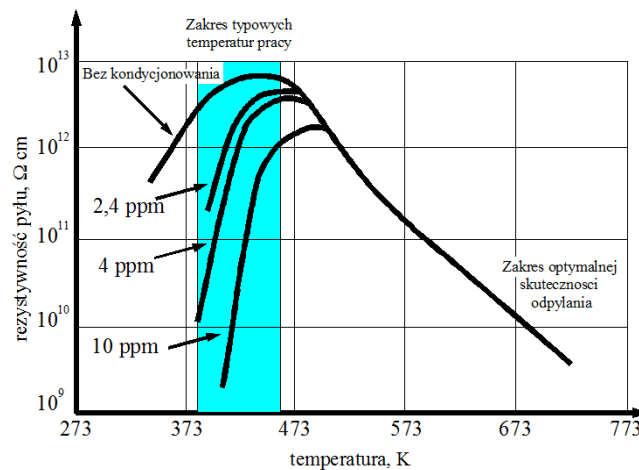
Wielkość dawki  $\text{SO}_3$ , koniecznej do uzyskania odpowiedniej rezystywności właściwej pyłu zależy od zawartości siarki w węglu, temperatury spalin, stężenia pyłu w spalinach oraz jego składu chemicznego [39, 79]. Maksimum oporności dużej liczby pyłów, w tym emitowanych z elektrowni (rys. 19) występuje w przedziale temperatur 120÷180°C. Wzrost stężenia  $\text{SO}_3$  w spalinach powoduje obniżenie oraz przesunięcie do wyższych temperatur przedziału występowania maksymalnych rezystywności pyłu. Im jest wyższa temperatura gazów odlotowych wprowadzanych do urządzenia, tym musi być wyższe stężenie  $\text{SO}_3$  [39].

Zaletą instalacji kondycjonowania spalin jest jej mobilność. Koszty przeniesienia instalacji nie są wysokie. Kondycjonowanie wymaga natomiast szczególnej dbałości o szczelność elektrofiltru. W przypadku modernizacji starszych obiektów energetycznych omawiana metoda ma ograniczone zastosowanie. Inwestorzy chętniej dokonują w takim przypadku kompleksowej przebudowy elektrofiltru. Niewątpliwie koszt zakupu i eksploatacji instalacji może stanowić problem, natomiast może okazać się ona niezbędną w przypadku oddania do eksploatacji nowego elektrofiltru, który wykazuje niedostateczną skuteczność wychwycenia wysokorezystywnego pyłu.





Rys. 18. Schemat instalacji kondycjonowania spalin na płynną siarkę [39]



Rys. 19. Wpływ kondycjonowania gazów odlotowych  $SO_3$  na rezystywność popiołu lotnego [39]

### Układy zasilania, sterowania i monitorowania pracą elektrofiltrów

Obecnie kontrola i sterowanie pracą elektrofiltrów stają się głównym kierunkiem ich rozwoju. W porównaniu do aspektów konstrukcyjnych i technologicznych przedstawionych powyżej, ten obszar jest na chwilę obecną najbardziej rozwojowy. Zastosowanie nowoczesnych systemów komputerowych pozwala w pełni automatyzować proces oczyszczania spalin oraz sterować i kontrolować wszystkie węzły odpylacza.

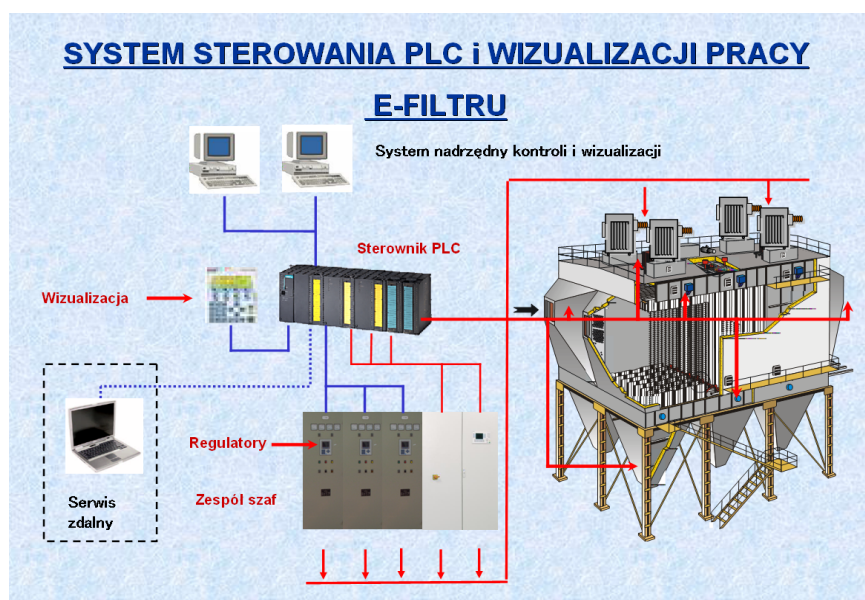
Do głównych funkcji stosowanych systemów należą [55]:

- ogólny monitoring pracy elektrofiltru;
- archiwizacja danych;
- szczegółowy monitoring pracy elektrofiltru:
  1. wykresy charakterystyk i wybranych przebiegów elektrofiltru;
  2. wykresy zmian wskazań pyłomierzy;
  3. wizualizacja pomiarów temperatury na wlocie i wylocie elektrofiltru;
  4. wizualizacja wskazań pyłomierza;
  5. równoczesna wizualizacja napięć i prądów elektrofiltru;
  6. wizualizacja wartości nastaw i zdalne ich dobieranie dla poszczególnych regulatorów:

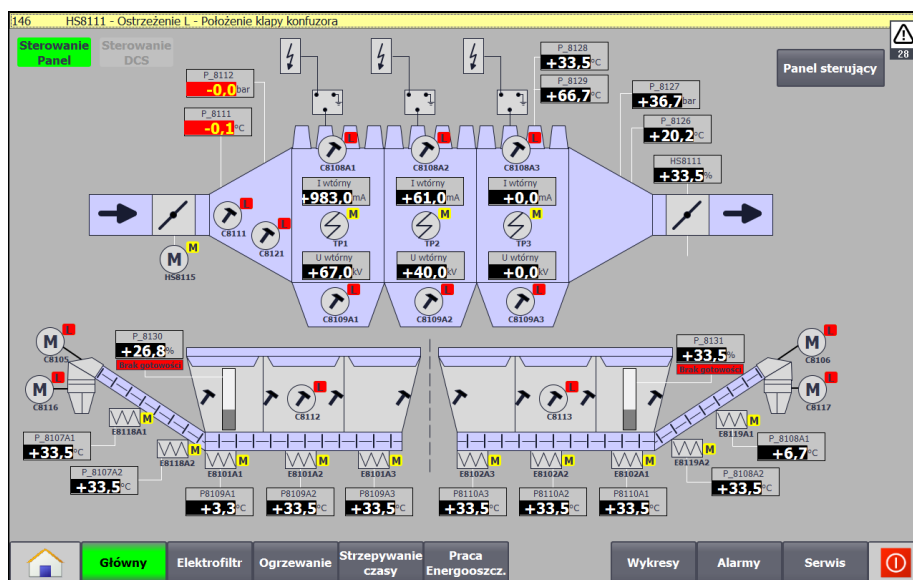
- sterowanie pracą napędów strzepywaczy;
- kontrola pracy napędów strzepywaczy (optymalizacja cykli strzepywania elektrod w poszczególnych sekcjach);
- zdalne nastawianie napędów strzepywaczy;
- zdalne załączanie/wyłączanie zespołów zasilających;
- zasilanie elektrofiltrów umożliwiające zmniejszenie zużycia energii (w oparciu o pomiary z pyłomierzy);
- sygnalizacja awarii i awaryjne wyłączenie z nastawni blokowej układów zasilania i strzepywania.

Aktualnie w elektrofiltrach stosowane są zespoły zasilające: 2 fazowe i 3 fazowe z transformatorem (energetyka zawodowa), 3 fazowe przetwornikowe (elektrofiltry wielozadaniowe), pulsacyjne (dla pyłów wysokorezystywnych). Na rys. 20-21 pokazano ideę systemu sterowania i wizualizacji pracy elektrofiltru [37, 55, 157].

Wiodącymi dostawcami technologii sterowania dla energetyki są: ABB, GE, Siemens, Rico, NWL, Kraft, Belos i Danfos. Należy podkreślić, że oprócz ww. firm, na rynku obecnych jest ok. 20 innych dostawców. Branżę tą cechuje wysoka innowacyjność i tempo postępu technologicznego, co przekłada się na coraz większą wydajność systemów sterowania dostarczanych dla sektora energetycznego.



Rys. 20. Przykładowy schemat systemu sterowania PLC i wizualizacji pracy elektrofiltru [37]



Rys. 21. Maska wizualizacyjna pracy elektrofiltru [37]

### 6.3. Nowe zastosowania elektrofiltrów

Źródła literaturowe krajowe i zagraniczne [50, 54-59, 91, 103, 115, 163-164, 155 175] obejmujące swoją tematyką budowę i eksploatację elektrofiltrów wskazują, że producenci tych urządzeń oraz jednostki naukowe prowadzą badania i wdrożenia przemysłowe w zakresie:

- elektrofiltrów kominowych;
- filtrów hybrydowych;
- nowych rozwiązań w zakresie oczyszczania płyt elektrod zbiorczych.

#### Elektrofiltry kominowe

Elektrofiltry kominowe są odpowiedzią na obniżenie niskiej emisji. Jest to emisja pyłu i szkodliwych gazów na wysokości do 40 m. Zanieczyszczenia te pochodzą z domowych pieców gazowych i lokalnych kotłowni węglowych w których spalanie węgla odbywa się w nieefektywny sposób oraz z transportu spalinowego. Niska emisja powodowana jest przez liczne źródła wprowadzające do powietrza niewielkie ilości zanieczyszczeń. Elektrofiltry kominowe jako metoda odpylania spalin z instalacji spalania małej mocy (piec, kocioł) może być rozpatrywana jako rozwiązanie w odniesieniu do konkluzji BAT (najlepsza możliwa technika). Przesłanki konkluzji BAT omówiono w rozdziale 1.

Elektrofiltr kominowy jest rozwiązaniem gwarantującym spełnienie coraz wyższych wymogów energetyczno-emisyjnych stawianych przed instalacjami małej mocy przy zachowaniu obecnego paliwa jakim jest węgiel. W ostatnich latach elektrofiltry kominowe pochodziły z importu, głównie z Austrii i Niemiec, gdzie są stosowane na dużą skalę. Aby wyjść naprzeciw oczekiwaniom rynku katowicka Grupa CZH S.A. wraz z Politechniką Śląską opracowała patent i rozpoczęła pilotażowy program eksploatacji tych urządzeń m.in. w Tarnowskich Górach, Sosnowcu, Zabrze, Goczałkowicach-Zdroju i na Żywiecczyźnie. Na rys. 22 zobrazowano innowacyjny elektrofiltr kominowy zamontowany w budynku mieszkalnym.



Rys. 22. Innowacyjny elektrofiltr kominowy zamontowany w budynku mieszkalnym w Goczałkowicach-Zdroju [54, 57]

Urządzenie w połączeniu ze sprawnie działającą instalacją kotłową gwarantuje skuteczność 50÷90% w zależności od źródła energii. Została ona potwierdzona w wyniku wieloletnich badań. Zgodnie z danymi [54, 57] przy sprawności urządzenia na poziomie 75% i po spaleniu 3,5 kg węgla, elektrofiltr zatrzymuje 7 gramów pyłu. Koszt zużywanej energii jest porównywalny do świecącej żarówki o mocy 40W.

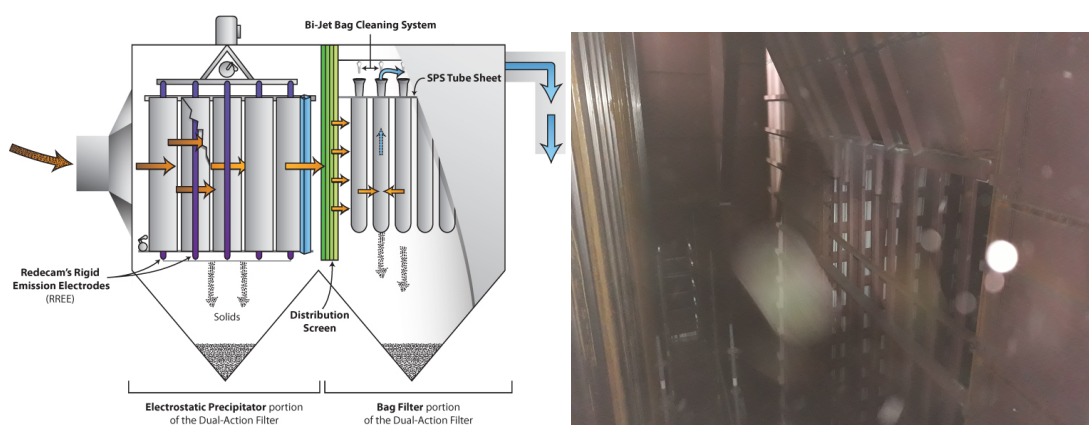
### **Filtry hybrydowe**

Elektrofiltr hybrydowy jest połączeniem elektrofiltru z filtrem workowym. Koncepcja zastosowania filtra hybrydowego ma szczególne uzasadnienie w przypadku modernizacji starych elektrofiltrów w których możliwe jest wykorzystanie istniejącej zabudowy (komory). Dużą rolę odgrywają w tym przypadku przesłanki ekonomiczne wynikające bezpośrednio z niewielkich zmian konstrukcyjnych. Filtry hybrydowe znajdują zastosowanie w odpylaniu gazów odlotowych w hutnictwie (spiekalnie rud żelaza). Takim przykładem może być Huta ArcelorMittal Poland S.A oddział w Dąbrowie Górniczej, gdzie w 2018 r. stare elektrofiltry zostały zmodernizowane przez firmę FLSmidth (Dania) i pracują aktualnie jako filtry hybrydowe. Na przestrzeni lat standardy zanieczyszczeń (stężenie pyłu na wylocie z elektrofiltru) wynosiły: w latach 80-tych - 100 mg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>, w latach 90-tych - 50 mg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>. Obecnie wynoszą one 30 mg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>. Oznacza to, że chcąc dostosować stary elektrofiltr do nowych standardów emisji zanieczyszczeń, konieczne byłoby zwiększenie jego powierzchni osadczą. Z tego też powodu bardziej opłacalnym rozwiązaniem jest filtr hybrydowy, pod warunkiem, że jego warunki pracy jak również stara zabudowa pozwala na tego typu modernizację. Umowna granica pracy filtra hybrydowego wynosi ~250<sup>0</sup>C.

Na rys. 23 przedstawiono schemat działania filtra hybrydowego [56]. W praktyce eksploatacyjnej dla elektrofiltru 3-strefowego, po modernizacji dwie pierwsze strefy pracują jako elektrofiltr natomiast trzecia trzecią strefę stanowi filtr workowy.

Jest to konfiguracja zalecana. Strefy 1-2 (elektrofiltr) oddzielone są od części w której jest filtr workowy specjalną przegrodą stanowiącą kierownicę, mającą za zadanie zapobiegać bezpośredniemu oddziaływaniu energii kinetycznej gazów z części elektrofiltrowej, rozbijając ich strumień na kierunki w których ciśnienie dynamiczne gazów nie będzie oddziaływało bezpośrednio na część filtracyjną – rys. 23a. W odróżnieniu od tradycyjnego filtra tkaninowego worki wykonane są z materiałów antystatycznych takich jak: PP w połączeniu z teflonem, PPS w połączeniu z PTFE. Według danych literaturowych około 90% zawartości pyłów zawartych w strumieniu przepływającego gazu jest wychwytywanych przez filtr płytowy, pozostałe 10% przez filtr workowy.

Na podstawie doświadczeń praktyków z branży energetycznej proporcje te wynoszą odpowiednio 80/20 pod warunkiem optymalnego wykorzystania stref elektrofiltru. Zalecana prędkości przepływu gazu przez część stanowiącą elektrofiltr wynosi:  $0,8 \div 1,2$  m/s. Wielkość powierzchni filtracyjnej powinna być tak dobrana, aby jednostkowy napór gazów zawierał się w przedziale  $0,015 \div 0,022$  m/s.



a)

b)

Rys. 23. Filtr hybrydowy: a) schemat działania filtra hybrydowego [56], b) przegroda (kierownica) oddzielająca strefy stanowiące elektrofiltr od strefy w której zabudowano filtr workowy [10]

Jak wspomniano powyżej zastosowanie filtra hybrydowego ma uzasadnienie ekonomiczne m.in. ze względu na:

- krótszy czas strzepywania worków przekładający się na mniejsze zużycie sprężonego powietrza;
- skrócenie przerw eksploatacyjnych;
- większą żywotność worków (tkaniny filtracyjnej).

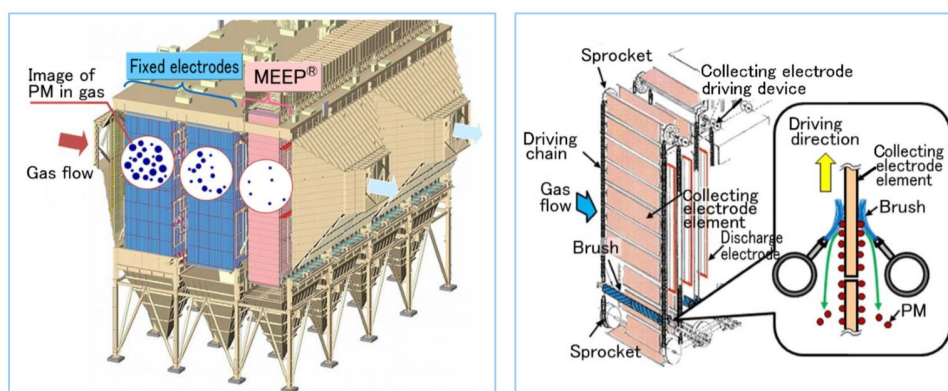
Otrzymywane skuteczności filtrów hybrydowych zaprojektowanych przez krajowych producentów wynoszą  $<5$  mg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>.

### Nowe rozwiązania oczyszczania płyt elektrod zbiorczych

W opracowaniach naukowych [6, 51 115] scharakteryzowano innowacyjną technologię oczyszczania płyt elektrod osadczycy (MEEP) Moving Electrode Electrostatic Precipitator. Źródła literaturowe przedstawiają wyniki badań nad efektywnością oczyszczania elektrod zbiorczych przy zastosowaniu tej metody w odniesieniu do różnych stężeń pyłu w spalinach.

Szeroko poruszana jest również problematyka eksploatacyjna oraz wpływ rozwiązań konstrukcyjnych na efektywność działania tej metody [115]. Pierwsze instalacje pilotażowe z technologią oczyszczania elektrod osadczych MEEP pojawiły się w Chinach i Indiach, będących jednymi z największych konsumentów węgla na świecie.

Z uwagi na ten fakt, zaczęto poszukiwać sposobu redukcji pyłów PM 2,5 (średnica poniżej 2,5  $\mu\text{m}$ ). Są to frakcje najdrobniejsze, najtrudniejsze do odpylania, uważane dla najbardziej szkodliwe dla zdrowia człowieka. W swoim założeniu omawiana technologia i rozwiązanie konstrukcyjne ma na celu zwiększenie efektywności oczyszczania jednostkowej powierzchni osadczą SCA przy jednoczesnym jej zmniejszeniu nawet do 20%. Technologia MEEP została opracowana i rozwijana przez Mitsubishi Hitachi Power System Environmental Solutions. W odniesieniu do powszechnie stosowanej metody oczyszczania płyt elektrod osadczych z zastosowaniem mechanizmów udarowych, technologia MEEP bardzo dobrze sprawdza się w przypadku pyłów wysokorezystywnych  $r \geq 10^{11} \text{ Wcm}$ , dla których metoda udarowa jest mało efektywna. Warto nadmienić, że jednocześnie rozwiązano problem wtórnej emisji pyłów oraz ulotu wstecznego. Na rys. 24 pokazano zasadę oczyszczania elektrod osadczych z zastosowaniem technologii MEEP.



Rys. 24. Zasada oczyszczania elektrod zbiorczych w elektrofiltrze z wykorzystaniem technologii MEEP Moving Electrode Electrostatic Precipitator [6]

Płyty „elektrody”, osadcze zamontowane są w specjalnej konstrukcji umożliwiającej ich przemieszczanie. Mechanizm napędzany jest poprzez motoreduktory z wykorzystaniem przekładni łańcuchowej. Ruch obrotowy płyt elektrod zbiorczych realizowany jest za pomocą układu napędowego zlokalizowanego w górnej części konstrukcji. W dolnej części usytuowany jest zespół szczotek obrotowych. System oczyszczania elektrod osadczych z wykorzystaniem technologii MEEP może być zastosowany w całym elektrofiltrze lub tylko w ostatniej strefie odpylacza. W pracy [6] porównano wyniki badań związanych z redukcją jednostkowej powierzchni osadczą. Dokonano analizy następujących konfiguracji elektrofiltru: 1 - dwie strefy z zastosowaniem MEEP oraz 2 - dwie strefy z sztywno zawieszonymi elektrodami zbiorczymi i w trzeciej strefie zastosowane oczyszczanie MEEP. Dla konfiguracji 1 uzyskano redukcję jednostkowej powierzchni osadczą o 48% w odniesieniu do rozwiązania 2. Do głównych zalet MEEP należą: redukcja zużycia energii elektrycznej, szeroki obszar zastosowania, możliwość redukcji przestrzeni i masy odpylacza.

## 7. Stan badań dotyczących konstrukcji, działania i projektowania elektrofiltrów

### 7.1. Symulacje numeryczne wytwarzania

Modelowanie numeryczne procesu wytwarzania elektrody zbiorczej nie jest obecne w literaturze przedmiotowej. Pierwszy powód to złożoność kształtu, drugi to fakt, że producenci wykorzystują swoje doświadczenie i bazują na dotychczasowych rozwiązaniach, trzeci zaś, że metody numeryczne w dziedzinie przeróbki plastycznej są nową gałęzią symulacji komputerowych. Większość znalezionych publikacji dotyczy profilowania na zimno, w szczególności prostszych profili otwartych i zamkniętych. Poniżej przedstawiono opis tych pozycji w porządku chronologicznym z okresu 2001-2023.

Publikacja z roku 2001 [53] opisuje modelowanie numeryczne profilowania otwartego przekroju typu C oprogramowaniem Copra. Szczególną uwagę poświęcono odległości pomiędzy stacjami roboczymi, gdyż wpływa ona na powstawanie wad końcowego produktu. Jeśli jest zbyt duża to powstaje sprężynowanie profilu, w przeciwnym razie wybrzuszenie. Jak stwierdzają autorzy najczęściej projektuje się stacje robocze w oparciu o wieloletnie doświadczenie wytwórcy i konstruktora. Jednak rozwój i dostępność oprogramowania stwarzają możliwość optymalizacji konstrukcji linii produkcyjnej gięcia na zimno profili i tym samym produkcji wyrobu gotowego. Badano profilowanie blachy o grubości 4 mm ze stali AISI 1015. Przyjęto współczynnik tarcia równy 0,2. Profil kształtowano w trzech stacjach roboczych, każda o kącie gięcia odpowiednio 30, 60 i 90°. Autorzy wskazują na ważność doboru współczynnika wzmocnienia materiału w prawidłowym modelowaniu rozkładu naprężenia i odkształcenia wyrobu.

Polskie publikacje z lat 2002 i 2003 [94, 96] podają przykład symulowanego profilowania przekroju otwartego typu C oprogramowaniem Copra. Pokazano przykład naprężenia zastępczego w profilu. W kolejnej publikacji z 2004 roku [95] autorzy podają zależności opisujące związek pomiędzy siłą nacisku oraz momentem występującymi w stacjach roboczych. Publikacja [150] z 2002 pokazuje ogólne podejście do profilowania profili otwartych na prostym przykładzie profilu C. Poprzez podstawowe równania naprężenia i odkształcenia, autorzy szacują energię potrzebną do plastycznego odkształcenia blachy. Na końcu artykułu porównano wyniki obliczeń teoretycznych z dostępnymi w literaturze pomiarami profilu rzeczywistego. W publikacji z 2006 [135] zastosowano oprogramowanie Shape-RE do rozwiązywania zagadnienia profilowania. Oprogramowanie sprawdzono symulując profilowanie przekroju zamkniętego w ciągu 26 stacji roboczych. Blacha miała rozmiar 896x204,6 i grubość 2 mm. Przyjęto współczynnik tarcia równy 0,01. Prędkość przejścia wynosiła 167 mm/s. Podano jak zmieniała się grubość blachy w trakcie profilowania. W miejscu największego odkształcenia spadła do 1 mm, w innych miejscach mieściła się w zakresie od 1,9 do 2,1 mm.

Inni autorzy publikacji z 2006 roku [152] wykorzystali oprogramowanie Abaqus do numerycznego modelowania profilowania przekroju otwartego typu C. Wyniki pokazują jak ważne jest przyjmowanie odpowiednich kątów gięcia na poszczególnych stacjach roboczych, aby uniknąć wypaczania krawędzi profilu pomiędzy sekcjami. Dla sekcji profilujących przyjęto współczynnik tarcia na poziomie 0,2.

Profilowanie otwartego przekroju typu U z różnych gatunków stali badane było doświadczalnie w pracy z 2007 roku [89], ze szczególnym uwzględnieniem pomiaru momentu napędowego i mocy potrzebnej do przeprowadzenia profilowania. Jednym z tych gatunków była blacha ze stali DC01 o grubości 1,46 mm. Prędkość przesuwu blachy wynosiła 9,7 m/min. Podano przydatne zależności siły nacisku walców oraz potrzebnego momentu napędowego w zależności od grubości blachy, kąta gięcia, granicy plastyczności. Na końcu artykułu oszacowano moc silnika elektrycznego potrzebną do przeprowadzenia profilowania. Profilowanie odbyło się walcami zaprojektowanymi według zasady stałego łuku.

W pracy [102] z roku 2011 badano, za pomocą oprogramowania Abaqus, formowanie stali nierdzewnej AISI 304. Blacha była modelowana siatką o trzech wariantach rozmiarów: 12x90, 24x180 i 48x360. Wykorzystano algorytm niejawny, z geometrią dwuwymiarową, rolki profilujące traktowane były jako ciała sztywne. Odległość pomiędzy rolkami profilującymi w każdej stacji była równa grubości blachy. Interesujące jest, że autorzy skorelowali mikrotwardość zmierzoną w rzeczywistej próbie rozciągania próbki blachy z odkształceniem plastycznym a następnie to samo wykonali podczas formowania, wiążąc tym razem mikrotwardość z rzeczywistym profilem odkształcenia plastycznego w poprzek i wzdłuż formowanej blachy. W publikacji [20] z roku 2013 badano doświadczalnie i numerycznie profilowanie otwartego przekroju C o różnej wysokości boków. Badano blachy o grubości 0,8 i 1 mm ze stali węglowej o podwyższonej wytrzymałości. Podano definicję skręcenia i wygięcia profilu. Zastosowano współczynnik tarcia o wartości 0,2. W poprzek grubości blachy zastosowano 2 elementy siatki. Zaproponowano dodatkowe ściskanie (walcowanie) gotowego profilu aby zmniejszyć wady w postaci wygięcia i skręcenia.

Kolejna praca z roku 2014 [73] również wykorzystuje oprogramowanie Abaqus do modelowania profilowania zamkniętego przekroju kwadratowego 50x50x2 o promieniu zaokrąglenia 4 mm, stosowanego w produkcji pojazdów. Przebadano 4 gatunki stali. Zmierzono naprężenie resztkowe po procesie profilowania. Analizowano odchyłki kształtu końcowego produktu. Autorzy publikacji z roku 2015 [75] szczegółowo analizowali powstawanie pofałdowań podczas profilowania odcinka blachy. Badano doświadczalnie a potem numerycznie oprogramowaniem Abaqus, formowanie blachy ze stali St12 o grubości 0,5 mm. Zwrócono uwagę na proporcje wymiarów elementów siatki obliczeniowej.

W roku 2015 w pracy [122] ponownie opisano numeryczne i doświadczalne badanie profilowania blachy ze stali St14. Interesujące jest, że autorzy przeprowadzili normatywny test rozciągania materiału blachy trzykrotnie i pokazali rozrzut wyników, co może stanowić wstęp do podstawowych obliczeń statystycznych. Wykorzystano oprogramowanie Abaqus. Modelowano 4 stacje profilujące, w których rolki traktowano jako ciała sztywne. Ze względu na symetrię profilu, obliczenia przeprowadzono dla połowy profilu. Rozmiar elementów siatki w okolicach gięcia był mniejszy, podczas gdy w pozostałych częściach wynosił 1 mm. Dolna i górna rolka były napędzane, tak że prędkość liniowa posuwu blachy wynosiła 2,5 m/min. Numerycznie i doświadczalnie badano profilowanie o 4 kątach gięcia 15, 30, 45 i 60, a grubość blachy wynosiła 0,95 mm. Doświadczalnie sprawdzono wyniki na stanowisku z jedną stacją roboczą. Przebadano wpływ parametrów profilowania na naprężenie i odkształcenie wzdłużne. Interesujący jest wniosek, że współczynnik tarcia (przyjmowany jako 0,1, 0,15 i 0,2) nie wpływał na naprężenie wzdłużne krawędzi profilu.



Zagadnienie sprężynowania i skrócenia profilu po zakończonym profilowaniu omówiono w pracy z 2016 roku [19]. Badano blachę o grubości 1,6 mm ze stali DP980. Wykonano badania eksperymentalne. Numerycznie zastosowano oprogramowanie Metafor. Rolki profilujące przyjęto jako ciała sztywne. Kontakt pomiędzy rolkami a blachą symulowano poprzez opcję „penalty” z parametrem o wartości  $10^4$  N/mm. Wykorzystano symetrię profilu typu C. Siatka blachy miała rozmiar liczony ilością elementów jako 400x22x1 w przypadku profilu symetrycznego a 300x36x1 niesymetrycznego. Zastosowano mieszany model umocnienia materiału Armstronga-Fredericka.

Krótką publikacją z 2016 roku [176] pokazuje zmierzone wady gotowego profilu w zależności od grubości blachy dla stali węglowej, stopu aluminium oraz stali niestopowej En8. Kolejna praca z roku 2016 [179] wykorzystuje oprogramowanie Copra do numerycznej analizy profilowania przekroju otwartego typu C. Przebadano profilowanie blachy o grubości 1, 2 i 3 mm ze stali węglowej. Badano proces w 6 stacjach roboczych. Testowano profilowanie odcinka blachy o wymiarach 300x100 mm. Modelowano numerycznie profile według stałego promienia 1,5, 2,5 i 3,5 mm oraz stałej długości łuku 20, 40 i 60 mm. W tej pracy zastosowano podejście statystyczne w następujący sposób – biorąc pod uwagę grubość blachy, promień i długość łuku gięcia otrzymano 27 przypadków. Zastosowano metodę Taguchi i obliczono skłonność do sprężynowania profilu. Przeprowadzono również analizę wrażliwości zmiennych czynników wymienionych wcześniej. Autorzy przeprowadzili profilowanie na stanowisku badawczym. W podsumowaniu stwierdzono, że to grubość blachy jest decydująca jeśli chodzi o sprężynowanie profilu końcowego. Zagadnieniem energii potrzebnej do profilowania w różnej temperaturze poświęcona była praca [178] z 2016 roku. Badano numerycznie oprogramowaniem Abaqus profilowanie blachy o rozmiarach 900x107,5 mm i grubości 1 mm ze stopu magnezu AZ31. Przyjęto izotropię materiału. Temperatura profilowania wynosiła 25 i 200°C. Krótka publikacja [180] z roku 2016 opisywała formowanie profilu zamkniętego ze stopu aluminium, blachy o grubości 0,265 mm. Wykorzystano 5 stacji roboczych. Użyto oprogramowania Abaqus. Współczynnik tarcia przyjęto jako 0,1. Rolki formujące były modelowane jako ciała sztywne.

Praca [162] z 2017 dotyczyła obliczeń numerycznych oprogramowaniem Copra profilu otwartego H o wysokości 27 i szerokości 26,8 mm. Profil formowany był poprzez 18 stacji roboczych. Materiał blachy o grubości 1,2 mm to stal konstrukcyjna S450. W poszczególnych klatkach dolny walec był napędzany. Współczynnik tarcia pomiędzy walcami a blachą dobrano na podstawie doświadczeń przemysłowych i wynosił 0,21. Prędkość przesuwu blachy wynosiła 30 m/min. Ze względu na symetrię modelowano połowę przekroju. Wyniki modelowania porównano z laserowymi pomiarami profilu wykonanymi u wytwórcy. Interesujące jest, że autorzy wskazali na korzystny stosunek wymiarowy komórek siatki modelu w kierunkach wzdłuż i w poprzek przesuwu blachy pomiędzy stacjami roboczymi jako 1:4.

W pracy z roku 2018 [60] opisano formowanie profilu otwartego typu C z blachy o grubości 0,5 mm, w 10 stacjach roboczych. Badano stal Q235, wykorzystano oprogramowanie MSC. Marc. Przyjęto współczynnik tarcia równy 0,2.

Jedyny profil otwarty podobny do elektrody zbiorczej, chociaż geometrycznie prostszy, opisano w pracy z 2018 roku [71]. Był to profil trapezowy o wysokości 34,3 mm, wykonany z blachy o grubości bazowej 0,5 mm, szerokości 1,25 m i długości 2,5 m.

Badano kilka gatunków materiału: stal DX 51D, DX 53D oraz aluminium Al 99,5, kilka szerokości: 950, 1100 i 1250 mm oraz 3 grubości: 0,5, 0,6 i 0,7 mm. Pomiary wykonano na linii produkcyjnej z 20 stacjami roboczymi, gdzie moc silnika napędowego to 11 kW. Mierzono siłę docisku oraz moment obrotowy walców w stacjach roboczych. Przeprowadzono analizę statystyczną zebranych danych. Pozwoliło to na znalezienie relacji pomiędzy siłą docisku i momentem napędowym w funkcji danych: wytrzymałość na rozciąganie, grubość i szerokość blachy. Zależności te pozwoliły przeprowadzić modernizację linii produkcyjnej w przedsiębiorstwie. W roku 2018 podobne zagadnienie zapotrzebowania na energię do profilowania zaprezentowała praca [161]. Autorzy pokazali możliwości współczesnego oprogramowania do optymalizacji procesu wytwarzania profilu, jednak przyznają, że wartości te oszacowane na poziomie około 50%, mogą być przeszacowane. Zastosowano współczynnik tarcia o wartości 0,1. Rolki profilujące symulowano ciałami sztywnymi.

W opracowaniu z 2018 roku [151] podjęto próbę oceny wpływu zmian wymiarów asymetrycznego kształtownika na wartość cech geometrycznych takich jak: wygięcie wzdłużne i skręcenie poprzeczne. Zagadnienie profilowania modelowano wykorzystując oprogramowanie ABAQUS. Projekt zakładał przejście pasma giętego o grubości 0,6 mm przez dwie stacje profilujące. W analizie numerycznej uwzględniono współczynnik tarcia o wartości 0,2. Odległość między stacjami profilującymi wynosiła 145 mm. Zdefiniowany materiał odpowiadał stali DC01. Wartość analizowanych wielkości geometrycznych była mierzona po wyjściu profilu z ostatniego przepustu w odległości 145 mm.

Publikacja z 2019 roku [166] opisywała nowatorską metodę profilowania blach, gdzie dolna rolka może przesuwac się w pionie i poziomie, górna natomiast tylko w pionie. Badano doświadczalnie i numerycznie profilowanie blachy o grubości 1 mm i długości 1,2 m, ze stali DC04 oraz Al2024. Siatka numeryczna blacha została dobrana tak, że po grubości występują 2 elementy. Modelowano połowę przekroju blachy ze względu na symetrię. Rolki profilujące modelowano jako ciała sztywne. Zastosowano interesujący pomysł, aby blacha była nieruchoma a zestawy rolek poruszały się. Przebadano profilowanie według stałego promienia oraz długości łuku gięcia.

W pracy [168] z 2021 autorzy badali wpływ pięciu parametrów opisujących profilowany kształtownik asymetryczny na otrzymaną wartość skręcenia poprzecznego gotowego wyrobu. Do badań modelowych wykorzystano oprogramowanie COPRA RF i MSC MARC. Analiza numeryczna wykazała, że grubość materiału profilowanego ma największy wpływ na otrzymaną wartość skręcenia poprzecznego, natomiast pionowe ramiona kształtownika w najmniejszy stopniu kształtują omawianą cechę geometryczną.

Jedna z najnowszych publikacji z 2022 r [88] opisywała modelowanie numeryczne procesu profilowania kształtownika o przekroju zamkniętym wykonanego z stali B700L o granicy plastyczności  $R_e=728$  MPa. Analizę numeryczną przeprowadzono posilując się oprogramowaniem COPRA i ABAQUS. Głównym założeniem autorów opracowania było oszacowanie optymalnych nastawów procesu profilowania w celu ograniczenia zjawiska pofalowania krawędzi kształtownika. Do tego celu wykorzystano metodykę eksperymentu przyjmując jako czynniki wejściowe: współczynnik tarcia, grubość profilowanego materiału, wysokość kształtownika oraz prędkość profilowania. Problematyka oceny wpływu przyjętej strategii profilowania na wartość skręcenia poprzecznego kształtownika została podjęta w opracowaniu [167] z 2022 r.

Modelowano numerycznie proces wielotaktowego gięcia rolkowego zetownika wykonanego z stali wysokowytrzymałej S550GD+Z. Projekt rozwinięcia zetownika rolek profilujących i weryfikację numeryczną przeprowadzono w pakiecie COPRA RF/COPRA FEA. Analizowano w jakim stopniu usytuowanie kształtownika względem płaszczyzny rozwinięcia wpływa na wartość skręcenia poprzecznego profilu. Przyjęto dwa warianty obliczeniowe. Środek zetownika był obrócony względem osi X odpowiednio o 32 i 45<sup>0</sup>.

Praca [165] z 2022 r. przedstawia możliwości optymalizacji procesu profilowania. Badano wpływ czterech parametrów (odległość między stacjami profilującymi, współczynnik tarcia, przeswit między rolkami profilującymi oraz prędkość profilowania) na wartość maksymalnego odkształcenia na krawędzi profilowanej taśmy. Profilowany materiał odpowiadał stali nierdzewnej z gatunku SUS301L-ST. Pasma gięte miało grubość 2 mm i 2500 mm długości. Do rozwiązania optymalnego nastawu parametrów wykorzystano metodykę optymalizacji procesu Taguchi, natomiast proces gięcia symulowano oprogramowaniem COPRA. Analogiczna problematyka została przedstawiona w publikacji [21] z 2023 r. W tym przypadku do oceny wpływu czynników wejściowych opisujących proces technologiczny na wartość skręcenia poprzecznego kształtownika trapezowego wykonanego z aluminium. Proces gięcia symulowano w środowisku ABAQUS. Wykorzystano zaawansowane oprogramowanie Minitab do oceny wpływu poszczególnych zmiennych na badaną cechę geometryczną. Otrzymano model regresji wielorakiej opisującej zależność funkcyjną. Głównym miernikiem oceny otrzymanego modelu był skorygowany współczynnik determinacji.

Ostatnie dwie publikacje oraz opracowanie [99] dowodzą, że coraz częściej w badaniach naukowych wykorzystywane jest połączenie analiz numerycznych z metodyką eksperymentu w celu otrzymania optymalnego rozwiązania już na etapie opracowania projektu konkretnego produktu. W najnowszej publikacji [142] z 2023 r. autorzy w sposób praktyczny przedstawili sposób oceny wpływu przyjętej strategii gięcia na jakość finalnego produktu. Do analizy wykorzystano oprogramowanie COPRA RF i ABAQUS. Analizowano proces profilowania prostego kształtownika o przekroju otwartym wykonanego z stali Q235 (właściwości mechaniczne zbliżone do stali DC01) i grubości 1,5 mm. Projekt rozwinięcia uwzględniał przejście pasma przez 9 stacji roboczych. Analiza numeryczna została wykonana dla różnych wariantów kąta gięcia (zakres 0-90<sup>0</sup>). Optymalizowano wpływ przyjętej strategii gięcia na wartość kąta sprężynowania oraz szczytowych wartości naprężeń zastępczych w strefach gięcia. Podsumowując literatura opisuje wykorzystanie dwojakiego oprogramowania. Pierwsze to Abaqus czyli komercyjny, uniwersalny program do obliczeń metodą elementów skończonych zagadnień mechaniki ciała sztywnego, wytrzymałości, przepływu ciepła, dynamiki, drgań itp. Drugie to oprogramowania specjalistyczne, najczęściej Copra, poświęcone w szczególności procesowi przeróbki plastycznej.

Kolejna cecha tych publikacji to połączenie modelowania numerycznego z pomiarami na stanowiskach doświadczalnych lub przemysłowych. Wszędzie ważne są właściwości materiałowe. W trzech publikacjach występują elementy podejścia statystycznego. W opracowaniu [31] zaprezentowano wyniki analizy numerycznej profilowania ceownika wykonanego z stali S350GD z wykorzystaniem oprogramowania COPRA.

Zbadano wpływ parametrów procesu takich jak: stosunek promienia gięcia i grubości profilowanej taśmy, odległości między stacjami profilującymi, właściwości materiałowych i współczynnika tarcia na wartość wygięcia profilu, kąta sprężynowania oraz naprężeń resztkowych w gotowym kształtowniku.

W niniejszej pracy w rozdziale 11 zostanie przeprowadzona symulacja numeryczna profilowania elektrody zbiorczej oprogramowaniem Copra. Jako dane do obliczeń zostaną przyjęte dane materiałowe opisane również rozdziale 10. Szczegółowa analiza statystyczna właściwości materiału i parametrów geometrycznych gotowego profilu elektrody zostanie przeprowadzona w rozdziale 12.

## **7.2. Symulacje numeryczne eksploatacji**

Problematyka eksploatacji elektrofiltrów jest szeroko opisana w publikacjach krajowych i zagranicznych. W Polsce można wyróżnić dwa ośrodki: Akademię Techniczną -Humanistyczną w Bielsku Białej, Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie, gdzie kadra naukowa poprzez współpracę z przemysłem opublikowała wiele wartościowych opracowań. Dotyczy to m.in. symulacji numerycznych drgań mechanicznych elektrod zbiorczych odpylaczy elektrostatycznych. W Polsce wspomnianą tematykę zagłębiał już w latach siedemdziesiątych profesor Marian Sarna. Jako wieloletni pracownik zakładu doświadczalnego Fabryki Elektrofiltrów S.A. w Pszczynie, połączył wiedzę akademicką i praktyczną co pozwoliło mu na opracowanie wielu rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych.

W tym czasie nie dysponowano zaawansowanymi systemami informatycznymi. Publikacje M. Sarny [123-129] były podstawą do kontynuacji badań nad optymalizacją sekcji elektrod zbiorczych.

W pracy [129] autor potraktował elektrody zbiorcze jako cienkościennie pręty o przekroju otwartym z jedną płaszczyzną symetrii dla których zastosował teorię Własowa. Badał przyspieszenie w cienkościennym pręcie na podstawie teorii propagacji fal, traktując wzbudzący impuls jako znany. Kontynuacją tych rozważań były publikacje [123-124, 128]. W tych pracach M. Sarna przedstawił analityczny opis uderzenie młotka przerzutowego w belkę wzbudzącą drgania oraz rozważania dotyczące dyskretno-ciągłego układu mechanicznego składającego się z szeregu oscylatorów harmonicznym. W publikacji [127] badano wpływ parametru „h” na czasowy przebieg oddziaływania pręta na elektrody osadcze. Parametr „h” wiązał w sobie pole przekroju poprzecznego pręta i masę zredukowaną elektrody. Dla zmiennej siły uderzenia w pręt najkorzystniejszy wariant uzyskano dla wartości  $h=20000$  1/s, przy której szczytowe wartości siły miały stosunkowo mały rozrzut. W opracowaniu [126] przedstawione zostały wyniki obliczeń i pomiary naprężeń w belkach wzbudzających drgania w elektrodach osadczych.

Z danych zamieszczonych w publikacji [125] wynika, że pokrycie młotka strzepywacza warstwą pyłu o grubości 2-3 mm powodowało zmniejszenie naprężeń w trzonku młotka o 28%. Jako wniosek przyjęto, że taka skala spadku naprężeń ma korzystny wpływ na podniesienie żywotności bijaków lecz niekoniecznie ze względu na obniżenie wartości przyspieszeń elektrod.

Badania ośrodka bielskiego skupione są na analizie zagadnień związanych ze zjawiskami mechanicznymi zachodzącymi podczas wzbudzania drgań elektrod zbiorczych, tak aby zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne układu strzepywacz-elektrody zbiorcze

pozwoiliło na uzyskanie najbardziej efektywnego procesu oczyszczania powierzchni elektrod z pyłu. W tym zakresie powstało wiele opracowań naukowych o tematyce modelowania dynamiki płyt elektrod osadczych przy wykorzystaniu modelu elementów skończonych, modelu hybrydowego oraz modelu pasm skończonych.

W opracowaniu [18] porównano wyniki weryfikacji metody hybrydowej łączącej w sobie elementy metody odkształcalnych elementów skończonych MES i metody sztywnych elementów skończonych SES. Badano częstość drgań własnych pojedynczego profilu elektrody zbiorczej, a następnie przeprowadzono weryfikację sekcji składającej się z dziewięciu płyt osadczych. Analizę numeryczną wykonano dla różnych wariantów zawieszenia elektrod oraz ich mocowania z drągiem strzepującym. Dodatkowo wyznaczono przemieszczenia drąga strzepującego przy obciążeniu układu siłą skupioną  $F=1000$  N. Otrzymane wyniki obliczeń przy wykorzystaniu metody hybrydowej nie różniły się więcej niż 3,2% do uzyskanych w pakiecie oprogramowania komercyjnego.

W pracy [113] A. Nowak przedstawił model numeryczny umożliwiający symulację drgań mechanicznych elektrod zbiorczych wywołanych siłą impulsową w procesie strzepywania pyłu. Autor badał wpływ sposobu łączenia elektrod z belką zawieszeniową i drągiem strzepującym na otrzymaną wartość przyspieszeń stycznych i normalnych. Podzespoły dyskretyzowano metodą elementów skończonych, w której do aproksymacji pola przemieszczeń translacyjnych i rotacyjnych powłok zastosowano własny element prostokątny o 24 wielkościach węzłowych. Łączniki mechaniczne tj. nity i śruby uwzględniono w symulacji jako masy skupione. Badany układ składał się z 9-ciu elektrod zbiorczych typu Sigma VI o długości 16,15 m. Wyniki obliczeń numerycznych porównano z danymi otrzymanymi na stanowisku badawczym. Zgodność wyników badano posługując się wskaźnikami: sprawdzalności FAC2 oraz zgodności  $q_e$ .

Analogiczny kierunek badań zamieszczono w opracowaniu [124, 129]. Rozwinięciem powyższych rozważań są publikacje [1-2]. W pracy [2] porównano wyniki modelowania numerycznego układu elektrod zbiorczych za pomocą: metody elementów skończonych, hybrydowej metody elementów skończonych, metody pasm skończonych oraz modelu zaimplementowanego w pakiecie komercyjnym Abaqus. Wyniki obliczeń porównano z pomiarami doświadczalnymi. W analizie wyników posłużono się tymi samymi wskaźnikami co w pracy [113]. Przebieg zmienności siły uderzenia w czasie zmierzono doświadczalnie, a następnie w obliczeniach numerycznych bazowano na tych danych. Dla modelu elementów skończonych i pasm płytowych uzyskano dużą zgodność w odniesieniu do szczytowych wartości przyspieszeń normalnych i stycznych oraz wartości zmierzonych doświadczalnie.

W pracy [1] autorzy analizowali wpływ topologii elektrody zbiorczej typu Sigma tj. kątów wygięcia profilu w jego części środkowej na częstotliwość drgań własnych płyty elektrody. W wyniku obliczeń dowiedziono, że im większe wartości kąta profilu elektrody, tym większe wartości częstości drgań własnych można uzyskać. W pracy sprawdzono również wpływ gęstości dyskretyzacji analizowanego modelu w kierunku osi X na otrzymane wartości przyspieszeń. I. Adamiec-Wójcik w swoim opracowaniu [5] zestawiała wyniki symulacji numerycznej częstości drgań własnych elektrody zbiorczej typu Sigma o długości 15 m. Obliczenia przeprowadzone zostały przy użyciu modelu hybrydowego. Wyniki porównano z wynikami z popularnych pakietów komercyjnych Ansys i Abaqus. Różnica w otrzymanych wynikach wynosiła odpowiednio 10% i 5,5%.

Podobną metodykę badań zastosowano w publikacji [4], gdzie również wyliczono dziesięć częstości drgań własnych przy użyciu pakietów komercyjnych Ansys, Abaqus oraz metody hybrydowej i pasm płytowych. Autorka sprawdziła dodatkowo wpływ dyskretyzacji analizowanego modelu na wartość częstości drgań własnych. W publikacji [3] autorzy zilustrowali przebieg przyspieszeń normalnych do powierzchni płyt elektrod w płacie. Analizowany model składał się z 3 płyt o długości 15 m i grubości 1,5 mm. Do obliczeń przyjęto trójkątny przebieg zmiany siły uderzenia. Przedstawiono na wykresach przebiegi przyspieszeń w punktach połączeń elektrod z belką górną i dolną oraz w punktach kontrolnych znajdujących się w  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  i  $\frac{3}{4}$  wysokości płyty. Przedstawione przebiegi przyspieszeń umożliwiły analizę rozprzestrzeniania się drgań w sekcji elektrod osadczych.

W pracy [105] zwrócono uwagę na problem oceny wpływu przyjętego sposobu dyskretyzacji na wyniki obliczeń. Dyskretyzację wykonano dla podziału pasm elektrody po długości kolejno na 10, 15, 30, 45 i 60 elementów. W wyniku oceny składowych przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia dla przyjętych punktów kontrolnych, zauważono, że wyniki są jakościowo zgodne, natomiast różnice ilościowe maleją wraz ze wzrostem liczny elementów. W publikacjach [106, 108, 112] również do obliczeń został wykorzystany model hybrydowy. Autor przeanalizował cztery profile elektrod zbiorczych, które porównał z płaską blachą pod kątem propagacji drgań mechanicznych w płacie. Sprawdził wpływ lokalizacji drąga strzepującego na otrzymane wartości przyspieszeń. Z przedstawionych wyników opracowania można wnioskować, że im bardziej ukształtowana jest płyta elektrody, tym możliwe jest otrzymanie wyższych wartości przyspieszeń normalnych. Dla płaskiej blachy A. Nowak otrzymał najwyższą wartość przyspieszeń stycznych. Autor zwrócił uwagę, że zmiana pozycji drąga strzepującego w górę sekcji elektrod nie spowodowała istotnego wzrostu przyspieszeń. Wyniki analizy dowodzą, że usytuowanie belki dolnej wpływa nie tylko na szczytową wartość przyspieszenia, ale również na równomierny jego rozkład w całym płacie oraz jego czas propagacji.

W publikacji [108] autorzy sprawdzili wpływ kąta przyłożenia impulsu siły wzbudzającej drgania sekcji elektrod na wartości szczytowe przyspieszeń stycznych i normalnych. Dla kąta  $90 \pm 5^\circ$  nie zaobserwowano znaczącej różnicy w wynikach obliczeń. Różnice w wynikach zaobserwowano przy wartości kąta  $90 \pm 10^\circ$ . Biorąc pod uwagę aspekt optymalizacji konstrukcji interesujące wyniki badań zostały opublikowane w pracy [107]. Sprawdzone wpływ sztywności drąga strzepującego na propagację drgań mechanicznych płata. Analizowano dwa rodzaje profili hutniczych: kształtowniki stalowe okrągłe i prostokątne dla różnych typoszeregów wymiarowych. Analiza numeryczna wykazała, że profile hutnicze o mniejszym przekroju poprzecznym pozwalają na uzyskanie korzystniejszych parametrów użytkowych, ale z punktu trwałości eksploatacyjnej takie rozwiązanie jest mało obiecujące.

Parag Wanjari i K.M. Nakar w publikacji [169] poszukiwali wartości przemieszczeń w strefie dolnej i środkowej sekcji. Płyty elektrod modelowano jako elementy powłokowe, pozostałe podzespoły jako elementy bryłowe. Uzyskano dużą zgodność z wynikami doświadczalnymi. Największą wartość przemieszczenia zlokalizowano w środkowej strefie płata, najmniejszą w dolnej jego strefie. W pracy [101] Pannkaaj More i D. H. Burande analizowali układ dwóch płyt elektrod zbiorczych. Drgania w układzie generował siłownik pneumatyczny sprzężony z belką zawieszeniową.

Sprawdzono przemieszczenia dla punktów kontrolnych zlokalizowanych w środkowej części sekcji. Do obliczeń wykorzystano analizę czasową – transient response. Maksymalną wartość przemieszczenia otrzymano po 0,5 s od czasu przyłożenia impulsu wywołującego drgania układu. Identyczną metodykę badań zaproponowali Vishal P. Atole i D. N. Koorde w opracowaniu [9] z tym, że poszukiwano wartości przemieszczenia w środkowej części płata i w odległości 1 m od belki górnej i dolnej.

Parag Wanjari i K. M. Narkar w pracy [170] zwrócili uwagę, na dużą efektywność tzw. hybrydowego sposobu oczyszczania płyt elektrod zbiorczych. Metoda hybrydowa łączy w sobie system górnego i bocznego strzepywania przy użyciu siłowników pneumatycznych. Według wymienionych powyżej autorów taki sposób regeneracji powierzchni elektrod jest wysoce wydajny szczególnie dla dużych wysokości sekcji.

Autorzy publikacji [49] analizowali zmianę rozkładu przyspieszeń na powierzchni elektrody typu Sigma o długości  $L=5577$  mm i grubości 1,5 mm przy zastosowaniu dwóch różnych wartości impulsu siły wzbudzającej drgania. Jako miarę oceny wyników przyjęto średnia kwadratową przyspieszenia.

Publikacja [93] porusza problematykę wytrzymałości zmęczeniowej młotka strzepywacza. Bijaki w zależności od nastawów pracy mechanizmu strzepywaczy wykonują ok. 500 000 uderzeń w ciągu roku. Celem pracy była identyfikacja rozkładu naprężeń zredukowanych w młotku strzepywacza co umożliwiło autorom zoptymalizować jego geometrię. Maksymalna wartość naprężenia w trzonku młotka wyniosła 145 MPa. Autorzy przeanalizowali również rozkład przyspieszenia całkowitego dla sekcji elektrod, której gabaryty odpowiadały elektrofiltrowi wielkogabarytowemu. Płat elektrod składał się z 6-ciu elektrod typu Sigma o długości 12,5 m i grubości 1,5 mm. Najmniejszą wartość przyspieszenia otrzymano dla ostatniej elektrody w płacie na wysokości 11 m (355 g), największą na drugiej elektrodzie (850 g). Badania nad optymalizacją młotka strzepywacza podjęto również w pracach [109, 111, 114].

Badania modelowe wykonane w publikacji [109] polegały na przygotowaniu szeregu modeli dyskretnych układu strzepywacz-elektrody. Celem badań było przygotowanie modelu o różnym stopniu uproszczenia od 100 tysięcy elementów dyskretnych do kilkuset. A. Nowak w pracy [111] wykonał optymalizację geometrii bijaka w celu uzyskania maksymalnej prędkości w chwili uderzenia przy jednoczesnym zredukowaniu do zera impulsu sił w układzie młotka. Rozwinięciem zagadnienia jw. jest zagadnienie optymalizacji kształtu bijaka strzepywacza w celu uniknięcia niepożądanego impulsu sił w osi jego obrotu, oraz uzyskanie możliwie najwyższej energii w chwili jego uderzenia w kowadło drąga strzepującego [114].

W opracowaniach własnych autora rozprawy doktorskiej [158-160] również podjęta została tematyka modelowania numerycznego sekcji elektrod zbiorczych elektrofiltrowi suchego. W publikacji [160] zestawiono wyniki symulacji numerycznej drgań własnych i wymuszonych elektrody zbiorczej o różnych cechach geometrycznych. Badano sześć typów elektrod osadczych o grubości: 1, 1,25 i 1,5 mm i długości 12 m. W założeniu powierzchnia osadcza wszystkich analizowanych paneli była jednakowa. Porównano wartości przyspieszeń stycznych i normalnych na powierzchniach analizowanych płyt. Obliczenia przeprowadzono oprogramowaniem Ansys 17.0. W opracowaniu [159] przedstawiono analizę rozwiązań konstrukcyjnych płatów elektrod zbiorczych o szerokości całkowitej 2970 mm.

Dla ośmiu wariantów remontowo-modernizacyjnych sprawdzono rozkład przyspieszenia całkowitego na powierzchni płyta, przyjmując za kryterium redukcję jego masy. Do porównawczych obliczeń wybrano jako podstawowy profil Sigma o szerokości 480 i 960 mm oraz długości 12 m. Analizę wykonano oprogramowaniem Autodesk Nastran In-Cad 2017. Dopełnieniem i rozwinięciem problematyki jw. jest publikacja [158] z 2017 r. Celem symulacji dynamicznej przedstawionej w opracowaniu autora rozprawy doktorskiej było określenie wpływu masy młotka przerzutowego na otrzymaną wartość impulsu siły uderzenia. Wyznaczono przebiegi siły uderzenia w czasie dla strzepywacza z młotkiem pojedynczym i podwójnym. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wzrost masy bijaka o 50% powoduje podobny wzrost maksymalnej siły uderzenia.

### **7.3. Badania modelowe w skali i rzeczywiste**

Literatura światowa zawiera również nieliczne pozycje pokazujące badania modelowe elementów mechanicznych elektrofiltru, głównie są to elektrody zbiorcze wraz z układem strzepującym pył oraz elektrody ulotowe. Poniżej przedstawiono opis tych pozycji. W publikacjach z 2013 roku [23-24] autorzy opisali badania zestawu 26 płaskich blach o wymiarach 230x380, symulujących elektrody elektrofiltru, wraz z prętami mocującymi, obudową, izolatorami oraz prętem wzbudzającym. Elektrody wzbudzano do drgań elektromagnetycznym wzbudnikiem. Uzyskano zakres częstotliwości od 10 do 260 Hz. Wcześniej symulowano numerycznie drgania własne układu programem Ansys. Sprawdzono pierwszych 9 częstotliwości własnych układu, uzyskując około 90% zgodności w porównaniu z pomiarami stanowiskowymi.

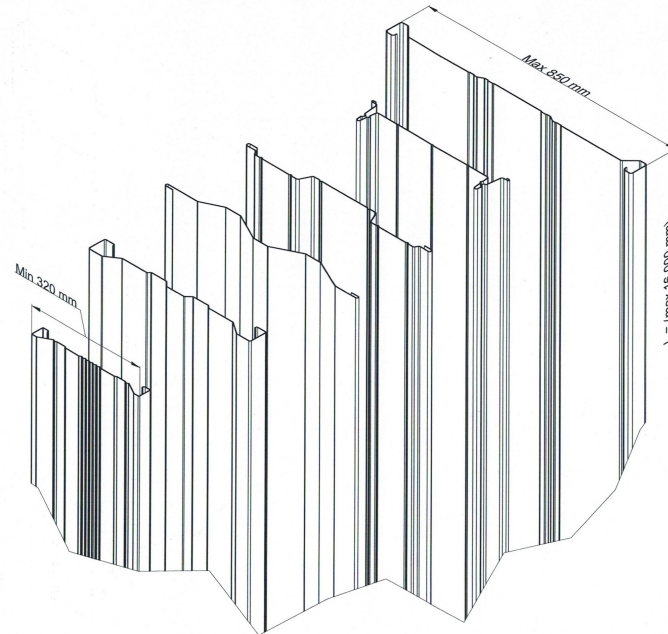
Jednak najwięcej publikacji dotyczy badań modelowych zjawisk elektrostatycznych, często połączonych z analizą numeryczną. Są to pozycje zagraniczne [29, 32, 47, 63] oraz krajowe [46, 66, 74]. Jedną z pozycji to praca z 2013 roku [177], która opisuje badania eksperymentalne elektrofiltru z poziomymi ustawionymi, w stosunku do przepływu, elektrodami zbiorczymi. Taki pomysł budowy elektrofiltrów powstał w latach 60-tych XX wieku, ale wciąż jest w obszarze zainteresowań. Autorzy twierdzą, że jest to konstrukcja perspektywiczna, jedną z jej zalet jest fakt, że działa jak komora osadcza, zatrzymując szczególnie pyły o większych ziarnach, nawet bez przyłożonego napięcia. Jednak nie wykazuje on przewagi nad klasycznym układem elektrod. W najnowszych publikacjach z 2021-2022 r. [7, 25-26] autorzy przedstawili wyniki badań modelowych elektrofiltru w warunkach laboratoryjnych. Badano wpływ zastosowanych typów elektrod ulotowych (taśmowych i gwoździowych), wytworzonego prądu ulotu na wielkość cząstek pyłu emitowanych do atmosfery. W publikacji [25-26] sprawdzono ponadto wpływ jakości spalanej biomasy w postaci peletu na wielkość cząstek pyłu zawieszonego PM (Particulate Matter). Otrzymano skuteczność odpylania na poziomie 90%.



## 8. Opis elektrody zbiorczej

### 8.1. Kształt

Na rys. 25 przedstawiono różne typy elektrod zbiorczych spotykane w elektrofiltrach płytowych. Najczęściej w instalacjach krajowych i zagranicznych stosowane są elektrody zbiorcze typu Sigma i płytowe o szerokości 320÷850 mm, długości do 16 m i grubości 1,2÷1,5 mm [36].



Rys. 25. Różne typy elektrod zbiorczych. Od prawej: GS 750, EEC USA, CSV i ZT24 Lurgi (płytowe), Sigma VI, Sigma I [160]

Odpowiednio profilowana geometria elektrody typu Sigma:

- osłania przestrzeń zbiorczą elektrody od strumienia gazu;
- zabezpiecza osadzony i strzepywany pył przed ponownym porywaniem;
- zapewnia wysoką zdolność zbiorczą osadzonego na elektrodach pyłu;
- charakteryzuje się dużą sztywnością ograniczającą deformacje i odkształcenia mogące powstać w trakcie montażu, składowania i pracy w podwyższonych temperaturach;
- cechuje się korzystną charakterystyką dynamiczną, niskim tłumieniem i prawidłową propagacją drgań podczas strzepywania pyłu, bez stref martwych;
- jest pozbawiona ostrych krawędzi przez co jej wytrzymałość elektryczna na przebicia jest stosunkowo wysoka;
- jej kształt ułatwia opadanie pyłu podczas regeneracji z minimalnym unosem wtórnym, zapewnia korzystne warunki aerodynamiczne podczas przepływu gazu przez komorę elektrofiltru;
- pozwala utrzymać z wymaganą dokładnością podziałkę międzyelektrodową w całym zakresie temperatur pracy elektrofiltru;
- jest stosunkowo lekka i przy strzepywaniu wykazuje wysoką, w miarę wyrównaną częstotliwość drgań własnych na całej powierzchni zbiorczej niezależnie od jej długości.

Problematyka doboru topologii i szerokości elektrody zbiorczej, która spełniałaby wymagania, jak wyszczególniono powyżej, jest zadaniem złożonym. W literaturze brak jest obszernych opracowań w tym zakresie, które obejmowałyby zarówno analizę parametrów użytkowych, jak również aspekty technologiczne związane z procesem wytwarzania.

W praktyce przemysłowej producenci elektrofiltrów posiadają własne rozwiązania profili elektrod osadczych i zazwyczaj na nich bazują. Problem pojawia się w momencie konieczności zastosowania nowego rozwiązania np. zmiany gatunku stali, modyfikacji kształtu, zwiększenia szerokości profilu lub zmniejszenia jego grubości. Brak dostatecznej wiedzy w obszarze technologii wykonania, powoduje, że podmioty z branży energetycznej niechętnie wprowadzają zmiany w swoich rozwiązaniach, obawiając się np. niedotrzymania dopuszczalnych tolerancji wykonania elektrod zbiorczych, co może w konsekwencji rzutować na poprawną pracę elektrofiltru. Zagadnienia technologiczne omówiono szczegółowo w rozdziale 8.3.

## **8.2. Zagadnienia materiałowe**

W wyniku spalania większości paliw powstałe gazy spalinowe zawierają, w zależności od prowadzonego procesu spalania oraz jakości paliwa,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  oraz lotne popioły i pyły. Szczególnie w przypadku paliw stałych udział popiołów i pyłów w gazach spalinowych jest znaczny [30, 42]. Unoszone pyły mogą zawierać szereg pierwiastków rzadkich takich jak: Be, Ge, Cs, Hf, Li, Mo, Ta, Ti, V, W. W czasie eksploatacji elektrofiltrów panująca temperatura (najczęściej powyżej  $150^\circ\text{C}$ ) jest czynnikiem uniemożliwiającym kondensację pary wodnej wewnątrz komory elektrofiltru. Chroni to przed tworzeniem się szczególnie groźnego kwasu siarkowego. Elektrofiltry podlegają okresowym wyłączeniom związanym z cyklem grzewczym i remontowym. Od momentu wyłączenia aż do całkowitego ostygnięcia elektrofiltru następuje gwałtowne korodowanie elementów odpylacza.

W wyniku spadku temperatury następuje przekroczenie punktu rosy i wykroplenie się pary wodnej na powierzchni stali. W wyniku połączenia  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$  z parą wodną powstają kwasy o różnym działaniu korozyjnym. Szczególnie wykraplanie się kwasu siarkowego na powierzchni stali powoduje przyśpieszenie procesów korozyjnych. Wewnętrzne ściany komory elektrofiltru, jak również elementy wyposażenia wewnętrznej komory są pokryte warstwą pyłu. Tworzą się wówczas roztwory siarczanów w stosunku do których stal węglowa wykazuje niską odporność korozyjną [42]. W zależności od temperatury pracy elektrofiltru oraz związków zawartych w spalinach, elektrody zbiorcze wykonuje się z odpowiednich gatunków stali. Zakres temperatury pracy elektrofiltru wynosi  $150\text{--}500^\circ\text{C}$ . W zakresie poniżej  $300^\circ\text{C}$  na elektrody zbiorcze stosuje się stale węglowe. Powyżej tej temperatury producenci zazwyczaj stosują gatunki przeznaczone do pracy w podwyższonej temperaturze. W przypadku bardzo agresywnego środowiska pracy elektrofiltru (przemysł chemiczny, huty miedzi) jego poszczególne elementy wykonuje się ze stali o podwyższonej odporności na korozję atmosferyczną lub nierdzewnych. W tablicach 3-4 zestawiono gatunki stali stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych w oparciu o dane archiwalne Fabryki Elektrofiltrów ELWO S.A w latach 1974-2007 [10, 61, 78, 181-183, 185-186, 193-194].

Tablica 3. Skład chemiczny stali stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych [10, 61, 78]

Skład chemiczny %	Oznaczenie materiału					
	10X	10J	DC01	St37-3G 03m	S235J0C+N	12H1JA
C	0,07-0,14	0,08-0,15	Max 0,12	Max 0,17	Max 0,19	0,08-0,15
Mn	0,25-0,50	0,30-0,60	Max 0,6	-	Max 1,5	0,5-1,0
Si	Max 0,04	Max 0,05	-	-	-	0,25-0,60
P	Max 0,04	Max 0,035	Max 0,045	Max 0,04	Max 0,04	0,06-0,12
S	Max 0,04	Max 0,045	Max 0,045	Max 0,035	Max 0,04	Max 0,035
Al	-	Min 0,02	-	-	-	0,14-0,25
Cr	-	-	-	-	-	0,40-0,80
Cu	-	-	-	-	Max 0,6	0,30-0,55
N	-	-	-	-	0,014	

Tablica 4. Właściwości mechaniczne stali stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych [10, 61, 78]

Oznaczenie materiału	Norma/Materiały źródłowe	Właściwości mechaniczne	
		Re [MPa]	Rm [MPa]
10X	PN-66/H-84019	Min 186	Min 314
10J	TWT-34/89	Min 260 (dop. 235)	270-430
DC01	EN 10130	140-280	270-410
St37-3G 03m	DIN 1623 Teil 3	Min 215	360-510
S235J0C+N	EN 10025-1	Min 235	360-510
12H1JA	TWT-41/92	Min 300	400-600

Stal 10J została opracowana z przeznaczeniem na blachy bardzo głęboko i głęboko tłoczne. Materiał ten znalazł stosowanie do produkcji elektrod zbiorczych w latach siedemdziesiątych. Stal 10J charakteryzowała się wysokimi współczynnikami anizotropii normalnej i umocnienia. Ponadto wykazywała bardzo dobrą podatność do profilowania. W opracowaniu [154] dokonano prób porównawczych gatunków 10J (uspokojonej glinem) oraz 10X i 08X (stal nieuspokojona) stosowanych na elektrody zbiorcze. Celem ekspertyzy było wyeliminowanie zjawiska sprężynowania elektrod, powodowanego starzeniem materiału, niewłaściwymi własnościami mechanicznymi lub technologicznymi.

Uspokojenie stali 10J glinem zapewniało jest odporność na starzenie i nie powodowało spadku własności mechanicznych w czasie dłuższego magazynowania. Gatunek 10J nie jest obecnie dostępny na rynku, natomiast stanowił odniesienie dla swoich zamienników. Po wycofaniu ww. gatunku z programu produkcji stali z powodzeniem został zastąpiony stalą konstrukcyjną niestopową St37-3G, a następnie z przyczyn ekonomicznych DC01. W Fabryce Elektrofiltrów ELWO S. A. w Pszczynie gatunek St37-3G 03m był uważany za optymalny materiał z uwagi na technologię profilowania. W 2007 r. w ww. spółce przeprowadzono próby technologiczne w zakresie profilowania elektrod zbiorczych z taśmy zimnowalcowanej z gatunków St37-3G i St44-3G (gatunki specjalnie uspokojeone) [181-183]. Przeanalizowano szereg atestów materiałowych dla obu gatunków pod względem rzeczywistej granicy plastyczności, która wynosiła odpowiednio: dla gatunku St37-3G (256÷289 MPa) i (285÷330 MPa) dla stali St44-3G. Warto nadmienić, że jako kryterium przydatności technologicznej taśmy stalowej przyjmowano jej granicę plastyczności. Z uwagi na konieczność optymalizacji konstrukcji elektrofiltrów i obniżenia całkowitego kosztu wytworzenia tych urządzeń, zaczęto poszukiwać tańszych zamienników dla sprawdzonych już materiałów. Dotyczyło to również materiału stosowanego na elektrody zbiorcze.

Dostawcy stali jako substytut gatunku St37-3G zaproponowali stal konstrukcyjną gorącowałcowaną S235J0C+N, charakteryzującą się zbliżonymi własnościami do swojego poprzednika, gdzie: N - oznacza stan dostawy (walcowanie normalizacyjne), C - oznacza przydatność do szczególnych zastosowań, w tym m.in. kształtowania rolkowego na zimno [187-188]. Obecnie główni producenci elektrofiltrów stosują do produkcji elektrod osadczych stal DC01. Własności wspomnianego gatunku stali nie są gwarantowane przez normę przedmiotową PN-EN 10130+A1 w zakresie podatności do obróbki plastycznej na zimno. Kryteria te spełniają gatunki DC02 i DC03 [193-194].

Stal DC01 nie jest materiałem zamiennym w stosunku do stali 10J w zakresie bardzo istotnej dla procesu gięcia rolkowego elektrod izotropowości własności plastycznych tj. w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania. Autorzy sprawozdania [97] przedstawili wyniki badań porównawczych odcinków elektrod zbiorczych profilowanych ze stali zimnowalcowanej DC01, 10J oraz gorącowałcowanej DD11 [192]. Celem przedmiotowych badań było sprawdzenie: mikrostruktury, własności wytrzymałościowych i anizotropii własności analizowanych gatunków. Współczynniki anizotropii normalnej i umocnienia elektrod profilowanych ze stali DD11 okazały się znacznie niższe w odniesieniu do gatunków DC01 i 10J. Z porównania mikrostruktur wynikało, że tylko stal 10J posiadała cechy stali głębokotłocznych. Stal DC01 charakteryzowała się drobniejszym i mocno zróżnicowanym pod względem wielkości ziarnem o nieregularnych granicach. Z danych przedstawionych w pracy wynika, że dla stali DD11 wskaźnik anizotropii normalnej wynosił 0,87 i nie spełniał wymagań stawianym stalom przeznaczonym do tłoczenia.

W 2018 r. Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach na zlecenie firmy Bufil Sp. z o. o. z Pszczyny, zajmującej się produkcją elektrod zbiorczych przeprowadził badania właściwości mechanicznych i analizę składu chemicznego odcinków próbnych taśmy zimnowalcowanej grubości 1,5 mm z gatunku DC01. Badania wykazały bardzo duży rozrzut własności mechanicznych i składu chemicznego dla kilku różnych wytopów [84-85]. Według opracowań [42] z 2003 r. dla Fabryki Elektrofiltrów Elwo S.A. wynika, że zastosowanie na elektrody zbiorcze stali o podwyższonej odporności na korozję atmosferyczną typu Corten [189] jest mało obiecujące, przy czym nie wyklucza wspomnianego gatunku. Występujące środowisko korozyjne w elektrofiltrach jest za bardzo agresywne dla tych stali. Powody agresywności środowiska są następujące [42]:

- mała cykliczność zwilżania i suszenia powierzchni (niekorzystne warunki do tworzenia się patyny);
- możliwość wykraplania się kwasu siarkowego w czasie stygnięcia elektrofiltru (stale trudnordzewiejące nie są odporne na kwas siarkowy);
- ścierne działanie pyłów w czasie osadzania i podczas ich strzepywania z powierzchni płyty elektrody (warunki uniemożliwiające utworzenie się patyny).

Jak wspomniano powyżej, w przypadku bardzo agresywnego środowiska pracy elektrofiltru zachodzi konieczność zastosowania przeznaczonych dla takich warunków gatunków stali – zazwyczaj nierdzewnych. Najczęściej spotykanymi materiałami w specyfikacjach technicznych dostawców elektrofiltrów są gatunki zestawione w tablicach 5-6 [17, 190-191].

Tablica 5. Właściwości mechaniczne stali nierdzewnych stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych [17, 190-191]

Oznaczenie stali wg EN 10088-2		AISI	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	Struktura
Znak	Numer					
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	240÷270	530÷680	40	Austenityczna
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	904L	240÷270	530÷730	35	Austenityczna
X6CrNiTi18-10	1.4541	321	220÷250	520÷720	40	Austenityczna
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	280÷300	380÷530	20	Ferrytyczna
X2CrTi17	1.4520	-	180÷200	380÷530	24	Ferrytyczna

Tablica 6. Skład chemiczny stali nierdzewnych stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych [17, 190-191]

Oznaczenie stali wg EN 10088-1	Skład chemiczny %							
	Numer	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Inne
1.4404	≤ 0,030	16,5÷18,5	10,0÷12,5	2,0÷2,5	-	-	-	-
1.4539	≤ 0,020	19,0÷21,0	24,0÷26,0	4,0÷5,0	1,2÷2,0	-	-	-
1.4541	≤ 0,08	17,0÷19,0	9,0÷12,0	-	-	-	-	Ti:5xC+0,70
1.4521	0,025	17,0÷20,0	-	1,80÷2,5	-	[4x(C+N)+0,15	-	-
1.4520	0,025	16,0÷18,0	-	-	-	16,0÷18,0	-	-

Stale nierdzewne austenityczne stosowane do produkcji elektrod zbiorczych wykazują dużą plastyczność i podatność do profilowania. W wyniku obróbki plastycznej na zimno tych stali, wzrasta ich wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności, a maleje wydłużenie. Umocnienie materiału jest związane z przemianą austenitu w martenzyt, który charakteryzuje się wysoką twardością i wytrzymałością. Umocnienie zgniotem powoduje, że w procesie gięcia rolkowego wymagane są większe siły kształtowania. Głównym składnikiem stopowym stali nierdzewnych austenitycznych jest nikiel (ok. 8%). Wysokie ceny tego składnika stopowego przekładają się na wysoką cenę stali austenitycznych. Taka sytuacja rynkowa zmusza producentów elektrofiltrów do poszukiwania tańszych zamienników dla tej grupy stali nierdzewnych.

Stale nierdzewne o strukturze ferrytycznej wg [17, 119] mogą stanowić alternatywę dla stali nierdzewnych austenitycznych, ponieważ są tańsze, a jednocześnie spełniają wymogi odporności korozyjnej. Plastyczność tych stali jest zbliżona do miękkiej stali węglowej. Zawsze dostarczone są one w stanie wyżarzonym, a ich granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie nie ulegają dużej zmianie w wyniku przeróbki plastycznej. Ponadto wykazują mniejszą podatność na odkształcenie wsteczne (sprężynowanie). Gatunek 444 z 2% dodatkiem molibdenu posiada bardzo zbliżoną odporność na korozję w agresywnym środowisku do gatunku 316L. W pracy [92] przedstawiono bardzo interesujące wyniki badań wykonanych dla hybrydowych kompozytów polimerowych na bazie żywicy fenolowej, włókien szklanych, włókien węglowych i nano proszku grafitowego jako alternatywy dla stali jako materiału wykorzystywanego na elektrody zbiorcze. Badania obejmowały sprawdzenie oporności właściwej zastosowanego materiału, własności mechanicznych oraz analizę zmęczenia elektrod po wykonaniu cyklu strzepywania na stanowisku badawczym. Sprawdzano wpływ procentowego udziału poszczególnych składników różnych konfiguracji hybrydowych kompozytów polimerowych na omawiane własności. Autor rozprawy doktorskiej w publikacji [156] porównał dotychczas stosowane gatunki stali na elektrody zbiorcze w zależności od środowiska pracy odpylacza.

### 8.3. Metoda wytwarzania

Elektrody zbiorcze są cienkościennymi profilami stalowymi o przekroju otwartym. Podczas opracowywania dokumentacji projektowej elektrody osadcznej należy uwzględnić zarówno wytyczne dotyczące jej walorów użytkowych, jak również wytyczne ściśle związane z technologią jej wykonania. Od strony technologicznej należy zwrócić uwagę na właściwe proporcje przekroju poprzecznego profilu, odpowiednie promienie gięcia (zależne od gatunku materiału), długości odcinków prostych, liczbę zagięć oraz proporcje poszczególnych wymiarów. Zbyt duże promienie gięcia zmniejszają dokładność wykonania elektrod osadcznych, natomiast zbyt małe, mogą prowadzić do powstania pęknięć na zewnętrznych powierzchniach łuków [48,172].

Geometria elektrody osadcznej charakteryzująca się zbyt dużymi odcinkami płaskimi powoduje nadmierne pofalowanie części płaskiej i skręcenie wzdłużne profilu. Ważnym problemem przy produkcji kształtowników giętych na zimno (elektrod zbiorczych) jest niepożądane zjawisko sprężynowania materiału, które powoduje odginanie się uprzednio zagiętych elementów kształtownika. Zgodnie z danymi literaturowymi [172] kąt sprężynowania zwiększa się wraz z:

- większą wytrzymałością materiału na rozciąganie  $R_m$ ;
- stosowaniem w poszczególnych przepustach większych kątów gięcia;
- zwiększeniem promieni gięcia;
- zmniejszeniem grubości materiału wsadowego;
- mniejszą szerokością zaginanych ramion kształtownika.

Proces technologiczny wykonania elektrod zbiorczych polega na wielotaktowym gięciu rolkowym taśmy stalowej o grubości 1,2÷1,5 mm z wykorzystaniem stopniowej metody kalibrowania – rys. 26. Ilość stacji roboczych uzależniona jest od kształtu profilu elektrody osadcznej oraz gatunku zastosowanego materiału. Do wykonania elektrod zbiorczych typu Sigma wystarczające jest zastosowanie 18-tu stacji roboczych. Pozwala to spełnić wymagania jakościowe i zapewnić stabilność procesu gięcia.



a)

b)

Rys. 26. Proces profilowania elektrody zbiorczej: a) widok wzdłuż poszczególnych stacji roboczych, b) etap kształtowania półki elektrody [10]

W procesie profilowania elektrod zbiorczych w obszarze gięcia zachodzą zmiany własności mechanicznych taśmy stalowej wywołane odkształceniem na zimno [172]. W wyniku odkształceń w strefie zginania następuje umocnienie materiału, co pociąga za sobą zwiększenie wytrzymałości i granicy plastyczności z równoczesnym zmniejszeniem wydłużenia. Naprężenia wywołane siłami naciągu i momentami zginającymi również wpływają na zmianę własności mechanicznych elementów prostych elektrody, znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie obszaru odkształceń. W procesie profilowania, odkształcenia występują nie tylko na elementach łukowych, ale również na odcinkach prostych.

Własności mechaniczne elektrod zbiorczych uzależnione są nie tylko od własności materiału wsadowego, ale również w dużym stopniu od parametrów technologicznych procesu profilowania takich jak [172]:

- sumaryczny kąt gięcia;
- kąty gięcia w poszczególnych klatkach;
- wymiary profilowanej elektrody;
- odstęp między rolkami profilującymi;
- metody kalibrowania.

Taśma stalowa na elektrody zbiorcze powinna wykazywać szereg cech technologicznych, istotnych zarówno z punktu widzenia podatności do profilowania, jak również trwałości eksploatacyjnej w warunkach pracy w elektrofiltrze. Materiał w trakcie kształtowania rolkowego ulega znacznym odkształceniom plastycznym w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania. Jest to kierunek najmniej korzystny dla materiału. Z tego względu materiał powinien cechować się możliwie zbliżonymi własnościami plastycznymi w kierunku walcowania i poprzecznym [97, 172]. Optymalny do produkcji elektrod zbiorczych materiał powinien posiadać następujące właściwości mechaniczno-technologiczne [10]:

- minimalna granica plastyczności  $R_e$  260 MPa;
- bardzo dobra podatność do wielotaktowego gięcia rolkowego na zimno;
- zadowalająca wytrzymałość zmęczeniowa w temperaturze 220 °C;
- stałość właściwości mechanicznych i technologicznych dla całego wytopu;
- rodzaj powierzchni „A”, wykończenie powierzchni „m” wg EN 10130;
- tolerancja grubości taśmy specjalna „S”  $\pm 0,06$  wg EN 10131;
- tolerancja szerokości taśmy specjalna „S” +2 wg EN 10131.

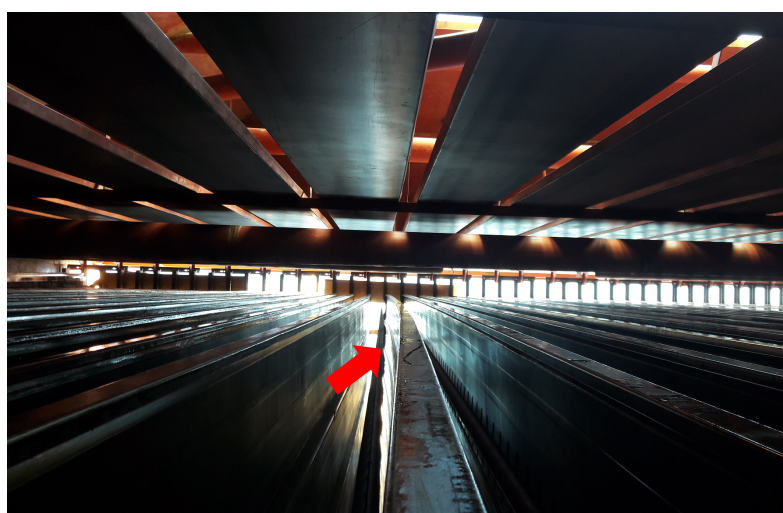
Zastosowania zawężonych tolerancji grubości taśmy stalowej (wsadu) zmniejsza ryzyko destabilizacji procesu profilowania. W praktyce grubość materiału dostarczanego przez huty w większości przypadków mieści się w dolnej granicy tolerancji przywołanej przez normy przedmiotowe. Stwarza to duże ryzyko powstania wad gotowego wyrobu.

Na rys. 27 zobrazowano przykładowe wady pojawiające się podczas realizacji procesu profilowania oraz w gotowej płycie elektrody. Z uwagi na przeznaczenie elektrody zbiorczej jej tolerancje wykonania są ściśle określone. Podstawowe tolerancje wykonania elektrod zbiorczych zilustrowano na rys. 118 w rozdziale 12.



a) b)  
 Rys. 27. Wady elektrody zbiorczej spowodowane zastosowaniem wsadu o nienormowych parametrach: a) deformacja półki elektrody, b) zjawisko pofalowania powierzchni środkowej płyty elektrody zbiorczej [10]

Na rys. 28 zobrazowano niepożądane zjawisko „zbliżenia” elektrod osadczycy w wyniku przekroczenia tolerancji wygięcia wzdłużnego płyty elektrody. Brak zachowania jednakowej odległości pomiędzy elektrodą zbiorczą a ulotową stwarza ryzyko wystąpienia tzw. przebić. Taka sytuacja powoduje utrudnienia w prawidłowej pracy elektrofiltru i jest trudna do wyeliminowania. W praktyce konieczna jest wymiana wadliwych paneli w ramach prac serwisowych. W założeniach projektowych do obecnie projektowanych elektrofiltrów rozpatrywana jest podziałka międzyelektrodowa 400, 500 mm. Dobór odpowiedniej podziałki międzyelektrodowej jest na chwilę obecną zagadnieniem otwartym. Wraz ze wzrostem podziałki międzyelektrodowej wzrastają tolerancje wykonania elektrofiltrów m.in. elektrod osadczycy.

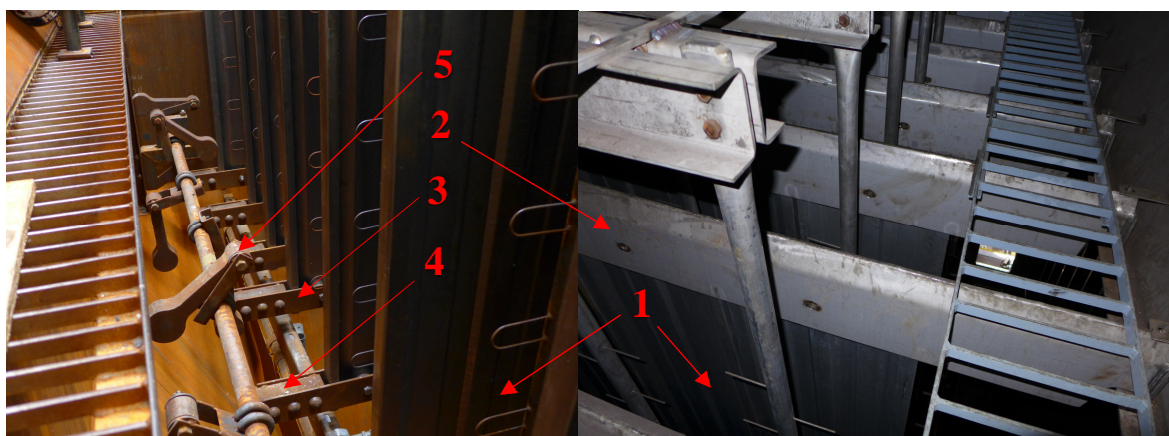


Rys. 28. Przykład niepożądanego zjawiska „zbliżenia” elektrod zbiorczych w komorze elektrofiltru spowodowane przekroczeniem tolerancji wygięcia wzdłużnego płyty elektrody (zdjęcie własne autora)



#### 8.4. Podstawowy parametr użytkowy

W instalacjach europejskich do oczyszczania elektrod zbiorczych elektrofiltrów suchych wykorzystywana jest metoda udarowa. W USA uznane zostały metody elektromagnetyczne. Na rys. 29 przedstawiono typowy układ elektrod zbiorczych w elektrofiltrze suchym. Elektrody zbiorcze połączone są w dolnej części z drągiem strzepującym, natomiast w części górnej z belką zawieszeniową za pomocą łączników mechanicznych, tworząc tzw. płat elektrod. Sekcja składa się zazwyczaj z 5-9 płyt elektrod. Płat elektrod zawieszony jest na górnych dźwigarach komory. Oczyszczanie elektrod zbiorczych z nagromadzonego na ich powierzchni pyłu, realizowane jest poprzez wzbudzenie w nich drgań o odpowiedniej wartości przyspieszeń poprzez mechanizmy udarowe (młotki przerzutowo-obrotowe). Wartość przyspieszenia ziemskiego  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  używana jest w branży energetycznej jako miara skuteczności strzepywania pyłu. Istotne znaczenie ma równomierny rozkład przyspieszeń na powierzchni elektrod (całego płata). Naprężenia odrywające warstwę pyłu od elektrody mogą być w odniesieniu do jej powierzchni normalne lub styczne.



Rys. 29. Układ elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego: 1-elektrody zbiorcze, 2-belka zawieszeniowa, 3-drąg strzepujący, 4-kowadło, 5-mechanizm udarowy [10]

W warunkach eksploatacyjnych występują jednocześnie jedno i drugie. Źródła literaturowe krajowe i zagraniczne podają różne zależności za pomocą których możliwe jest oszacowanie wymaganej wartości przy oczyszczaniu płyt elektrod osadczycy [15, 117, 130]. W pracy [130] podano, że usunięcie pyłu z elektrody następuje, gdy przyspieszenia normalne i styczne spełniają warunek:

$$a_t \geq \frac{S_t}{\rho * \delta}, a_{II} \geq \left( \frac{S_s}{\rho * \delta} \pm g \right) \quad (3)$$

gdzie:

$S_t, S_s$  - normalna i styczna siła adhezji cząstek do płyty elektrody;

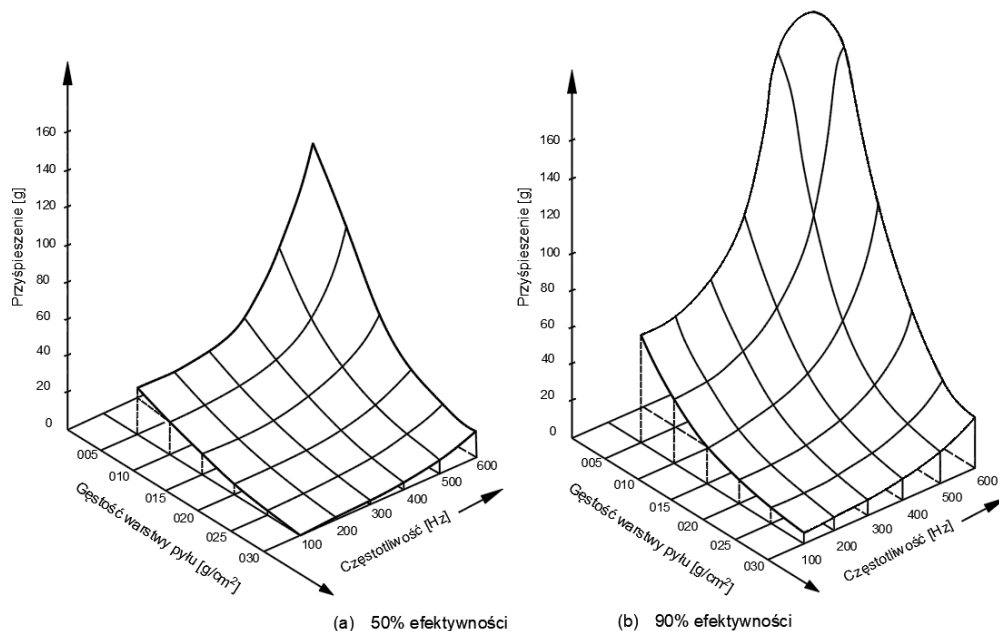
$d$  - grubość warstwy pyłu;

$r$  - gęstość warstwy pyłu;

$a_n, a_{II}$  - przyspieszenie płyty (elektrody) w kierunku prostopadłym i równoległym.

Zazwyczaj istnieje uprzywilejowany kierunek przyspieszeń elektrod [121, 141]. Mianowicie przyspieszenia normalne do kierunku wymuszenia są dwukrotnie skuteczniejsze w usuwaniu pyłu, niż styczne. Inne źródła literaturowe wskazują na dużo większą złożoność omawianej problematyki. Badania przeprowadzone przez autorów [69-70] dowodzą, że przyspieszenia normalne powodują dwukrotnie większe wtórne porywanie cząstek pyłu podczas strzepywania.

W pracy [49] autor na podstawie przeprowadzonych badań stwierdza, że przyspieszenia styczne są bardziej korzystne w procesie strzepywania pyłu. Ponadto z przeprowadzonych przez autora badań wynika, że skuteczność przyspieszeń stycznych występuje dla gęstości pyłu zgromadzonego na elektrodzie do  $160 \text{ mg/cm}^2$ . Przy większej gęstości, bardziej efektywne w procesie oczyszczania są przyspieszenia normalne. Dla bardzo cienkich warstw wpływ przyspieszeń stycznych i normalnych na skuteczność strzepywania jest jednakowy. Badania eksperymentalne wykonane przez [22] dowodzą, że o efektywności oddzielania pyłu decyduje nie tylko szczytowa wartość przyspieszeń, ale również częstotliwość drgań odpowiedzialna za szczytową wartość tego parametru. Autorzy w swoim opracowaniu przedstawili zależność oddzielenia pyłu od elektrody w funkcji przyspieszenia i częstotliwości drgań – rys. 30. Wykresy przedstawiają przyspieszenia niezbędne do usunięcia 50% i 90% pyłu osadzonego na powierzchni elektrody.



Rys. 30. Zależność oddzielania pyłu od elektrody w funkcji przyspieszenia i częstotliwości drgań:  
 a) przyspieszenia wymagane do usunięcia 50% pyłu zgromadzonego na elektrodzie zbiorczej,  
 b) przyspieszenia wymagane do usunięcia 90% pyłu na elektrodzie zbiorczej [22]

Z wykresu wynika, że usuwanie pyłu przy wzroście częstotliwości od 100 do 600 Hz i zachowaniu identycznego stopnia czystości elektrody osadczą wymaga znacznego zwiększenia wartości przyspieszeń. Wzrost przyspieszenia jest tym większy, im cieńsza warstwa pyłu wymaga oddzielenia od płyty elektrody. Na podstawie przytoczonych wyników można stwierdzić, że gwałtowny wzrost częstotliwości drgań jest niekorzystny z punktu widzenia oczyszczania płyt elektrod zbiorczych.

Wymagana wartość przyspieszeń na powierzchni płyt elektrod osadczych powinna być rozpatrywana jako funkcja wielu zmiennych takich jak: skład fizykochemiczny pyłu, jego wilgotność, gęstość powierzchniowa prądu ulotu, rezystywność oraz rozkład uziarnienia pyłu [148-149]. Należy również zwrócić uwagę na aspekty konstrukcyjne tj.: topologię elektrod zbiorczych, grubość i długość elektrod, sposób ich zawieszenia oraz konstrukcję stosowanych bijaków [41, 132, 140]. Czynniki te również w istotny sposób wpływają na wartość omawianego parametru. W pracy [38] opublikowano wyniki analizy porównawczej przyspieszeń dla dwóch różnych topologii płyt elektrod osadczych. Poddano analizie wpływ zawieszenia elektrod na wartość tego parametru oraz rozkład przyspieszeń na powierzchni całego płata. Autorzy pracy [13] sprawdzili wpływ połączenia elektrod osadczych typu Sigma IV z drągiem strzepującym na wartość przyspieszeń płyt osadczych.

Badania dotyczyły tzw. sztywnego i luźnego sposobu połączenia tych podzespołów. W większości stosowanych obecnie elektrofiltrów standardem jest stosowanie tzw. sztywnego mocowania elektrod do drąga strzepującego. Jak dowiedziono w pracy sztywne połączenie elektrod osadczych z drągiem strzepującym wywala znacznie większe wartości przyspieszeń na powierzchni całej sekcji.

W przypadku pyłów wysokorezystywnych (trudnych do odpylania), które scharakteryzowano w rozdziale 5.5, wymagana skuteczność odpylania może przekraczać nawet 300 g, co wiąże się z zastosowaniem dużych impulsów siły wzbudzającej drgania i w konsekwencji dużym ryzykiem uszkodzenia konstrukcji. Następuje zmęczeniowe pękanie młotków strzepywaczy oraz elektrod w strefach ich mocowania, zazwyczaj w pierwszych dwóch elektrodach w płacie od strony, gdzie generowany jest udar – (rys. 31).



Rys. 31. Przykłady eksploatacyjnych uszkodzeń elementów sekcji elektrod zbiorczych: a) deformacja młotków strzepywaczy, b) propagacja pęknięć w strefie mocowania elektrody zbiorczej do drąga strzepującego (zdjęcie własne autora)

Fabryka Elektrofiltrów ELWO S. A. w latach 1970-2008 przeprowadzała cykliczne badania nad optymalizacją ww. węzła konstrukcyjnego [41]. Oprócz aspektów konstrukcyjnych wymienionych powyżej, sprawdzano dodatkowo wpływ poszczególnych gatunków stali stosowanych na elektrody zbiorcze na wartość otrzymywanych przyspieszeń.

W opracowaniu [154] na podstawie badań porównawczych zauważono 72% przyrost średniej wartości przyspieszeń dla elektrod wykonanych ze stali 12H1JA w odniesieniu do gatunku 10J. W branży energetycznej przyjmuje się, że dla elektrofiltrów odpylających spaliny z kotłów energetycznych wartość przyspieszeń na powierzchni elektrod zbiorczych i ulotowych nie powinna być mniejsza niż 100 g. Potwierdzają to również opracowania naukowe, chociaż w niektórych przypadkach podawane wartości różnią się między sobą [93].

Warto nadmienić, że omawiany węzeł konstrukcyjny poddawany jest bardzo dużej ilości uderzeń mechanicznych. Szacunkowo dla pierwszej strefy elektrofiltru można przyjąć ok. 150 tys. uderzeń młotka strzepywaczy/godzinę. W przypadku strzepywania w systemie ciągłym – ok. 500 tys. uderzeń. Istotne znaczenie przy podawaniu pojedynczego udaru (impulsu strzepującego) jest naruszenie struktury wewnętrznej warstwy pyłu, nawet jeśli udar mechaniczny nie generuje przyspieszeń pozwalających na oderwanie zalegającej warstwy pyłu w całości [148]. W opracowaniu [144] zwrócono uwagę, że w praktyce eksploatacyjnej istotną rolę odgrywa widmo przebiegów w czasie (rozstęp i amplituda wartości szczytowych przyspieszeń). Autor bazując na doświadczeniach osób zajmujących się eksploatacją elektrofiltrów potwierdza, że pojedyncze udary o dużej amplitudzie nie powodują oczekiwanych efektów.

## 8.5. Wskaźniki ilościowe wykorzystywane przy projektowaniu elektrofiltru

Przygotowanie dokumentacji projektowej elektrofiltru wymaga podania przez zamawiającego podstawowych danych dotyczących oczyszczanego z pyłu gazu. Są to m.in. strumień objętościowy spalin [ $m^3_n/h$ ], koncentracja popiołu w spalinach [ $g/m^3_n$ ], rodzaj spalnego paliwa, jego wartość opałowa, skład elementarny, zawartość wilgoci i popiołu w paliwie. Konstruktorzy wykorzystując wiedzę z dziedziny projektowania elektrofiltrów używają wskaźnik  $a_v$  [ $m^2/m^3_n/s$ ], który jest obciążeniem jednostkowej powierzchni elektrody zbiorczej strumieniem oczyszczanego gazu. Spalając różne paliwo wskaźnik ten będzie różny. Przykładowe wartości podano w tabelicy 7 dla węgla brunatnego oraz kamiennego, wraz z dodatkowymi danymi.

Oczywiste jest, że główny wpływ na ten wskaźnik mają wartość opałowa paliwa oraz zawartość popiołu w paliwie. Biorąc pod uwagę również moc elektryczną bloku oraz jego sprawność można zaproponować inny wskaźnik. Mianowicie jest to obciążenie jednostkowej powierzchni elektrody zbiorczej strumieniem wytrącanego, łapanego w elektrofiltrze pyłu – jednostką będzie  $a_p$  [ $m^2/kg/s$ ]. Znając dane strumienia odpylanego gazu wskaźniki te będą powiązane zależnością:

$$a_p = \frac{a_v}{g_{popiół}} \quad (4)$$

gdzie:

$a_p$  - obciążenie powierzchni elektrody zbiorczej strumieniem wytrącanego pyłu, [ $m^2/kg/s$ ];

$a_v$  - obciążenie powierzchni elektrody zbiorczej strumieniem oczyszczanego gazu, [ $m^2/m^3_n/s$ ];

$g_{popiół}$  – zapylenie spalin, zawartość pyłu w spalinach,  $kg/m^3_n$ .

W analizie ogólnej, gdy nie są znane parametry konkretnego gazu można posłużyć się innym podejściem. Bilansując strumień popiołu wchodzący wraz z paliwem do kotła energetycznego w bloku energetycznym o znanej sprawności i mocy elektrycznej można napisać inną zależność. Wzór obliczeniowy tego wskaźnika będzie następujący:

$$a_p = \frac{A_{zbiorcze}}{\dot{m}_{popiół}} = \frac{A_{zbiorcze} * \eta * W_d}{P * N_{elektryczna}} \quad (5)$$

gdzie:

$\dot{m}_{popiół}$  – strumień popiołu unoszony ze spalinami, kg/s;

$a_p$  - obciążenie powierzchni elektrody zbiorczej strumieniem wytrącanego pyłu, m<sup>2</sup>/kg/s;

$A_{zbiorcze}$  – sumaryczna powierzchnia elektrod zbiorczych, m<sup>2</sup>;

$\eta$  – sprawność wytwarzania energii elektrycznej bloku energetycznego;

$W_d$  – wartość opałowa paliwa, MJ/kg;

$P$ - zawartość popiołu w paliwie, kg popiół/kg paliwa;

$N_{elektryczna}$  – moc elektryczna bloku energetycznego, MW.

Ponieważ właściwości paliwa mogą mieścić się w pewnym zakresie przeprowadzono przeliczenie wartości powierzchni elektrod zbiorczych hipotetycznego elektrofiltru dla różnych paliw. Bazowano na danych zamieszczonych w dokumentacji DTR elektrofiltrów pracujących w EC Rybnik, EC Turów oraz Hucie szkła w Orzeszu. Na rys. 32-33 zaprezentowano wykres zależności powierzchni elektrod od wartości opałowej oraz zawartości popiołu dla danych podanych w tabelicy 8.

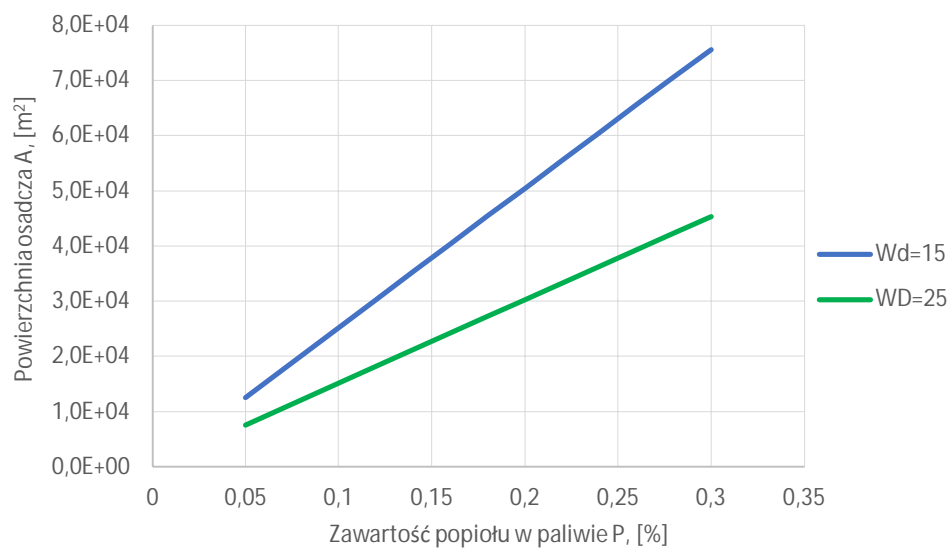
Tablica 7. Bazowe zestawienie danych i wskaźników projektowych elektrofiltru suchego na podstawie danych rzeczywistych

Oznaczenie	Węgiel brunatny	Węgiel kamienny
Wartość opałowa paliwa, MJ/kg	8	21
Zawartość popiołu w paliwie, %	23	23
Strumień spalin, m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /s	286	105
Zawartość popiołu w spalinach, g/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	70	24
Sumaryczna powierzchnia elektrod zbiorczych, m <sup>2</sup>	32 400	17 300
Wyliczony wskaźnik $a_v$ , m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> <sub>n</sub> /s	113	165

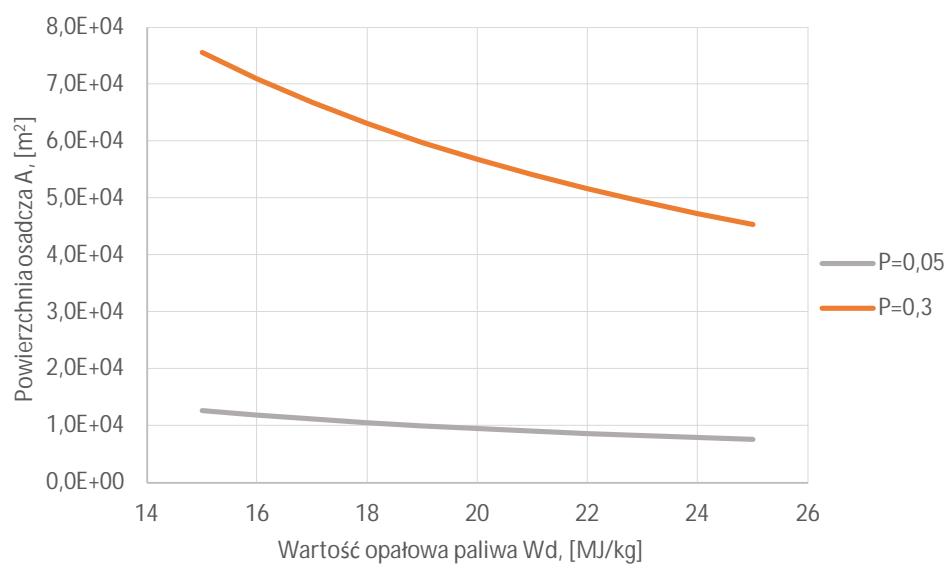
Tablica 8. Zestawienie danych do przygotowania wykresów

WĘGIEL>>	KAMIENNY	BRUNATNY
Zawartość popiołu w paliwie, %	5-30	10-40
Wskaźnik „popiołowy”, m <sup>2</sup> /kg/s	6875	1615
Sprawność wytwarzania energii elektrycznej, %	40	40
Wartość opałowa paliwa, MJ/kg	15-25	5-15

a)

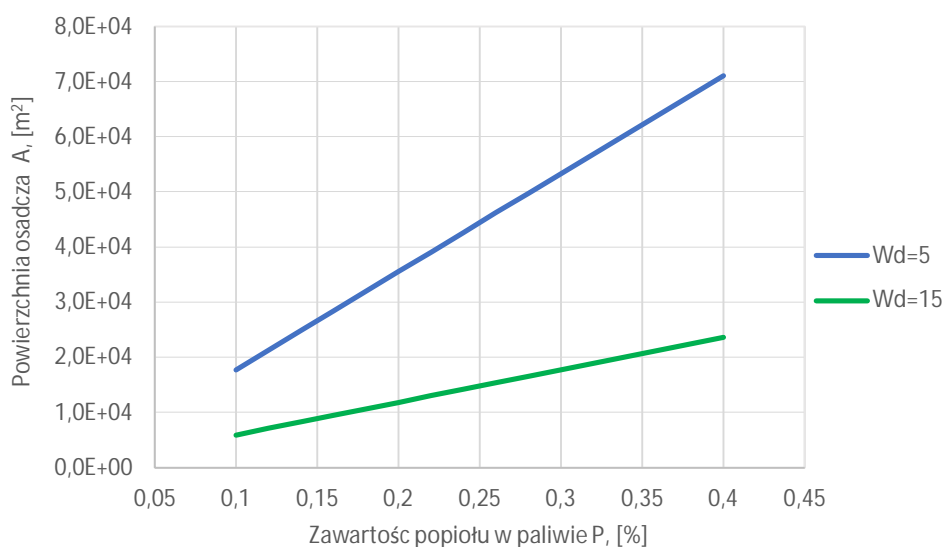


b)

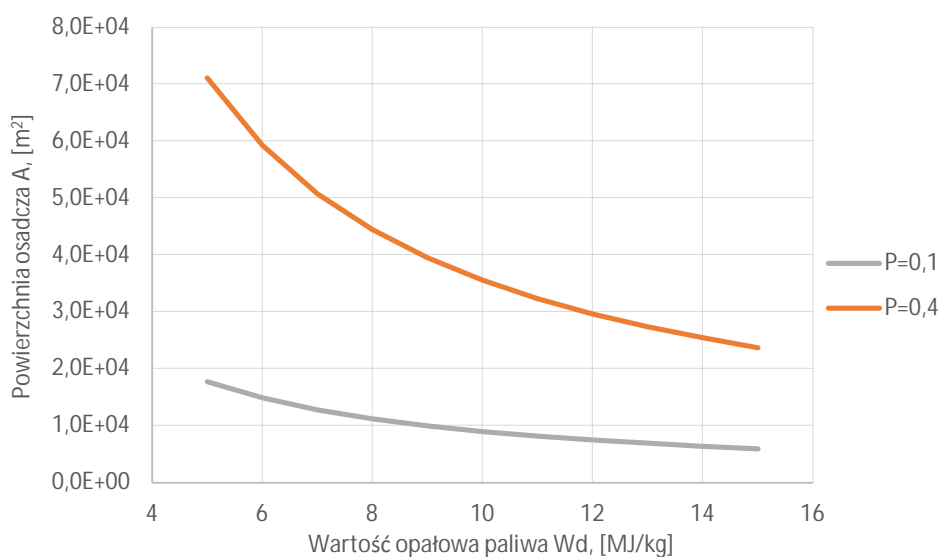


Rys. 32. Rozrzut wielkości pola elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego dla przemysłu energetycznego w zależności od wartości opałowej paliwa i zawartości popiołu w paliwie w przypadku węgla kamiennego

a)



b)



Rys. 33. Rozrzut wielkości pola elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego dla przemysłu energetycznego w zależności od wartości opałowej paliwa i zawartości popiołu w paliwie w przypadku węgla brunatnego

Jak pokazują wykresy krańcowe wartości mogą różnić się nawet 10-cio krotnie. Dlatego też konstruktorzy podają wymagania, co do jakości oczyszczanego gazu spalanego (tzn. właściwej jakości spalanego paliwa). Ten zakres zmienności może zostać wykorzystany w analizie produkcji. Powyższa uwaga wskazuje, że wielkość zamówienia produkcyjnego może znacząco się różnić.

## **9. Szczegółowa analiza sposobu wytwarzania elektrody zbiorczej**

Aktualnie postęp technologiczny umożliwia łatwy dostęp do specjalistycznego parku maszynowego, co zwiększa możliwość szybkiego dostosowania się do oczekiwań klienta. Z tego względu usługi profilowania elektrod zbiorczych coraz częściej świadczą firmy nie związane z sektorem energetycznym. Warto nadmienić, że obecnie rynek azjatycki stanowi bardzo silną konkurencję dla firm europejskich. Dotyczy to zarówno cen stali, transportu, oprzyrządowania technologicznego, w tym profilarek.

W przypadku dużego elektrofiltru elektrody osadcze stanowią około 25% masy całkowitej odpylacza, dlatego też w przypadku inwestycji związanych z budową lub modernizacją dużych bloków energetycznych, największe podmioty z branży energetycznej coraz częściej zamawiają elektrody zbiorcze u dostawców w Azji, poszukując w ten sposób oszczędności w budżecie projektu. Na rynku europejskim można wyróżnić sześciu znaczących producentów elektrod zbiorczych: FLSmith A/S Airtech (Dania), Politeknik Engineering (Turcja), Schuitemaker Machnies BV (Holandia), ZVVZ Milevsko (Czechy), Rafako S. A. oraz Pless-Group Sp. z o. o. (Polska). Głównymi argumentami przemawiającymi na korzyść producentów europejskich są: wyższa jakość oferowanego produktu i wiedza techniczna w zakresie budowy i eksploatacji elektrofiltrów. Pozwala to poza wykonawstwem warsztatowym wg dokumentacji klienta świadczyć usługi serwisowe i doradcze z zakresu optymalizacji konstrukcji wyposażenia wewnętrznego odpylacza. Firma Pless-Group Sp. z o. o. z Pszczyny (poprzednio Bilfinger ELWO Sp. z o.o.) poza infrastrukturą produkcyjną dysponuje unikalnym w skali europejskiej stanowiskiem badawczym umożliwiającym testowanie sekcji elektrod zbiorczych w skali 1:1.

### **9.1 Zakup materiału oraz przygotowanie procesu produkcyjnego**

Na podstawie zapytania ofertowego przedłożonego przez klienta określa się zdolności produkcyjne wydziału produkcyjnego tj. dostępność oprzyrządowania technologicznego dedykowanego dla danego kształtu profilu, sposobu konserwacji profilowanych płyt, sposobu pakowania, transportu oraz zdolności dotrzymania tolerancji wykonania zgodnie z dokumentacją warsztatową zamawiającego. W momencie akceptacji warunków handlowych i WTWiO (warunki techniczne wykonania i odbioru) uruchamiany jest proces zakupu taśmy stalowej wg wytycznych, które szczegółowo opisano w rozdziale 8.2. Istotne znaczenie na tym etapie ma określenie naddatku technologicznego, jaki należy przyjąć dla założonego tonażu oraz geometrii elektrody zbiorczej. Omawiana wielkość wynika ze strat materiałowych poniesionych na etapie kalibracji procesu (urządzenia) oraz strat związanych z wybrakowaniem elektrod, które nie spełniają wymagań jakościowych. Naddatek technologiczny wzrasta wraz z:

- wzrostem szerokości i długości elektrody;
- większą ilością rolek taśmy wsadu dostarczonych przez dostawcę dla danego zlecenia (najbardziej pożądane pod względem ekonomicznym są dostawy materiału o optymalnym tonażu – (maksymalny udźwig rozwijaka taśmy);
- wzrostem zużycia oprzyrządowania i błędnie przyjętą technologią wykonania.



Z praktyki warsztatowej można przyjąć, że naddatek technologiczny mieści się w zakresie 3-9%. Prawidłowe oszacowanie masy naddatku technologicznego rzutuje na konkurencyjność przygotowanej oferty i w dalszym etapie determinuje dotrzymanie założonego budżetu zlecenia. Czas dostawy wsadu (taśmy stalowej) zależy od wielkości zlecenia. W przypadku małych tonaży <40, czas oczekiwania na materiał wynosi około 4 tygodni. Dla dużych zleceń >200 ton czas oczekiwania może wynosić nawet 3 miesiące.

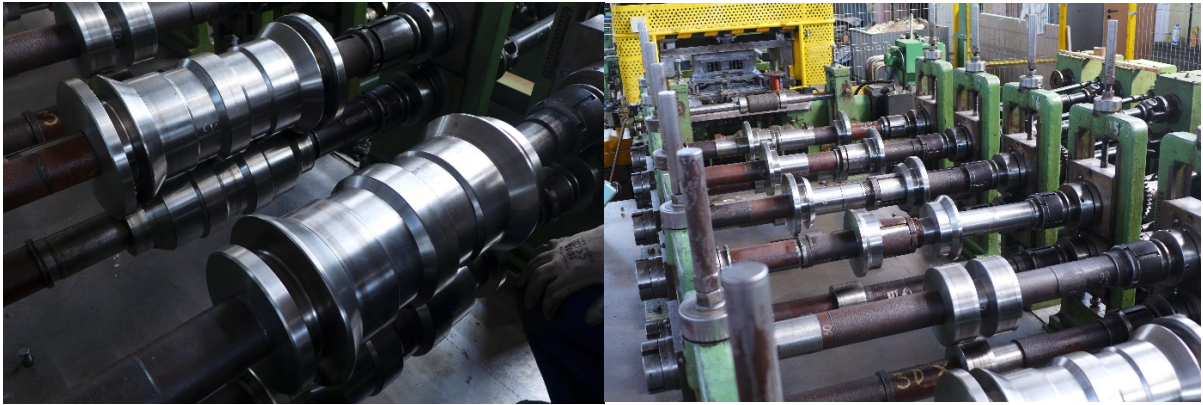
Dostawca materiału w porozumieniu z hutą, planuje z wyprzedzeniem proces produkcyjny, w którym musi uwzględnić własne moce przerobowe w odniesieniu do zamawianej szerokości taśmy. Dostawcy przycinają taśmy na wymiar docelowy z kręgów o standardowych szerokościach produkowanych przez huty np. 1000, 1250 i 1500 mm. Mając powyższe na uwadze dostawca stara się optymalnie zagospodarować krąg taśmy nie pozostawiając sobie odpadu z procesu cięcia. Stąd też wynika z reguły cena i czas oczekiwania na produkt docelowy. Do grona krajowych i zagranicznych dostawców wsadu należą: RBB Stal, Bowim S.A., ArcelorMittal Poland S.A., U.S. Steel Kosice, Marcegaglia Poland Sp. z o.o. Warte odnotowania są spółki ukraińskie: PJSC Illych Iron and Steel Works oraz Zaporizhstal. Spółki ukraińskie są konkurencyjne pod względem oferowanych cen, natomiast walory technologiczne oferowanych przez te podmioty produktów nie zostały do tej pory sprawdzone. Ceny taśmy uzależnione są w głównej mierze od kursu euro i ceny wsadu wykorzystywanego do procesu wytwórczego w hucie. W 2018 roku koszt zakupu 1 tony taśmy zimnowalcowanej DC01 o grubości 1,5 mm (standardowa grubość stosowana do prefabrykacji elektrod osadnych) kształtował się w granicach 665÷725 euro. Materiał na halę produkcyjną dostarczany jest transportem samochodowym – rys. 34.



Rys. 34. Proces dostawy i magazynowania taśmy stalowej (wsadu) w hali produkcyjnej [10]

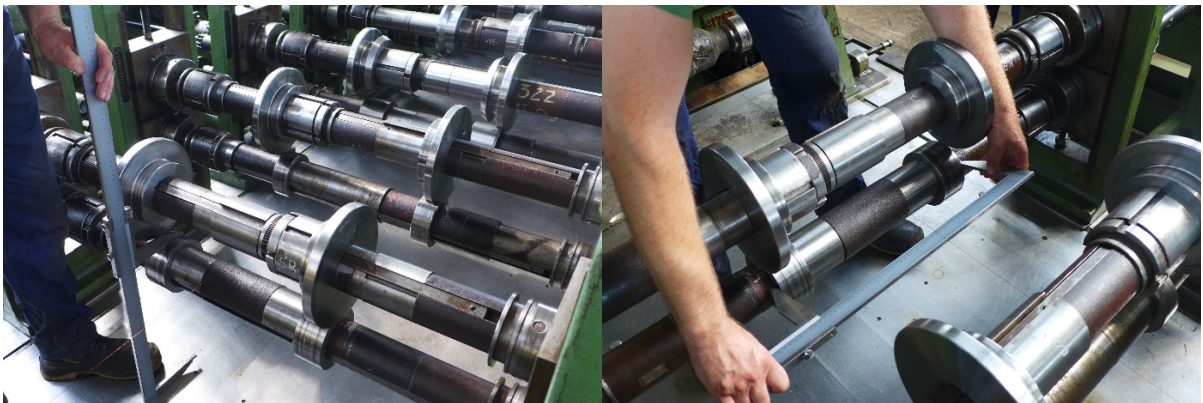
Maksymalna ilość 7-tonowych kręgów taśmy, którą można zmagazynować w hali produkcyjnej nie powodując zakłóceń w realizacji marszruty technologicznej wynosi około 12 ton, co odpowiada 84 tonom wsadu. Kolejnym etapem przygotowania produkcji jest uzbrojenie linii produkcyjnej w oprzyrządowanie technologiczne. W zależności od topologii płyty elektrody oraz założonego przez zleceniodawcę sposobu zawieszenia elektrody w komorze elektrofiltru (połączenie elektrody z belką zawieszeniową i drągiem strzepującym), instalowane są na prasach przynależnych do linii produkcyjnej przyrządy z grupy tłoczników. Profilarka uzbrajana jest jednocześnie z zestawem profilującym (w większości przypadków 18-stacji roboczych).

Czas uzbrojenia linii produkcyjnej, a następnie kalibracji procesu wynosi 128÷200 roboczogodzin. Na rys. 35 przedstawiono sposób uzbrajania profilarki w zestaw profilujący.



Rys. 35. Proces uzbrajania i kalibracji profilarki elektrod zbiorczych Daniel Smith LTD [10]

Na wały umieszczone w oprawach segmentu profilarki montowane są rolki profilujące (sekcja dolna i górna dla każdej stacji profilującej). Każda sekcja składa się z kilku rolek profilujących. Pod względem technologicznym najlepszym rozwiązaniem jest symetryczny podział takiej sekcji (strona prawa i lewa). Za pomocą stalowej linki rozciągniętej wzdłuż wszystkich stacji roboczych (sekcje dolne) ustala się prostoliniowość całego zestawu profilującego względem prasy głównej – rys. 35-36. Regulację przesuwu rolek na wałach realizuje się poprzez zastosowanie tuleji rozprężnych. Na tym etapie należy zapewnić, aby dolne rolki wszystkich zestawów profilujących leżały w tej samej płaszczyźnie – rys. 36.



Rys. 36. Sposób pomiaru wzajemnego położenia kolejnych przepustów profilarki [10]

Następnie instalowane są sekcje górne zestawu profilującego. Ostatecznym etapem jest ustalenie właściwej szczeliny pomiędzy wszystkimi rolkami profilującymi, która odzwierciedla grubość profilowanej taśmy stalowej. Należy podkreślić, że etap kalibracji maszyny jest procesem wymagającym dużego doświadczenia i rzutuje na jakość i stabilność realizowanego procesu.

## 9.2 Opis linii produkcyjnej

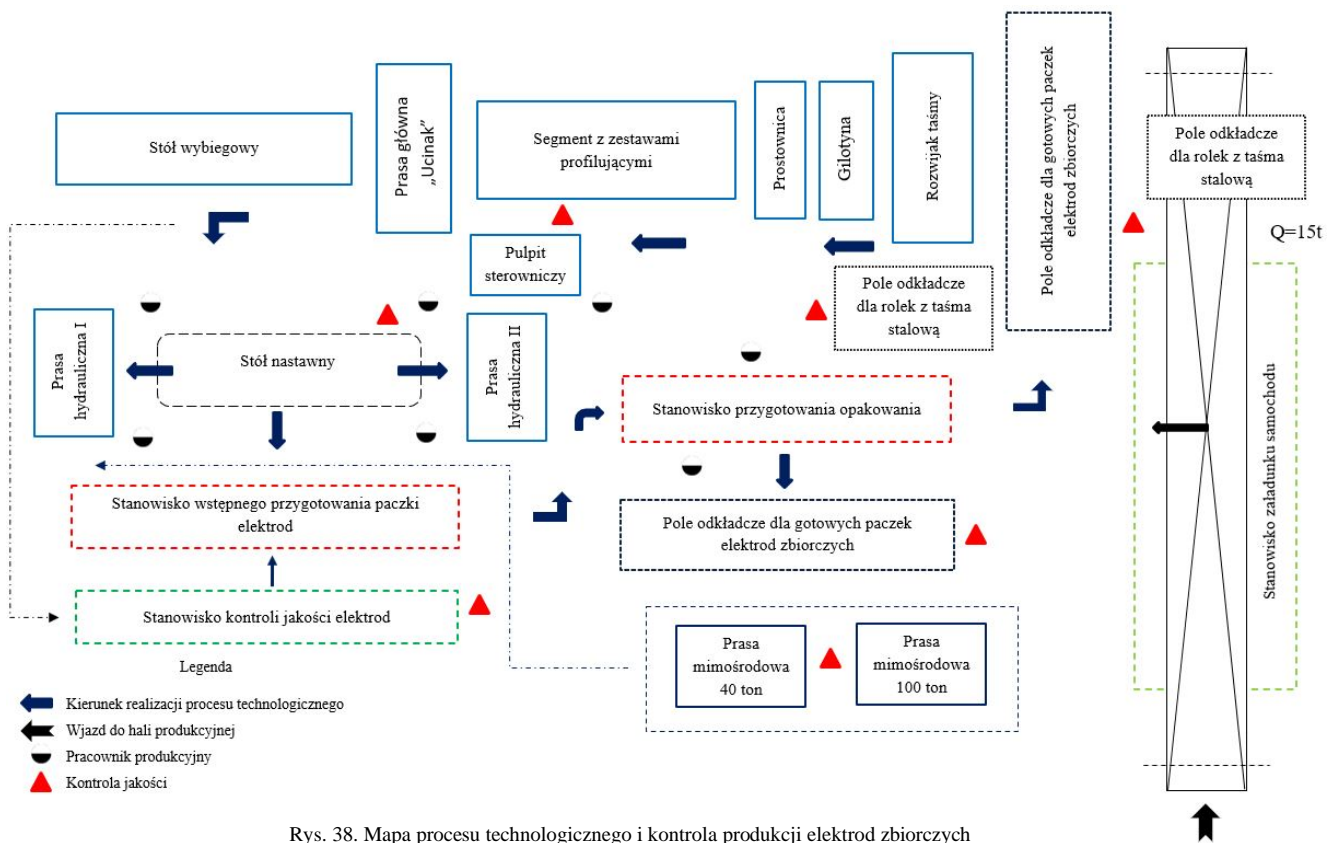
Proces wytwarzania elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego realizowany jest w hali produkcyjnej o powierzchni 3200 m<sup>2</sup> wyposażonej w suwnicę o udźwigu 15 ton, specjalistyczną linię technologiczną oraz warsztat narzędziowy. Park maszynowy umożliwia wykonanie nowego lub regenerację istniejącego oprzyrządowania technologicznego. Wielotaktowe gięcie rolkowe elektrod zbiorczych realizowane jest za pomocą profilarki Daniel Smith LTD, z wykorzystaniem kalibrowania wg metody stałego promienia. Gięcie odbywa się od środka poszczególnych profili na zewnątrz. Maszyna posiada możliwość montażu 18-tu zestawów profilujących. Taka ilość przepustów jest wystarczająca do wykonania 10 różnych typów elektrod zbiorczych. Infrastruktura produkcyjna umożliwia produkcję paneli elektrod zbiorczych o długości do 16 m i szerokości 850 mm. Na rys. 37 przedstawiono zdjęcie poglądowe hali produkcyjnej, natomiast na rys. 38 zilustrowano mapę procesu technologicznego procesu produkcji elektrod zbiorczych na przykładzie firmy krajowej. W tablicy 9 wyszczególniono podstawowe dane oraz wskaźniki dotyczące procesu produkcyjnego.



Rys. 37. Zdjęcie poglądowe wydziału produkcji firmy krajowej [10]

Tablica 9. Podstawowe dane oraz wskaźniki dotyczące procesu produkcyjnego

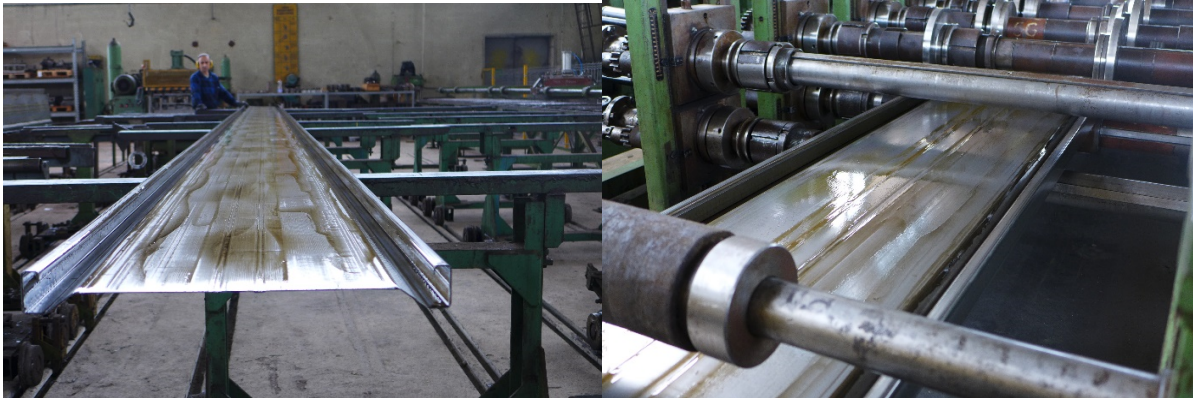
Liczba pracowników produkcyjnych	Wydajność [tona/8godz] [tona/miesiąc]	Maksymalna liczba paczek możliwych do zapakowania na naczepę samochodu [szt.]	Liczba elektrod w paczce drewnianej/stalowej [szt.]	Czas przezbrajania linii produkcyjnej [rbh]	Średni czas załadunku samochodu [rbh]
6 – obsługa linii produkcyjnej / 1 – obsługa suwnicy	6÷7 250	Stalowe – 6 Drewniane - 9	20/26	128÷200	1,5÷2
<i>Wskaźniki produktywności procesu dla zlecenia ~42 ton (elektroda zbiorcza Sigma VI, L=13 000 mm, g=1,5 mm)</i>					
$\frac{\text{Produktywność maszyn wykonanych produktów [tona]}}{\text{czas linii produkcyjnej [godz]}}$	$\frac{\text{Produktywność pracy wykonanych produktów [t]}}{\text{liczba pracowników}}$	$\frac{\text{Produktywność powierzchni wytworzonych produktów [t]}}{\text{powierzchnia produkcyjna [m^2]}}$	$\frac{\text{Materiałochłonność produkcji zużyte materiały [t]}}{\text{liczba produktów [szt.]}}$		
1,83	6	0,013	0,1		



Rys. 38. Mapa procesu technologicznego i kontrola produkcji elektrod zbiorczych

Głównymi elementami profilarki elektrod zbiorczych są: rozwijak taśmy, gilotyna, prostownica, segment z zestawami profilującymi, prasa główna, stół wybiegowy, prasy hydrauliczne przynależne do urządzenia. Proces technologiczny podzielony jest na 2 etapy:

- a) Wielotaktowe gięcie rolkowe taśmy stalowej z jednoczesną konserwacją za pomocą zestawów profilujących, cięcie na założoną długość. Środkiem konserwującym jest mieszanina oleju maszynowego Tectyl 915 W40 i nafty technicznej Akorinol Z. Mieszanina rozprowadzana jest na powierzchni taśmy stalowej przed jej wprowadzeniem do zestawów profilujących – rys. 39.



Rys. 39. Proces profilowania i konserwacji elektrod zbiorczych [10]

- b) Wykrawanie, dziurowanie, włączanie tulejki zawieszniowej, opcjonalnie spawanie wzmocnień płyt elektrod. Operacje wykonywane są na końcach elektrod w zależności od przyjętego sposobu zawieszenia elektrody w komorze elektrofiltru – rys. 40.



Rys. 40. Przykładowe operacje obróbki plastycznej na zimno wykonywane na prasach bocznych przynależnych do linii produkcyjnej [10]

### 9.3 Magazynowanie i spedycja

Obecnie opakowania drewniane wypierają stalowe ze względu na znaczące obniżenie całkowitych kosztów wytwórczych m.in. poprzez wyeliminowanie operacji cięcia i spawania profili stalowych. W celu zmodernizowania procesu produkcyjnego w przykładowej spółce krajowej wzorem firm konkurencyjnych opracowano prototypowe opakowanie drewniane. Opakowanie stanowią przewiązki z tarcicy iglastej spinane taśmą polipropylenową.

Na życzenie klienta paczki elektrod dodatkowo zabezpieczane są czarną, izolacyjną folią przemysłową. Po nadaniu elektrodom osadczym cech zawieszenia (operacja wykrawania lub spawania), układana jest paczka elektrod zbiorczych w sposób zapewniający uzyskanie możliwie dużej jej sztywności, eliminując jednocześnie do minimum ryzyko uszkodzenia płyt podczas transportu. W dalszej kolejności tak przygotowany stos płyt umieszcza się w stalowych korytkach, gdzie rozpoczyna się proces pakowania – rys. 41.



Rys. 41. Przygotowanie elektrod zbiorczych do procesu pakowania [10]

Szerokość korytek dopasowana jest do założonej ilości elektrod w paczce. Gotowe paczki przenoszone są na pole odkładcze zlokalizowane wewnątrz hali produkcyjnej, a następnie za pomocą suwnicy na naczepę samochodu ciężarowego. W warunkach warsztatowych możliwe jest składowanie maksymalnie 15 paczek elektrod (około 34÷38 ton), dlatego też przy realizacji dużych zleceń konieczne jest ustalanie z firmą spedycyjną kolejnych transportów z wyprzedzeniem. Na rys. 42-43 pokazano przykładowe opakowanie stalowe i drewniane elektrod osadczych elektrofiltru oraz zobrazowano proces załadunku gotowych paczek. Dla porównania w tabelicy 10 przedstawiono koszt wytworzenia opakowania dla jednej paczki elektrod zbiorczych.

Tablica 10. Porównanie kosztu wytworzenia opakowania elektrod zbiorczych

<i>Dane: 420 szt. elektrod zbiorczych typu Sigma VI L=13 000 mm</i>			
Rodzaj opakowania	Wielkość przerobu [tona]	Ilość elektrod w paczce [szt.]	Koszt wytworzenia [zł/tona]
Stalowe	42	26	437
Drewniane		20	124



a)

b)

Rys. 42. Opakowanie elektrod zbiorczych – proces przygotowania paczek:  
a) opakowanie stalowe, b) opakowanie drewniane [10]



Rys. 43. Przygotowanie do wysyłki i załadunek gotowego produktu [10]

## 9.4 Kontrola jakości wytwarzania

Kontrola jakości procesu produkcji elektrod zbiorczych podzielona jest na etapy jak zestawiono w tablicy 11, gdzie szczegółowo opisano mierzone wielkości. Na mapie procesu – rys. 38 oznaczono miejsca przeprowadzania kontroli jakości.

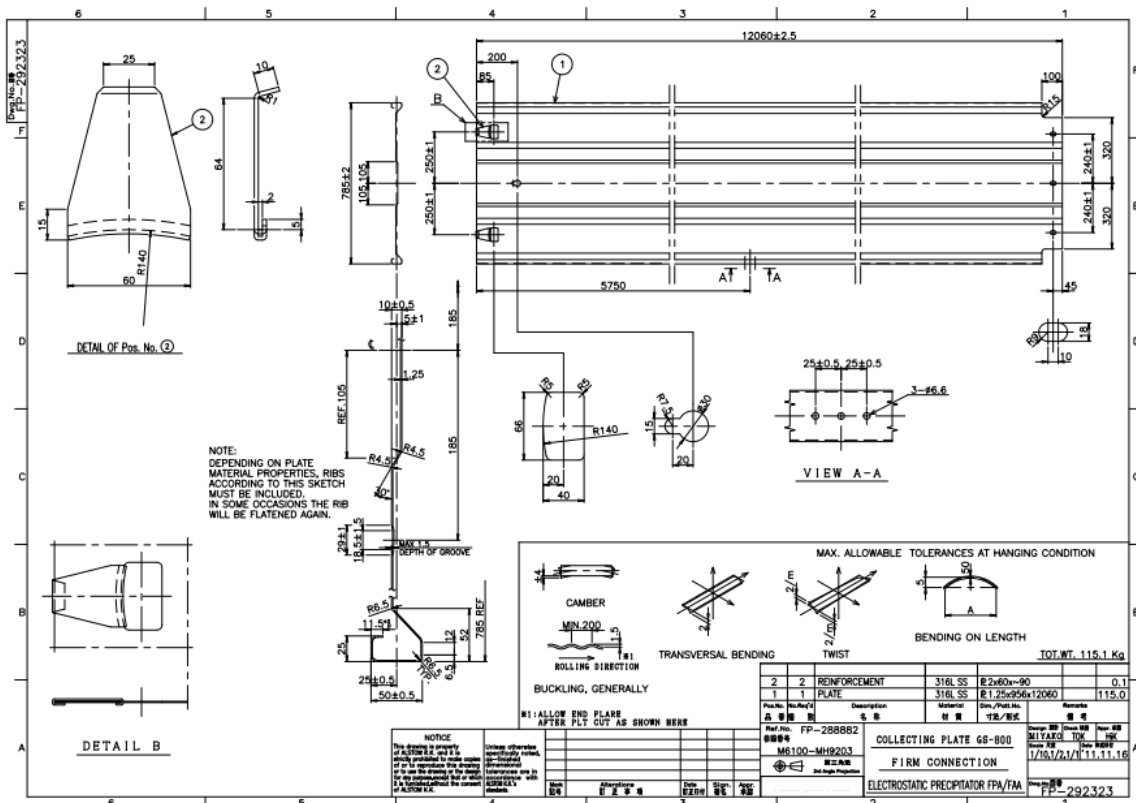
Tablica 11. Etapy kontroli jakości w procesie produkcji elektrod zbiorczych

<i>Realizacja kontroli jakości w procesie prefabrykacji elektrod zbiorczych</i>		
<i>Kontrola dostarczanych materiałów</i>	<i>Kontrola międzyoperacyjna procesu</i>	<i>Kontrola gotowego wyrobu</i>
§ sprawdzenie grubości/szerokości taśmy stalowej (wsadu) zgodnie z wytycznymi przedłożonymi dostawcy (szczegółowo opisano w rozdziale 9.1 § badanie wizualne powierzchni taśmy stalowej Kontrola wykonywana w oparciu o normy przedmiotowe PN EN 10130 / PN EN 10131	§ Sprawdzenie tolerancji wymiarów liniowych, kątowych i geometrycznych w odniesieniu do dokumentacji warsztatowej. Mierzone wielkości: Ø długość, szerokość elektrody, wysokość półek; Ø odległość środka (powierzchni rozwinięcia) od przyjętej bazy pomiarowej profilu elektrody; Ø wygięcie wzdłużne (K) i poprzeczne (H); Ø wichrowatość; Ø skręcenie profilu; Ø pofalowanie powierzchni płyty elektrody. § Badanie wizualne powierzchni płyty § Badanie penetracyjne w przypadku dodatkowych wymagań klienta lub stwierdzenia podczas badania wizualnego wystąpienia pęknięć w miejscach mocowania płyty elektrody oraz w obszarach gięcia profilu płyty elektrody	
<i>Wyposażenie do kontroli i badań</i>		
Suwmiarka, mikrometr, elektroniczny czujnik grubości materiału	Suwmiarka, elektroniczny czujnik grubości materiału, przymiar stalowy rozwijany, kątownik warsztatowy, w przypadku badań penetracyjnych (penetrant)	


Kontrolę jakości gotowego produktu (elektrody zbiorczej) przeprowadza się w oparciu o dokumentację warsztatową przedłożoną przez klienta oraz warunki techniczne wykonania i odbioru. Na etapie analizy wykonalności dobrą praktyką jest wprowadzanie dodatkowych dokumentów, które powinny być aprobowane przez zamawiającego i wytwórcę. Dodatkowa dokumentacja tzw. plan kontroli i badań, zawiera m.in. wytyczne wykonania pomiarów mierzonych wielkości geometrycznych, określenie baz pomiarowych, propozycję protokołu pomiarowego. W ten sposób unika się błędnej interpretacji wyników podczas odbiorów końcowych, gdzie zazwyczaj uczestniczą przedstawiciele dwóch stron. Istotne jest również uzgodnienie z zamawiającym ilości pomiarów kontrolnych w odniesieniu do całkowitego zamówienia.

Na rys. 44-45 zobrazowano przykładową dokumentację jakościową elektrody zbiorczej. Rysunek 46 przedstawia sposób pomiaru wybranych wielkości geometrycznych takich jak: wygięcie wzdłużne, skręcenie poprzeczne oraz sierpowatości płyty elektrody. Coraz częściej plany kontroli i badań zawierają zapisy o konieczności sprawdzenia gotowego wyrobu pod kątem wystąpienia ewentualnych pęknięć. Dotyczy to stref gięcia profilowanego materiału oraz miejsc wykrawania otworów montażowych, co pokazano na rys. 47. Taki zabieg praktykowano w przeszłości w przypadku wprowadzania do produkcji nowego gatunku materiału. Obecnie wymóg badania penetracyjnego jest standardem w ocenie nieciągłości powierzchni, nie tylko w przypadku złączy spawanych.

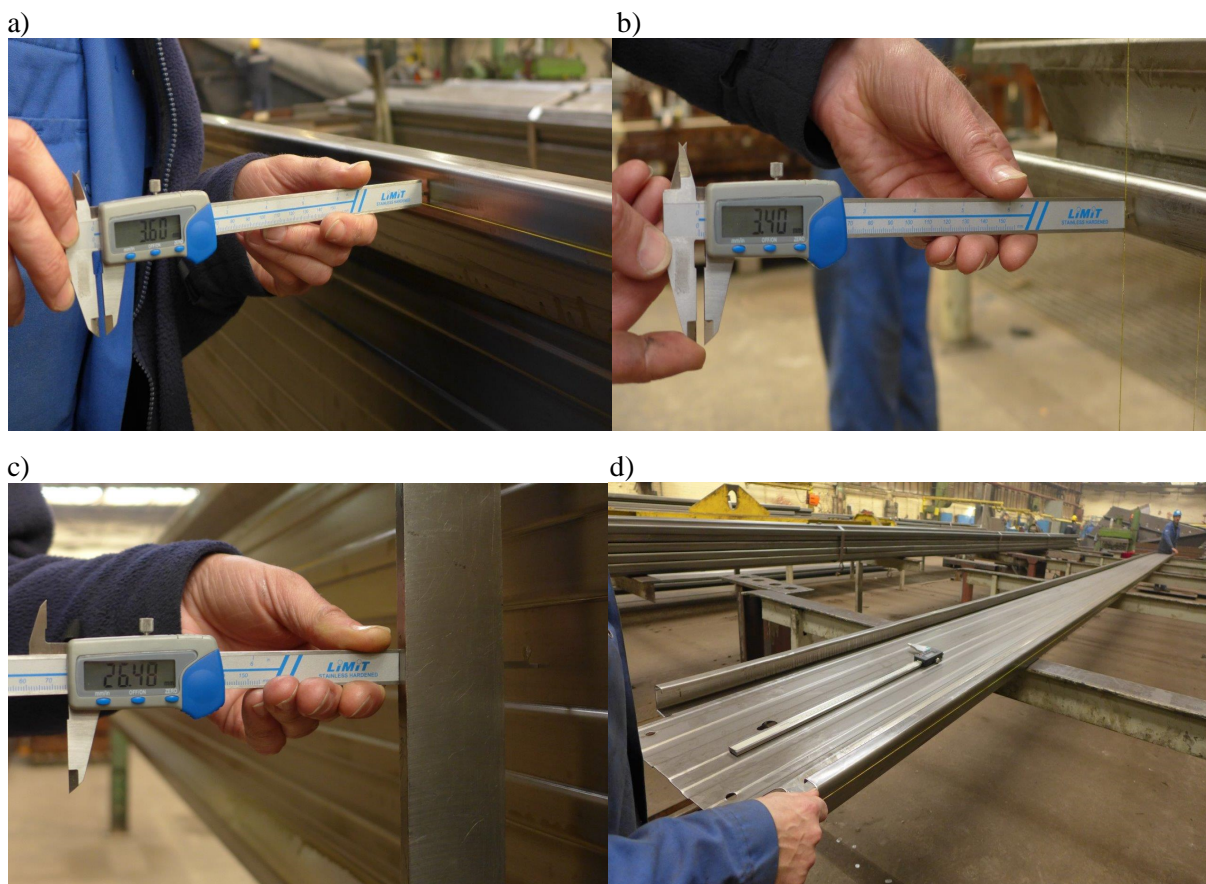




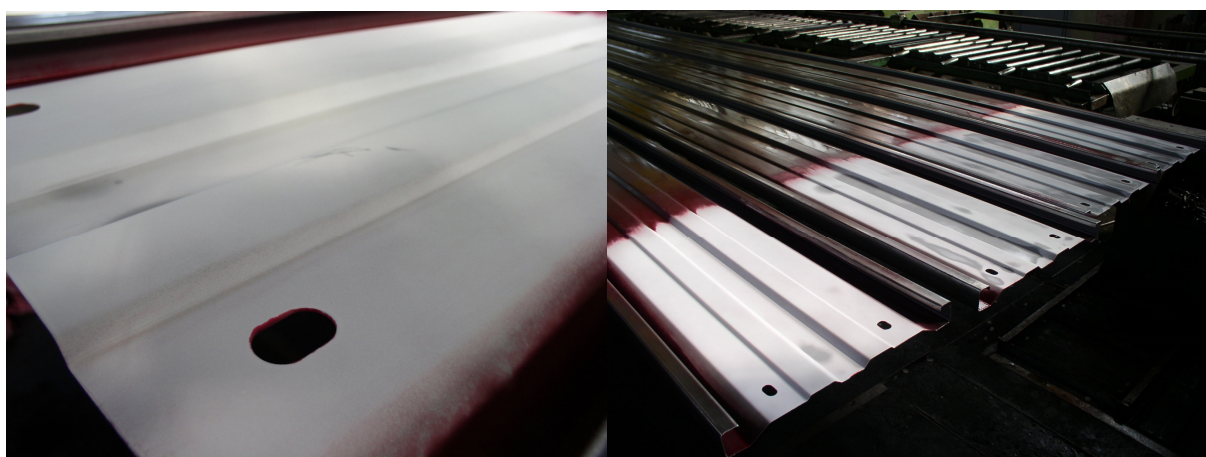
Rys. 44. Przykładowa dokumentacja warsztatowa elektrody zbiorczej GS-800

		<b>PROTOKÓŁ Z POMIARÓW ELEKTROD ZBIORCZYCH</b> <b>PROTOCOL OF MEASUREMENT OF COLLECTING PLATES</b> <b>MESSUNGEN DER SAMMELELEKTRODEN PROTOKOLL</b> <b>PROTOCOLE DE MESURES DES ELECTRODES COLLECTIVES</b>				<b>Protokół nr :</b> Report No.: <b>960/2018</b> Protokoll Nr: Protocole N°:						
						<b>Strona:</b> Page: <b>1</b> Seite:	<b>Stron:</b> Of: <b>4</b> Von: Pages:					
<b>Zamawiający:</b> Purchaser Besteller: Donneur d'ordre:		<b>Valmet Technologies Oy</b> <b>for Skövde Värmeverk AB</b>		<b>Nr zamówienia :</b> Manuf. Order No.: Kom-Nr: N° d'ordre de fabrication :		<b>2018/115962</b> <b>Project 05_06_2018</b>		<b>Nr produkcyjny :</b> Code no. : Herstell Nr. : N° d'identification :		<b>B2300002-001</b> <b>Work E23001</b>		
<b>Przedmiot :</b> Subject : Anlage : Dispositif :		<b>Elektroda zbiorcza C-750</b> <b>Collecting Electrode C-750</b>		<b>Nr rysunku:</b> Zeichnungs-Nr: Drawing No.: N° de dessin:		<b>P00270480</b>		<b>Nr Planu Kontroli i Badań:</b> Inspection & test plan no.: Prüfplan Nr.: Plan de contrôle n°.:		<b>B2300002/1/2018</b>		
<b>Data</b> Date Datum Date	<b>Nr elektrody</b> Elektroden Nr Plate' s no Numero d' electrode	<b>Strona A</b> Side A Seite A Cote A		<b>Strona B</b> Side B Seite B Cote B		<b>Plaskość</b> Ebenheit Flatness Planeite		<b>Skręcenie poprzeczne</b> Quervedrehung Cross turning/twist Torsion transversale	<b>Sierpowatość</b> Krummung Falcate Deformation en lame	<b>Długość</b> Länge Length Longueur	<b>Szerokość</b> Breite Width Largeur	<b>Kontrola jakości</b> Qualitätskontrolle Quality control Contrôle de qualite
		<b>Wygięcie</b> Biegung Bending Cambure	<b>Wysokość</b> Hohe Height Hauteur	<b>Wygięcie</b> Biegung Bending Cambure	<b>Wysokość</b> Hohe Height Hauteur	C1 C2 E1 E2	H (±14mm)					
<b>Data:</b> Date: Datum: Date:	<b>05.06.2018</b>	<b>Wykonał/Sporządził:</b> Prepared : Erstellt: Fait par:				<b>Sprawdził:</b> Supervisor: Prüfaufsicht: Verifié par:						

Rys. 45. Przykładowy protokół z pomiarów elektrod zbiorczych



Rys. 46. Sposób sprawdzenia tolerancji wykonania warsztatowego elektrod zbiorczych: a) wygięcie wzdłużne, b) skręcenie poprzeczne, c) odległość od osi środkowej (średnika) profilu elektrody, d) sierpowatość [10]

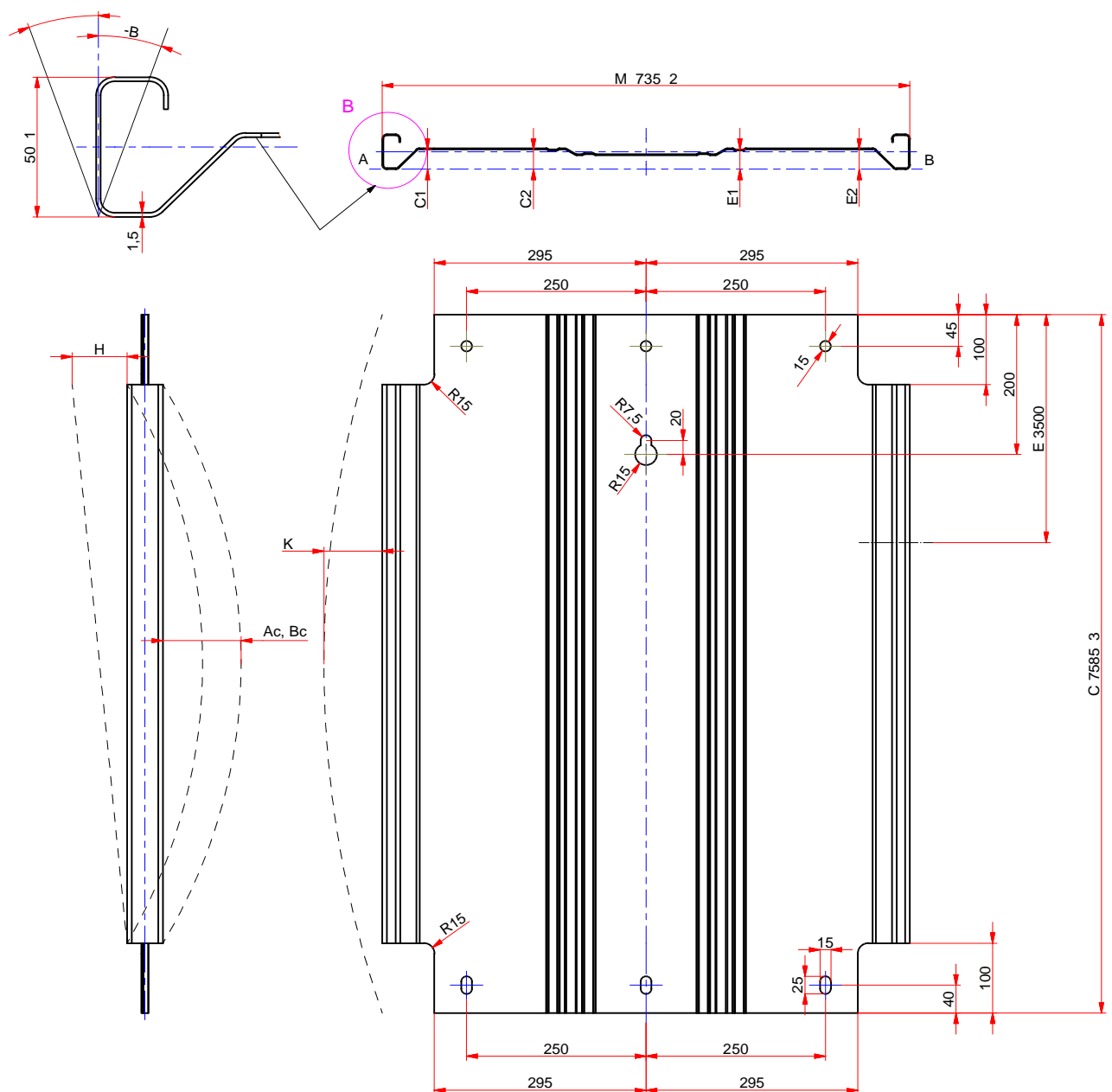


Rys. 47. Sprawdzenie nieciągłości powierzchni płyty elektrody zbiorczej za pomocą badania penetracyjnego [10]

## 10. Analiza statystyczna właściwości wsadu technologicznego i tolerancji wykonania elektrod zbiorczych w procesie wielotaktowego gięcia rolkowego

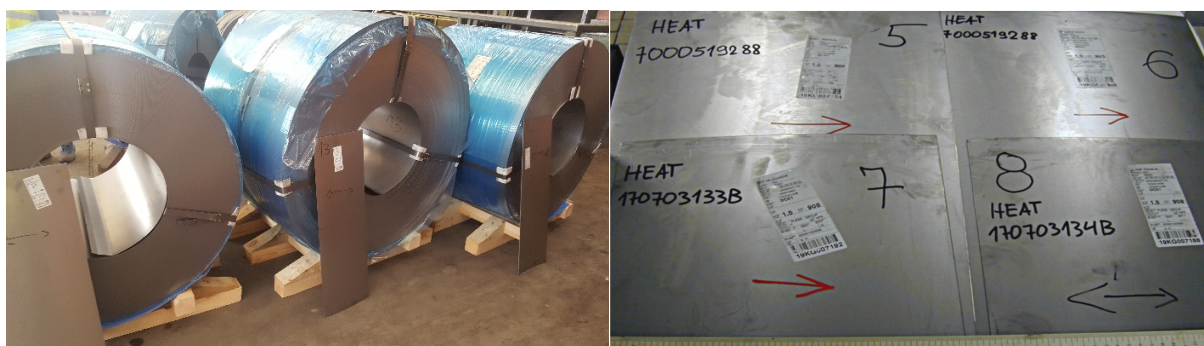
W celu zbadania wpływu składu chemicznego i właściwości mechanicznych wsadu technologicznego na tolerancje wykonania gotowego wyrobu przeprowadzono analizę statystyczną. Analizę wykonano za pomocą oprogramowania Minitab oraz arkusza kalkulacyjnego MS Excel w odniesieniu do zlecenia produkcyjnego obejmującego około 100 ton elektrod zbiorczych typu Sigma 735 (rys. 48), dla firmy Valmet Technologies Oy z siedzibą w Finlandii.

### 10.1 Podstawowa statystyka opisowa właściwości materiału przeznaczonego do produkcji



Rys. 48. Geometria oraz wymiary płyty elektrody zbiorczej Sigma 735 na podstawie dokumentacji warsztatowej firmy VALMET Technologies Oy

Całkowita liczba elektrod wynosiła 816 sztuk, dla których przewidziano pięć różnych typów szeregów długości w zakresie 8, 13 m. Wsad technologiczny stanowiła taśma stalowa zimnowalcowana w gatunku DC01 o grubości 1,5 mm i szerokości 958 mm. Taśma została zakupiona u jednego z polskich producentów wg wytycznych zamawiającego, sporządzonych w odniesieniu do norm przedmiotowych PN-EN 10130:1999 i PN-EN 10131:2008. Dostawca dostarczył materiał w 12 kręgach pochodzących z 7 wytopów. Z każdego kręgu taśmy wycięto odcinek próbny do badań dla firmy zewnętrznej z oznaczonym kierunkiem walcowania taśmy, numerem kręgu i wytopu (rys. 49).



Rys. 49. Kręgi taśmy stalowej zimnowalcowanej zakupionej do produkcji oraz odcinki próbne wycięte do badań właściwości mechanicznych i składu chemicznego

Skład chemiczny próbek badano za pomocą spektrometru iskrowego. Statyczną próbę rozciągania wykonano wg wewnętrznej procedury Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2016, Metale – próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej. Zastosowano próbkę płaską o długości pomiarowej  $L_0=80$  mm. Pomiar twardości (HV10) przeprowadzono na powierzchniach blach w środkowej części odcinka próbnego zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2018, Metale – pomiar twardości sposobem Vickersa. Pomiaru grubości odcinków próbnych dokonano w losowo wybranych miejscach w obrębie całej szerokości blachy.

Proces technologiczny był realizowany za pomocą wielotaktowego gięcia rolkowego taśmy stalowej z wykorzystaniem stopniowej metody kalibrowania (od części środkowej profilu na zewnątrz) i stałej wartości promienia gięcia równej 6,5 mm. W analizowanym procesie produkcyjnym zestaw profilujący składał się z 18 stacji profilujących i trzech zestawów prostujących. Odległość między zestawami profilującymi wynosiła 500 mm. Zestawy profilujące miały możliwość regulacji położenia w płaszczyźnie pionowej. Umożliwiały one regulację średnicy płyty elektrody oraz jej szerokości. Pasma gięte przez cały czas przejścia przez wszystkie rolki profilujące było ograniczone przez wszystkie ich powierzchnie. Konstrukcja rolek nie uwzględniała kątów dodatnich dla powierzchni rolek nie biorących udziału w gięciu taśmy. Cięcie gotowego profilu oraz wykonanie otworów montażowych realizowano za pomocą nożycy gilotynowej do cięcia poprzecznego w układzie “latającym” usytuowanej za profilarką.

W pierwszym etapie wykonano statystykę opisową dla właściwości mechanicznych i składu chemicznego materiału do produkcji. Wprowadzono następujące oznaczenia: poszczególne wytopy oznaczono h1-h7, natomiast kręgi taśmy r1-r12. Zbiór danych składał się z 134 próbek. W tabelicy 12 przyporządkowano kręgom taśmy wytopy oraz określono liczbę próbek występujących w populacji w odniesieniu do poszczególnych wytopów.

W tabelicy 13 zestawiono liczbę próbek jaką uzyskano dla poszczególnych wytopów. W tabelicy 14 zestawiono wartości składu chemicznego, właściwości mechanicznych i grubości taśmy dla kręgów taśmy przeznaczonych do produkcji. W tabelicy 15 przedstawiono miary statystyczne opisujące właściwości materiału produkcyjnego w odniesieniu do wszystkich wytopów (całej populacji).

Tablica 12. Oznaczenie materiału zastosowanego do produkcji

Oznaczenie kręgu	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12
Nr wytopu	h5	h7	h6	h5	h3	h3	h1	h4	h1	h4	h2	h2
Liczba próbek z kręgu	12	12	13	11	11	10	11	9	13	9	10	13

Tablica 13. Liczba próbek w poszczególnych wytopach

Nr wytopu	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7
Liczba próbek na wytop	24	23	21	18	23	13	12

Tablica 14. Zestawienie zmierzonych właściwości materiałowych dla poszczególnych kręgów taśmy

Krąg taśmy	g [mm]	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	Twardość HV10
r1	1,513	0,051	0,20	0,009	0,007	250	357	36,5	115
r2	1,501	0,049	0,21	0,013	0,008	223	348	35,2	117
r3	1,487	0,050	0,20	0,013	0,009	222	346	35,5	121
r4	1,513	0,050	0,20	0,008	0,006	228	348	38,0	114
r5	1,495	0,041	0,23	0,009	0,007	227	342	35,5	114
r6	1,498	0,040	0,23	0,009	0,007	254	353	36,9	116
r7	1,487	0,042	0,18	0,008	0,005	212	338	36,2	114
r8	1,492	0,042	0,18	0,008	0,005	213	338	36,5	114
r9	1,491	0,043	0,18	0,008	0,005	227	338	36,5	114
r10	1,500	0,058	0,19	0,008	0,006	242	354	35,9	117
r11	1,493	0,042	0,20	0,005	0,006	220	338	37,5	110
r12	1,502	0,042	0,20	0,005	0,006	233	340	38,1	112

Tablica 15. Miary statystyczne opisujące właściwości materiałowe wszystkich wytopów z 12 kręgów

Miary statystyczne	Skład chemiczny [%]				R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	Twardość [HV10]*	Grubość [mm]*
	C	Mn	P	S					
Średnia x	0,046	0,2	0,009	0,006	229,2	344,9	36,52	114,9	1,497
Odchylenie standardowe s	0,005	0,016	0,002	0,001	12,48	6,63	0,942	2,72	0,007
Mediana M	0,043	0,2	0,008	0,006	227	344	36,5	114	1,496
Minimum	0,04	0,18	0,005	0,005	212	338	35,2	100	1,487
Maksimum	0,058	0,23	0,013	0,009	254	357	38,1	121	1,513
Skośność	0,802	0,566	0,456	0,611	0,665	0,47	0,369	0,623	0,656
Kurtoza	-0,34	-0,392	-0,285	-0,471	-0,488	-1,16	-1,0	0,559	0,103
Kwartył q1	0,042	0,19	0,008	0,006	222	338	35,5	114	1,491
Kwartył q3	0,05	0,2	0,009	0,007	233	348	37,35	116,75	1,501
s/x, %	11,24	8,02	29,41	19,02	5,45	1,92	2,58	2,37	0,48
(q3-q1)/(2*M), %	9,3	2,5	6,25	8,33	2,42	1,45	2,53	1,21	0,33

$V(x) = s/x, \%$  (klasyczny współczynnik zmienności),  $V_0 = (q3-q1)/(2*M), \%$  (pozytywny współczynnik zmienności)

\*wartość średnia dla każdego odcinka próbnego taśmy, wyliczona na podstawie 5 punktów pomiarowych

Materiał przeznaczony do realizacji zlecenia produkcyjnego, obejmującego 816 sztuk elektrod zbiorczych, wykazał zmienność pod względem właściwości materiałowych.

Do oceny zróżnicowania zastosowano klasyczny współczynnik zmienności  $V(x)$  będący ilorazem odchylenia standardowego i średniej oraz pozycyjny współczynnik zmienności  $V_Q$ , który wyliczono wg zależności podanej w tabelicy 15.

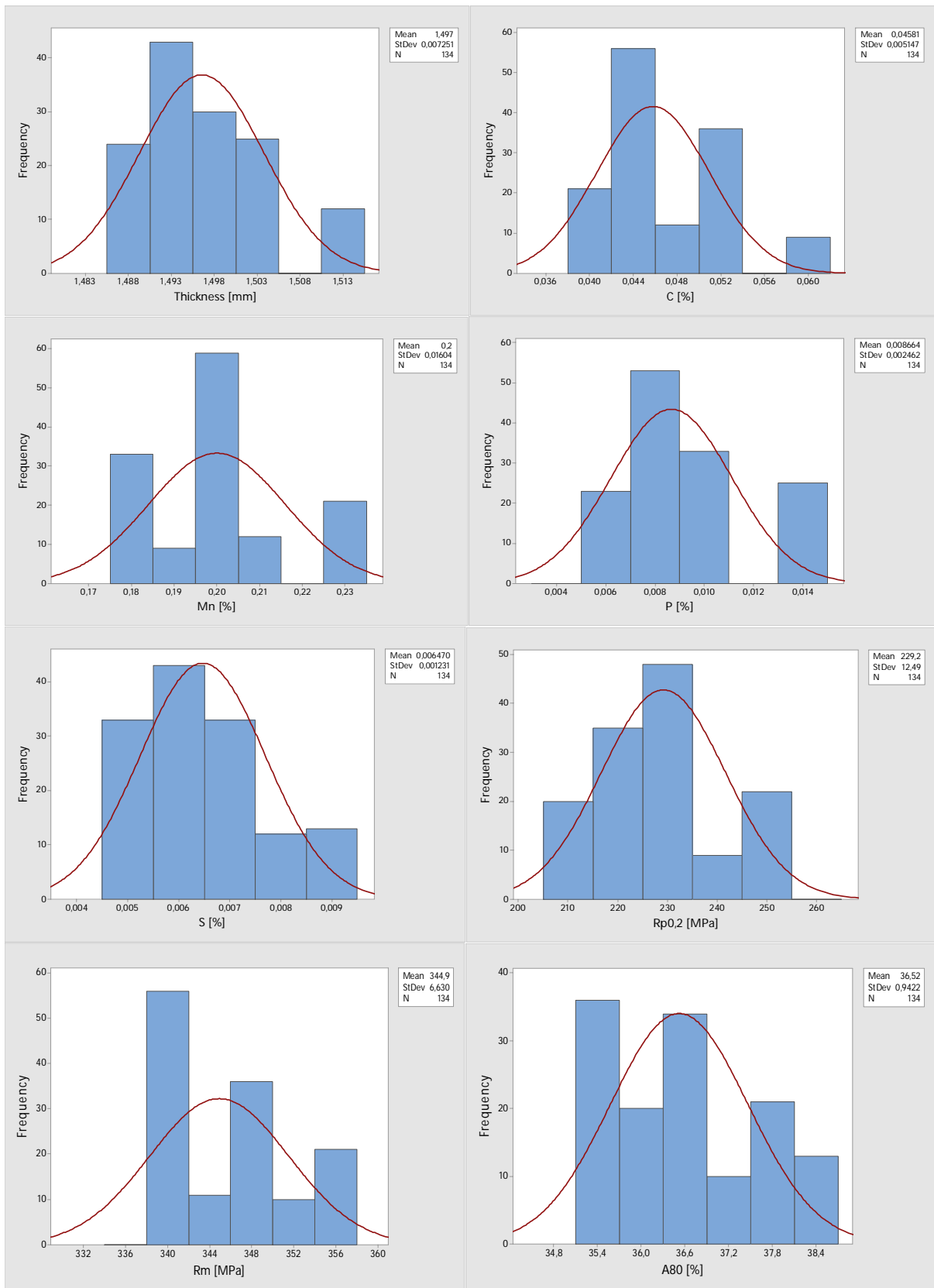
Wyniki zestawione w tabelicy 15 wskazują, że zróżnicowanie zawartości fosforu i siarki jest dużo większe, niż zróżnicowanie zawartości węgla i manganu. Otrzymane wartości współczynnika zmienności  $>10\%$  świadczą o niejednorodności badanej zbiorowości statystycznej. Dla właściwości mechanicznych i grubości taśmy stalowej otrzymano stosunkowo niewielkie zróżnicowanie. Największą wartość współczynnika zmienności otrzymano dla granicy plastyczności, natomiast wydłużenie  $A_{80}$  i twardość HV10 wykazały stosunkowo zbliżone zróżnicowanie. Dla większości pomiarów wykonanych na odcinkach próbnych taśmy stalowej otrzymano grubości poniżej wartości nominalnej, tj. 1,5 mm. Otrzymane ujemne wartości kurtozy (dla większości zmiennych), będącej miarą koncentracji rozkładu wyników wokół średniej wskazały słabą koncentrację danych wokół średniej. Dla wszystkich zmiennych objaśniających otrzymano dodatnie wartości skośności, co świadczy o prawostronnej asymetrii rozkładu danych (większość danych o wartości mniejszej niż średnia). W praktyce analitycznej przyjmuje się, że  $|kurtoza| < 2$  i  $|skośność| < 1$  są wartościami bezpiecznymi do przeprowadzenia statystycznych testów parametrycznych.

Na poniższych histogramach – rys. 50 pokazano rozkład i liczebności wybranych danych empirycznych z całej populacji. W tabelicy 16 podano granice przedziału ufności właściwości wsadu technologicznego oraz dokładność oszacowania analizowanych wielkości. Otrzymane przedziały ufności w wyszczególnionych granicach pokrywają rzeczywistą średnią wartość analizowanych zmiennych zależnych z prawdopodobieństwem 0,95. W tabelicy 17 zestawiono wyniki statystyki opisowej dla siedmiu analizowanych wytopów materiału produkcyjnego.

Tablica 16. Granice przedziału ufności dla właściwości wsadu technologicznego

Zmienna zależna	Granice przedziału ufności przy poziomie istotności $\alpha=0,05$		Dokładność oszacowania $e(*)$
	Dolna	Górna	
g [mm]	1,492	1,501	0,005
C [%]	0,042	0,049	0,004
Mn [%]	0,189	0,211	0,011
P [%]	0,007	0,01	0,002
S [%]	0,006	0,007	0,001
$R_{p0,2}$ [MPa]	220,8	237,8	8,5
$R_m$ [MPa]	340,6	349,4	4,4
$A_{80}$ [%]	35,9	37,1	0,6
Twardość [HV10]	113,1	116,6	1,8

(\*) Podano w jednostkach odpowiadającym zmiennym zależnym



Rys. 50. Rozkład wybranych właściwości badanych materiałów



Tablica 17. Podstawowa statystyka dla 7-miu analizowanych wytopów wsadu technologicznego

Numer wytopu kręgów taśmy	Miary statystyczne	g [mm]	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	Twardość HV10
h1- 2 rolki: r7+r9	Średnia	1,489	0,043	0,18	8e-3	5e-3	220	338	36,4	114
	Odchylenie standardowe	2e-3	5e-4	0	0	0	7,5	0	0,15	0
	x/s, %	0,13	1,2	0	0	0	3,4	0	0,41	0
h2- 2 rolki: r11+r12	Średnia	1,498	0,042	0,20	5e-3	6e-3	227	339	37,8	111
	Odchylenie standardowe	4e-3	0	0	0	0	6,4	1,00	0,30	1,00
	x/s, %	0,30	0	0	0	0	2,8	0,29	0,79	0,89
h3- 2 rolki: r5+r6	Średnia	1,496	0,041	0,23	9e-3	7e-3	240	347	36,2	114
	Odchylenie standardowe	1,5e-3	5e-4	0	0	0	13,5	5,5	0,7	1,00
	x/s, %	0,10	1,23	0	0	0	5,6	1,6	1,9	0,9
h4- 2 rolki: r8+r10	Średnia	1,496	0,050	0,185	8e-3	6e-3	227	346	36,2	116
	Odchylenie standardowe	4,4e-3	8e-4	5e-3	0	5e-4	14,5	8,0	0,3	1,5
	x/s, %	0,27	8,5	2,7	0	9,1	6,4	2,3	0,8	1,3
h5- 2 rolki: r1+r4	Średnia	1,506	0,050	0,2	8e-3	6e-3	239	353	37,2	114
	Odchylenie standardowe	7e-3	5e-3	0	5e-4	5e-4	11,0	4,5	0,75	0,5
	x/s, %	0,5	1,0	0	5,9	7,6	4,6	1,3	2,0	0,43
h6- 1 rolka: r3	Średnia	1,487	0,05	0,2	0,013	9e-3	222	346	35,5	121
	Odchylenie standardowe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	x/s, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0
h7- 1 rolka: r2	Średnia	1,501	0,049	0,21	0,013	8e-3	223	348	35,2	117
	Odchylenie standardowe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	x/s, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bazując na otrzymanych wartościach klasycznego współczynnika zmienności można zauważyć, że spośród analizowanych wytopów zarówno skład chemiczny, jak i właściwości mechaniczne wykazały niewielkie zróżnicowanie. Granica plastyczności charakteryzowała się największym poziomem zmienności. W przypadku składu chemicznego siarka i fosfor wykazały zróżnicowanie, ale o stosunkowo małym zakresie. W dalszym etapie sprawdzono normalność rozkładu analizowanych danych empirycznych. Do tego celu zastosowano test Shapiro-Wilka służący do badania normalności rozkładu danych [98]. Testowano hipotezy:

H<sub>0</sub>: rozkład danych jest zgodny z rozkładem normalnym, gdy:  $W_1(a/2, n) < W < W_2(1-a/2, n)$ ;

H<sub>1</sub>: rozkład danych nie jest zgodny z rozkładem normalnym, gdy:  $W_1(a/2, n)^3 > W^3 > W_2(1-a/2, n)$ .

W tabelicy 18 przedstawiono wyniki testu Shapiro-Wilka. Na podstawie wyników obliczeń stwierdzono, że rozkład wszystkich analizowanych zmiennych objaśniających ze zbioru danych empirycznych jest zgodny z rozkładem normalnym. Przyjęto hipotezę  $H_0$ . Największą wartość statystyki  $W$  przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$  uzyskano dla grubości taśmy i wydłużenia  $A_{80}$ , natomiast najniższą dla węgla.

Tablica 18. Wyniki testu Shapiro-Wilka (badanie normalności rozkładu danych empirycznych)

Zmienna zależna	Wartość statystyki $W$	Dwustronny obszar krytyczny		Wynik testu
		$W_1(0,025;12)$	$W_2(0,975;12)$	
g [mm]	0,936	0,838	0,983	T
C [%]	0,841	0,838	0,983	T
Mn [%]	0,866	0,838	0,983	T
P [%]	0,846	0,838	0,983	T
S [%]	0,903	0,838	0,983	T
$R_{p0,2}$ [MPa]	0,924	0,838	0,983	T
$R_m$ [MPa]	0,874	0,838	0,983	T
$A_{80}$ [%]	0,936	0,838	0,983	T
Twardość [HV10]	0,925	0,838	0,983	T
Przyjęty poziom istotności $\alpha=0,05$ . Jeżeli $W_1(0,025;12) < W < W_2(0,975;12)$ - rozkład normalny (T)				

Z poszczególnych kręgów i wytopów hutniczych wyprodukowane zostały elektrody zbiorcze o różnych długościach. W tabelicy 19 przedstawiono sumaryczne zestawienie wyprodukowanych elektrod osadczych w powiązaniu z ich długością w odniesieniu do poszczególnych kręgów i wytopów hutniczych. Długości produkowanych elektrod wynosiły: 8085, 10085, 11835 i 13085 mm. Wyszczególnione długości oznaczono 11-14. Całkowita liczba wyprodukowanych elektrod wynosiła 816 sztuk, natomiast podczas realizacji zlecenia produkcyjnego skontrolowano 134 sztuk. Wynikało to z uzgodnień pomiędzy wykonawcą i zamawiającym.

Tablica 19. Sumaryczne zestawienie wyprodukowanych elektrod w powiązaniu z ich długością w odniesieniu do zastosowanych rolek i wytopów hutniczych

Długość elektrody [mm]	Liczba kręgów / liczba wytopów	Kręgi	Wytopy	Ilość analizowanych próbek / liczba wytopów
11=8085	3/2	r7+r9+r12	h1+h2	36=24+12
12=10085	3/3	r1+r2+r3	h5+h6+h7	30=12+6+12
13=11835	4/4	r3+r4+r5+r10	h3+h4+h5+h6	31=4+9+11+7
14=13085	4/3	r5+r6+r8+r11	h2+h3+h4	37=11+17+9

Produkcja elektrod zbiorczych powinna być wykonana w sposób zapewniający spełnienie założeń projektowych. Tolerancje wykonania tego podzespołu elektrofiltru są ściśle określone. W konsekwencji tylko wyrób spełniający wymagania odnośnie finalnego kształtu jest dopuszczony do sprzedaży i montażu w przestrzeni roboczej odpylacza. Na rysunku 48 pokazano, które cechy geometryczne sprawdzano podczas kontroli międzyoperacyjnej i w gotowej płycie elektrody. Docelowo mierzono 12 wielkości geometrycznych, takich jak: długość ( $L$ ) i szerokość płyty elektrody ( $M$ ), sierpowatość ( $K$ ), wygięcie wzdłużne ( $A_c$ ,  $B_c$ ), pofalowanie środkowej powierzchni płyty, skrócenie poprzeczne ( $H$ ) oraz odległość określonych punktów pomiarowych mierzonych od środka elektrody ( $C1$ ,  $C2$ ,  $E1$ ,  $E2$ ).

W celu pokazania zróżnicowania w zbiorowości ww. wielkości geometrycznych wykorzystano klasyczny współczynnik zmienności. W analizie pominięto 4 wielkości geometryczne, dla których otrzymano wartość współczynnika zmienności <1% (dotyczy długości i szerokości płyty oraz wysokości półki elektrody strona A i B). Analizę statystyczną dotyczącą oceny tolerancji wykonania wykonano w odniesieniu do każdego kręgu taśmy zastosowanej w procesie produkcyjnym oraz dla całej populacji reprezentującej materiał do produkcji. Wyniki zestawiono w tablicach 20-22.

Tablica 20. Wartości klasycznego współczynnika zmienności dla analizowanych wielkości geometrycznych [%]

Krąg taśmy	Ac	Bc	C1	C2	E1	E2	Pofalowanie powierzchni
r1	2,7	5,85	1,55	2,56	1,87	1,19	6,15
r2	2,19	2,38	3	3	3,28	2,97	5,61
r3	5,28	5,1	2,31	3,44	3,17	1,65	10,64
r4	4,83	5,58	3,04	3,44	2,6	2,94	13,93
r5	4,6	7,24	2,29	2,86	2,99	2,46	7,93
r6	6,27	13,29	3,33	3,54	3,06	2,21	4,97
r7	25,73	19,31	2,44	3,06	3,6	1,78	40,6
r8	8,25	2,28	2,43	3,82	2,23	1,37	4,4
r9	6,63	5,24	2,25	3,25	2,81	2	8,88
r10	6,11	6,15	1,99	3,48	3,73	3,65	21
r11	10,28	7,32	2,84	3,6	3,51	2,7	4,19
r12	27,76	20,69	2,77	3,95	3,54	2,4	20,1

Tablica 21. Wartości klasycznego współczynnika zmienności dla analizowanych wielkości geometrycznych [%]

Krąg taśmy	Skręcenie poprzeczne H	Sierpowatość K
r1	2,45	4,22
r2	0,97	4,66
r3	3,55	5,30
r4	12,0	6,53
r5	23,75	11,45
r6	28,51	6,57
r7	27,22	26,55
r8	20,59	4,66
r9	9,8	14,39
r10	7,77	8,86
r11	4,75	6,21
r12	9,54	9,11

Tablica 22. Podstawowa statystyka wielkości geometrycznych w odniesieniu do całej populacji (134 próbki)

Miary statystyczne	Ac	Bc	C1	C2	E1	E2	H	K	Pofalowanie powierzchni
Średnia x	2,67	2,64	28,71	28,89	29,11	28,75	11,72	2,63	1,57
Odchylenie standardowe s	0,6	0,57	0,75	0,94	0,89	0,76	3,72	0,55	0,43
Mediana M	2,9	2,9	28,8	29	29,45	28,8	13,2	2,8	1,45
Minimum	1	1	27	27	27	26,6	2	1,2	0,8
Maksimum	3,5	3,5	30	30	30	30	22	3,6	2,7
Skośność	-1,13	-0,98	-0,45	-0,48	-0,9	-0,4	-0,03	-0,66	0,29
Kurtoza	0,01	-0,48	-0,4	-0,96	-0,34	-0,29	-0,57	-0,48	-1,26
Kwartyl q1	2,33	2,35	28,3	28,2	28,5	28,3	8	2,3	1,2
Kwartyl q3	3	3	29,2	29,8	29,8	29,3	14,1	3	2,0
V(x)=s/x, %	22,34	21,44	2,62	3,3	3,04	2,63	31,72	20,9	27,34
(q3-q1)/(2*M), %	11,64	11,21	1,56	2,9	2,21	1,74	23,1	12,5	27,59

Największą wartość współczynnika zmienności otrzymano dla skręcenia poprzecznego (krąg taśmy oznaczony r6) – tablica 21. Największe zróżnicowanie analizowanych wielkości geometrycznych zaobserwowano w przypadku kręgu r7 (tablica 20-21). Jest to krąg taśmy charakteryzujący się najmniejszą wartością grubości taśmy - tablica 14. Jak opisano powyżej, w zakresie analizowanego zlecenia produkcyjnego były produkowane elektrody dla typoszeregu 4 długości. W celach porównawczych do analizy statystycznej wybrano najmniejszą i największą długość. Wyniki analizy zestawiono w tablicy 23-24.

Tablica 23. Analiza statystyczna analizowanych wielkości geometrycznych dla najkrótszej elektrody (11)

Miary statystyczne	Ac	Bc	C1	C2	E1	E2	H	K	Pofalowanie powierzchni
Średnia x	1,80	1,79	28,64	28,83	29,02	28,86	7,09	1,88	1,30
Odchylenie standardowe s	0,43	0,30	0,71	0,97	0,94	0,60	1,23	0,33	0,33
Mediana M	1,75	1,70	28,70	28,80	29,25	28,85	7,20	1,80	1,30
Minimum	1,00	1,00	27,20	27,00	27,00	27,50	2,00	1,20	0,80
Maksimum	3,00	2,60	30,00	30,00	30,00	30,00	10,00	2,70	2,70
Skośność	1,05	0,88	-0,18	-0,29	-0,67	-0,11	-1,81	0,50	2,09
Kurtoza	2,20	2,74	-0,42	-1,19	-0,74	-0,30	8,13	0,53	7,79
Kwartyl q1	1,93	1,83	29,20	29,73	29,83	29,33	7,63	2,00	1,40
Kwartyl q3	0,24	0,17	0,02	0,03	0,03	0,02	0,17	0,18	0,26
s/x, %	24,0	16,6	2,5	3,35	3,23	2,07	24,0	16,7	2,5
(q3-q1)/(2*M), %	9,3	3,7	1,8	3,0	2,3	1,4	9,3	3,7	1,8

Tablica 24. Analiza statystyczna analizowanych wielkości geometrycznych dla najdłuższej elektrody (14)

Miary statystyczne	Ac	Bc	C1	C2	E1	E2	H	K	Pofalowanie powierzchni
Średnia x	2,99	2,91	28,46	28,89	29,10	28,52	12,64	3,07	2,08
Odchylenie standardowe s	0,27	0,27	0,78	0,99	0,89	0,66	4,08	0,31	0,11
Mediana M	3,00	3,00	28,60	29,20	29,30	28,60	13,00	3,10	2,10
Minimum	2,30	2,10	27,00	27,00	27,00	27,00	7,00	2,00	1,70
Maksimum	3,50	3,50	29,80	30,00	30,00	30,00	22,00	3,60	2,30
Skośność	-0,40	-0,76	-0,28	-0,55	-1,11	-0,24	0,60	-0,96	-0,87
Kurtoza	0,74	1,03	-0,83	-1,02	0,30	0,48	-0,60	2,63	2,80
Kwartyl q1	2,90	2,80	27,90	28,10	28,60	28,10	9,00	3,00	2,00
Kwartyl q3	3,10	3,10	29,00	29,80	29,80	28,90	15,00	3,20	2,20
s/x, %	9,0	9,4	2,8	3,4	3,1	2,3	32,3	10,2	5,3
(q3-q1)/(2*M), %	3,3	5,0	1,9	2,9	2,05	1,4	23,1	3,3	4,8

Dla zmierzonych wielkości geometrycznych podobnie, jak w przypadku grubości taśmy, składu chemicznego i właściwości mechanicznych sprawdzono zgodność rozkładu danych empirycznych z rozkładem normalnym. Ponieważ w tym przypadku ilość próbek przekraczała 50, zastosowano inny rodzaj testu tzn. | Kołmogorowa [98]. Testowano hipotezy:

$H_0$ : rozkład danych jest zgodny z rozkładem normalnym, gdy:  $|I| \leq I_{krytyczne}$ ;

$H_1$ : rozkład danych nie jest zgodny z rozkładem normalnym, gdy:  $|I| > I_{krytyczne}$ .

Wartość statystyki  $I_{krytyczne}$  odczytano z tablic Kołmogorowa. Wartość statystyki  $I$  wyliczono jako iloczyn statystyki  $D_n$  i pierwiastka z liczebności próby. Wykazano, że nie wszystkie rozkłady mierzonych wielkości geometrycznych w populacji mają rozkład zgodny z rozkładem normalnym przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

W tablicy 25 zestawiono granice przedziału ufności dla analizowanych wielkości geometrycznych. Tablica 26 przedstawia wyniki testu zgodności I Kołmogorowa dla zmiennych niezależnych reprezentujących tolerancje wykonania elektrody zbiorczej Sigma 735. Stwierdzono brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej stwierdzającej normalność rozkładu danych.

Tablica 25. Granice przedziału ufności dla analizowanych wielkości geometrycznych

Wielkości geometryczne (zmienna niezależna) [mm]	Granice przedziału ufności		Dokładność oszacowania e [mm]
	Dolna	Górna	
Wysokość strona A	50,37	50,45	0,04
Wysokość strona B	50,22	50,33	0,05
Wygięcie Ac	2,56	2,77	0,1
Wygięcie Bc	2,55	2,74	0,1
Wymiar pomocniczy C1	28,59	28,84	0,1
Wymiar pomocniczy C2	28,73	29,05	0,2
Wymiar pomocniczy E1	28,96	29,26	0,2
Wymiar pomocniczy E2	28,62	28,88	0,1
Skreślenie poprzeczna H	11,08	12,35	0,64
Sierpowatość K	2,53	2,72	0,1
Szerokość M	736,39	736,53	0,1
Pofalowanie powierzchni	1,5	1,65	0,1

Tablica 26. Wyniki testu zgodności I Kołmogorowa dla analizowanych wielkości geometrycznych

Wielkość geometryczna [mm] (zmienna niezależna)	Statystyka $D_n$	Wartość statystyki I	Wynik testu
Wysokość strona A	0,099	1,146	T
Wysokość strona B	0,090	1,046	T
Wymiar pomocniczy C1	0,059	0,687	T
Wymiar pomocniczy C2	0,075	0,873	T
Wymiar pomocniczy E2	0,049	0,563	T
Sierpowatość K	0,096	1,115	T
Szerokość M	0,060	0,697	T
Pofalowanie powierzchni	0,179	2,066	N/T (a~0)
Wygięcie Ac	0,223	2,582	N/T (a~0)
Wygięcie Bc	0,177	2,045	N/T (a~0)
Wymiar pomocniczy E1	0,127	1,468	N/T (a~0)
Skreślenie poprzeczne H	0,156	1,809	N/T (a~0)
Założony poziom istotności $\alpha=0,05$ . Wartość statystyki Kołmogorowa (krytyczna) $I_{0,05}=1,358$ . Jeżeli $I \leq I_{0,05}$ – rozkład danych zgodny z rozkładem normalnym (T).			

## 10.2 Badanie zależności pomiędzy składem chemicznym wsadu technologicznego a tolerancjami wykonania gotowego wyrobu

W pierwszym etapie analizy zależności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi, a objaśnianymi wyliczono współczynniki korelacji liniowej Pearsona oraz współczynniki korelacji cząstkowej pierwszego i drugiego stopnia. Miało to na celu zbadanie związków między tymi zmiennymi oraz ich siłę. Zmienne objaśniające reprezentowały skład chemiczny, a objaśniane tolerancje wykonania gotowego wyrobu. Współczynniki oraz ich istotność wyliczono według poniższych zależności (6-10). Wyniki zestawiono w tablicach 27-32. Analiza współczynników korelacji jest podstawą doboru zmiennych do modeli regresji, co zostanie przedstawione w dalszej części obliczeń. Zgodnie z danymi literaturowymi [139-140] zmienne powinny charakteryzować się:

- słabą korelacją między sobą (zestaw zmiennych objaśniających x);
- silną korelacją ze zmienną objaśnianą (powinny wnosić możliwie dużo informacji o zmiennej objaśnianej y).

Współczynniki korelacji liniowej Pearsona dla poszczególnych zestawów zmiennych ujęto w postaci tablicy korelacyjnej, co ułatwiło analizę porównawczą. Sprawdzone ich istotność statystyczną. Korelację cząstkową analizowano pod kątem ścisłości związku korelacyjnego dwóch zmiennych przy wyłączeniu wpływu innych. Pierwsze dwa indeksy przed kropką nazywane w literaturze głównymi, oznaczają zmienne, których związek badano. Indeksy po kropce tzw. następcze oznaczają cechy eliminowane. Wszystkie współczynniki korelacji (Pearsona i cząstkowej) zostały sprawdzone pod kątem istotności statystycznej. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona przyjmuje wartości liczbowe z przedziału:  $-1 \leq r_{xy} \leq +1$ . Według [140] do oceny siły współzależności można skorzystać z następujących przedziałów:

- $|0-0,2|$  – współzależność bardzo słaba;
- $|0,2-0,4|$  – współzależność słaba;
- $|0,4-0,6|$  – współzależność umiarkowana;
- $|0,6-0,8|$  – współzależność silna;
- $|0,8-1,0|$  – współzależność bardzo silna.

$$r_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sqrt{s_X^2 * s_Y^2}} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{s_X^2 * s_Y^2} \quad (6)$$

gdzie:

$r_{x,y}$  – współczynnik korelacji liniowej Pearsona dwóch zmiennych;

$\text{cov}(X, Y)$  – kowariancja dwóch zmiennych;

$S_x, S_y$  – odchylenie standardowe zmiennej objaśniającej i objaśnianej.

$$r_{X1,X2,X3} = \frac{r_{X1,X2} - r_{X1,X3} * r_{X2,X3}}{\sqrt{(1 - r_{X1,X3}^2)} * \sqrt{(1 - r_{X2,X3}^2)}} \quad (7)$$

$$r_{X1,X2,X3,X4} = \frac{r_{X1,X2} - r_{X1,X4,X3} * r_{X2,X4,X3}}{\sqrt{(1 - r_{X1,X4,X3}^2) * (1 - r_{X2,X4,X3}^2)}} \quad (8)$$

gdzie:

$r_{X1,X2,X3}$  – współczynnik korelacji cząstkowej pierwszego rzędu;

$r_{X1,X2,X3,X4}$  – współczynnik korelacji cząstkowej drugiego rzędu.

$$z = \frac{r_{x,y}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2)}} * \sqrt{n} \quad (9)$$

gdzie:

$z$  – wartość statystyki empirycznej  $z$ ;

$r_{XY}$  – współczynnik korelacji liniowej Pearsona dwóch zmiennych;

$n$  – liczba wyników pomiarów.

Przedział ufności dla współczynnika korelacji:

$$r_{XY} - z_{kr} * \frac{1 - r_{XY}^2}{\sqrt{n}} \leq z \leq r_{XY} + z_{kr} * \frac{1 - r_{XY}^2}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

gdzie;

$z_{kr}$  – wartość krytyczna rozkładu normalnego,  $z_{kr}=1,96$  dla  $\alpha=0,05$ ;

$r_{XY}$  – współczynnik korelacji liniowej Pearsona dwóch zmiennych.

Wprowadzono następujące oznaczenia zmiennych objaśniających opisujących skład chemiczny, dla ułatwienia interpretacji wyników obliczeń zestawionych w dalszej części pracy: C [%] – X1; Mn [%] – X2; S [%] – X3, P [%] – X4. Ustalono, że w obliczeniach uwzględnione zostaną wielkości geometryczne dla których wartość klasycznego współczynnika zmienności  $V(x)^3$  8% (tablica 22). W celu jednoczesnego porównywania wartości współczynnika korelacji zastosowano skalę kolorów: gradient biało-czerwony dotyczy par korelacyjnych w obrębie zbioru zmiennych reprezentujących skład chemiczny, natomiast gradient żółto-zielony odnosi się do par korelacyjnych (wielkość geometryczna - skład chemiczny wsadu technologicznego). Wyniki analizy zestawiono w tablicy 27.

Tablica 27. Wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla par korelacyjnych w obrębie zmiennych objaśniających opisujących skład chemiczny i kombinacji zmiennych (wielkość geometryczna – skład chemiczny)

	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
C [%]	1			
Mn [%]	-0,163	1,000		
P [%]	0,403	0,234	1,000	
S [%]	0,361	0,583	0,760	1,000
Wygięcie Ac [mm]	0,328	0,492	0,377	0,537
Wygięcie Bc [mm]	0,381	0,480	0,397	0,532
Skręcenie poprzeczne H [mm]	0,470	0,386	0,522	0,502
Sierpowatość K [mm]	0,120	0,529	0,436	0,525
Pofalowanie. powierzchni elektrody [mm]	-0,310	0,285	-0,316	-0,233
$X1=C$ [%]; $X2=Mn$ [%]; $X3=P$ [%]; $X4= S$ [%]				

Wyniki analizy korelacji wykazały, że w obrębie zmiennych objaśniających reprezentujących skład chemiczny występuje silna dodatnia współzależność pomiędzy siarką i fosforem ( $X_4=S$ ;  $X_3=P$ ) oraz współzależność dodatnia pomiędzy siarką i manganem ( $X_4=S$ ;  $X_2=Mn$ ). Dla ostatniej pary zmiennych otrzymana wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona świadczy o dodatniej współzależności umiarkowanej. Dla ww. zmiennych wartości  $r_{xy}$  dowodzą, że wyszczególnione predyktory powielają w pewnym zakresie informacje wnoszące do modelu regresji. Najsłabszy związek korelacyjny negatywny (ujemny) wykazała para ( $X_1=C$ ;  $X_2=Mn$ ). W przypadku par zmiennych (pierwiastki stopowe x – tolerancje wykonania y) można zauważyć, że informacje wnoszone przez poszczególne pierwiastki stopowe o zmiennej objaśnianej y nie tworzą jednakowego wzorca. Wykorzystując współczynnik determinacji obliczanym jako:

$$R^2 = r_{xy}^2 * 100\% \quad (11)$$

stwierdzono, że zmienność omawianych cech jest spowodowana odpowiednio w: 57,8%, 34% i 2,7% zmianami drugiej cechy. Cechami w wyszczególnionych powyżej parach korelacyjnych są pierwiastki stopowe. W tego typu związkach, nazywanych w literaturze [140] dwustronnymi, zachodzi wzajemne oddziaływanie na siebie badanych zjawisk. Trudno w tym konkretnym przypadku określić co jest skutkiem, a co przyczyną.

Wyniki analizy par korelacyjnych zestawionych w tabelicy 27 (x-pierwiastki stopowe, y-tolerancje geometryczne wykonania) sugerują, że współzależność węgla z poszczególnymi tolerancjami wykonania jest najsłabsza w całej rozpatrywanej grupie zmiennych objaśniających. Największą wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona wykazały pary zmiennych: ( $X_4=S$ ; Wygięcie Ac), ( $X_4=S$ ; Wygięcie Bc), ( $X_3=P$ ; Skręcenie poprzeczne H) oraz ( $X_2=Mn$ ; Sierpowatość K /  $X_4=S$ ; Sierpowatość K). W wyszczególnionych powyżej związkach jednokierunkowych występuje jednokierunkowe oddziaływanie przyczyny na skutek. Zmienność ww. cech jest uwarunkowana w ~28% zmianami drugiej cechy. Najwięcej współzależności negatywnych z poszczególnymi pierwiastkami stopowymi wykazało pofalowanie powierzchni elektrody zbiorczej (3 przypadki). Największe zróżnicowane w zakresie współzależności (zmienna objaśniająca – zmienna objaśniana) wykazał węgiel  $V(x)=141\%$ , natomiast najmniejszym rozproszeniem wyników charakteryzuje się mangan dla którego  $V(x)=20\%$ .

W dalszej kolejności analizowano ścisłość związków korelacyjnych między dwoma zmiennymi przy wyłączeniu wpływu pozostałych. Zmienne objaśniające reprezentowały skład chemiczny wsadu technologicznego (4 pierwiastki stopowe jednocześnie). W tym celu wyliczono korelację cząstkową pierwszego i drugiego rzędu. Wyniki zestawiono w tabelicy 28. Silną współzależność korelacyjną wykazały kombinacje zmiennych: ( $X_3=P$ ;  $X_4=S$ ) oraz ( $X_1=C$ ;  $X_3=P$ ), Współzależność pomiędzy węglem i siarką ( $X_1=X$ ;  $X_4=S$ ) przy wyłączeniu związku pozostałych pierwiastków okazała się najsłabsza. W tabelicy 28-32 przedstawiono wyniki oceny istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla poszczególnych par korelacyjnych wraz z podaniem przedziału ufności.



Tablica 28. Wartości współczynnika korelacji cząstkowej pierwszego i drugiego rzędu dla zmiennych objaśniających reprezentujących skład chemiczny wsadu technologicznego

Kombinacja zmiennych objaśniających z wyłączeniem pozostałych predyktorów	Korelacja cząstkowa I stopnia		Korelacja cząstkowa II rzędu	
	Kombinacja zmiennych	Wartość	Kombinacja zmiennych	Wartość
X1, X2, X3, X4	X1, X4, X3	0,09289	X1, X2, X3, X4	-0,29124
	X2, X4, X3	0,64088		
X1, X3, X2, X4	X1, X4, X2	0,81514	X1, X3, X2, X4	-0,67691
	X3, X4, X2	0,78923		
X1, X4, X2, X3	X1, X3, X2	0,45952	X1, X4, X2, X3	-0,00271
	X4, X3, X2	0,78923		
X2, X3, X1, X4	X2, X4, X1	0,69771	X2, X3, X1, X4	-0,53915
	X2, X4, X1	0,71998		
X2, X4, X1, X3	X2, X3, X1	0,33210	X2, X4, X1, X3	0,52535
	X4, X3, X1	0,71998		
X3, X4, X1, X2	X3, X2, X1	0,33210	X3, X4, X1, X2	0,78178
	X4, X2, X1	0,69771		

Tablica 29. Przedział ufności dla współczynnika korelacji liniowej Pearsona, wartość statystyki empirycznej z, wraz z oceną istotności

Para korelacyjna	Przedział ufności dla wsp. korelacji liniowej Pearsona przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$	Wartość statystyki empirycznej z	Ocena istotności statystycznej wsp. korelacji liniowej Pearsona, Istotny jeżeli $(-\mu; -z_{kr}) > Z < (z_{kr}; +\mu)$
Wygięcie Ac, X1	0,1764 £ Ac, X1 £ 0,4787	4,01	Tak
Wygięcie Ac, X2	0,3637 £ Ac, X2 £ 0,6204	6,54	Tak
Wygięcie Ac, X3	0,2322 £ Ac, X3 £ 0,5226	4,72	Tak
Wygięcie Ac, X4	0,4162 £ Ac, X4 £ 0,6573	7,36	Tak
Wygięcie Bc, X1	0,2364 £ Bc, X1 £ 0,5259	4,77	Tak
Wygięcie Bc, X2	0,3497 £ Bc, X2 £ 0,6103	6,33	Tak
Wygięcie Bc, X3	0,2542 £ Bc, X3 £ 0,5395	5,01	Tak
Wygięcie Bc, X4	0,4105 £ Bc, X4 £ 0,6534	7,27	Tak
Skręcenie poprzeczne H, X1	0,3386 £ H, X1 £ 0,6023	6,17	Tak
Skręcenie poprzeczne H, X2	0,2423 £ H, X2 £ 0,5304	4,85	Tak
Skręcenie poprzeczne H, X3	0,3992 £ H, X3 £ 0,6455	7,09	Tak
Skręcenie poprzeczne H, X4	0,3759 £ H, X4 £ 0,6291	6,73	Tak
Sierpowatość K, X1	-0,0474 £ K, X1 £ 0,2864	1,39	Nie
Sierpowatość K, X2	0,4075 £ K, X1 £ 0,6513	7,22	Tak
Sierpowatość K, X3	0,2988 £ K, X1 £ 0,5731	5,61	Tak
Sierpowatość K, X4	0,4023 £ K, X1 £ 0,6476	7,14	Tak
Pofalowanie pow., X1	-0,4633 £ PP, X1 £ -0,1573	-3,78	Tak
Pofalowanie pow., X2	0,1298 £ PP, X1 £ 0,4409	3,45	Tak
Pofalowanie pow., X3	-0,4684 £ PP, X1 £ -0,1636	-3,86	Tak
Pofalowanie pow., X4	-0,3929 £ PP, X1 £ -0,0726	-2,93	Tak

Tablica 30. Przedział ufności dla współczynnika korelacji liniowej Pearsona, wartość statystyki empirycznej z, wraz z oceną istotności

Para korelacyjna	Przedział ufności dla wsp. korelacji liniowej Pearsona przy poziomie istotności $\alpha=0,05$	Wartość statystyki empirycznej z	Ocena istotności statystycznej wsp. korelacji liniowej Pearsona. Istotny jeżeli $(-\mu; -z_{kr}) > z < (z_{kr}; +\mu)$
X1, X2	-0,3279 £ X1, X2 £ 0,017	-2,02	Tak
X1, X3	0,2607 £ X1, X3 £ 0,5444	5,39	Tak
X1, X4	0,2140 £ X1, X4 £ 0,5084	4,74	Tak
X2, X3	0,0743 £ X2, X3 £ 0,3943	2,95	Tak
X2, X4	0,4712 £ X2, X4 £ 0,6948	8,79	Tak
X3, X4	0,6884 £ X3, X4 £ 0,8315	14,32	Tak

Tablica 31. Przedział ufności dla współczynnika korelacji cząstkowej pierwszego rzędu, wartość statystyki empirycznej z, wraz z oceną istotności

Kombinacja zmiennych	Przedział ufności dla wsp. korelacji cząstkowej I stopnia przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$	Wartość statystyki empirycznej z	Ocena istotności statystycznej wsp. korelacji liniowej Pearsona. Istotny jeżeli $(-\mu; -z_{kr}) > z < (z_{kr}; +\mu)$
X1, X4. X3	-0,750 £ X1, X4. X3 £ 0,2607	1,08	Nie
X2, X4. X3	0,5411 £ X2, X4. X3 £ 0,7407	9,66	Tak
X1, X4. X2	0,7583 £ X1, X4. X2 £ 0,8720	16,29	Tak
X3, X4. X2	0,7254 £ X3, X4. X2 £ 0,8531	14,88	Tak
X1, X3. X2	0,3260 £ X1, X3. X2 £ 0,5931	5,99	Tak
X4, X3. X2	0,7254 £ X4, X3. X2 £ 0,8531	14,88	Tak
X2, X4. X1	0,6108 £ X2, X4. X1 £ 0,7846	11,27	Tak
X2, X4. X1	0,6384 £ X2, X4. X1 £ 0,8015	12,01	Tak
X2, X3. X1	0,1815 £ X2, X3. X1 £ 0,4827	4,08	Tak
X4, X3. X1	0,6384 £ X4, X3. X1 £ 0,8015	12,01	Tak
X3, X2. X1	0,6884 £ X3, X2. X1 £ 0,8315	4,08	Tak
X4, X2. X1	0,6108 £ X4, X2. X1 £ 0,7846	11,27	Tak

Tablica 32. Przedział ufności dla współczynnika korelacji cząstkowej drugiego rzędu, wartość statystyki empirycznej z wraz z oceną istotności

Kombinacja zmiennych	Przedział ufności dla wsp. korelacji cząstkowej II stopnia przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$	Wartość statystyki empirycznej z	Ocena istotności statystycznej wsp. korelacji liniowej Pearsona. Istotny jeżeli $(-\mu; -z_{kr}) > z < (z_{kr}; +\mu)$
X1, X2. X3, X4	-0,1720 £ X1, X2. X3, X4 £ 0,1666	-0,03	Nie
X1, X3. X2, X4	-0,7686 £ X1, X3. X2, X4 £ -0,5852	-10,65	Tak
X1, X4. X2, X3	-0,1720 £ X1, X4. X2, X3 £ 0,1666	-0,03	Nie
X2, X3. X1, X4	-0,6593 £ X2, X3. X1, X4 £ -0,4191	-7,41	Tak
X2, X4. X1, X3	0,4028 £ X2, X4. X1, X3 £ 0,6479	7,15	Tak
X3, X4. X1, X2	0,7159 £ X3, X4. X1, X2 £ 0,8476	14,51	Tak

Bazując na zebranych danych empirycznych, w drugim etapie przeprowadzono procedurę doboru zmiennych objaśniających i objaśnianych do modelu ekonometrycznego. Jako pierwsze kryterium eliminacji zmiennych quasi-stałych, przyjęto wartość współczynnika zmienności dla zbioru zmiennych (x i y). Ustalono, że wszystkie badane zmienne, dla których wartość współczynnika zmienności  $V_x < 8\%$  zostaną usunięte ze zbioru "kandydatek".

Do badań przyjęto następujące regresory: C, Mn, P i S. Regresanty reprezentowały: wygięcie profilu elektrody Ac i Bc, skręcenie poprzeczne H, sierpowatość K i pofalowanie powierzchni płyty elektrody. Jako metodę badań przyjęto klasyczną metodę najmniejszych kwadratów (funkcję regresji wielorakiej). Dla określenia optymalnego zbioru zmiennych objaśniających wykorzystano metodę Hellwiga (metodę wskaźników pojemności informacyjnej) [45]. W pierwszym kroku przygotowano macierze korelacji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi spełniającymi kryterium jw. a analizowanymi zmiennymi objaśnianymi reprezentującymi tolerancje wykonania elektrod osadczych. W tablicy 27 zestawiono macierz korelacji dla analizowanych przypadków. Następnie obliczono ogólną liczbę możliwych kombinacji dla zbiorów danych wejściowych x, z zależności:  $S=2^m-1$ , gdzie: m-liczba predyktorów x. Ostatecznie przyjęto m=4 i otrzymano ogólną liczbę kombinacji  $S=15$ . W dalszym etapie wyznaczono kombinacje zmiennych objaśniających za pomocą macierzy zero-jedynkowej – tablica 33. Liczbę kombinacji dla rozpatrywanych predyktorów wyliczono wykorzystując symbol Newtona:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

gdzie:

n-liczba wszystkich zmiennych objaśniających w modelu;

k-liczba zmiennych w kombinacji.

Otrzymano następujące kombinacje zmiennych x dla poszczególnych wartości n i k:

$$\binom{4}{1} = 4; \binom{4}{2} = 6; \binom{4}{3} = 4; \binom{4}{4} = 1$$

Tablica 33. Macierz zero-jedynkowa kombinacji zmiennych objaśniających

Nr kombinacji	X <sub>1</sub> =C [%]	X <sub>2</sub> =Mn [%]	X <sub>3</sub> =P [%]	X <sub>4</sub> =S [%]	C <sub>s</sub> - możliwe kombinacje zbioru X
C1	1	0	0	0	X1
C2	0	1	0	0	X2
C3	0	0	1	0	X3
C4	0	0	0	1	X4
C5	1	1	0	0	X1, X2
C6	1	0	1	0	X1, X3
C7	1	0	0	1	X1, X4
C8	0	1	1	0	X2, X3
C9	0	1	0	1	X2, X4
C10	0	0	1	1	X3, X4
C11	1	1	1	0	X1, X2, X3
C12	1	1	0	1	X1, X2, X4
C13	1	0	1	1	X1, X3, X4
C14	0	1	1	1	X2, X3, X4
C15	1	1	1	1	X1, X2, X3, X4

Dla każdej zmiennej  $x_j$  w obrębie każdej kombinacji zmiennych objaśniających obliczono indywidualne wskaźniki pojemności informacyjnej wg zależności:

$$h_{sj} = \frac{r_j^2}{\sum_{i \in C_s} |r_{ij}|}; \quad h_{sj} \in [0,1] \quad (12)$$

gdzie:

$h_{sj}$  - indywidualny wskaźnik pojemności informacyjnej;

$s$  - numer kombinacji,  $j$ -numer zmiennej;

$r_j$  - współczynnik korelacji między zmienną objaśniającą  $X_j$ , a objaśnianą  $Y$ ;

$r_{ij}$  - współczynnik korelacji między zmiennymi objaśniającymi  $X_i$  oraz  $X_j$ .

Następnie dla  $s$ -tej kombinacji obliczono integralne wskaźniki pojemności informacyjnej w ramach każdej kombinacji z zależności:

$$H_s = \sum_{i \in C_s} h_{sj} \quad H_s \in [0,1] \quad (13)$$

gdzie:

$H_s$ -integralny wskaźnik pojemności informacyjnej  $s$ -tej kombinacji,  $C_s$ -zbiór zmiennych tworzących  $s$ -tą kombinację.

Za najlepszą (optymalną) kombinację nośników informacji uznaje się ten podzbiór na zmienne objaśniające, dla którego pojemność integralna jest największa. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 34-38.

Tablica 34. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej wygięcie  $A_c$

Nr kombinacji	Wartości $h_{js}$				Wartości $H_s$	$C_s$ - możliwe kombinacje zbioru X
	X1=C [%]	X2=Mn [%]	X3=P [%]	X4=S [%]		
C1	0,1073	0	0	0	0,1073	X1
C2	0	0,2421	0	0	0,2421	X2
C3	0	0	0,1424	0	0,1424	X3
C4	0	0	0	0,2881	0,2881	X4
C5	0,0922	0,2082	0	0	0,3004	X1, X2
C6	0,0765	0	0,1016	0	0,1780	X1, X3
C7	0,0788	0	0	0,2116	0,2904	X1, X4
C8	0	0,1961	0,1154	0	0,3115	X2, X3
C9	0	0,1529	0	0,1820	0,3349	X2, X4
C10	0	0	0,0809	0,1637	0,2446	X3, X4
C11	0,0685	0,1733	0,0870	0	0,3288	X1, X2, X3
C12	0,0704	0,1387	0	0,1482	0,3572	X1, X2, X4
C13	0,0608	0	0,0659	0,1358	0,2625	X1, X3, X4
C14	0	0,1332	0,0714	0,1230	0,3276	X2, X3, X4
C15	0,0557	0,1222	0,0594	0,1065	0,3439	X1, X2, X3, X4

$$C_{opt} : H_{opt} = \max \{H_s\} = 0,3572$$

Tablica 35. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej wygięcie Bc

Nr kombinacji	Wartości $h_{js}$				Wartości $H_s$	$C_s$ - możliwe kombinacje zbioru X
	X1=C [%]	X2=Mn [%]	X3=P [%]	X4=S [%]		
C1	0,1453	0	0	0	0,1453	X1
C2	0	0,2304	0	0	0,2304	X2
C3	0	0	0,1575	0	0,1575	X3
C4	0	0	0	0,2830	0,2830	X4
C5	0,1249	0,1981	0	0	0,3230	X1, X2
C6	0,1036	0	0,1123	0	0,2159	X1, X3
C7	0,1067	0	0	0,2079	0,3146	X1, X4
C8	0	0,1867	0,1276	0	0,3143	X2, X3
C9	0	0,1456	0	0,1788	0,3243	X2, X4
C10	0	0	0,0895	0,1608	0,2503	X3, X4
C11	0,0928	0,1649	0,0962	0	0,3539	X1, X2, X3
C12	0,0953	0,1320	0	0,1455	0,3728	X1, X2, X4
C13	0,0824	0	0,0728	0,1334	0,2886	X1, X3, X4
C14	0	0,1268	0,0790	0,1208	0,3266	X2, X3, X4
C15	0,0754	0,1164	0,0657	0,1046	0,3621	X1, X2, X3, X4

$$C_{opt} : H_{opt} = \max \{H_s\} = 0,3728$$

Tablica 36. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej skręcenie poprzeczne H

Nr kombinacji	Wartości $h_{js}$				Wartości $H_s$	$C_s$ - możliwe kombinacje zbioru X
	X1=C [%]	X2=Mn [%]	X3=P [%]	X4=S [%]		
C1	0,2213	0	0	0	0,2213	X1
C2	0	0,1493	0	0	0,1493	X2
C3	0	0	0,2729	0	0,2729	X3
C4	0	0	0	0,2525	0,2525	X4
C5	0,1903	0,1284	0	0	0,3187	X1, X2
C6	0,1578	0	0,1946	0	0,3524	X1, X3
C7	0,1626	0	0	0,1855	0,3481	X1, X4
C8	0	0,1210	0,2211	0	0,3420	X2, X3
C9	0	0,0943	0	0,1595	0,2538	X2, X4
C10	0	0	0,1550	0,1435	0,2985	X3, X4
C11	0,1414	0,1068	0,1667	0	0,4149	X1, X2, X3
C12	0,1452	0,0855	0	0,1299	0,3606	X1, X2, X4
C13	0,1255	0	0,1262	0,1190	0,3707	X1, X3, X4
C14	0	0,0821	0,1368	0,1078	0,3267	X2, X3, X4
C15	0,1149	0,0754	0,1138	0,0934	0,3975	X1, X2, X3, X4

$$C_{opt} : H_{opt} = \max \{H_s\} = 0,4149$$

Tablica 37. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej sierpowatość K

Nr kombinacji	Wartości $h_{js}$				Wartości $H_s$	$C_s$ - możliwe kombinacje zbioru X
	X1=C [%]	X2=Mn [%]	X3=P [%]	X4=S [%]		
C1	0,0143	0	0	0	0,0143	X1
C2	0	0,2803	0	0	0,2803	X2
C3	0	0	0,1900	0	0,1900	X3
C4	0	0	0	0,2756	0,2756	X4
C5	0,0123	0,2410	0	0	0,2533	X1, X2
C6	0,0102	0	0,1355	0	0,1457	X1, X3
C7	0,0105	0	0	0,2025	0,2130	X1, X4
C8	0	0,2271	0,1540	0	0,3810	X2, X3
C9	0	0,1771	0	0,1741	0,3512	X2, X4
C10	0	0	0,1080	0,1566	0,2646	X3, X4
C11	0,0091	0,2006	0,1161	0	0,3258	X1, X2, X3
C12	0,0094	0,1605	0	0,1418	0,3116	X1, X2, X4
C13	0,0081	0	0,0879	0,1299	0,2259	X1, X3, X4
C14	0	0,1542	0,0953	0,1176	0,3671	X2, X3, X4
C15	0,0074	0,1415	0,0793	0,1019	0,3301	X1, X2, X3, X4

$$C_{opt} : H_{opt} = \max \{H_s\} = 0,3810$$

Tablica 38. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej pofalowanie powierzchni

Nr kombinacji	Wartości $h_{js}$				Wartości $H_s$	$C_s$ - możliwe kombinacje zbioru X
	X1=C [%]	X2=Mn [%]	X3=P [%]	X4=S [%]		
C1	0,0963	0	0	0	0,0963	X1
C2	0	0,0814	0	0	0,0814	X2
C3	0	0	0,0999	0	0,0999	X3
C4	0	0	0	0,0542	0,0542	X4
C5	0,0828	0,0700	0	0	0,1528	X1, X2
C6	0,0687	0	0,0712	0	0,1399	X1, X3
C7	0,0708	0	0	0,0398	0,1106	X1, X4
C8	0	0,0660	0,0809	0	0,1469	X2, X3
C9	0	0,0514	0	0,0342	0,0857	X2, X4
C10	0	0	0,0567	0,0308	0,0875	X3, X4
C11	0,0615	0,0583	0,0610	0	0,1808	X1, X2, X3
C12	0,0632	0,0466	0	0,0279	0,1377	X1, X2, X4
C13	0,0546	0	0,0462	0,0255	0,1263	X1, X3, X4
C14	0	0,0448	0,0501	0,0231	0,1180	X2, X3, X4
C15	0,0500	0,0411	0,0417	0,0200	0,1528	X1, X2, X3, X4

$$C_{opt} : H_{opt} = \max \{H_s\} = 0,1808$$

Z przedstawionych powyżej wyników obliczeń można wywnioskować, że największy wskaźnik integralnej pojemności informacyjnej  $H_s$  uzyskano dla podzbioru danych C11 i zmiennej objaśnianej reprezentującej skręcenie poprzeczne elektrody "H". Najmniejszą wartość wskaźnika otrzymano przy analizie wpływu zmiennych zależnych, reprezentujących skład chemiczny taśmy stalowej na tolerancję pofalowania powierzchni elektrody w środkowym jej paśmie. Wstępnie do obliczeń przyjęto kombinację czterech predyktorów z uwagi na większą wartość poznawczą i zastosowano metodę regresji krokowej wstecznej. Zakłada ona przyjęcie do modelu wszystkich zmiennych objaśniających, wyselekcjonowanych na podstawie wartości współczynnika zmienności oraz wartości integralnych wskaźników pojemności informacyjnej, i usuwanie w kolejnych krokach predyktorów, które w danym kroku wykazują najmniej istotny wpływ na zmienną objaśnianą (wartość  $p < 0,05$ ).

Dane zastosowane do budowy modeli regresji sprawdzono pod kątem występowania obserwacji odstających (nietypowych). Wykorzystano do tego celu test Grubbsa. Dodatkowo analizowano reszty otrzymane z poszczególnych modeli regresji wielorakiej. Reszty większe co do modułu od 3-krotnego błędu standardowego reszt, tj.  $|e_i| > 3 \cdot S_e$  zostały zakwalifikowane jako obserwacje odstające. Docelowo zostały one usunięte z analizowanej populacji. Istotność wszystkich współczynników równania regresji została oszacowana na podstawie testu F (Fishera-Snedecora). Otrzymane wartości istotności  $p < 0,05$  świadczą, że współczynniki regresji ostatecznie przyjęte do modeli ekonometrycznych są istotne statystycznie. Wyniki analizy zestawiono w tablicy 39.

Tablica 39. Współczynniki równania regresji wielorakiej wraz z wartościami poziomu istotności p

Wielkości geometryczne i poziom istotności (p-value, p)	Współczynniki równania regresji wielorakiej					Wartość p dla testu F
	$a_0$ [mm]	$a_1$ [mm/%C]	$a_2$ [mm/%Mn]	$a_3$ [mm/%P]	$a_4$ [mm/%S]	
Ac	-4,02	50,56	21,78	x	x	1,41E-17
Wartość p	1,34E-07	7,78E-09	1,40E-13	x	x	
Bc	-3,67	51,95	19,67	x	x	1,36E-17
Wartość p	2,07E-08	4,95E-11	4,60E-14	x	x	
Skręcenie porzeczne H	-33,16	404,11	133,16	586,80	-861,11	7,05E-27
Wartość p	2,28E-14	3,49E-15	1,191E-11	1,107E-05	1,04E-02	
Sierpowatość K	-1,1	x	15,45	73,49	x	1,79E-14
Wartość p	2,08E-02	x	2,47E-09	7,19E-06	x	
Pofalowanie powierzchni	x	x	17,59	x	-206,44	1,22E-12
Wartość p	x	x	3,34E-12	x	1,83E-10	

W dalszym etapie obliczono wartości czynnika inflacji wariancji VIF (variance inflation factors), który jest miarą współliniowości zmiennych. Współliniowość zmiennych objaśniających jest cechą niepożądaną w oszacowanym modelu. Współczynnik inflacji wariancji pozwala określić, czy zmienna zależna jest skorelowana z pozostałymi zmiennymi objaśniającymi w modelu. Miarę  $VIF_j$  wyznacza się z następującego wzoru:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (14)$$

dla  $j=1, 2, \dots, K$ , gdzie  $R_j^2$  jest współczynnikiem korelacji wielorakiej między zmienną  $x_j$ , a pozostałymi zmiennymi modelu.

Według danych literaturowych [86] uważa się, że wartość  $VIF_j > 10$  jest oznaką współliniowości, która trwale zakłóca jakość skonstruowanego modelu ekonometrycznego. Otrzymane wartości czynnika inflacji wariancji (tablica 40) świadczą o braku wystąpienia zjawiska współliniowości pomiędzy zmiennymi objaśniającymi w analizowanych modelach ekonometrycznych.

Tablica 40. Wartość czynnika inflacji wariancji dla zmiennych objaśniających w odniesieniu do poszczególnych modeli ekonometrycznych

Model ekonometryczny	Kombinacja zmiennych objaśniających do wyliczenia współczynnika korelacji wielorakiej				Wartość VIF
Ac	C	Mn	x	x	3,03
Bc	C	Mn	x	x	2,94
H	C	Mn	P	S	1,51
K	x	Mn	P	x	2,56
Pofalowanie powierzchni	x	Mn	x	S	2,44
VIF > 10 jest oznaką współliniowości zmiennych objaśniających					

W tablicy 41 zestawiono miary określające stopień zgodności modeli regresji z danymi empirycznymi. Wartości skorygowanego współczynnika determinacji  $R^2 < 0,70$  i współczynnika zmienności losowej  $W_e > 10\%$  świadczą o umiarkowanym dopasowaniu modeli, do danych empirycznych. Wartości skorygowanego współczynnika determinacji świadczą jednak o tym, że modele regresji wyjaśniają mniej niż 50% zmienności zmiennej objaśnianej y. Nie są to wartości dyskwalifikujące otrzymane modele regresji. W przypadku zrozumienia związków pomiędzy zmiennymi, mniejsze wartości współczynnika  $R^2$  są akceptowalne. Relatywna ocena tego współczynnika jest uzależniona od kontekstu badawczego i według wielu opracowań miara ta, nie może być uniwersalnym wyznacznikiem jakości modelu. Należy podkreślić, że podczas eliminacji predyktorów z analizowanych modeli w trakcie kolejnych etapów ich weryfikacji pod względem poziomu wartości p, otrzymywano każdorazowo wyższe wartości skorygowanego współczynnika determinacji ( $DR^2$ ). Dowodzi to, że na etapie doboru zmiennych do modelu regresji nie popełniono błędu. Do interpretacji i oceny otrzymanych modeli dodatkowo wyliczono i porównano wartości względnego średniego błędu standardowego parametrów funkcji regresji. Wyniki zestawiono w tablicy 42, gdzie podano również przedziały ufności dla poszczególnych parametrów strukturalnych. Względny średni błąd standardowy  $V(a_i)$  i przedziały ufności wyliczono z następujących zależności:

$$V(a_i) = \left| \frac{S a_i}{a_i} \right| * 100\% \quad (15)$$

gdzie:

$V(a_i)$  – względny średni błąd standardowy;

$S(a_i)$  – błąd standardowy poszczególnych parametrów strukturalnych równania regresji;

$a_i$  – wartość parametru strukturalnego z równania regresji.



$$P(a_i - t_{\alpha, n-(k+1)} * Sa_i) \leq a_i \leq (a_i + t_{\alpha, n-(k+1)} * Sa_i) \quad (16)$$

gdzie:

$a_i$  - wartość parametru strukturalnego z równania regresji;

$S(a_i)$  – błąd standardowy poszczególnych parametrów strukturalnych równania regresji;

$t_{\alpha, n-(k+1)}$  – wartość statystyki testu t -Studenta wyliczona na podstawie poziomu istotności  $\alpha=0,05$ , liczby obserwacji  $n$  i stopni swobody  $k$  ( $k$  jest równe liczbie zmiennych objaśniających w modelu regresji).

Wszystkie parametry strukturalne analizowanych modeli zostały oszacowane poprawnie. Względne średnie błędy szacunku parametrów są poniżej 50% ( $Sa_i < 50\%$ ), co nie przekreśla wartości poznawczej liczbowej otrzymanych modeli ekonometrycznych. Na podstawie wyników analizowanego parametru wszystkie otrzymane modele zostały ocenione pozytywnie. Wyliczone przedziały ufności obejmują z prawdopodobieństwem 0,95 nieznaną wartość parametrów strukturalnych otrzymanych modeli regresji.

Tablica 41. Miary określające stopień zgodności modelu z danymi empirycznymi

Miara dopasowania	Model ekonometryczny				
	Ac	Bc	H	K	Pof. pow.
Wariancja resztowa $S^2$	0,21	0,18	4,66	0,19	0,13
Odchylenie standardowe reszt $S_e$	0,46	0,42	2,16	0,43	0,35
Współczynnik zmienności losowej $W_e$	17,2%	16,1%	18,7%	16,5%	22,7%
Skorygowany wsp. determinacji $R^2$	0,44	0,44	0,63	0,37	0,33
Współczynnik zbieżności $f$	0,55	0,55	0,36	0,62	0,66
Współczynnik korelacji wielorakiej $R$	0,67	0,67	0,80	0,62	0,59

Tablica 42. Wartości względnego średniego błędu standardowego  $V(a_i)$  oraz 95% przedziały ufności dla parametrów strukturalnych otrzymanych modeli ekonometrycznych

Wartość $V(a_i)$ i przedział ufności dla parametrów strukturalnych	Współczynniki równania regresji wielorakiej				
	$a_0$ [mm]	$a_1$ [mm/%C]	$a_2$ [mm/%Mn]	$a_3$ [mm/%P]	$a_4$ [mm/%S]
Wygięcie Ac					
$V(a_i)$ [%]	16,2	15,0	11,2	x	x
Przedział ufności	(-5,30 ; -2,73)	(35,52 ; 65,6)	(16,94 ; 26,63)	x	x
Wygięcie Bc					
$V(a_i)$ [%]	16,7	13,9	11,8	x	x
Przedział ufności	(-4,89 ; -2,46)	(37,62 ; 66,29)	(15,08 ; 24,28)	x	x
Wygięcie poprzeczne H					
$V(a_i)$ [%]	11,6	11,2	13,4	21,8	38,4
Przedział ufności	(-40,77 ; -25,56)	(314,93 ; 493,28)	(97,87 ; 168,45)	(333,18 ; 840,41)	(-1516,24 ; -205,98)
Sierpowatość K					
$V(a_i)$ [%]	42,7	x	15,6	21,4	x
Przedział ufności		x			x
Pofalowanie powierzchni					
$V(a_i)$ [%]	x	x	13,0	x	14,4
Przedział ufności	x	x	(13,06 ; 22,12)	(13,06 ; 22,12)	(-265,43 ; -147,44)
(*) – patrz tabela nr 39					

Kolejny etap weryfikacji statystycznej otrzymanych modeli ekonometrycznych polegał na zbadaniu rozkładu odchyłań losowych (reszt). Analizę przeprowadzono w następującym zakresie [45]:

- liniowości modelu ekonometrycznego – trafność doboru postaci analitycznej modelu (test serii);
- normalności rozkładu reszt (test Jarque-Bera);
- autokorelacji składnika losowego (test Durбина-Watsona);
- własności homoskedastyczności (test Harrisona-McCabe'a).

#### Test serii

Biorąc pod uwagę otrzymane wartości podstawowych miar określających stopień zgodności modeli z danymi empirycznymi, wykonano test serii na sprawdzenie liniowości otrzymanych modeli. Testowano hipotezę:

$H_0$ : oszacowany model ekonometryczny jest liniowy;

$H_1$ : oszacowany model ekonometryczny nie jest liniowy.

Ciąg otrzymanych reszt z poszczególnych modeli podzielono na reszty dodatnie i ujemne. Przypisano im symbole A i B. Otrzymano w ten sposób ciąg jednakowych symboli (dla A i B). Statystykę  $Z_s$  wyliczono z zależności (17). Wszystkie otrzymane wartości statystyki  $Z_s$  zawierały się w utworzonym przedziale, co świadczyło o braku postaci liniowej analizowanych modeli. Wyniki testu serii zestawiono w tabelicy 43.

$$Z_s = \frac{S - E_s}{\sigma_s} \quad (17)$$

gdzie:

S - liczba serii;

$$E_s = \frac{2 * n1 * n2}{n1 + n2} + 1$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2 * n1 * n2 * (2 * n1 * n2 - n1 - n2)}{(n1 + n2)^2 * (n1 + n2 - 1)}}$$

Tablica 43. Wyniki testu serii na sprawdzenie liniowości otrzymanych modeli ekonometrycznych

Model ekonometryczny	Wartość statystyki empirycznej $Z_s$	Ocena modelu (funkcji regresji)
Ac	-5,69	N
Bc	-6,22	N
H	-7,80	N
K	-6,06	N
Pofalowanie powierzchni	-8,49	N
Wartość krytyczna $z_{\alpha/2}=1,96$ dla $(\alpha=0,05)$ . Jeżeli $(-\mu, -1,96) > Z_s < (1,96, +\mu)$ model ekonometryczny jest nieliniowy (N)		

Otrzymane wartości statystyki empirycznej  $Z_s$  wykazały zależność nieliniową w analizowanych modelach. Należy odrzucić hipotezę zerową  $H_0$ . Prawdopodobieństwo popełnienia błędu, polegającego na podjęciu błędnej decyzji weryfikacyjnej wynosi 5%.

#### Test Jarque'a-Bery

Do sprawdzenia normalności rozkładu reszt uzyskanych z analizowanych modeli regresji wykorzystano test Jarque'a-Bery, który bazuje na dwóch charakterystykach rozkładu (skośności i kurtozie). Testowano hipotezę:

$H_0$ : reszty charakteryzują się rozkładem normalnym;

$H_1$ : reszty charakteryzują się rozkładem innym niż normalny.

Statystyka Jarque'a-Bery wyrażona jest następującym wzorem:

$$JB = \frac{T}{6} * \left( A_S^2 + \frac{Kurt_S^2}{4} \right) \quad (18)$$

gdzie:

JB – statystyka Jarque'a-Bery;

$A_S$  – skośność;

$$A_S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^3}{\partial^3} \quad (19)$$

$\partial$  - odchylenie standardowe reszt modelu regresji;

$r_i$  – reszty modelu;

$\bar{r}$  – wartość średnia reszt modelu regresji.

$Kurt_S$  – kurtoza:

$$Kurt_S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^4}{\partial^4} - 3 \quad (20)$$

Statystyka JB ma rozkład Ch-kwadrat z dwoma stopniami swobody. Obliczono wartość krytyczną statystyki JB przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ ,  $JB_{kr}=5,991$ . W tablicy 44 zestawiono wyniki testu Jarque'a-Bery. Reszty otrzymane z dwóch modeli ekonometrycznych (Sierpowatość K i Pofalowanie powierzchni) charakteryzowały się rozkładem normalnym. W tych przypadkach nie odrzucono hipotezy zerowej  $H_0$ . Normalność rozkładu reszt nie jest warunkiem koniecznym do oszacowania modelu regresji, natomiast ułatwia weryfikację istotności otrzymanych parametrów modelu regresji.

Tablica 44. Wyniki testu Jarque'a-Bery na sprawdzenie normalności rozkładu składnika losowego

Model ekonometryczny	Wartość statystyki empirycznej JB	Ocena rozkładu odchyleń losowych modeli regresji
Ac	35,02	RINN
Bc	25,99	RINN
H	62,57	RINN
K	0,67	N
Pofalowanie powierzchni	2,53	N
Wartość krytyczna $JB_{kr}=5,991$ dla $(\alpha=0,05)$ . Jeżeli $JB < JB_{kr}$ rozkład normalny (N), jeżeli $JB > JB_{kr}$ rozkład inny niż normalny (RINN)		

### Test Durbina-Watsona

W celu sprawdzenia, czy reszty z otrzymanych modeli regresji są ze sobą skorelowane, tzn. czy na bieżące reszty wpływają reszty wcześniejsze, zastosowano test Durbina-Watsona. Test ten polega na sprawdzeniu autokorelacji składnika resztowego I-go rzędu. Błędy przewidywania w prawidłowo dopasowanych modelach powinny charakteryzować się niezależnością i losowym rozkładem. Weryfikowano hipotezy:

$H_0$  :  $r = 0$ : brak autokorelacji składnika losowego;

$H_1$  :  $r > 0$ : występuje istotna dodatnia autokorelacja I-go rzędu;

$H_1$  :  $r < 0$ : występuje istotna ujemna autokorelacja I-go rzędu.

W pierwszej kolejności wyliczono wartość nieobciążonego estymatora współczynnika  $r$  na podstawie otrzymanych składników resztowych wg wzoru:

$$\rho = \frac{\sum_{t=2}^n e_t * e_{t-1}}{\sqrt{\sum_{t=2}^n e_t^2} * \sqrt{\sum_{t=2}^n e_{t-1}^2}} \in (-1, 1) \quad (21)$$

Jeżeli  $|r| < 0,3$  to przyjmuje się, że autokorelacja jest nieistotna.

W następnym kroku obliczono statystykę testu  $f$  wg zależności (22) oraz wartości krytyczne testu Durbina-Watsona dla  $\alpha=0,05$ , liczby próby  $n$  i szacowanych parametrów modelu  $k$ . Wyniki zestawiono w tablicy 45.

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_t^2} \quad (22)$$

gdzie:

$f$  – statystyka Durbina-Watsona;

$e_t$  – reszty z modelu regresji.

Tablica 45. Wyniki testu Durбина-Watsona na sprawdzenie autokorelacji składnika resztowego

Model ekonometryczny	Wartość statystyki testu $f$	Wartość nieobciążonego estymatora $r$	Wartości krytyczne testu Durбина-Watsona przy poziomie istotności $\alpha=0,05$		Wynik testu
			Dolna granica $d_L$	Górna granica $d_U$	
Ac	0,79	0,66	1,6812	1,7441	A
Bc	0,90	0,54	1,6785	1,7424	A
H	0,55	0,72	1,6682	1,7617	A
K	0,52	0,74	1,6851	1,7466	A
Pofalowanie pow.	0,64	0,68	1,6864	1,7474	A
Jeżeli $f < d_L$ występuje autokorelacja składnika resztowego (A), jeżeli $f > d_U$ brak autokorelacji składnika resztowego (BA)					

Wyniki testu Durбина-Watsona wykazały, że we wszystkich analizowanych modelach regresji zachodzi dodatnia autokorelacja składnika losowego pierwszego stopnia, istotna statystycznie przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Odrzucono hipotezę  $H_0$  na korzyść  $H_1$ . Należy zauważyć, że przyczynami wystąpienia zjawiska autokorelacji w otrzymanych modelach regresji mogą być: nieuwzględnienie istotnej zmiennej objaśniającej, przyjęcie niewłaściwego zestawu zmiennych objaśniających lub wybór niewłaściwej postaci analitycznej modelu.

W dalszej części pracy posłużono się zaawansowanym oprogramowaniem do analiz statystycznych Minitab, które pozwala na głębszą analizę wyszczególnionych czynników, w tym wykrywanie związków nieliniowych między zmiennymi i ich wzajemne interakcje. Na tym etapie wykonano podstawową ocenę modeli liniowych zgodnie z założeniem KMNK (klasyczna metoda najmniejszych kwadratów). Zgodnie z danymi literaturowymi [139] wystąpienie zjawiska autokorelacji, przy estymacji modeli liniowych pogarsza jakość otrzymanych modeli ekonometrycznych.

#### Test Harrisona-McCabe'a

Jednym z podstawowych założeń KMNK jest jednorodność wariancji czyli homoskedastyczność otrzymanego ciągu składników resztowych modelu regresji. W przypadku wystąpienia homoskedastyczności, reszty zachowują się losowo i są jednakowo rozproszone wokół zerowej wartości oczekiwanej. Jeżeli wariancja reszt zmienia się wraz ze zmianą zmiennej niezależnej  $x$ , wówczas występuje zjawisko heteroskedastyczności. Do sprawdzenia wystąpienia tego zjawiska wykorzystano test Harrisona-McCabe'a.

Testowano hipotezy:

$$H_0: D^2(\epsilon_1) = D^2(\epsilon_2) = \dots = D^2(\epsilon_n) = \text{const} \text{ (stałość wariancji – homoskedastyczność);}$$

$$H_1: \exists_{\substack{t,s \\ t \neq s}} D^2(\epsilon_t) \neq D^2(\epsilon_s) \neq \text{const} \text{ (heteroskedastyczność).}$$

Na podstawie otrzymanych składników resztowych  $\epsilon_t$  modeli regresji, wyliczono wartość statystyki  $b$ , wartość  $m$  oraz wartości statystyk  $F_1$  i  $F_2$ . Statystyki  $F_1$  i  $F_2$  wyznaczono z rozkładu Fishera-Snedecora dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha=0,05$  wg zależności (23-24).

$$b = \frac{\sum_{t=1}^m e_t^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (23)$$

$$m = \left\lceil \frac{1}{2} * n \right\rceil \quad (24)$$

gdzie:

b – wartość statystyki Harrisona-McCabe’a;

m – wartość „m” (liczba obserwacji wyliczona z zależności (X));

n – liczba obserwacji;

$F_1(n-m; m-(k+1))$ ;

$F_2(n-m-(k+1); m)$ ;

gdzie:

k – liczba zmiennych objaśniających w modelu regresji.

Następnie obliczono wartości krytyczne statystyki b (granice obszaru krytycznego  $b_L$ -wartość dolna,  $b_U$ -wartość górna) wg zależności:

$$b_L = \left[ 1 + \frac{(n-m) * F_1}{m - (k+1)} \right]^{-1} \quad (25)$$

$$b_U = \left[ 1 + \frac{(n-m-(k+1)) * F_2}{m} \right]^{-1} \quad (26)$$

Wyniki testu Harrisona-McCabe’a zestawiono w tablicy 46.

Tablica 46. Wyniki testu Harrisona-McCabe’a na sprawdzenie jednorodności wariancji składnika resztowego

Model ekonometryczny	Wartość statystyki testu b	Wartości statystyki Harrisona-McCabe’a przy poziomie istotności $\alpha=0,05$		Wynik testu
		Dolna granica $b_L$	Górna granica $b_U$	
Ac	0,88	0,3890	0,4125	A
Bc	0,83	0,3804	0,4042	A
H	0,76	0,3822	0,4054	A
K	0,83	0,3874	0,41	A
Pofalowanie pow.	0,70	0,3835	0,4062	A
Jeżeli $b \geq b_U$ – zachodzi homoskedastyczność (A); Jeżeli $b \leq b_L$ – zachodzi heteroskedastyczność (B)				

Otrzymane wyniki testu wykazały, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  zakładającej homoskedastyczność składnika resztowego. Prawdopodobieństwo popełnienia błędu, polegającego na podjęciu błędnej decyzji wynosi 5%. Wszystkie analizowane modele regresji pod tym względem oceniono pozytywnie. W odniesieniu do otrzymanych wyników testu serii, sprawdzającego liniowość otrzymanych modeli regresji, dokonano głębszej analizy w zakresie poznania analitycznej postaci szacowanych wstępnie modeli KMNK. Przed przeprowadzeniem predykcji z wykorzystaniem oprogramowania Minitab (Regression analysis - Fit model and optimize response) wyliczono stosunki korelacyjne Pearsona pomiędzy zmienną objaśnianą a objaśniającą oraz pomiędzy predyktorami reprezentującymi skład chemiczny.

Stosunki korelacyjne w odróżnieniu od współczynnika korelacji liniowej Pearsona pozwalają określić, czy związek pomiędzy analizowanymi zmiennymi jest liniowy, czy też nieliniowy. Służą również do określenia siły współzależności między zmiennymi x i y. W odróżnieniu od współczynnika korelacji liniowej Pearsona nie wskazują kierunku zależności i nie zależą od rodzaju regresji [82]. Wyniki przedmiotowej analizy zestawiono w tablicach 47-48. Stosunki korelacyjne i wskaźniki krzywoliniowości wyliczono wg poniższych zależności:

$$e_{yx} = \bar{r} \sqrt{\frac{S^2(\bar{y}_i)}{S^2(y)}} \quad (27)$$

gdzie:

$e_{xy}$  – stosunek korelacyjny.  $0 \leq e \leq 1$ ;

$S^2(\bar{y}_i)$  – wariancje średnich warunkowych zmiennych x i y;

$S^2(y)$  – wariancje ogólne zmiennych x i y.

$$M_{xy} = e_{xy}^2 - r_{xy}^2 \quad (28)$$

gdzie:

$M_{xy}$  – wskaźnik krzywoliniowości.  $M \in (0,1)$ ;

$e_{xy}^2$  - stosunek korelacyjny;

$r_{xy}$  – współczynnik korelacji liniowej Pearsona.

Do oceny siły zależności zastosowano następujące przedziały [140]:

0-0,2 – zależność bardzo słaba;

0,2-0,4 – zależność słaba;

0,4-0,6 – zależność umiarkowana;

0,6-0,8 – zależność silna;

0,8-1,0 – zależność bardzo silna.

Tablica 47. Wartości stosunków korelacyjnych Pearsona, wskaźników krzywoliniowości wraz z oceną istotności statystycznej dla kombinacji zmiennych objaśniających reprezentujących skład chemiczny stali

Stosunek korelacyjny Pearsona	Wartość stosunku korelacyjnego $e_{yx}$	Wartość wskaźnika krzywoliniowości $M_{xy}$	Wartość statystyki empirycznej $F^*$	Ocena istotności statystycznej stosunku korelacyjnego
X1, X2	0,80	0,61	26,74	T
X1, X3	0,56	0,16	9,84	T
X1, X4	0,54	0,16	8,85	T
X2, X3	0,83	0,63	31,11	T
X2, X4	0,88	0,44	42,79	T
X3, X4	0,93	0,29	60,92	T

Wartość krytyczna testu F (Fishera-Snedecora)  $F_{kryt.}=2,28$ . ( $\alpha=0,05$ ). Jeżeli  $F^* > F_{kryt.}$  (T) - stosunek korelacyjny jest istotny

Tablica 48. Wartości stosunków korelacyjnych Pearsona, wskaźników krzywoliniowości wraz z oceną istotności statystycznej dla kombinacji zmiennych objaśniających i objaśnianych

Stosunek korelacyjny Pearsona	Wartość stosunku korelacyjnego $e_{yx}$	Wartość wskaźnika krzywoliniowości $M_{xy}$	Wartość statystyki empirycznej $F^*$	Ocena istotności statystycznej stosunku korelacyjnego
X1, Wygięcie Ac	0,58	0,23	10,68	T
X2, Wygięcie Ac	0,58	0,24	10,56	T
X3, Wygięcie Ac	0,49	0,10	7,00	T
X4, Wygięcie Ac	0,61	0,08	12,05	T
X1, Wygięcie Bc	0,63	0,25	13,02	T
X2, Wygięcie Bc	0,55	0,07	9,19	T
X3, Wygięcie Bc	0,46	0,05	6,08	T
X4, Wygięcie Bc	0,57	0,04	9,92	T
X1, Skręcenie poprzeczne H	0,57	0,10	9,95	T
X2, Skręcenie poprzeczne H	0,53	0,14	8,61	T
X3, Skręcenie poprzeczne H	0,58	0,07	10,73	T
X4, Skręcenie poprzeczne H	0,55	0,05	9,13	T
X1, Sierpowatość K	0,49	0,22	6,94	T
X2, Sierpowatość K	0,50	0,03	7,53	T
X3, Sierpowatość K	0,59	0,16	10,97	T
X4, Sierpowatość K	0,59	0,08	11,24	T
X1, Pofalowanie powierzchni	0,53	0,19	8,56	T
X2, Pofalowanie powierzchni	0,65	0,34	14,18	T
X3, Pofalowanie powierzchni	0,42	0,08	5,05	T
X4, Pofalowanie powierzchni	0,44	0,14	5,56	T
Wartość krytyczna testu F Fishera-Snedecora $F_{kryt.}=2,28$ ( $\alpha=0,05$ ). Jeżeli $F^* > F_{kryt.}$ (T) - stosunek korelacyjny jest istotny				

Analiza kombinacji zmiennych zestawionych w tablicy 47 wykazała, że występuje silna zależność pomiędzy cechami reprezentującymi skład chemiczny. Największe wartości stosunku korelacyjnego otrzymano dla par zmiennych: (X3=P; X4=S), (X2=Mn; X3=P), (X2=Mn; X3=P). W przypadku analizy zależności pomiędzy zmienną objaśnianą a objaśniającą (tablica 48) zależność silną wykazały następujące kombinacje: (X2=Mn; Pofalowanie powierzchni), (X1=C; Wygięcie Bc) oraz (X4=S; Wygięcie Ac). Obliczone wartości wskaźnika krzywoliniowości wskazały, że związki pomiędzy poszczególnymi zmiennymi mogą wykazywać charakter nieliniowy. Zgodnie z danymi literaturowymi [82] wartość wskaźnika krzywoliniowości  $M_{xy} > 0,2$  świadczy o występowaniu zależności krzywoliniowej pomiędzy badanymi zmiennymi.

W analizowanej populacji wykazano zależność nieliniową pomiędzy zmiennymi zależnymi (skład chemiczny) i niezależnymi (tolerancje wykonania elektrod zbiorczych) - 5 analizowanych kombinacji zmiennych o wartościach zbliżonych do wartości granicznej podanej powyżej. Zależności nieliniowe wykazały również otrzymane wartości wskaźnika  $M_{xy}$  dla 4 kombinacji stosunków korelacyjnych reprezentujących zmienne objaśniające x (tablica 47).



Z uwagi na wątpliwości co do poprawności oszacowanych wstępnie modeli ekonometrycznych założono, że należy traktować je jako modele szacunkowe na tym etapie obliczeń. W związku z tym stwierdzeniem w dalszym etapie analizy statystycznej posłużono się zaawansowanym oprogramowaniem do analiz statystycznych Minitab. Skorzystano z funkcji optymalizacji modelu regresji wielorakiej. Podobnie jak w przypadku modeli szacowanych uprzednio, jako zmienne objaśniające przyjęto wszystkie 4 predyktory reprezentujące skład chemiczny. Ustalono, że dla analizowanych zmiennych objaśnianych, reprezentujących tolerancje wykonania elektrod zbiorczych, program będzie optymalizował kształt funkcji dla średniej wartości odpowiedzi y. Otrzymane modele regresji zestawiono w tablicy 49. Dodatkowo wyszczególnione zostały optymalne nastawy zmiennych objaśniających, przy których możliwe jest uzyskanie podanych wartości skorygowanego współczynnika determinacji  $R^2$  i średniej wartości odpowiedzi zmiennej objaśnianej y (z prawdopodobieństwem 95%).

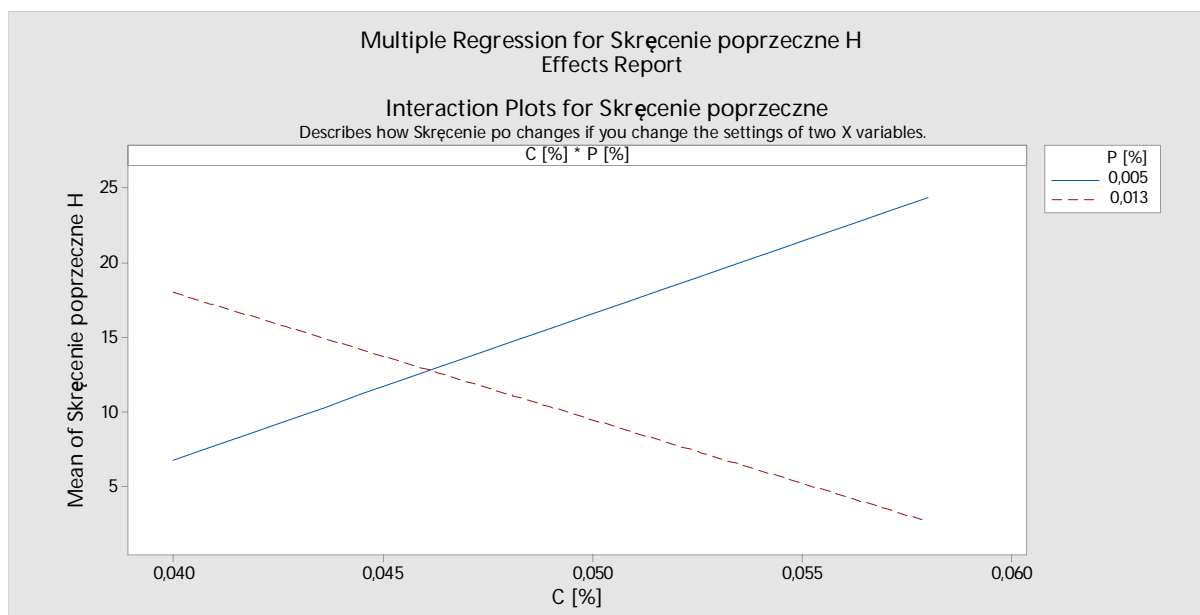
Do oceny i porównania otrzymanych modeli wykorzystano skorygowany współczynnik determinacji uwzględniający liczbę danych w próbie oraz liczbę predyktorów w modelach. Program optymalizował modele regresji poprzez dodawanie lub odejmowanie kolejnych zmiennych x i sprawdzał poziom istotności statystycznej p związku pomiędzy zmienną y i zestawem zmiennych x. Przy poziomie istotności  $p < 0,001$  otrzymane zależności uznano za istotne statystyczne. Należy nadmienić, że program na etapie optymalizacji funkcji regresji używał standaryzowanych wartości zmiennych objaśniających, co miało na celu zmniejszenie ryzyka dodania do modelu regresji zmiennych, które nie poprawiały jakości szacowanych modeli. Finalne wartości zmiennych x i y analizowanych modeli ekonometrycznych zostały wyszczególnione w postaci niestandardyzowanej.

Tablica 49. Modele regresji reprezentujące wpływ składu chemicznego taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 na tolerancje wykonania elektrod zbiorczych, otrzymane z wykorzystaniem opcji Regression analysis - Fit model and optimize response

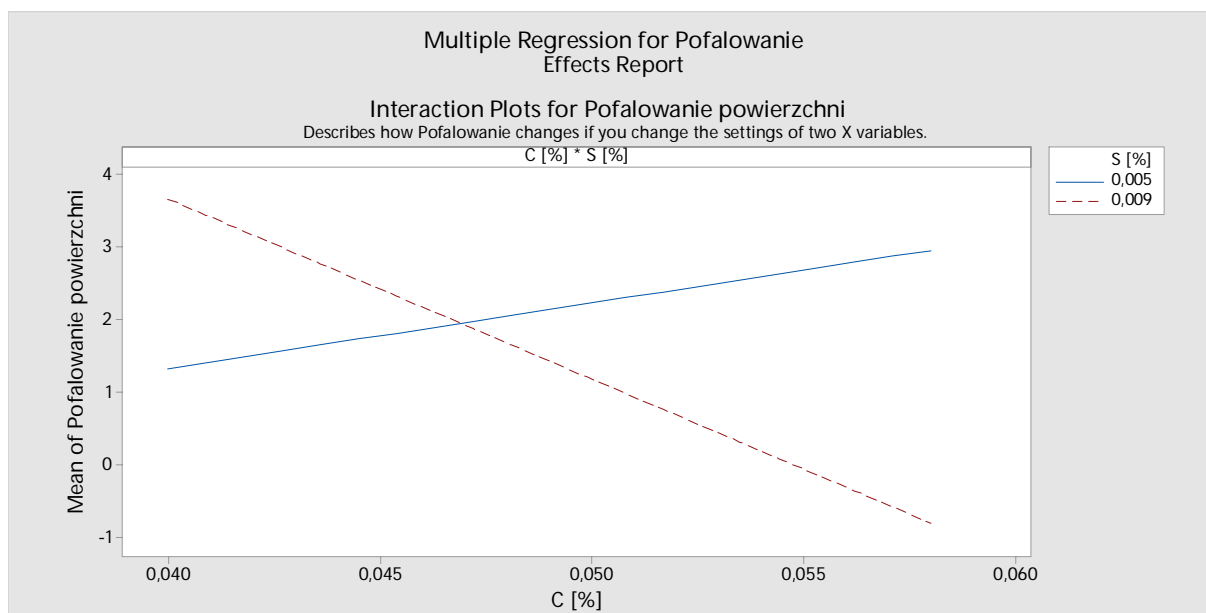
Tolerancje wykonania elektrody zbiorczej [mm]	Model równania regresji				Skorygowany wsp. determinacji $R^2$ [%]
	X1=[%C]	X2=[%Mn]	X3=[%P]	X4=[%S]	
Wygięcie Ac	<i>Wygięcie Ac</i> = $-4,017 + 50,56 X1 + 21,78 X2$				45,28
	0,055	0,18	x	x	
Wygięcie Bc	<i>Wygięcie Bc</i> = $-3,673 + 51,95 X1 + 19,68 X2$				45,06
	0,053	0,18	x	x	
Skręcenie poprzeczne H	Skręcenie pop. H = $-98,5 + 2124 X1 + 10565 X3 + 2041 X4 - 229005 X1 * X3$				66,19
	0,05	x	0,008	0,005	
Sierpowatość K	<i>Sierpowatość K</i> = $-1,103 + 15,46 X2 + 73,5 X3$				38,6
	x	0,22	0,005	x	
Pofalowanie powierzchni	<i>Pof. pow.</i> = $-17,75 + 513,8 X1 + 2598 X4 + 98082 X4^2 + 84670 X1 * X4$				41,71
	0,048	x	x	0,009	

## Wnioski:

W porównaniu z modelami szacowanymi KMNK (klasyczna metoda najmniejszych kwadratów) otrzymano zbliżone wartości skorygowanego współczynnika determinacji. Tylko w przypadku pofalowania powierzchni odnotowano wzrost tej miary statystycznej o 8,7%. Dla skrzywienia poprzecznego H i pofalowania powierzchni oszacowane modele wykazały postać inną niż liniowa. Ponadto wystąpił efekt dwuczynnikowej interakcji pomiędzy poszczególnymi zmiennymi objaśniającymi - rys. 51-52. W obu przypadkach interakcje okazały się istotne statystycznie (krzywe przecinają się). Na przedstawionych wykresach zobrazowano wpływ zmienności węgla na zmienną zależną y w zależności od zakresu zmienności pozostałych zmiennych w analizowanych modelach. Przy zawartości węgla ~0,046% występuje zmiana wpływu pierwiastków tworzących efekt interakcji. Przy minimalnym nastawie (zawartości) fosforu wzrost węgla powoduje jednoczesny wzrost średniej wartości skrzywienia profilu elektrody osadkowej, natomiast przy maksymalnym nastawie tego pierwiastka stopowego wzrost węgla redukuje średnią wartość omawianej tolerancji wykonania. Wykres interakcji węgla i siarki otrzymany przy predykcji pofalowania powierzchni profilu – rys. 52 należy interpretować analogicznie. W obydwu analizowanych przypadkach przy maksymalnej zawartości węgla  $C=0,058\%$  rozstęp wartości tolerancji wykonania jest większy, niż dla wartości minimalnej  $C$  [%]. Otrzymanych zależności nieliniowych nie potwierdziły uprzednio wyliczone stosunki korelacyjne zestawione w tablicy 47-48, ale może wynikać to ze wspomnianej uprzednio procedury standaryzacji zmiennych objaśniających, której celem jest m.in. usunięcie nadmiernego ich skorelowania.

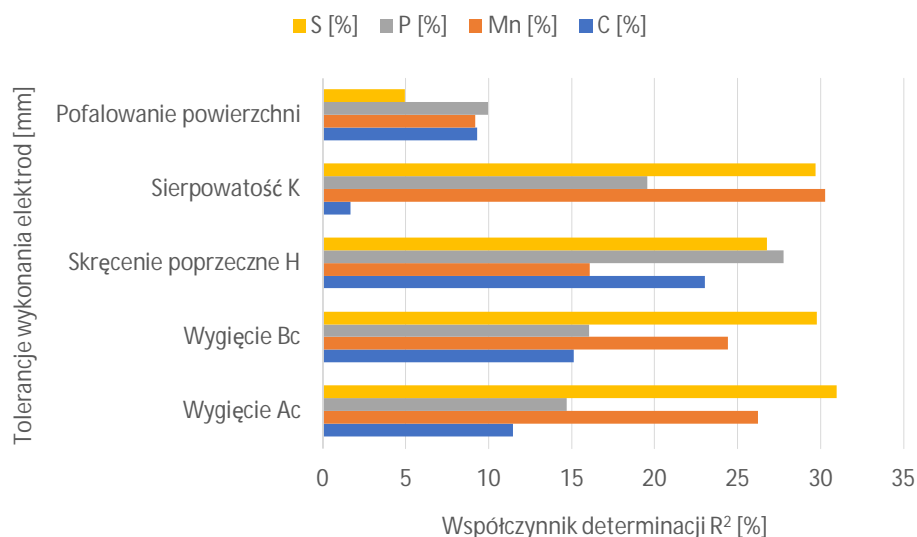


Rys. 51. Wykres interakcji węgla i fosforu - predykcja modelu szacującego skrzywienie poprzeczne elektrody zbiorczej



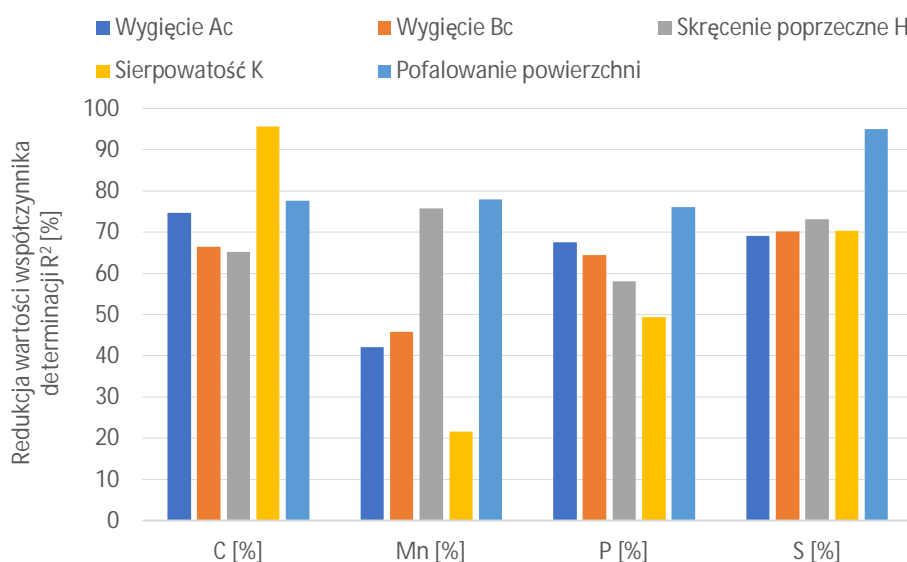
Rys. 52. Wykres interakcji węgla i siarki - predykcja modelu szacującego pofalowanie płyty elektrody zbiorczej

W dalszym etapie sprawdzono, jak poszczególne pierwiastki stopowe wpływały na 5 analizowanych tolerancji wykonania. Do celów porównawczych posłużono się współczynnikiem determinacji  $R^2$ , będącym kwadratem współczynnika korelacji Pearsona, który wyliczono na wstępnym etapie przedmiotowej analizy zależności – tablica 27. Wyniki zobrazowano na rys. 53. Największą wartość współczynnika determinacji  $\sim 30\%$  wykazała zależność siarki i wygięcia elektrody Ac (zmiennosc zmiennej y została wyjaśniona przez siarkę w 30%). W większości analizowanych przypadków można zauważyć, że wpływ tego pierwiastka w przedmiotowej analizie porównawczej jest dominujący. Predykcja pofalowania powierzchni każdym pierwiastkiem stopowym z osobna okazała się najsłabsza (współczynnik  $R^2 \sim 10\%$ ). Największą wartość współczynnika zmienności  $V(x)$  w tej analizie wykazał węgiel  $V(x) = 57,8\%$ .



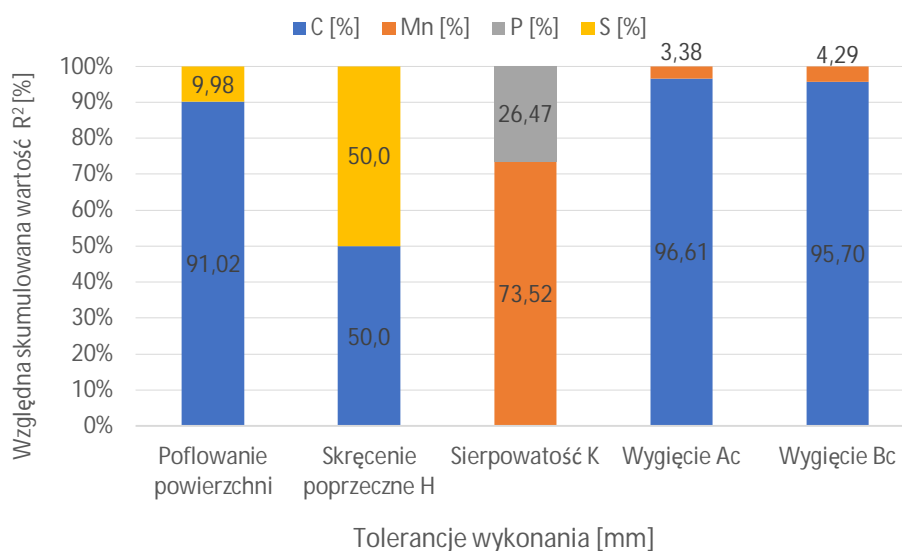
Rys. 53. Wartości współczynnika determinacji  $R^2$  jako miara oceny wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych z osobna na poszczególne tolerancje wykonania elektrod zbiorczych

Na rys. 54 przedstawiono redukcję współczynnika  $R^2$ , przy szacowaniu modeli regresji jedną zmienną objaśniającą, przyjmując jako odniesienie jego wartość otrzymaną przy predykcji modeli regresji czterema regresorami. Największą wartość  $R^2$ , w tym porównaniu ( $>90\%$ ) wykazały: węgiel – model C/Sierpowatość K i siarka – model S/Pofalowanie powierzchni. Wyniki analizy dowodzą, że predykcja sierpowatości płyty elektrody jednym pierwiastkiem stopowym (manganem) powoduje najmniejszy spadek wartości współczynnika determinacji  $\sim 22\%$ . Najmniejszą zmienność w przedmiotowym zestawieniu wykazała siarka  $V(x) = 2\%$ . Dla pozostałych pierwiastków stopowych wartość  $V(x)$  zawiera się w przedziale 11,37%, przy czym największą zmienność zidentyfikowano w przypadku manganu co obrazuje poniższy wykres.



Rys. 54. Porównanie wartości współczynnika determinacji  $R^2$  [%] w kontekście sprawdzenia redukcji tej miary statystycznej przy szacowaniu modeli regresji jedną zmienną objaśniającą

Na rys. 55 przedstawiono względne skumulowane wartości współczynnika  $R^2$  dla poszczególnych wielowymiarowych modeli aproksymujących funkcję regresji. Na wykresie zobrazowano, jaki jest udział procentowy poszczególnych pierwiastków stopowych w wyjaśnieniu zmienności zmiennej objaśnianej  $y$ . Pierwiastkiem dominującym w tym porównaniu jest węgiel, którego udział w trzech modelach przekracza wartość 90%. W przypadku sierpowatości, wyłącznie mangan i fosfor wpływają na wzrost współczynnika determinacji. Względne skumulowane wartości tych zmiennych są największe spośród analizowanych modeli. Interesujący jest udział procentowy pierwiastków stopowych w modelu regresji szacującego średnią wartość skręcenia poprzecznego panelu elektrody zbiorczej. Jest to jedyny model regresji, w którym stosunek dwóch pierwiastków stopowych tj. węgla i siarki wynosi 50/50.



Rys. 55. Porównanie względnych skumulowanych wartości współczynnika determinacji  $R^2$  [%] dla modeli regresji wielorakiej, w których zmienne objaśniające reprezentują skład chemiczny wsadu technologicznego

### 10.3 Wpływ właściwości mechanicznych wsadu technologicznego na tolerancje wykonania elektrod zbiorczych

Przedmiotowa analiza miała na celu poznanie wpływu regresorów reprezentujących właściwości mechaniczne taśmy stalowej zimnowalcowanej na tolerancje geometryczne gotowego produktu. Modelowanie numeryczne, które omówiono w kolejnym rozdziale pracy wymagało określenia nastawów m.in. granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia taśmy, co dodatkowo skłaniało do znalezienia zależności w tym zakresie. Szczególną uwagę zwrócono na te tolerancje wykonania, których wartości analizowano na etapie przeprowadzonych w dalszej części pracy symulacji numerycznych w odniesieniu do różnych grubości taśmy stalowej. Analogicznie, jak w pierwszej części analizy statystycznej (rozdział 10.2), obejmującej swoim zakresem badanie związków pomiędzy składem chemicznym wsadu technologicznego a tolerancjami wykonania płyt elektrod osadycznych, wyliczono współczynniki korelacji w obrębie zmiennych zależnych i niezależnych.

Do oceny współzależności pomiędzy zmiennymi  $x$  i  $y$  ze zbioru danych empirycznych posłużono się współczynnikiem korelacji rangowej  $\rho$  Spearmana, którego zastosowanie jest uzasadnione w przypadku możliwości wystąpienia związków monotonicznych (np. nieliniowych) pomiędzy zmiennymi. Jest on odporny na występowanie tzw. obserwacji odstających (redukuje wpływ tych obserwacji). Korelacja rang Spearmana pozwala korelować ze sobą zmienne nie posiadające rozkładu normalnego. Zasadność zastosowania omawianej miary statystycznej potwierdziły kolejne etapy analizy statystycznej. Współczynniki korelacji rang Spearmana i ich istotność statystyczną obliczono wg zależności (29 i 31). Wyniki zestawiono w tablicach 50-52.

$$r_s = 1 - \frac{6 * \sum_{i=1}^n d_i^2}{n * (n^2 - 1)} \quad (29)$$

gdzie:

$n_i$  - liczebność próby;

$d_i$  - różnica rang obliczona z wzoru:

$$d_i = R_y - R_x \quad (30)$$

w którym:

$R_y$  - kolejna ranga badanej cechy y dla i-tej badanej jednostki;

$R_x$  - kolejna ranga cechy x dla i-tej badanej jednostki.

Współczynnik korelacji rang Spearmana przyjmuje wartości z przedziału (-1; 1). Oceny siły współzależności zmiennych dokonano wg identycznej skali jaką, zastosowano dla współczynnika korelacji Pearsona:

|0,0-0,2| – współzależność bardzo słaba ( $|r_s| < 0,2$  – brak związku liniowego);

|0,2-0,4| – współzależność słaba;

|0,4-0,6| – współzależność umiarkowana;

|0,6-0,8| – współzależność silna;

|0,8-1,0| – współzależność bardzo silna.

Istotność statystyczną współczynnika korelacji rangowej (Spearmana) określono na podstawie wyliczonej statystyki H:

$$H = |r_s| * \sqrt{n - 1} \quad (31)$$

gdzie:

H – statystyka empiryczna;

$r_s$  – wartość wsp. korelacji rangowej Spearmana;

n – liczebność próby.

Wartość obliczonej statystyki H porównuje się z wartością krytyczną  $H_{kr(a)}$  obliczonej z rozkładu t-Studenta dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha=0,05$  i liczby stopni swobody  $f = n - 2$ . Jeżeli  $|H| > H_{kr(a)}$  współczynnik korelacji uważa się za istotny statystycznie.

Dla usystematyzowania oznaczenia danych w analizie przyjęto następujące oznaczenia:  $X1=R_{p0,2}$  [MPa],  $X2=R_m$  [MPa],  $X3=A_{80}$  [%],  $X4=Twardość$  [HV10]. Analogicznie, jak w rozdziale 10.2 w celu jednoczesnego porównywania wartości współczynnika korelacji zastosowano skalę kolorów: gradient biało-czerwony dotyczy par korelacyjnych w obrębie zbioru zmiennych reprezentujących właściwości mechaniczne wsadu technologicznego, natomiast gradient żółto-zielony odnosi się do par korelacyjnych (wielkość geometryczna – właściwości mechaniczne). Wyniki analizy zestawiono w tablicy 50.

Tablica 50. Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana dla zmiennych zależnych oraz predyktorów reprezentujących właściwości mechaniczne taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01

	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	Twardość [HV10]
$R_{p0,2}$ [MPa]	1			
$R_m$ [MPa]	0,729	1		
$A_{80}$ [%]	0,338	-0,159	1	
Twardość [HV10]	0,17	0,65	-0,686	1
Wygięcie Ac [mm]	0,085	0,339	-0,194	0,381
Wygięcie Bc [mm]	0,102	0,449	-0,252	0,384
Skręcenie poprzeczne H [mm]	0,181	0,566	-0,473	0,579
Sierpowatość K [mm]	0,006	0,333	-0,323	0,383
Pofalowanie pow. [mm]	-0,006	-0,115	0,216	-0,27
$X1=R_{p0,2}$ [MPa]; $X2=R_m$ [MPa], $X3=A_{80}$ [%]; $X4=Twardość$ [HV10]				

W grupie zmiennych objaśniających x reprezentujących właściwości mechaniczne wsadu technologicznego otrzymane wartości współczynnika rang Spearmana wykazały silne współzależności dodatnie pomiędzy następującymi parami zmiennych: ( $X1=R_e$ ;  $X2=R_m$ ) i ( $X2=R_m$ ;  $X4=Twardość$ ) oraz silną negatywną (ujemną) korelację dla pary ( $X3=Wydluzenie$ ;  $X4=Twardość$ ). Posiłkując się współczynnikiem determinacji obliczonym jako:

$$R^2 = r_s^2 * 100\% \quad (32)$$

można określić, że zmienność ww. cech jest spowodowana odpowiednio w: 53,1%; 42,3% i 47,1% zmianami drugiej cechy. Analizując pary korelacyjne (x; y) – tablica 50 można zauważyć, że współzależność granicy plastyczności z rozpatrywanymi tolerancjami wykonania elektrod jest najslabsza spośród rozpatrywanych właściwości mechanicznych. Największą wartość współczynnika korelacji rangowej  $r_s$ , świadczącej o zależności umiarkowanej między zmiennymi otrzymano dla par zmiennych: ( $X2=R_m$ ;  $Y=Skręcenie$  poprzeczne H) oraz ( $X4=Twardość$ ;  $Y=Skręcenie$  poprzeczne H). Zmienność wymienionych cech (x, y) jest spowodowana odpowiednio w 32% i 33,5% zmianami drugiej cechy.

Najwięcej współzależności ujemnych wykazały związki wydłużenia ( $A_{80}$ ) z tolerancjami geometrycznymi (4 przypadki). Największe zróżnicowanie w zakresie współzależności zmienna zależna – zmienna niezależna wykazała granica plastyczności, dla której współczynnik zmienności  $V(x)=86\%$ . Najmniejszym rozproszeniem wyników charakteryzuje się twardość taśmy  $V(x)=25\%$ . W tablicach 51-52 zestawiono wyniki testu istotności współczynnika korelacji rang Spearmana wraz z podaniem przedziałów ufności dla rozpatrywanych par korelacyjnych. Dla czterech przypadków otrzymana wartość statystyki empirycznej H, wskazała na brak istotności statystycznej współczynnika  $r_s$  (pary korelacyjne z granicą plastyczności) – tablica 51. Warto zwrócić uwagę, że wartość współczynnika korelacji Spearmana dla wspomnianych par zmiennych wskazuje na zależności monotoniczne nieliniowe ( $|r_s|<0,2$ ). Zostanie to potwierdzenie w dalszej części analizy statystycznej podczas optymalizacji modeli regresji za pomocą oprogramowania Minitab.

Tablica 51. Przedział ufności dla współczynnika korelacji rang Spearmana, wartość statystyki empirycznej z wraz z oceną istotności

Para korelacyjna	Przedział ufności dla wsp. korelacji rho Spearmana przy poziomie istotności $\alpha=0,05$	Wartość statystyki empirycznej H	Ocena istotności statystycznej wsp. korelacji rang Spearmana. Istotny jeżeli $ H >H_{kr}$ ( $H_{kr(\alpha)}=1,96$ )
X1, Wygięcie Ac	-0,0831 £ Ac, X1 £ 0,2531	0,98	Nie
X2, Wygięcie Ac	0,1891 £ Ac, X2 £ 0,4889	3,91	Tak
X3, Wygięcie Ac	-0,3569 £ Ac, X3 £ -0,0311	2,24	Tak
X4, Wygięcie Ac	0,2363 £ Ac, X4 £ 0,5257	4,39	Tak
X1, Wygięcie Bc	-0,0656 £ Bc, X1 £ 0,2696	1,18	Nie
X2, Wygięcie Bc	0,3138 £ Bc, X2 £ 0,5842	5,18	Tak
X3, Wygięcie Bc	-0,4106 £ Bc, X3 £ -0,0934	2,91	Tak
X4, Wygięcie Bc	0,2396 £ Bc, X4 £ 0,5284	4,43	Tak
X1, Skręcenie poprzeczne H	0,0172 £ H, X1 £ 0,3448	2,09	Tak
X2, Skręcenie poprzeczne H	0,4509 £ H, X2 £ 0,6811	6,53	Tak
X3, Skręcenie poprzeczne H	-0,6044 £ H, X3 £ -0,3416	5,45	Tak
X4, Skręcenie poprzeczne H	0,4664 £ H, X4 £ 0,6916	6,68	Tak
X1, Sierpowatość K	-0,1633 £ K, X1 £ 0,1753	0,07	Nie
X2, Sierpowatość K	0,1825 £ K, X2 £ 0,4835	3,84	Tak
X3, Sierpowatość K	-0,4747 £ K, X3 £ -0,1713	3,73	Tak
X4, Sierpowatość K	0,2385 £ K, X4 £ 0,5275	4,42	Tak
X1, Pofalowanie powierzchni	-0,1753 £ PP, X1 £ 0,1633	0,07	Nie
X2, Pofalowanie powierzchni	-0,2821 £ PP, X2 £ 0,0521	1,33	Tak
X3, Pofalowanie powierzchni	0,0546 £ PP, X3 £ 0,3774	2,49	Tak
X4, Pofalowanie powierzchni	-0,4270 £ PP, X4 £ -0,1130	3,11	Tak
X1= $R_{p0,2}$ [MPa]; X2= $R_m$ [MPa], X3= $A_{80}$ [%]; X4=Twardość [HV10]			

Tablica 52. Przedział ufności dla współczynnika korelacji rang Spearmana, wartość statystyki empirycznej z wraz z oceną istotności

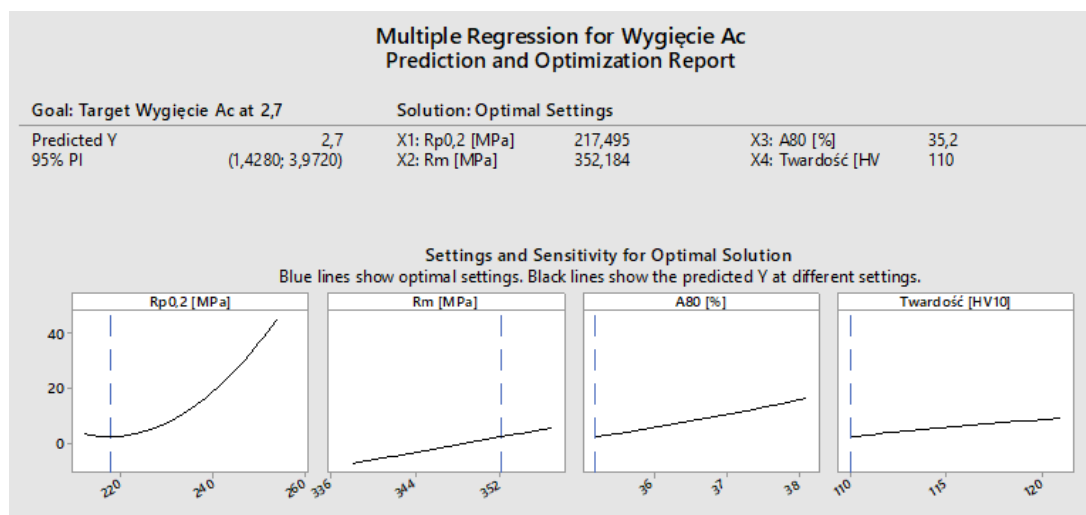
Para korelacyjna	Przedział ufności dla wsp. korelacji rang Spearmana przy poziomie istotności $\alpha=0,05$	Wartość statystyki empirycznej H	Ocena istotności statystycznej wsp. korelacji rang Spearmana. Istotny jeżeli $ H >H_{kr}$ ( $H_{kr(\alpha)}=1,96$ )
X1, X2	0,6497 £ X1, X2 £ 0,8083	8,41	Tak
X1, X3	0,1880 £ X1, X3 £ 0,4880	3,90	Tak
X1, X4	0,0056 £ X1, X4 £ 0,3344	1,96	Tak
X2, X3	-0,3240 £ X2, X3 £ 0,0060	1,83	Nie
X2, X4	0,5522 £ X2, X4 £ 0,7478	7,50	Tak
X3, X4	-0,7756 £ X3, X4 £ -0,5964	7,91	Tak
X1= $R_{p0,2}$ [MPa]; X2= $R_m$ [MPa], X3= $A_{80}$ [%]; X4=Twardość [HV10]			



Wstępną selekcję zmiennych do modeli przeprowadzono za pomocą metody nazywanej Bartosiewicz (metody analizy współczynników korelacji) [45]. W celu wyjaśnienia kształtowania się zmiennej y zaproponowano wstępnie wszystkie cztery zmienne objaśniające. Analogicznie, jak w przypadku składu chemicznego program optymalizował kształt funkcji regresji dla średniej wartości odpowiedzi y, reprezentującej tolerancje geometryczne elektrod zbiorczych z prawdopodobieństwem 95%. Na rys. 56 przedstawiono przykładowe okno dialogowe obrazujące optymalne nastawy parametrów strukturalnych wyliczonej funkcji regresji. Zestaw regresorów został sprawdzony pod kątem wystąpienia zjawiska współliniowości. Otrzymane wartości ViF<10 wykluczyły wystąpienie tego zjawiska. Modele regresji zestawiono w tablicy 53, gdzie wyszczególniono dodatkowo optymalne nastawy współczynników równania regresji przy predykcji poszczególnych wielkości geometrycznych.

Tablica 53. Modele regresji reprezentujące wpływ właściwości mechanicznych taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 na tolerancje wykonania elektrod zbiorczych, otrzymane przy wykorzystaniu opcji Regression analysis - Fit model and optimize response

Tolerancje wykonania elektrody zbiorczej [mm]	Model równania regresji				Skorygowany wsp. determinacji R <sup>2</sup> [%]
	X1=R <sub>p0,2</sub> [MPa]	X2=R <sub>m</sub> [MPa]	X3=A <sub>80</sub> [%]	X4=Twardość [HV10]	
Wygięcie Ac	<i>Wygięcie Ac</i> = -9189 + 34,28 X1 + 12,764 X2 + 91,42 X3 + 25,03 X4 + 0,03203 X1 <sup>2</sup> + 0,333 X3 <sup>2</sup> - 0,01438 X4 <sup>2</sup> - 0,05554 X1*X2 - 0,5106 X1*X3 - 0,09703 X1*X4				83,69
	217,49	352,18	35,2	110	
Wygięcie Bc	<i>Wygięcie Bc</i> = -8667 + 27,46 X1 + 16,52 X2 + 93,52 X3 + 17,36 X4 + 0,02361 X1 <sup>2</sup> - 0,01744 X2 <sup>2</sup> - 0,03018 X4 <sup>2</sup> - 0,03534 X1*X2 - 0,4121 X1*X3 - 0,09610 X1*X4 + 0,03217 X2*X4				86,19
	219,49	338	37,44	110	
Skęcenie poprzeczne H	<i>Skęcenie poprzeczne H</i> = -45647 + 152,4 X1 + 78,7 X2 + 342,7 X3 + 149,6 X4 + 0,1329 X1 <sup>2</sup> - 0,0498 X2 <sup>2</sup> + 3,115 X3 <sup>2</sup> - 0,1864 X4 <sup>2</sup> - 0,1940 X1*X2 - 2,518 X1*X3 - 0,4729 X1*X4				80,0
	242,15	339,75	36,1	121	
Sierpowatość K	<i>Sierpowatość K</i> = -56069 - 1,374 X1 + 10,03 X2 + 710,4 X3 + 728,7 X4 - 0,13364 X2 <sup>2</sup> - 1,348 X4 <sup>2</sup> + 0,11311 X1*X2 - 1,0124 X1*X3 + 1,953 X2*X3 - 0,1450 X2*X4 - 10,10 X3*X4				83,73
	216,42	338	37,4	110	
Pofalowanie powierzchni	<i>Pofalowanie powierzchni</i> = -2417 - 0,807 X1 + 13,300 X2 + 12,35 X3 - 0,0494 X4 - 0,02201 X2 <sup>2</sup> + 0,008151 X1*X2 - 0,05431 X1*X3				69,2
	253,85	338	35,43	120,76	



Rys. 56. Optymalne nastawy parametrów strukturalnych modelu regresji wielorakiej szacującego średnią wartość wygięcia Ac panelu elektrody zbiorczej

W tablicy 54 zestawione zostały modele aproksymowane klasyczną metodą najmniejszych kwadratów stanowiące odniesienie do analizy porównawczej dla optymalizowanych modeli funkcji regresji.

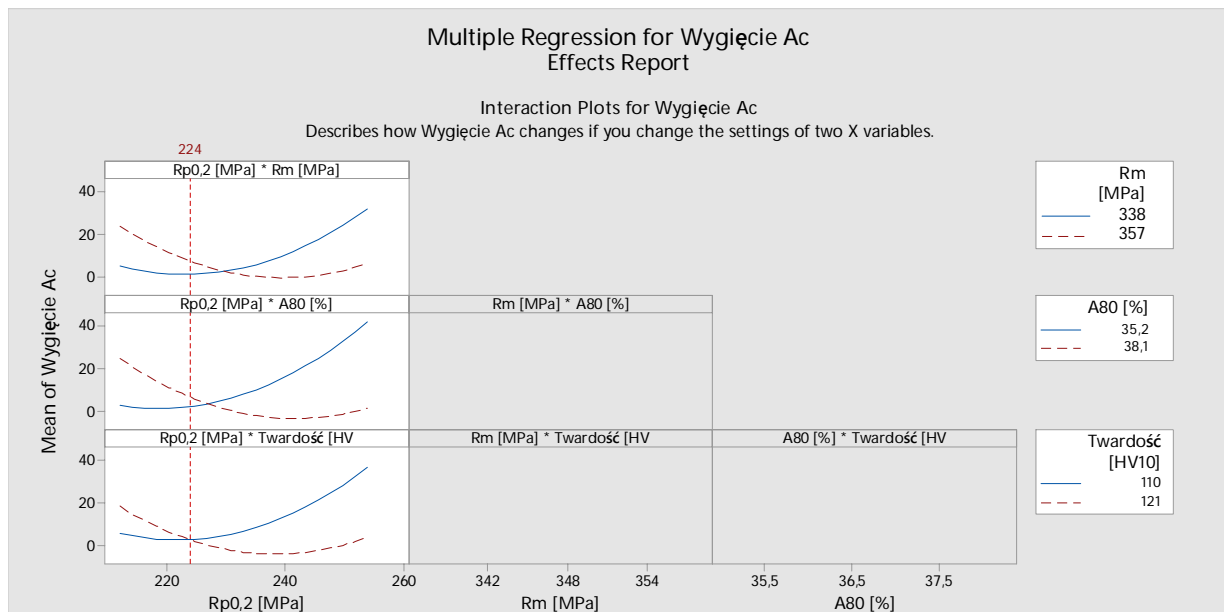
Tablica 54. Współczynniki równania regresji wielorakiej wraz z wartościami poziomu istotności p otrzymane przy predykcji tolerancji geometrycznych elektrod na podstawie właściwości mechanicznych (klasyczna metoda najmniejszych kwadratów)

Wielkości geometryczne [mm]	Współczynniki równania regresji wielorakiej					Skorygowany wsp. determinacji R <sup>2</sup> [%]	Wartość p dla testu F
	a <sub>0</sub> [mm]	a <sub>1</sub> [mm/R <sub>p0,2</sub> MPa]	a <sub>2</sub> [mm/R <sub>m</sub> MPa]	a <sub>3</sub> [mm/% A <sub>80</sub> ]	a <sub>4</sub> [mm/HV10]		
Ac	-18,85	-0,02	0,07	x	x	32,23	4,48E-12
Wartość p	1,59E-12	4,31E-04	3,20E-11	x	x		
Bc	-19,96	-0,02	0,08	x	x	39,29	5,78E-15
Wartość p	2,77E-13	2,61E-06	1,35E-14	x	x		
Skęcenie porzeczne H	-77,6	-0,1	0,43	-1,1	x	46,34	1,02E-17
Wartość p	1,54E-03	5,85E-03	2,47E-09	8,20E-04	x		
Sierpowatość K	-7,05	x	0,05	-0,11	x	26,19	7,47E-09
Wartość p	9,11E-02	x	6,80E-05	2,37E-02	x		
Pofalowanie powierzchni	7,4	x	x	x	-0,05	10,07	1,61E-04
Wartość p	2,39E-05	x	x	x	1,61E-04		

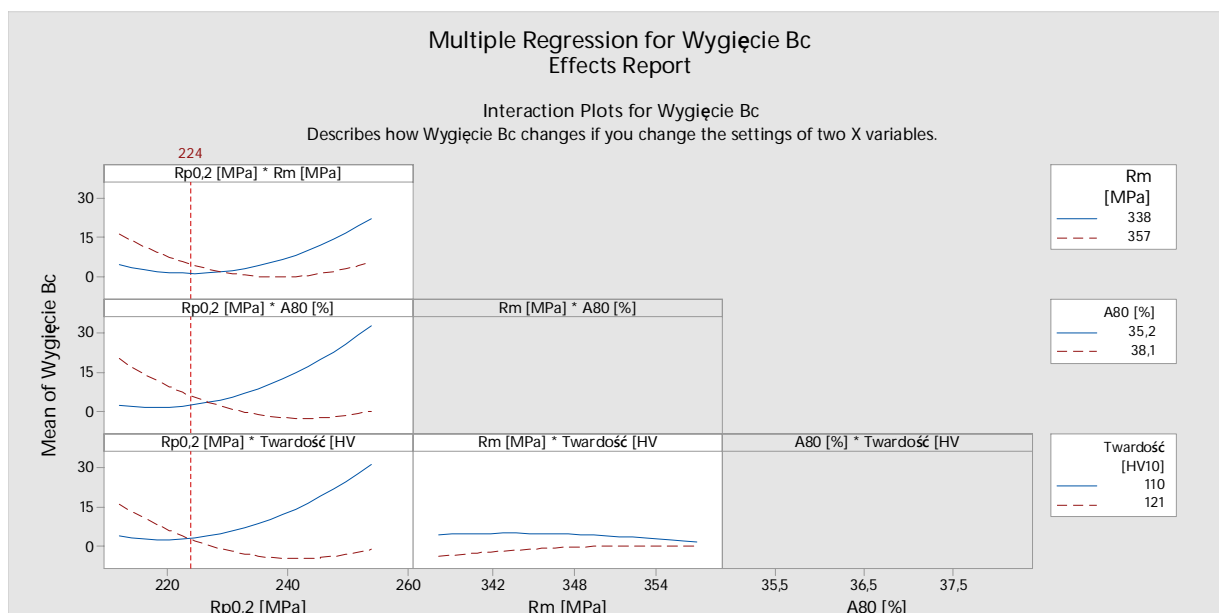
#### Wnioski:

Dla wszystkich analizowanych modeli uzyskano wysoką wartość skorygowanego współczynnika determinacji  $R^2 > 70\%$ , co zgodnie z danymi literaturowymi świadczy o dobrym dopasowaniu funkcji regresji do danych empirycznych i dużej zdolności predykcji. Zmienność zmiennej zależnej y została wyjaśniona przez zestaw zmiennych objaśniających w zakresie 69, 86%. Tak jak wspomniano na początku rozdziału dotyczącego analizy statystycznej, graniczna wartość współczynnika determinacji  $R^2 > 70\%$  nie może stanowić odniesienia, szczególnie przy analizie danych procesowych przekrojowych (różne wytopy taśmy stalowej dla jednego zlecenia produkcyjnego).

Małe rozbieżności pomiędzy wartościami współczynnika determinacji i skorygowanego współczynnika determinacji sugerują, że zmienne przyjęte do modeli są dobrane optymalnie. Należy też nadmienić, że modele regresji szacowano, mając świadomość niskiego współczynnika zmienności zmiennych objaśniających  $x$ , reprezentujących właściwości mechaniczne wsadu technologicznego. Budując modele regresyjne dla danych empirycznych z procesu produkcyjnego kierowano się chęcią osiągnięcia celów poznawczych, tj. zbudowania modeli rzeczywistych i powiązania finalnych wyników, zależności z wynikami otrzymanymi na etapie modelowania numerycznego wielotaktowego gięcia rolkowego elektrod osadczych elektrofiltru. Zostało to przedstawione w dalszej części pracy. Każdy z pięciu otrzymanych modeli regresji wielorakiej wykazał postać inną niż liniowa, w porównaniu z aproksymacją klasyczną metodą najmniejszych kwadratów. Zaobserwowano znaczny wzrost skorygowanego współczynnika determinacji (największy dla pofalowania powierzchni - 6-krotny). W otrzymanych modelach regresji wystąpiły efekty interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi (jednoczesny wpływ kilku czynników łącznie na zmienną zależną) – rys. 57-61. Wszystkie interakcje należy uznać za istotne statystyczne (krzywe na wykresach przecinają się). Na przedstawionych wykresach - rys. 57-58 zobrazowano wpływ zmienności granicy plastyczności na zmienną zależną  $y$  w zależności od zakresu zmienności pozostałych predyktorów w analizowanych modelach. Przy zakresie  $R_e \sim 224, 226$  [MPa] (interakcja granicy plastyczności i twardości) występuje zmiana wpływu właściwości mechanicznych tworzących efekt interakcji. Dla pozostałych przypadków ( $R_{p0,2} * A_{80}$  i  $R_{p0,2} * R_m$ ) punkt przecięcia krzywych na wykresach jest przesunięty w prawo o wartość 4, 6 [MPa] w stosunku do pokazanej na poniższych wykresach czerwonej linii. Relacje pomiędzy zmiennymi mają charakter monotoniczny (nie rosną i nie maleją w jednym tempie). Najbardziej widoczne jest to w przypadku estymacji modeli regresji  $A_c$ ,  $B_c$  i skręcenia poprzecznego profilu elektrody.

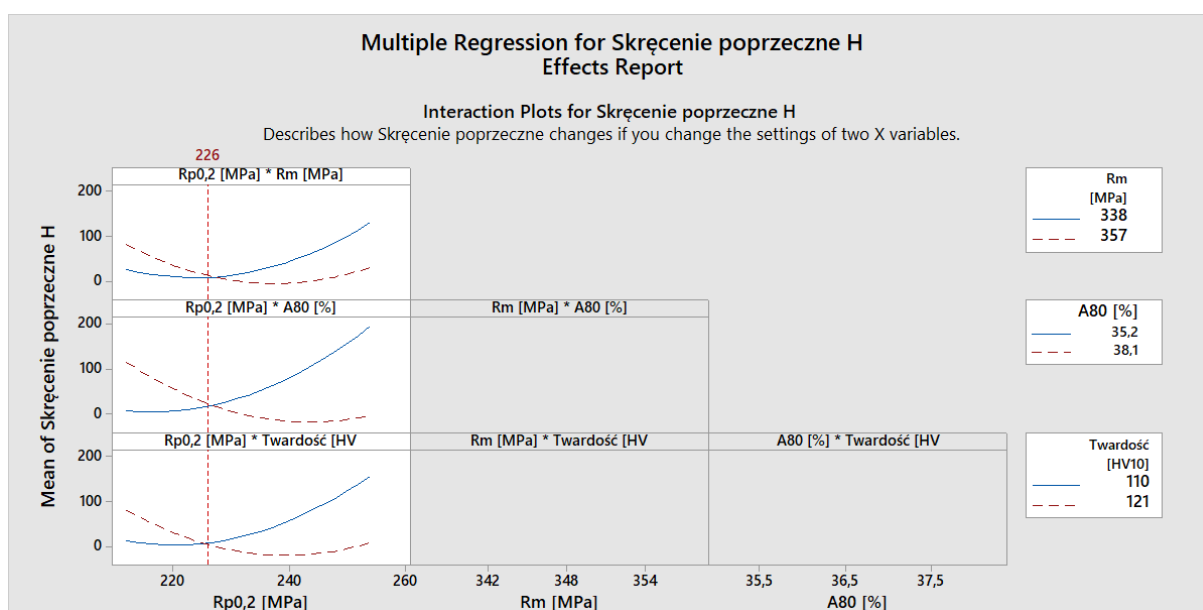


Rys. 57. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego wygięcie  $A_c$

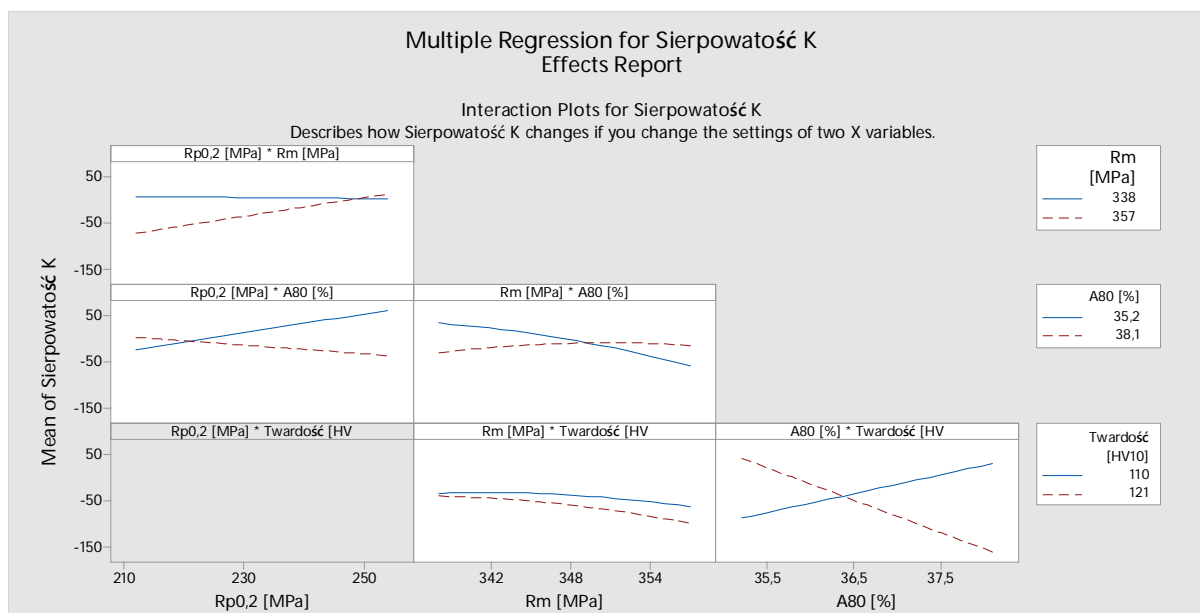


Rys. 58. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego wygięcie Bc

Dla wyszczególnionych modeli regresji najsilniejszą zależność nieliniową wykazała granica plastyczności. Przy minimalnym nastawie (wartości)  $R_m$ ,  $A_{80}$  i twardości wzrost granicy plastyczności powoduje jednoczesny wzrost średniej wartości wygięcia profilu elektrody i jej skręcenia, natomiast przy maksymalnym nastawie tej zmiennej wzrost granicy plastyczności redukuje średnią wartość omawianych tolerancji wykonania. Dla maksymalnej wartości granicy plastyczności, rozstęp wartości tolerancji wykonania jest większy niż dla wartości minimalnej. Dodatkowo w modelu szacującym wygięcie Bc występuje słaba interakcja  $R_m$  i twardości (krzywe na wykresie dążą do przecięcia).



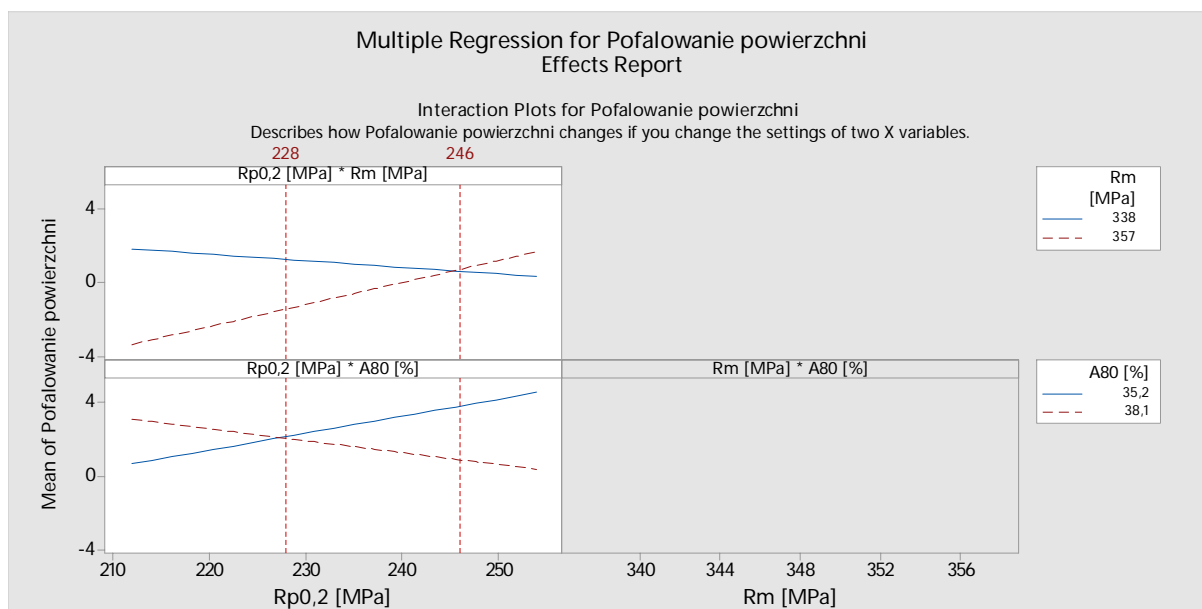
Rys. 59. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego skręcenie poprzeczne H



Rys. 60. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego sierpowatość K

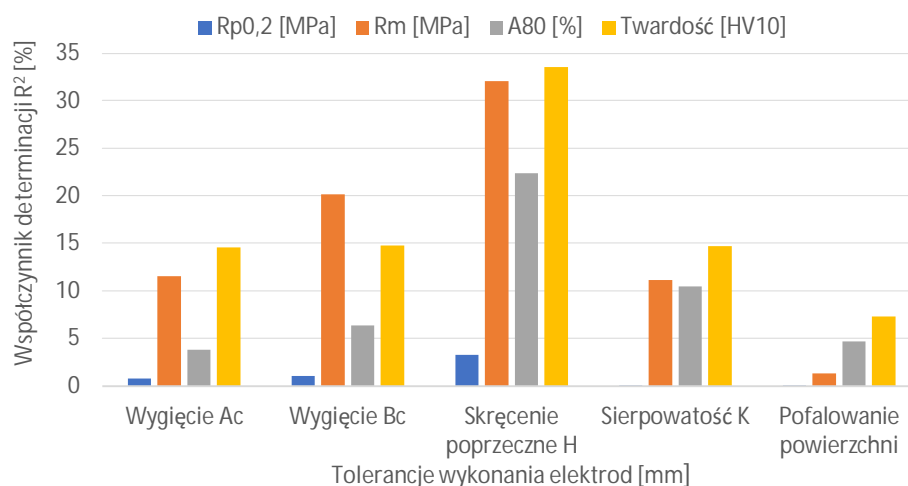
W przypadku wielowymiarowego modelu szacującego sierpowatość elektrody zbiorczej – rys. 60, otrzymano największą liczbę interakcji w obrębie zmiennych objaśniających. W dwóch przypadkach ( $R_e * R_m$ ) i ( $R_m * \text{Twardość}$ ) zaobserwowane pomiędzy zmiennymi związki są widoczne i choć nie są zbyt silne, to jednak okazały się istotne statystycznie (krzywe na wykresach dążą do przecięcia). Najbardziej wyraźny jest wpływ efektu interakcji wydłużenia i twardości oraz wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia na średnią wartości zmiennej objaśnianej. W analizowanym modelu regresji największą zależność nieliniową wykazała twardość wsadu technologicznego.

Zależności występujące pomiędzy właściwościami mechanicznymi dla modelu regresji szacującego pofalowanie powierzchni elektrody przedstawiono na rys. 61. Można zauważyć, że interakcje ( $R_e * R_m$ ) i ( $R_e * A_{80}$ ) występujące w tym modelu charakteryzują się liniową zależnością. Dla minimalnej wartości  $R_m$  wzrost wartości granicy plastyczności powoduje redukcję pofalowania powierzchni elektrody zbiorczej, natomiast dla wartości maksymalnej  $R_m$ , wraz ze wzrostem  $R_e$  analizowana tolerancja geometryczna wzrasta. Przy wartości  $R_e \sim 228$  [MPa] następuje zmiana wpływu właściwości mechanicznych tworzących interakcję na średnią wartość pofalowania profilu elektrody. Odwrotną sytuację można zaobserwować dla interakcji ( $R_e * A_{80}$ ), dla której zmiana wpływu pary zmiennych jest widoczna od wartości  $R_e \sim 246$  [MPa]. Najsilniejszą zależność nieliniową w analizowanym modelu regresji wykazała wytrzymałość na rozciąganie.



Rys. 61. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego pofalowanie powierzchni

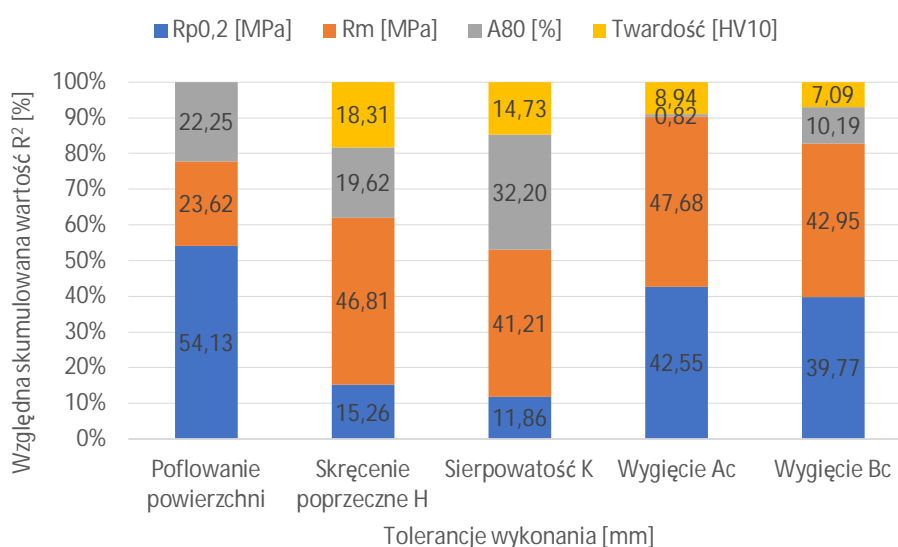
Dalsza analiza polegała na sprawdzeniu, jak poszczególne właściwości mechaniczne materiału do produkcji wpływały na 5 analizowanych tolerancji wykonania (proste modele regresji). Analogicznie, jak w przypadku składu chemicznego do celów porównawczych posłużono się współczynnikiem determinacji  $R^2$ , będącym kwadratem współczynnika korelacji rangowej Spearmana. Miarę monotonicznej zależności między zmiennymi wyliczono na wstępnym etapie przedmiotowej analizy zależności – tablica 50. Otrzymane wyniki zobrazowano na rys. 62.



Rys. 62. Wartości współczynnika determinacji  $R^2$  jako miara oceny wpływu poszczególnych właściwości mechanicznych, z osobna na poszczególne tolerancje wykonania elektrod zbiorczych

Szczegółowa analiza otrzymanych danych pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków. Największą wartość współczynnika determinacji  $R^2 \sim 33,5\%$  wykazała zależność twardości i skręcenia poprzecznego elektrody (zmiennosc zmiennej y została wyjaśniona przez twardość w 32,5%).

Dla tej samej tolerancji wykonania wpływ wytrzymałości na rozciąganie jest mniejszy od wartości maksymalnej  $R^2 \sim 1,5$  punktu procentowego. Na podstawie wartości  $R^2$  jako miary dopasowania modelu do danych empirycznych stwierdzono, że predykcja skrzywienia elektrody każdym regresorem z osobna pozwoliła otrzymać największe wartości współczynnika determinacji, w obrębie analizowanych tolerancji geometrycznych. Otrzymane wyniki analizy dowodzą, że wpływ  $R_m$  i twardości jest dominujący w odniesieniu do wszystkich analizowanych tolerancji wykonania. Modele regresji z jedną zmienną objaśniającą, reprezentującą właściwości mechaniczne wsadu technologicznego najslabiej prognozowały pofalowanie powierzchni i wygięcie Ac. Rozpatrując każdy predyktor z osobna, należy zwrócić uwagę na bardzo słaby związek funkcyjny granicy plastyczności z poszczególnymi wielkościami geometrycznymi gotowego produktu ( $R^2 = \max 3,3\%$ ). Dla granicy plastyczności uzyskano największą wartość współczynnika zmienności  $V(x)=119\%$  spośród rozpatrywanych właściwości mechanicznych. W ostatnim etapie dla wielowymiarowych modeli regresji otrzymanych z wykorzystaniem oprogramowania Minitab analizowano, na ile znaczące są poszczególne (predyktory) właściwości mechaniczne materiału produkcyjnego w przewidywaniu zmiennej  $y$  – rys. 63.



Rys. 63. Porównanie względnych skumulowanych wartości współczynnika determinacji  $R^2$  [%] dla modeli regresji wielorakiej, w których zmienne objaśniające reprezentują właściwości mechaniczne wsadu technologicznego

Założeniem tej analizy było pokazanie proporcjonalnego wkładu każdej zmiennej objaśniającej do całej wartości  $R^2$  [%]. Na rys. 63 przedstawiono względne skumulowane wartości współczynnika  $R^2$  dla poszczególnych wielowymiarowych modeli aproksymujących funkcję regresji. Na wykresie porównano użyteczność poszczególnych zmiennych objaśniających w analizowanych modelach. Czynnikiem (zmiennymi) stymulującym wzrost współczynnika  $R^2$  są w większości przypadków granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie. W czterech modelach względna skumulowana wartość współczynnika determinacji przekracza 40% (współczynnik zmienności  $V(x)=24\%$  dla wszystkich modeli). Uzyskane wyniki sugerują, że zmienną najmniej kształtującą odpowiedź  $y$  jest twardość taśmy stalowej.

## Dyskusja i opis wyników.

W celu udzielenia odpowiedzi na postawione pytanie badawcze przeprowadzono szereg analiz statystycznych, przy użyciu arkusza kalkulacyjnego excel oraz pakietu Minitab w wersji 17. Za pomocą wymienionych narzędzi informatycznych wyliczono podstawowe statystyki opisowe, testowano założenia normalności rozkładu danych empirycznych z wykorzystaniem testu Shapiro - Wilka i Kołmogorowa - Smirnowa. Określono szereg zależności korelacyjnych ze współczynnikiem  $r$  Pearsona i  $\rho$  Spearmana oraz zależności funkcyjnych z uwzględnieniem optymalnych nastawów analizowanych zmiennych. Proces szacowania postaci funkcji regresji poprzedzono oceną stopnia krzywoliniowości pomiędzy analizowanymi zmiennymi wyliczając stosunki korelacyjne eta ( $\eta$ ). Modele regresji wielorakiej wyliczono za pomocą krokowej metody wprowadzania zmiennych objaśniających do modelu. Za poziom istotności w wykonanych analizach przyjęto  $\alpha=0,05$ . Wyniki dla których wartość  $p<0,05$  uznawano jako istotne statystycznie. Jako główną miarę oceny otrzymanych modeli regresji przyjęto dopasowany współczynnik determinacji  $R^2$ .

Przeprowadzone analizy statystyczne obejmujące swym zakresem wsad technologiczny wniosły dużą wartość poznawczą oddziaływania poszczególnych składowych na dopuszczalne tolerancje wykonania finalnego produktu. Jako wartość poznawczą należy rozumieć stopień zmienności badanej zbiorowości statystycznej oraz znalezienie finalnych zależności statystycznych, które mogą posłużyć do znalezienia warunków optymalizacji analizowanego procesu technologicznego. Przyjęta metodyka badań umożliwiła uzyskanie zestawu informacji, który może stanowić formę przewodnika dla inżynierów produkcji, jak również właścicieli przedsiębiorstw specjalizujących się w produkcji części wykonywanych za pomocą procesu profilowania. Badania przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste dane z procesu technologicznego. Dane empiryczne zastosowane do analizy miały charakter przekrojowy, co tym bardziej skłaniało do poznania współzależności i zależności funkcyjnych w obrębie zmiennych objaśniających reprezentujących skład chemiczny i właściwości mechaniczne taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 oraz badanych wielkości geometrycznych paneli elektrod osadczych. Przedstawione analizy prowadzą do następujących wniosków:

1. Największe zróżnicowanie wsadu technologicznego otrzymano dla udziału fosforu, siarki i granicy plastyczności. Analizując zebrane dane można stwierdzić, że średnie zawartości poszczególnych pierwiastków stopowych są znacząco mniejsze od wartości maksymalnych podanych w normie przedmiotowej (~50, 100%).
2. Najsilniejsze zależności korelacyjne w obrębie zmiennych objaśniających opisujących wsad technologiczny, zidentyfikowano pomiędzy siarką i fosforem oraz granicą plastyczności (umowną), a wytrzymałością na rozciąganie. Analiza korelacji wykazała ponadto, że współzależność udziału węgla oraz granicy plastyczności z poszczególnymi tolerancjami wykonania jest najsłabsza.
3. Możliwe jest oszacowanie „przybliżonych” wartości analizowanych wielkości geometrycznych paneli elektrod zbiorczych na podstawie tylko jednej zmiennej (właściwości mechanicznej). Z przytoczonych wyników badań wynika, że są to: twardość oraz wytrzymałość na rozciąganie.



4. Otrzymane modele regresji wielorakiej potwierdzają, że poszczególne związki funkcyjne przyjmują postać nieliniową. W tych przypadkach określone zostały występujące efekty interakcji pomiędzy zmiennymi. Interesujące jest wzajemne oddziaływanie udziału węgla z domieszkami wprowadzonymi do stali tj. fosforem i siarką oraz granicy plastyczności z wytrzymałością na rozciąganie, wydłużeniem i twardością stali (najsilniejsze zależności nieliniowe). Zmiana wpływu jednej zmiennej na drugą występuje przy zawartości C  $\sim$ 0,046% i  $R_e \sim$ (246, 252) MPa.
5. Predykcja tolerancji wykonania paneli elektrod zbiorczych na podstawie wszystkich czterech właściwości mechanicznych opisujących wsad technologiczny pozwala dokładniej wyznaczyć postać analityczną funkcji opisującej analizowany proces technologiczny, aniżeli prognozowanie tylko na podstawie wyłącznie jednego predyktora. Proces wnioskowania na podstawie kompozycji składników stopowych stali okazuje się mniej obiecujący.
6. Na podstawie merytorycznej oceny otrzymanych modeli regresji można wnioskować, że jeżeli średnia wartość poszczególnych parametrów taśmy stalowej DC01 wzrośnie o jedną jednostkę to średni przyrost lub spadek wartości rozpatrywanych tolerancji wykonania elektrod zbiorczych wyniesie odpowiednio:  $R_e$  (-3,72%),  $R_m$  (18,9%),  $A_{80}$  (372%), twardość (26,3%), C (0,25%), Mn (7,6%), P (-24,9%), S (499%), przy założeniu stałości pozostałych zmiennych.
7. Materiał badawczy może stanowić bazę porównawczą dla innych gatunków taśmy stalowej stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych np. taśm stalowych gorącowałcowanych, trudnordzewiejących takich jak Corten A i nierdzewnych. Uzyskana wiedza może zostać wykorzystana na etapie zakupu materiału i przygotowania specyfikacji materiałowych szczególnie w przypadku dużych zleceń produkcyjnych i wysokich reżimów jakościowych.

## 11. Modelowanie numeryczne profilowania elektrody zbiorczej

### 11.1 Opis stosowanego oprogramowania

Do modelowania procesu wielotaktowego gięcia rolkowego wykorzystano oprogramowanie COPRA RF i COPRA FEA RF w wersji 2017. Dystrybutorem oprogramowania jest firma dataM z Niemiec. Na potrzeby pracy doktorskiej spółka nieodpłatnie udostępniła pakiet narzędzi wspomagający projektowanie procesu profilowania kształtowników na zimno. COPRA RF umożliwia projektowanie kształtowników otwartych o różnym stopniu skomplikowania. Użytkownik ma możliwość przygotowania i modyfikacji projektu kształtownika, zdefiniowania płaszczyzny rozwinięcia, zaprojektowania sekwencji gięcia dla poszczególnych stacji profilujących i opracowania projektu rolek profilujących.

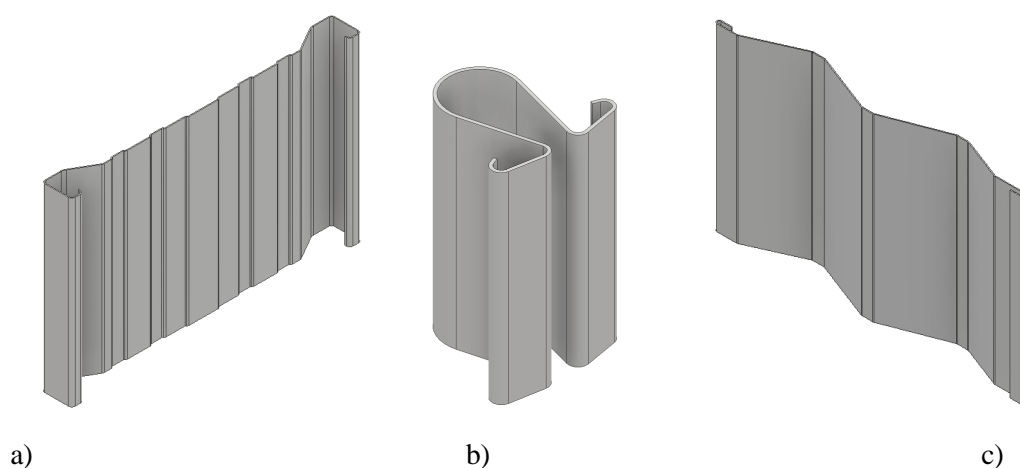
COPRA RF wspomaga projektanta w opracowaniu optymalnego procesu profilowania. Moduł COPRA RF DTM pozwala użytkownikowi na wstępną weryfikację projektu i strategii gięcia poprzez teoretyczną analizę odkształceń wzdłużnych w czasie procesu profilowania. Na tym etapie wymagane jest zdefiniowanie granicy plastyczności i modułu Younga materiału profilowanego.

W celu dalszej analizy zestaw profilujący importowany jest do COPRA FEA RF, gdzie realizowana jest symulacja numeryczna wielotaktowego gięcia rolkowego, wykorzystująca nieliniowe obliczenia elastoplastyczne. Analiza numeryczna wymaga zdefiniowania właściwości materiałowych materiału profilowanego takich jak  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$  lub określenie parametrów ( $\epsilon$ ,  $n$  i  $K$ ) na podstawie krzywej umocnienia. Użytkownik definiuje dodatkowo odległości między stacjami profilującymi oraz określa długość profilowanego kształtownika. Istnieje możliwość modyfikacji siatki na elementach prostych i łukowych profilowanego kształtownika.

Oprogramowanie posiada bogaty zestaw narzędzi do oceny otrzymanych wyników obliczeń oraz opcję wirtualnego przejścia pasma giętego przez zdefiniowane zestawy profilujące. Wyszczególnić tu można m.in.: możliwość identyfikacji ewentualnych wad w gotowym kształtowniku, analizę powstałych naprężeń, odkształceń oraz zjawiska sprężynowania w profilowanym paśmie i finalnym profilu. Oprogramowanie umożliwia porównanie otrzymanego przekroju poprzecznego kształtownika z wariantem projektowym, podczas przejścia pasma profilowanego przez poszczególne stacje robocze i w gotowym profilu, jak również po procesie jego cięcia. Poszczególne wyniki analizy zostały zaprezentowane i omówione w dalszej części pracy.

## 11.2 Zakres modelowania numerycznego

Celem modelowania numerycznego było opracowanie produkcji elektrody zbiorczej z pocienionej taśmy z uwzględnieniem aspektów technologicznych, jakościowych oraz konstrukcji oprzyrządowania technologicznego tzn. rolek profilujących. Proces modelowania numerycznego wielotaktowego gięcia rolkowego elektrod zbiorczych został poprzedzony analizą profili najczęściej występujących w elektrofiltrach suchych, pracujących w instalacjach krajowych i zagranicznych. Docelowo do analizy wybrano 3 typy elektrod osadczycy: Sigma, płytowy i rynnowy. Profil elektrody Sigma III znajduje szerokie zastosowanie w elektrofiltrach suchych z uwagi na jego walory eksploatacyjne związane m.in. z propagacją drgań mechanicznych podczas oczyszczania płyty elektrody ze zgromadzonego pyłu. Profile przedstawiono poglądowo na rys. 64. Wybrane wskaźniki opisujące modelowane profile zestawiono w tabelicy 55. Główne cechy elektrod zbiorczych wyliczono na podstawie modeli 3D i narzędzi COPRA RF.



Rys. 64. Modelowane numerycznie profile elektrod zbiorczych: a) Sigma, b) rynnowy, c) ZT24

Tablica 55. Podstawowe wskaźniki opisujące analizowane typy elektrod osadczycy

Grubość taśmy [mm]	Wymiary [mm] (szerokość x wysokość)	Pole przekroju poprzecznego [mm <sup>2</sup> ]	Masa [kg/1mb]	Długość w rozwinięciu [mm]
<b>PROFIL ELEKTRODY SIGMA III</b>				
1	480x50	639,4	5,0	639,4
1,25		792,9	6,2	634,4
1,5		943,9	7,4	629,3
<b>PROFIL ELEKTRODY PŁYTOWEJ ZT24</b>				
1	510X40	585,7	4,6	585,7
1,25		731,3	5,7	585,1
1,5		876,7	6,9	584,5
<b>PROFIL ELEKTRODY RYNNOWEJ</b>				
1	60X60	201,7	1,6	201,7
1,25		250,8	2,0	200,6
1,5		299,4	2,4	199,6

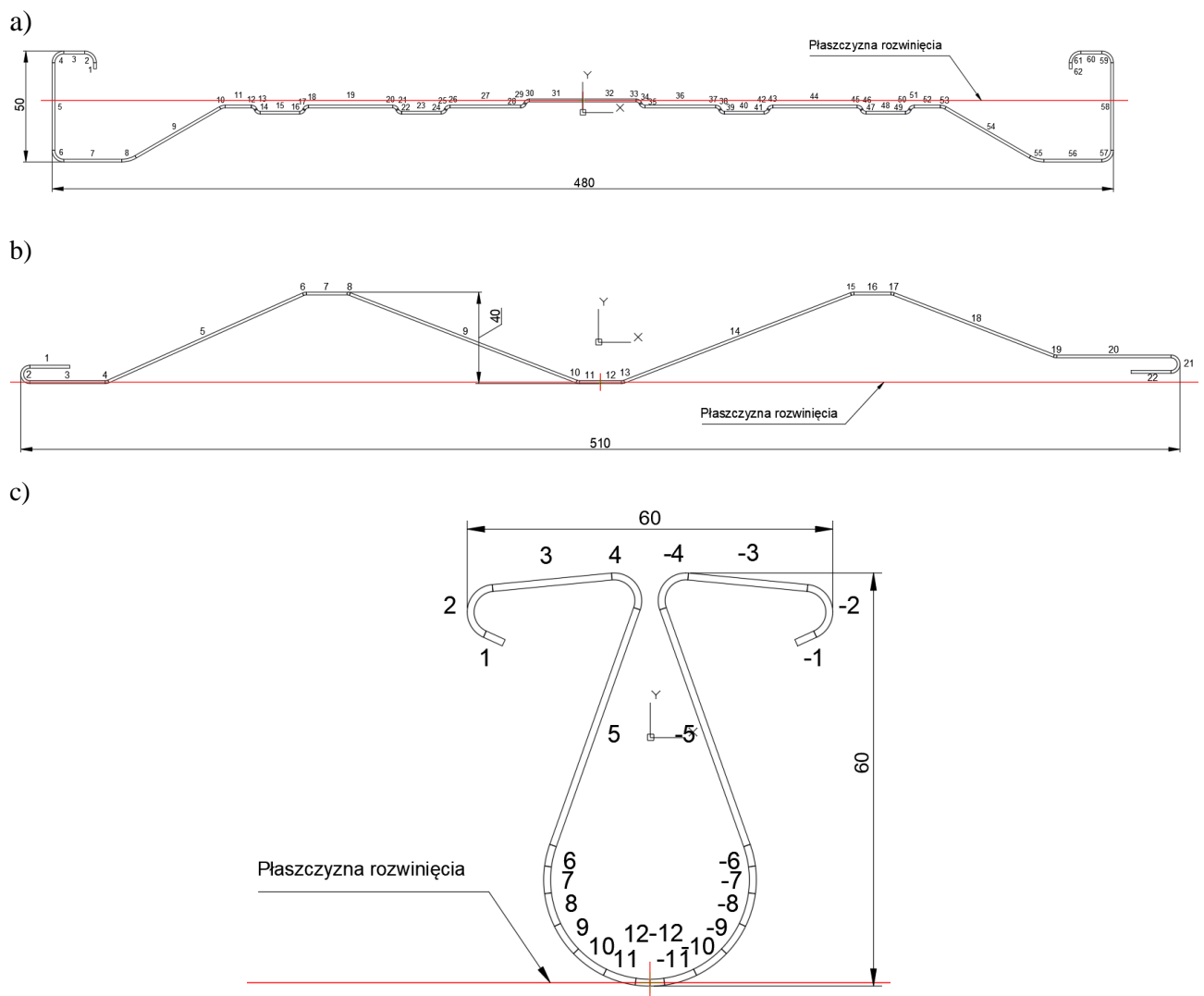
Modele numeryczne opracowano dla typoszeregu 3 grubości wsadu technologicznego 1, 1,25 i 1,5 mm. Jako punkt odniesienia przyjęto standardową grubość taśmy stalowej 1,5 mm, stosowaną do produkcji przez większość producentów analizowanego wyrobu. Materiałem podstawowym wsadu technologicznego była taśma stalowa zimnowalcowana w gatunku DC01 (PN-EN 10130/PN-EN 10131). W analizie numerycznej bazowano na średnich wartościach  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$  obliczonych na podstawie rzeczywistych danych materiału wsadu (rozdział 10.1). W obliczeniach wykorzystano ponadto dane materiałowe ( $\epsilon$  - odkształcenie rzeczywiste,  $K$  i  $n$  – stałe materiałowe) wyliczone w oparciu o krzywą umocnienia ze statycznej próby rozciągania. W przypadku elektrody rynnowej wykonano dodatkowo analizę numeryczną profilowania profilu wykonanego z taśmy stalowej trudnordzewiejącej Corten A i stali austenitycznej 1.4301 (PN-EN 10088-1). Miało to na celu przeprowadzenie analizy porównawczej w zakresie otrzymanych wyników m.in. tolerancji wykonania, naprężeń i odkształceń oraz pozostałych parametrów technologicznych, co opisano w dalszej części pracy. Obliczenia numeryczne obejmowały analizę wstępną oraz wykonanie obliczeń metodą elementów skończonych w zakresie nieliniowych odkształceń sprężystoplastycznych. Nerozłącznym elementem modelowania było opracowanie kompletnych projektów zestawów profilujących dla analizowanych profili elektrod. W kolejnym etapie przeprowadzono weryfikację poprawności przyjętej strategii profilowania i opracowanej konstrukcji rolek profilujących.

### **11.3 Opracowanie projektów rozwinięcia kształtowników i ich wstępna weryfikacja**

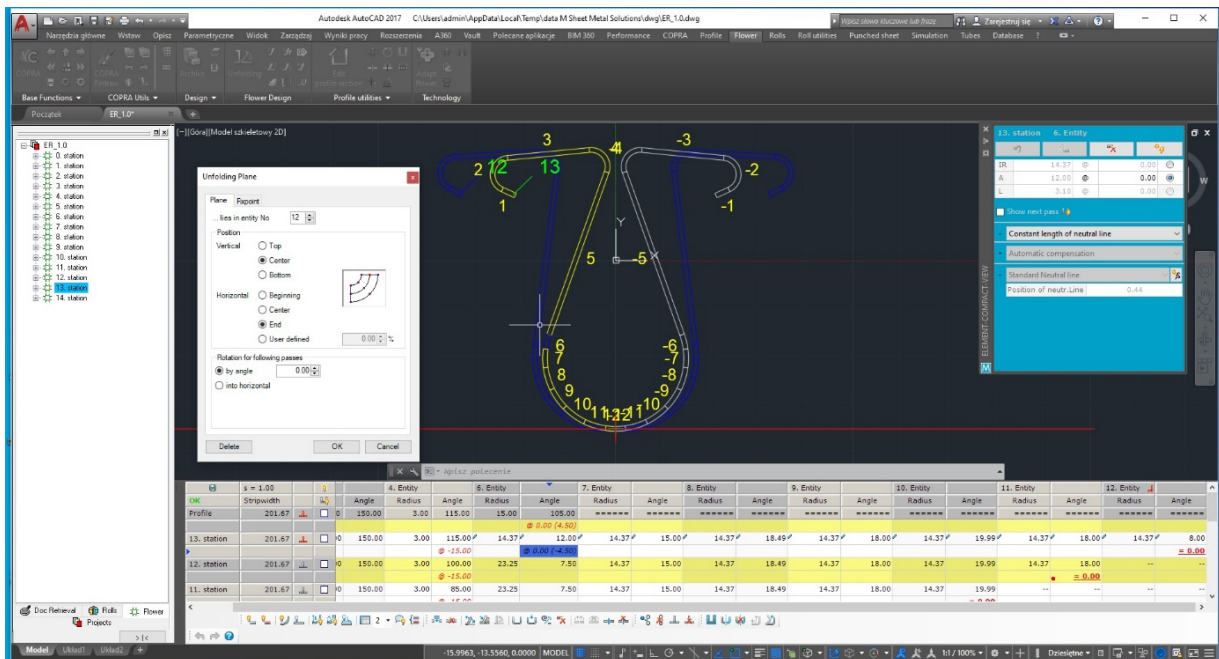
W pierwszym etapie modelowania numerycznego opracowane zostały projekty rozwinięcia kształtowników otwartych, które reprezentowały wybrane typy elektrod osadczych. Projekty wykonano w oprogramowaniu COPRA RF w skali 1:1. Autor pracy posiada doświadczenie w projektowaniu oprzyrządowania technologicznego i technologii produkcji elektrod zbiorczych, które zdobył podczas pracy w byłej Fabryce Elektrofiltrów ELWO S.A. w Pszczynie. Projekt każdego z kształtowników obejmował określenie m.in. płaszczyzny rozwinięcia i zaprojektowanie sekwencji gięcia dla poszczególnych stacji profilujących. Projekty zestawów profilujących opracowano w odniesieniu do rzeczywistych warunków warsztatowych przedsiębiorstwa. Profilarka elektrod zbiorczych Daniel Smith LTD posiadała możliwość instalacji 18-tu zestawów profilujących. Powyższe ograniczenie uwzględniono podczas opracowania projektu rozwinięcia każdego z kształtowników. Płaszczyzny rozwinięcia (średniki) kształtowników przyjęto zgodnie z dokumentacją techniczną. Dla zapewnienia stałego położenia wybranych odcinków pasma giętego zastosowano opcje: „środek kształtownika” i „stały punkt rozwinięcia”. Przy takich nastawach wskazany element kształtownika nie zmieniał swojego położenia podczas tworzenia rozwinięcia. W projektach rozwinięcia elektrody Sigma III i ZT24 zastosowano metodę rozwinięcia wg stałego promienia. W projekcie elektrody rynnowej zastosowano połączoną metodę stałego promienia i metodę stałego łuku. Metodą stałego łuku rozwijano podstawę kształtownika rynnowego. Położenie obojętnej osi taśmy stalowej we wszystkich kształtownikach wynosiło 0,44. Dla poszczególnych elementów giętych kształtowników zdefiniowano sprężynowanie materiału podczas gięcia w ostatnich przepustach.

Kąt sprężynowania przyjęto bazując na archiwalnych, rzeczywistych danych produkcyjnych. Docelowo przyjęto następujące kąty sprężynowania (użytkownika): elektroda Sigma III i ZT24: 2 stopnie, elektroda rynnowa: 2 stopnie dla elementów łukowych rozwijanych metodą stałego promienia i 4,5 stopnia dla elementów rozwijanych metodą stałego łuku. Łączna liczba elementów prostych i łukowych dla analizowanych kształtowników wynosiła: Sigma III – 62, ZT24 – 22, rynnowa – 24.

Finalne projekty rozwinięcia dla poszczególnych elektrod obejmowały następującą liczbę stacji roboczych: Sigma III – 18, ZT24 – 13, rynnowa – 13. Szerokość rozwinięcia pasma giętego kształtowników wyliczona została przez oprogramowanie wg normy DIN 6935 [184]. Rozwinięcia wszystkich analizowanych kształtowników opracowano z wykorzystaniem metody kalibrowania stopniowego (od środka kształtownika na zewnątrz). Na rys. 65-66 pokazano szczegółowo analizowane kształtowniki z podziałem na elementy proste i łukowe, wraz z usytuowaniem płaszczyzny rozwinięcia (czerwona linia). Projekty sekwencji gięcia opracowano za pomocą narzędzia SpreadSheet – rys. 67.



Rys. 65. Podział analizowanych kształtowników na elementy proste i łukowe oraz położenie płaszczyzny rozwinięcia, elektrody: a) Sigma III, b) ZT24, c) rynnowa



Rys. 66. Definicja płaszczyzny rozwinięcia oraz sekwencji gięcia elektrody zbiorczej rynnowej, (oprogramowanie COPRA RF)

OK	s = 1.00	9	2. Entry	4. Entry	6. Entry	8. Entry	10. Entry	12. Entry	14. Entry	16. Entry	18. Entry									
Profile	Stripwidth	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle									
18. station	639.39	4.00	92.00	4.00	92.00	4.00	92.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
17. station	639.39	4.00	90.00	4.00	78.00	4.00	90.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
16. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	90.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
15. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	79.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
14. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	68.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
13. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	57.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
12. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	47.00	12.00	30.00	4.00	30.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
11. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	35.00	12.00	20.00	4.00	20.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
10. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	19.00	12.00	10.00	4.00	10.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
9. station	639.39	4.00	90.00	4.00	63.00	4.00	0.00	10.00	0.00	4.00	0.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
8. station	639.39	4.00	90.00	4.00	48.00	4.00	0.00	10.00	0.00	4.00	0.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
7. station	639.39	4.00	90.00	4.00	32.00	4.00	0.00	10.00	0.00	4.00	0.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
6. station	639.39	4.00	90.00	4.00	16.00	4.00	0.00	10.00	0.00	4.00	0.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
5. station	639.39	4.00	90.00	4.00	0.00	4.00	0.00	10.00	0.00	4.00	0.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50
4. station	639.39	4.00	60.00	4.00	0.00	4.00	0.00	10.00	0.00	4.00	0.00	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50	63.70	1.50

Rys. 67. Arkusz Spreadsheet – projektowanie rozwinięcia kształtowników zimnogiętych

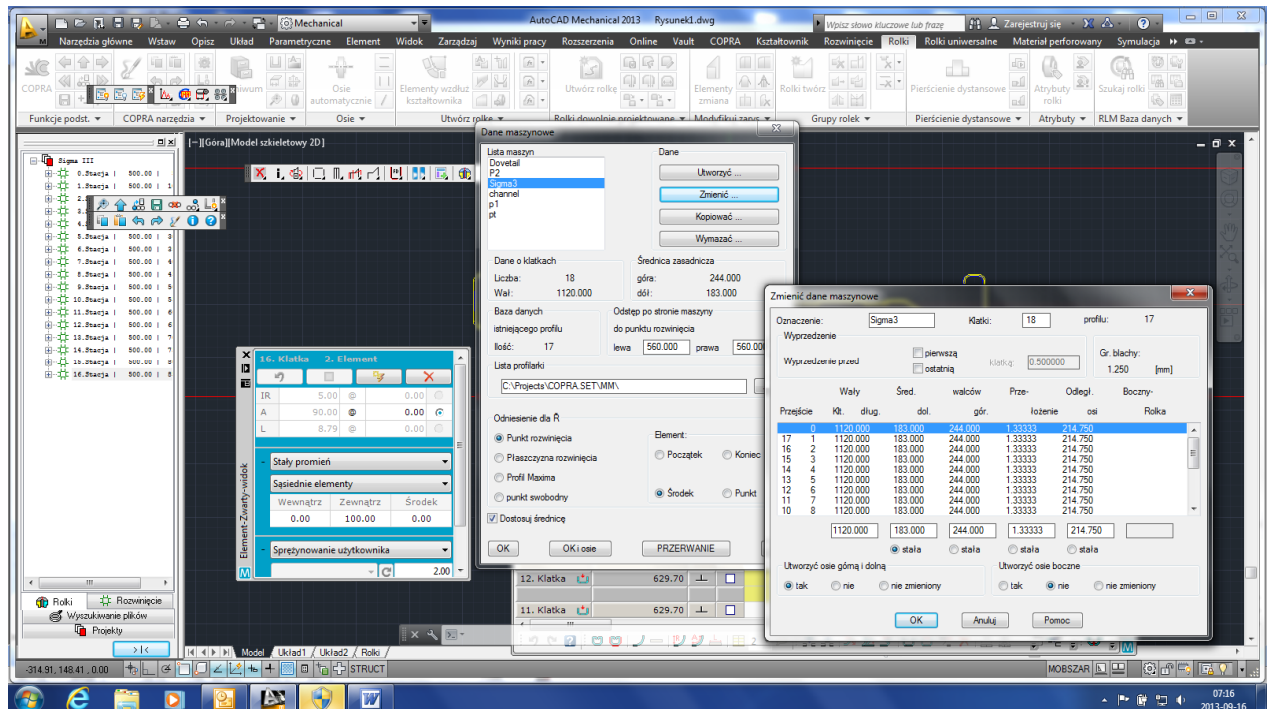
Szczegółowe dane dotyczące kątów gięcia w poszczególnych przepustach dla 3 analizowanych profili zestawiono tabelarycznie w formie załączników do pracy doktorskiej. Do oceny projektu sekwencji gięcia wykorzystano analizę zjawiska odkształcenia materiału podczas profilowania (moduł Copra RF DTM – Simulation of Strains). Odkształcenie plastyczne na krawędzi profilowanej taśmy stalowej może spowodować deformację materiału w tym obszarze kształtownika. W konsekwencji na krawędziach profilowanego kształtownika możliwe jest wystąpienie pofalowania jego powierzchni. Analizę odkształceń (wydłużeń) na krawędziach profilowanej taśmy przeprowadzono przy zastosowaniu metody Hauschild'a. W obliczeniach przyjęto wykładnik 2,5 (stałe konstrukcyjne) dla wybranej metody.

Jako dane materiałowe dla gatunku taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 zdefiniowano: moduł Younga 210 [GPa] oraz wartość granicy plastyczności  $R_e = 229$  [MPa]. Do obliczeń przyjęto średnią wartość tego parametru na podstawie próbki statystycznej opisującej rzeczywisty wsad technologiczny.

W kolejnym kroku zdefiniowano parametry opisujące profilarkę elektrod zbiorczych (maszynę) – rys. 68. Szczegółowe dane zestawiono w tabelicy 56. We wstępnej analizie numerycznej dyskretyzację kształtowników wykonano za pomocą powłokowych elementów skończonych. Siatka elementów skończonych nałożonych na elektrody zbiorcze została utworzona poprzez podział kształtowników na elementy powłokowe o wymiarach: wzdłuż kierunku profilowania 15 mm, w kierunku poprzecznym do pasma giętego 15 mm. Analiza odkształceń (wydłużeń) obejmowała wszystkie zaprojektowane stacje profilujące (sekwencje gięcia), które przedstawiono na rys. 69.

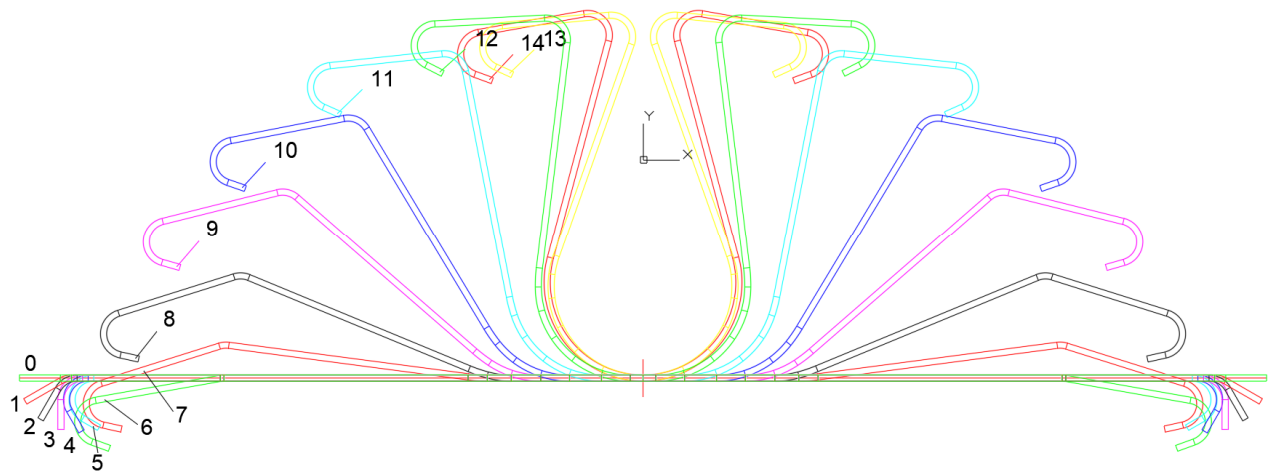
Tablica 56. Przyjęte parametry opisujące maszynę profilującą

Parametr	Wymiar [mm]
Odległość między stacjami profilującymi	500
Odległość od płaszczyzny rozwinięcia do osi rolek górnych	244
Odległość od płaszczyzny rozwinięcia do osi rolek dolnych	183
Długość wału na którym osadzono zestawy rolek profilujących	1120
Grubość profilowanej taśmy stalowej	1,0, 1,5
Przełożenie o wartości 1,3 przyjęto zgodnie z dokumentacją techniczno-ruchową (DTR) maszyny profilującej	

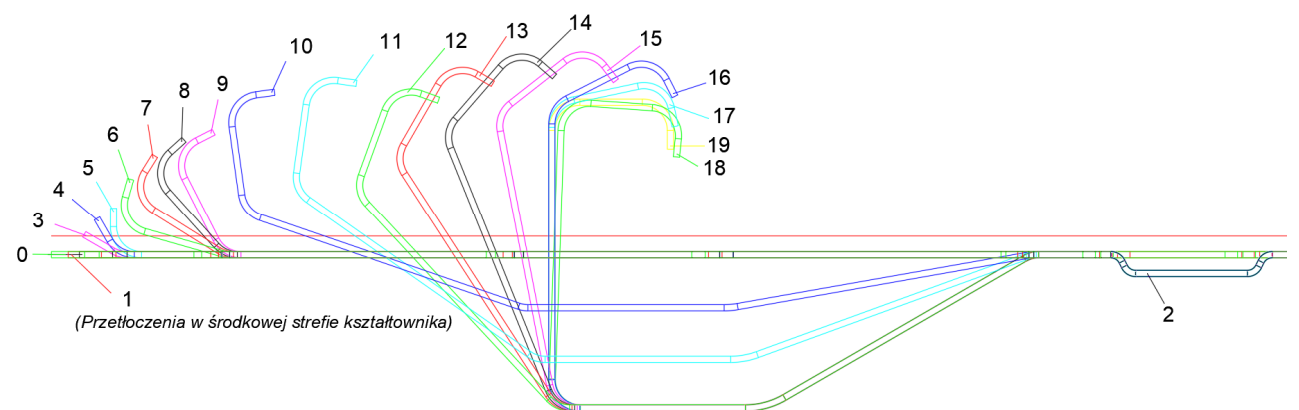


Rys. 68. Kolejne etapy definiowania wymaganych parametrów podczas tworzenia wirtualnej maszyny profilującej

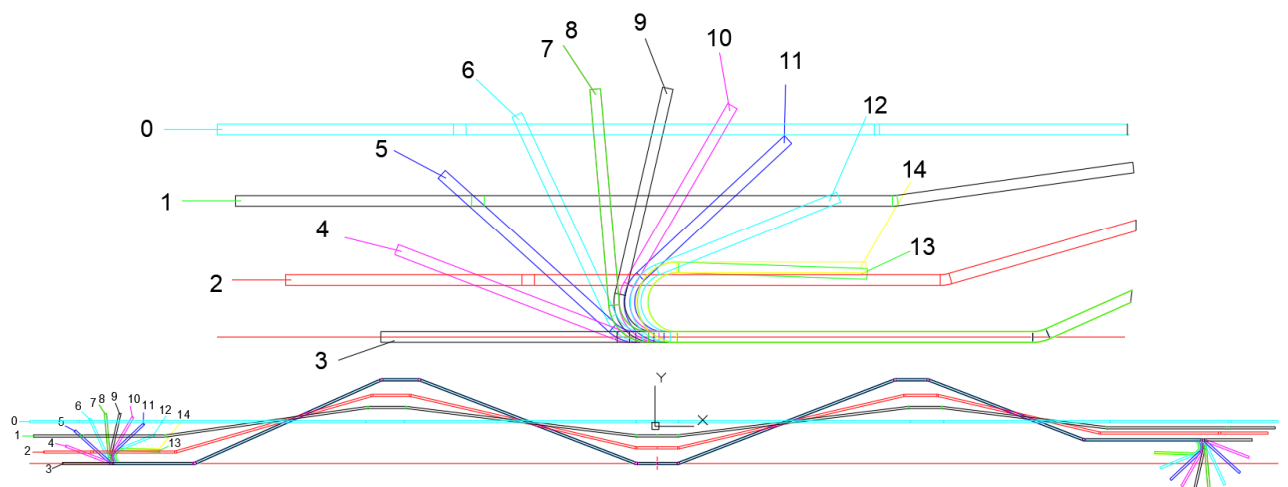
a)



b)



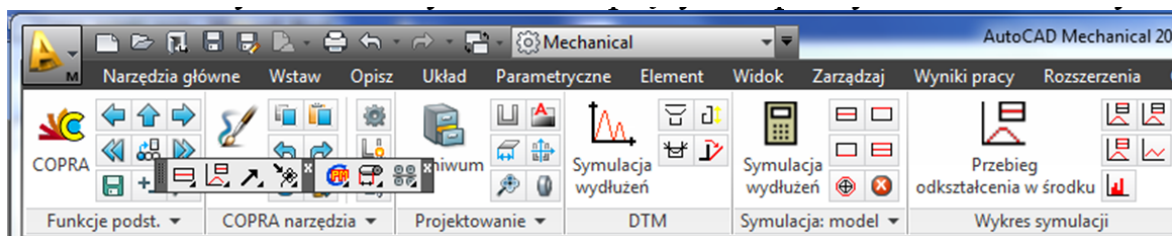
c)



Rys. 69. Sekwencje gięcia analizowanych elektrod zbiorczych, elektrody: a) rynnowa, b) Sigma III, c) ZT24



Symulację wydłużeń wykonano w module Copra RF DTM (Simulation of Strains) i stanowiła ona weryfikację opracowanej strategii gięcia. Przebieg odkształcenia wyliczany był dla części środkowej kształtownika - rys. 70. Na rys. 71 przedstawiono wyniki wstępnej analizy numerycznej wielotaktowego gięcia rolkowego elektrod zbiorczych wykonanych ze stali DC01. W obliczeniach przyjęto średnią wartość granicy plastyczności, którą wyliczono na podstawie analizowanej zbiorowości statystycznej (wsad technologiczny).



Rys. 70. Pasek narzędzi COPRA RF DTM (symulacja wydłużeń z wybraną opcją „Przebieg odkształceń w środku kształtownika”)

Czerwona linia ciągła na wykresach oznacza odkształcenie graniczne i wyznaczana jest przez oprogramowanie wg poniższej zależności:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{Re}{E} * 100\% + 0,2 [\%] \quad (33)$$

gdzie:

$\varepsilon_{gr}$  – odkształcenie graniczne (maksymalne odkształcenie sprężyste pasma giętego) [%];

$R_e$  – granica plastyczności [MPa];

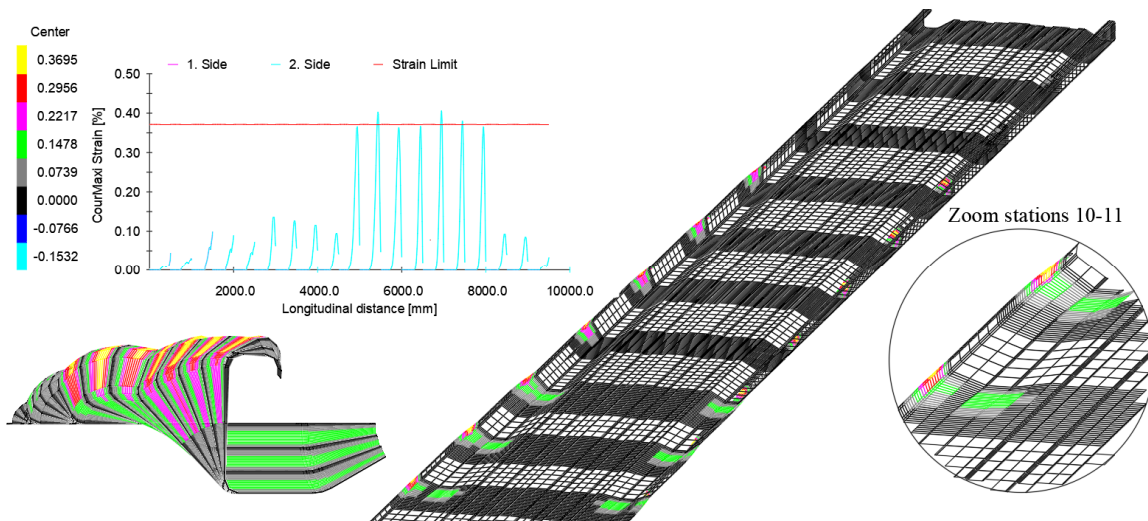
$E$  – współczynnik sprężystości wzdłużnej (moduł Younga) [MPa].

Dla elektrody zbiorczej Sigma III – (rys. 71) największą wartość wydłużenia na krawędziach profilowanej taśmy stalowej otrzymano dla stacji 11 i 14 ~ 0,4%. Na podstawie wykresu można zauważyć, że wartości otrzymanych odkształceń (stacja 10-16) są czterokrotnie większe od pozostałych i rozkładają się równomiernie. Jest to etap kształtowania tzw. półki elektrody. Zmniejszenie kątów gięcia dla sekwencji jw. (w zakresie 10, 11 stopni) nie pozwoliło na obniżenie wartości omawianego parametru. Bazując na praktyce projektowej firmy dataM (konsultacje) można przyjąć, że w przypadku, gdy otrzymane wartości wydłużeń są powyżej czerwonej linii wyznaczonej przez program, wówczas wskazane jest, aby znajdowały się one na zbliżonym poziomie [143]. W związku z powyższym dla każdego profilu wykonano szereg projektów rozwinięcia i wybrano najbardziej optymalne rozwiązanie.

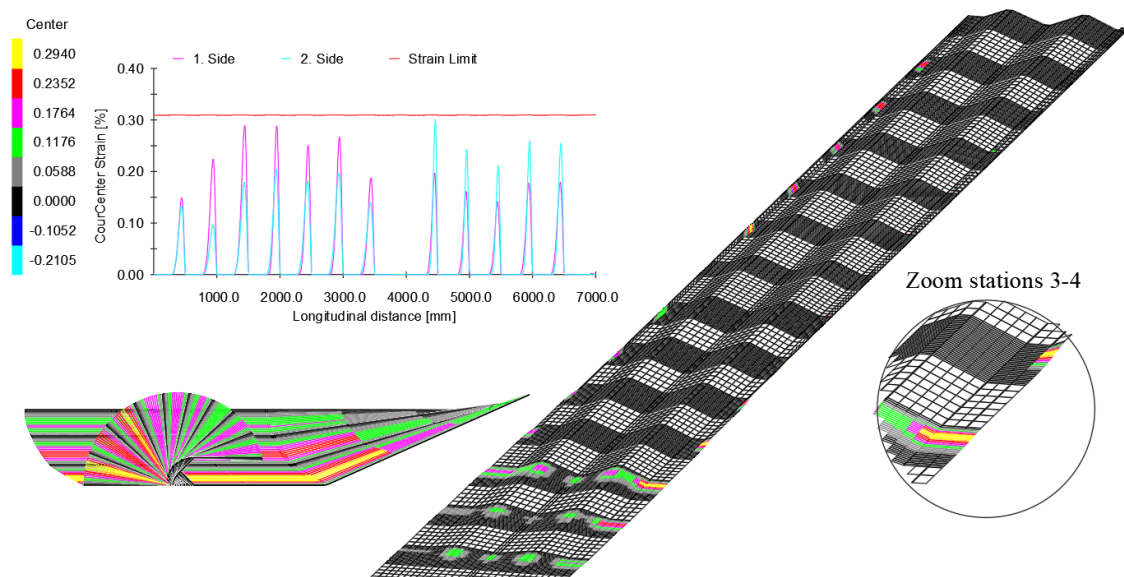
W przypadku elektrody zbiorczej ZT24 na żadnej ze stacji profilujących nie zostało przekroczone odkształcenie graniczne wyznaczone przez oprogramowanie. Profil ten jako jedyny nie jest symetryczny. Na wykresie z rys. 71 można zauważyć, że dla lewej strony kształtownika otrzymana wartość wydłużeń jest większa od uzyskanych dla strony prawej. Prawa strona elektrody ZT24 kształtowana jest powyżej przyjętej linii środka (płaszczyzny rozwinięcia). Dla stacji 2 różnica wynosi ~0,12%. Maksymalne wartości zidentyfikowano dla stacji 3-4 oraz 9, gdzie następuje przegięcie ramienia (>90°) ~0,28%. W pierwszych trzech przepustach zidentyfikowano wydłużenia taśmy również w strefie środkowej elektrody, gdzie następuje formowanie trapezu.

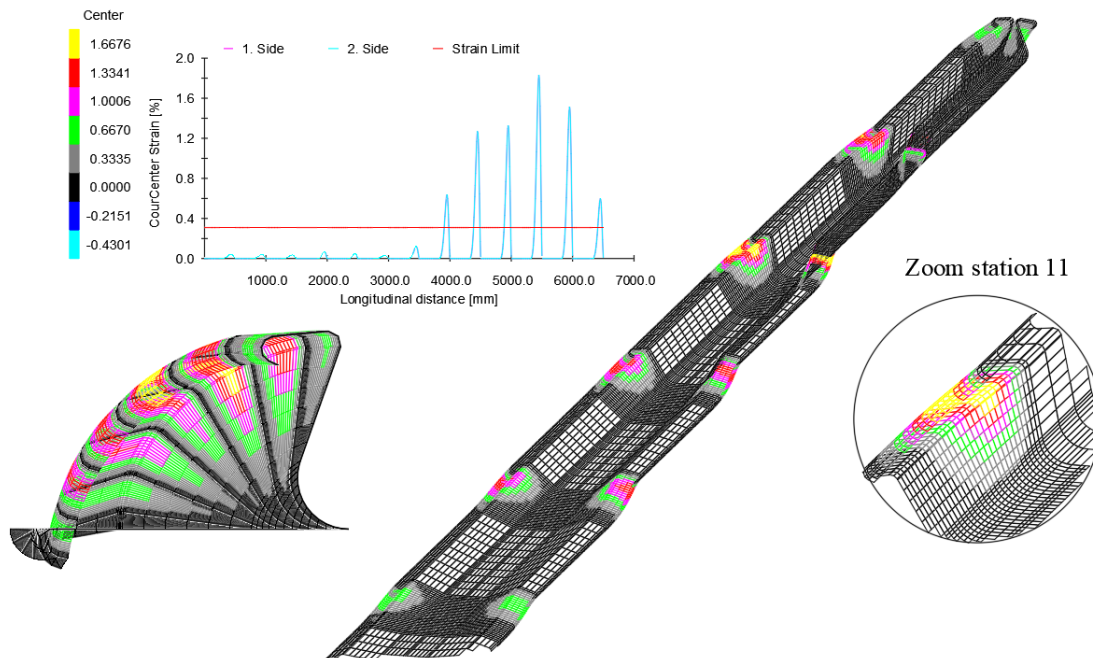
Najtrudniejszy pod względem projektowym okazał się profil elektrody rynnowej z rys. 71. Zastosowanie w ostatnich przepustach rolek bocznych niezbędnych do uzyskania finalnej geometrii analizowanego kształtownika mogło przyczynić się do powstania tak gwałtownego wzrostu wydłużeń w elementach 2-4 pokazanych na rys. 65c. W tym przypadku wartość odkształcenia na krawędzi profilowanej taśmy wyniosła  $\sim 1,78\%$ . Jest to ponad 5-krotny wzrost w odniesieniu do wartości odkształcenia granicznego. Otrzymana wartość okazała się największa w przedmiotowej analizie numerycznej. Należy podkreślić, że opisany etap wstępnej analizy stanowił podstawę do dalszych obliczeń, które zweryfikowano w dalszej części pracy, przy zastosowaniu metody elementów skończonych MES, gdzie sprawdzono m.in. wartość pocienienia materiału w niewralgicznych obszarach gięcia analizowanych kształtowników oraz zbadano ryzyko powstania ewentualnych pęknięć w tych obszarach, przy użyciu narzędzia Limit Forming Diagram (wykres granic formowania). Jak wspomniano w rozdziale 11.3, liczba kłatek roboczych oraz odległości między nimi stanowiły odniesienie do opracowania technologii profilowania, odzwierciedlającej realne warunki parku maszynowego i instalacji nowego oprzyrządowania technologicznego.

a)



b)



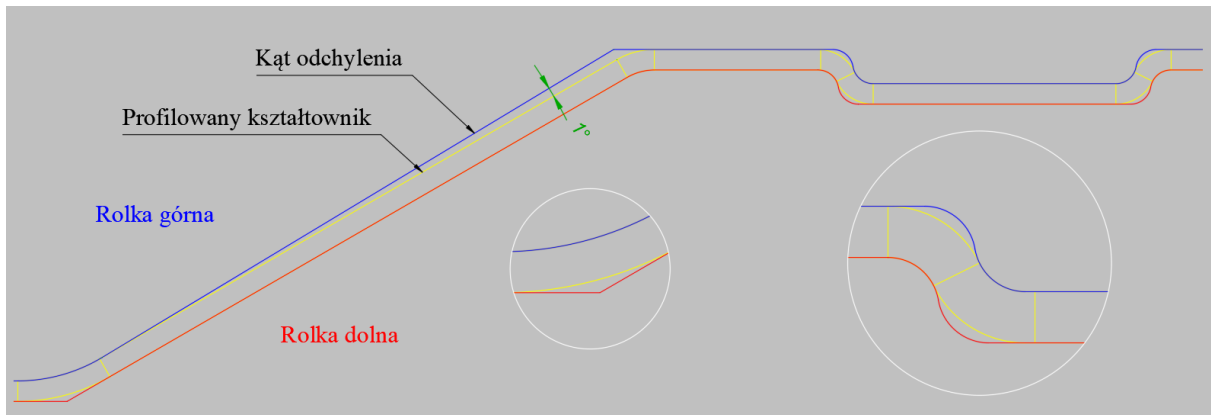


Rys. 71. Walidacja opracowanych projektów rozwinięcia elektrod zbiorczych na podstawie analizy odkształceń zidentyfikowanych na krawędzi profilowanego kształtownika:  
 a) Sigma III, b) ZT24, c) rynnowa

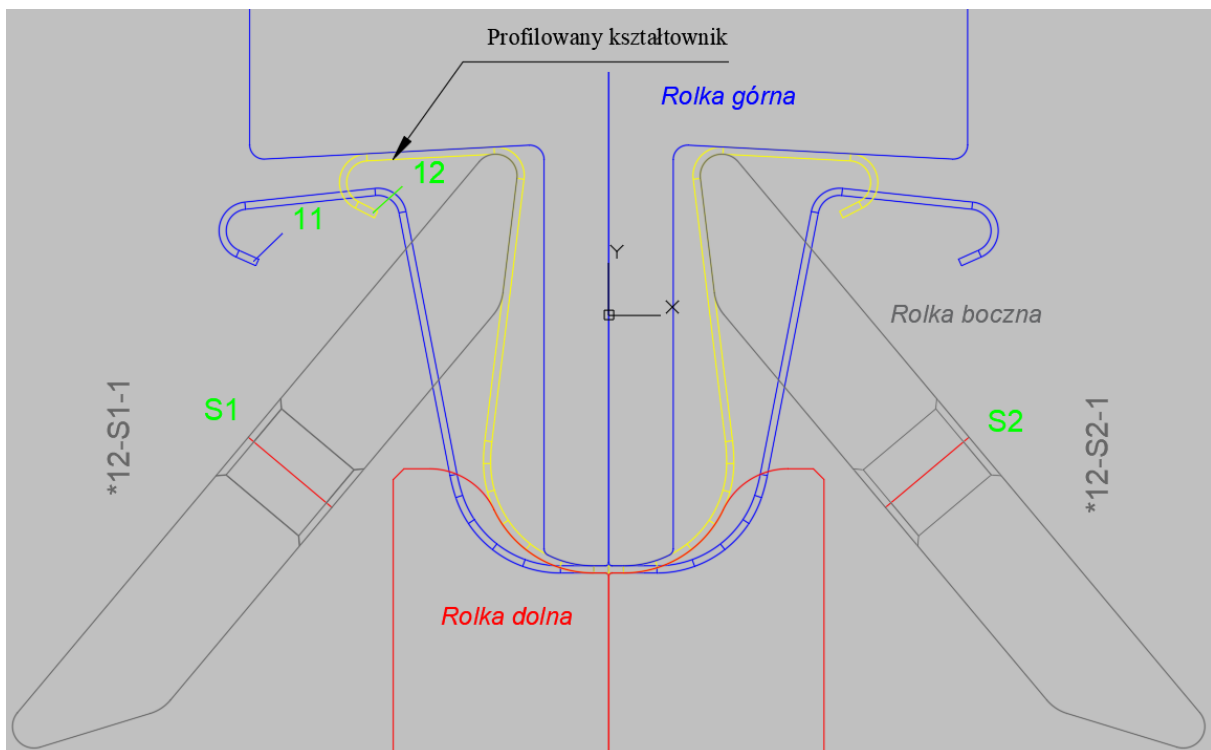
#### 11.4 Konstrukcja rolek profilujących

Ważnym etapem poprzedzającym symulację profilowania metodą elementów skończonych było opracowanie zestawów profilujących w skali 1:1. Przyjęto określone kryteria projektowe bazując na danych projektowych archiwalnych, protokołach z prób technologicznych oraz materiałach szkoleniowych [90, 143]. Rolki profilujące zaprojektowano z minimalnym kontaktem z pasmem giętym w celu ograniczenia pocienienia materiału podczas gięcia oraz redukcji naprężeń powstających w profilowanym materiale. W ostatnich przepustach dla uzyskania dostatecznej dokładności wymiarowej projekt przewidywał, aby rolki kształtujące współpracowały z pasmem giętym na całej powierzchni. Zastosowane kąty odchylenia wykroju miały za zadanie ochronę przed zakleszczeniem taśmy i uniknięcie naciągania taśmy podczas gięcia kilku części kształtownika jednocześnie. Zastosowanie kątów odchylenia ułatwia ponadto poślizg rolek w odniesieniu do profilowanej taśmy, co korzystnie wpływa na jakość powierzchni kształtownika (elektrody). W przedmiotowych projektach zastosowane zostały kąty odchylenia w zakresie  $0,5, 1^{\circ}$ . Dla podginanych ramion, dłuższych niż 50 mm stosowano kąty odchylenia  $1^{\circ}$ . Omawiane rozwiązanie konstrukcyjne zobrazowano na rys 72. Ponadto w konstrukcji rolek profilujących usunięte zostały promienie nie biorące udziału w gięciu, co przedstawiono na rys. 72. Wyjątek stanowiły przepusty, w których kształtowana była docelowa geometria (półka elektrody Sigma III). W projekcie zestawów profilujących (elektroda Sigma III i rynnowa) wykorzystano rolki boczne – rys. 73. Miało to na celu uniknięcie gięcia określanego w literaturze anglojęzycznej jako „air bending” tj. bez podparcia promienia gięcia (w obszarach kształtownika które stwarzały taką możliwość).

Mając na uwadze wymagania systemowe oprogramowania COPRA RF FEA nie dzielono każdej pary rolek (górną i dolną) na mniejsze segmenty, tak jak to praktykuje się w rzeczywistości. Dla celów analitycznych nie miałyby to uzasadnienia z uwagi na znaczące obciążenie procesora. W ostatnich przepustach zgodnie z przyjętym kątem sprężynowania, rolki przeginały odcinki kształtowników, dla których zostało zdefiniowane sprężynowanie powrotne materiału.



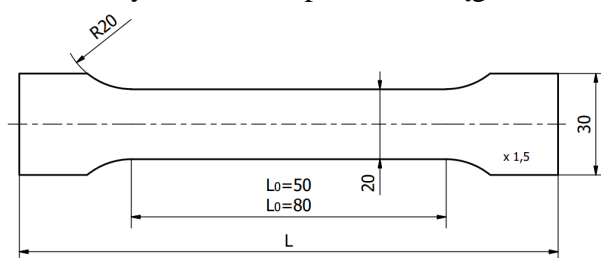
Rys. 72. Przykładowa konstrukcja rolek profilujących – elektroda zbiorcza Sigma III (stacja 13)



Rys. 73. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne z zastosowaniem rolek bocznych – elektroda zbiorcza rynnowa (stacja 12)

## 11.5 Parametry wsadu technologicznego zdefiniowanego w symulacji numerycznej metodą elementów skończonych

Przed przystąpieniem do analizy numerycznej oprogramowaniem Copra RF FEA konieczne było określenie parametrów materiałowych opisujących wsad technologiczny. Właściwości materiałowe taśmy stalowej definiowano przez podanie średnich wartości granicy plastyczności  $R_e$ , wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i wydłużenia  $A_{80}$ , oraz w odniesieniu do danych materiałowych opisujących krzywą umocnienia wg równania trójparametrycznego Swifta, wyliczonych w oparciu o statyczną próbę rozciągania. Badaniu poddano próbki płaskie o różnych wymiarach ze względu na dostępność materiału. Kształt próbek zobrazowano na rys. 74. Parametry materiałowe wyznaczone w próbie rozciągania zestawiono w tabelicy 57.



Rys. 74. Kształt i wymiary próbek wykorzystanych w statycznej próbie rozciągania

Tabela 57. Parametry materiałowe wyznaczone w próbie rozciągania

Gatunek stali	Numer próbki	$R_{p0,5}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]
DC01	1	229	324	34 ( $A_{50}$ )
	2	210	327	42 ( $A_{50}$ )
	3	216	325	36 ( $A_{50}$ )
Średnia		218	325	37 ( $A_{50}$ )
Corten A	1	274	324	37,5 ( $A_{80}$ )
	2	240	323	37,5 ( $A_{80}$ )
	3	238	323	45 ( $A_{80}$ )
Średnia		251	323	40 ( $A_{80}$ )
1.4541	1	290	682	70 ( $A_{50}$ )
	2	275	677	52 ( $A_{50}$ )
	3	256	681	56 ( $A_{50}$ )
Średnia		274	680	59 ( $A_{50}$ )

Parametry krzywej umocnienia przedstawiono w tabelicy 58. Analizę numeryczną procesu profilowania wykonano dla 3 profili elektrod zbiorczych typu: Sigma III, ZT24 i rynnowej z uwzględnieniem typoszeregu 3 grubości taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01. W tym przypadku bazowano na średnich wartościach  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$ , które wyliczono na podstawie próbki statystycznej z rzeczywistych danych produkcyjnych (rozdział 10.1). W przypadku elektrody rynnowej proces profilowania analizowano ponadto dla profilu o najmniejszej grubości ( $g=1\text{mm}$ ), gdzie zdefiniowano parametry ( $\epsilon_0$ ,  $K$  i  $n$ ) na podstawie krzywej umocnienia plastycznego. Statyczną próbę rozciągania wykonano we własnym zakresie dla trzech gatunków taśmy stalowej: DC01, Corten A oraz stali nierdzewnej austenitycznej 1.4531.

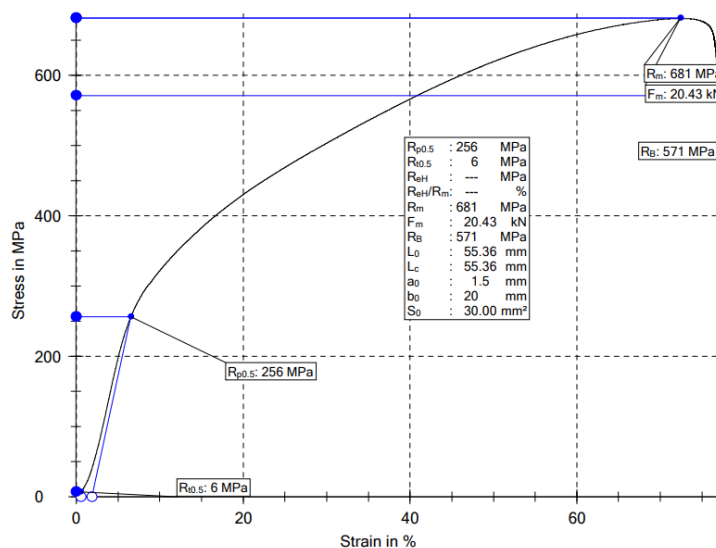
Do tego celu wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową o napędzie mechanicznym Zwick/Roell o zakresie 100 kN oraz hydraulicznym MTS również o zakresie 100 kN. Zdjęcie maszyny wytrzymałościowej oraz badanych próbek po zerwaniu przedstawiono na rys. 75. Przykładowy wykres rozciągania zobrazowano na rys. 76. Do wyznaczenia umownej granicy plastyczności  $R_{p0,2}$  wykorzystano ekstensometry dotykowe.

Tablica 58. Parametry ( $\epsilon_0$ ,  $K$  i  $n$ ) wyznaczone na podstawie krzywej umocnienia

Gatunek stali	Numer próbki	$\epsilon_{p0}$	$n$	$K$ , MPa	Wymiar próbki $b \times g$ [mm]	Długość pomiarowa $L_0$ [mm]
DC01	1	0,0012	0,224	565	20x1,5	50
	2	0,002	0,233	580		
	3	0,001	0,25	614		
Średnia		0,001	0,24	586		
Corten A	1	0,0002	0,18	531	20x1,5	80
	2	0,001	0,2	552		
	3	0,001	0,2	552		
Średnia		0,001	0,2	545		
1.4541	1	0,002	0,59	1400	20x1,5	50
	2	0,0015	0,62	1448		
	3	0,0022	0,59	1403		
Średnia		0,002	0,6	1417		



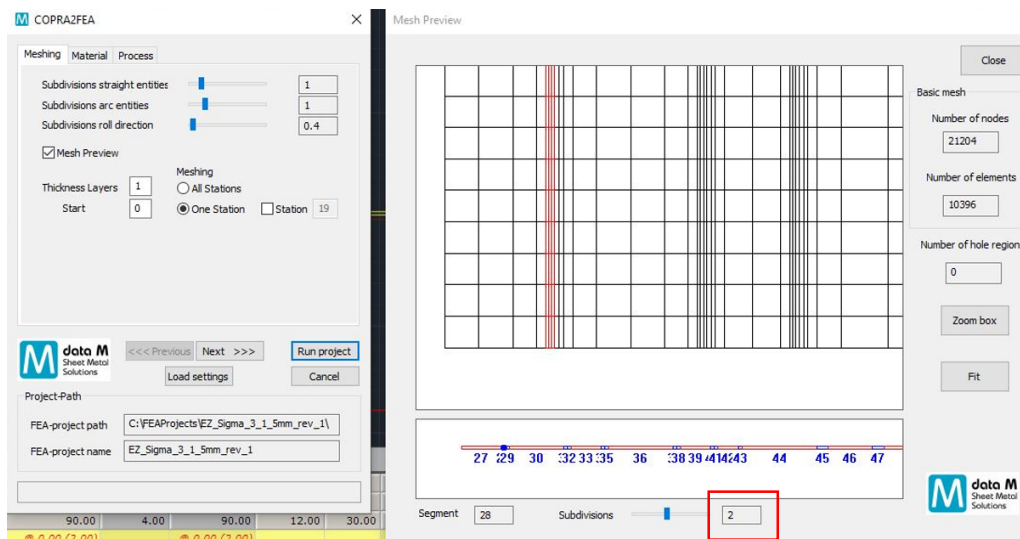
Rys. 75. Maszyna wytrzymałościowa za pomocą której wykonano statyczną próbę rozciągania próbek



Rys. 76. Przykładowy wykres rozciągania stali nierdzewnej 1.4541

## 11.6 Ustawienia symulacji numerycznej w zakresie danych materiałowych, procesowych oraz dyskretyzacja modeli geometrycznych

Przed przystąpieniem do symulacji metodą elementów skończonych niezbędne było zdefiniowanie podstawowych ustawień COPRA RF FEA (Project Manager) w zakresie materiałowym, procesowym oraz parametrów siatki elementów skończonych. Przykładowe okna dialogowe zobrazowano na rys. 77 i 79.



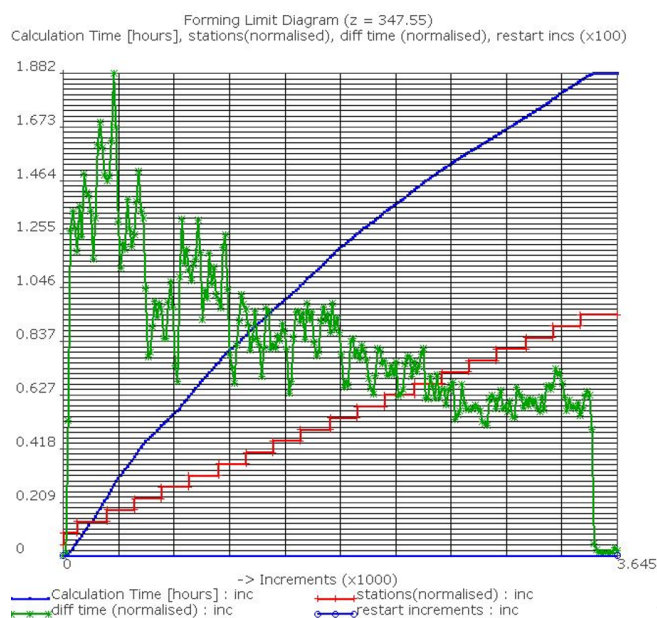
Rys. 77. Przykładowe ustawienia symulacji numerycznej (zakładka meshing)

Dla analizowanych kształtowników przyjęto następujący podział elementów profili elektrod zbiorczych: prostych i łukowych – 1, w kierunku profilowania - 0,4, 0,5. Dodatkowo zagęszczano siatkę elementów skończonych w obszarach, gdzie przebiegał proces gięcia (x2), co pokazano na rys. 77. Biorąc pod uwagę czas pojedynczej analizy, który oszacowano na etapie symulacji wstępnych, przyjęto kompromis pomiędzy gęstością siatki, ilością warstw siatki, a czasem symulacji.

Wszystkie analizowane modele siatek przygotowano jako jednowarstwowe i bryłowe. Odzorowywały one profilowaną taśmę stalową. Wsad technologiczny zdefiniowano jako materiał sprężystoplastyczny. Dane dotyczące dyskretyzacji poszczególnych siatek (modeli) wraz z podaniem czasu symulacji zestawiono w tabelicy 59. Graficzną prezentację przykładowego modelu obliczeniowego zilustrowano na rys. 78.

Tablica 59. Dane dotyczące zastosowanych siatek elementów skończonych oraz czasu symulacji

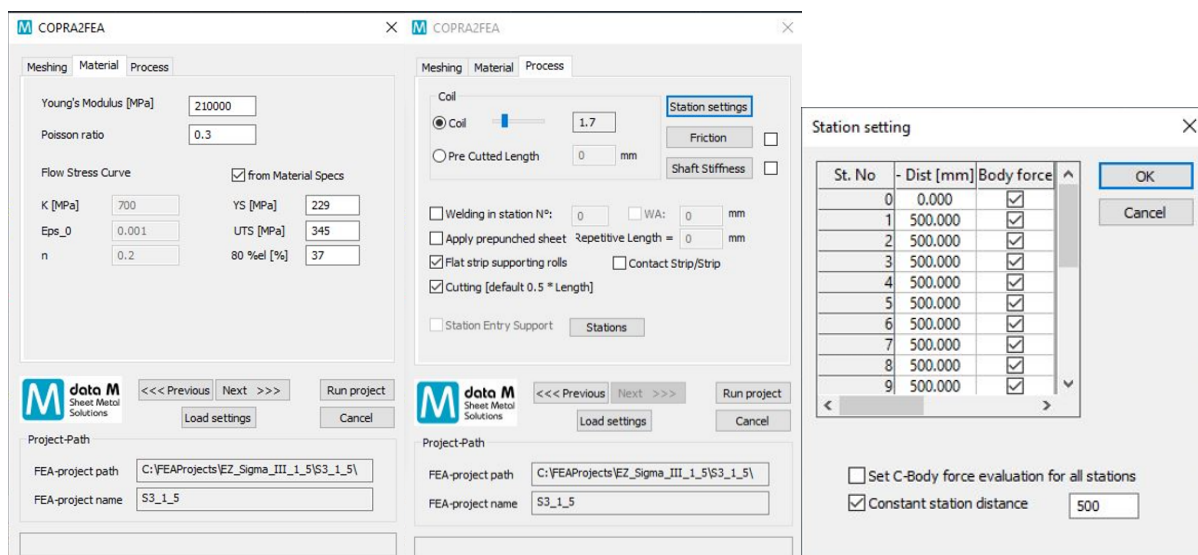
Liczba stacji profilujących	Grubość taśmy [mm]	Liczba elementów skończonych	Czas symulacji	Wsp. H
<i>Sigma III</i>				
18	1	14 805	188 h 12 min	10112
	1,25	12 091	124 h 26 min	6686
	1,5	10 848	104 h 9 min	5596
<i>ZT24</i>				
13	1	14916	70 h 27 min	3785
	1,25	12690	69 h 29 min	3733
	1,5	12204	63 h 19 min	3402
<i>rynnowa</i>				
13	1	7006	34 h 23 min	1847
	1,25	5130	20 h 41 min	1111
	1,5	5424	20 h 11 min	1084
<i>Wsp. H = czas symulacji / rzeczywisty czas profilowania. Rzeczywisty średni czas profilowania wynosi 67 s</i>				



Rys. 78. Wykres (czas symulacji – poszczególne kroki obliczeniowe - increments) – elektroda zbiorcza Sigma III g=1,5 mm

Standardowym typem elementu skończonego zaimplementowanym do COPRA FEA RF jest element bryłowy: element 7 (eight node hexahedral solid element with trilinear interpolation). Dystrybutor oprogramowania bazując na swoim doświadczeniu w analizach numerycznych procesu profilowania zwraca uwagę, że ww. typ elementu skończonego dobrze odzwierciedla zachowanie się materiału podczas wielotaktowego gięcia rolkowego. Wcześniejsze próby zastosowania elementów powłokowych nie pozwoliły na otrzymanie wiarygodnych wyników symulacji [143].



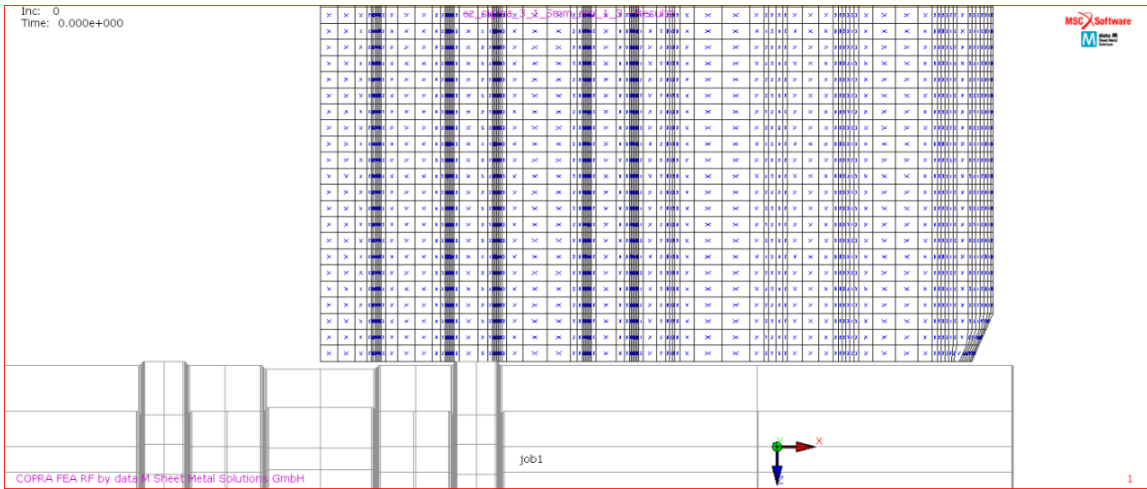


Rys. 79. Przykładowe ustawienia symulacji numerycznej (zakładka material i process)

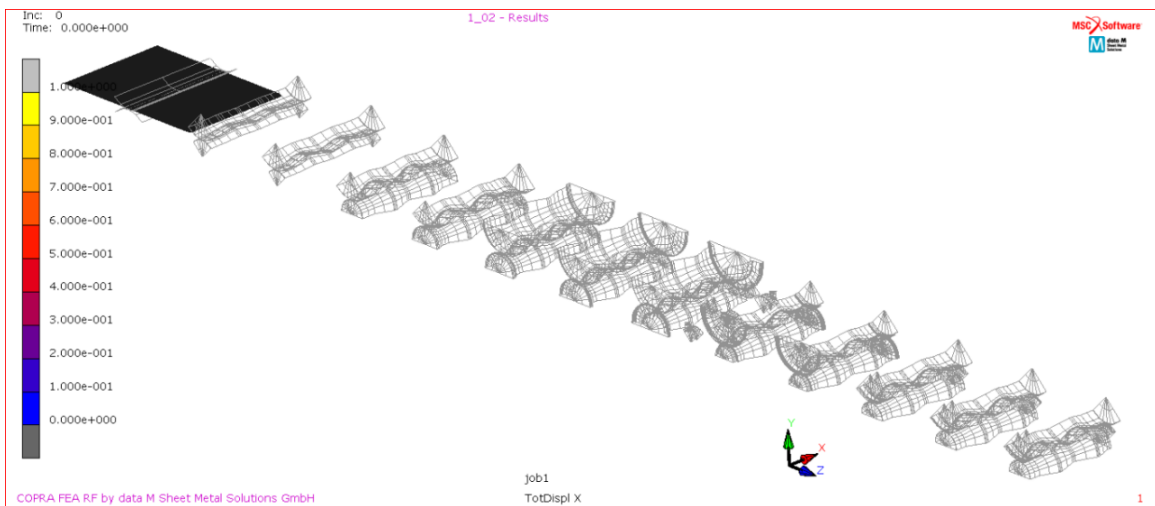
Dane materiałowe opisujące wsad technologiczny zdefiniowano w sposób opisany szczegółowo w rozdziale 10.1 (średnia wartość  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$  wyliczona na podstawie analizowanej zbiorowości statystycznej). Dla danych procesowych określono wartość współczynnika Coil – 1.7. Wartość ta oznacza, że długość profilowanych elektrod zbiorczych była o 70% większa od przyjętej odległości między stacjami profilującymi tj. 500 mm (100%). Odległości między stacjami profilującymi były identyczne dla wszystkich przepustów. Przyjęty parametr odpowiadał rzeczywistym nastawom profilarki elektrod zbiorczych. Przyjęcie wartości współczynnika Coil na tym poziomie ułatwiło analizę przejścia pasma giętego przez wszystkie zaprojektowane stacje profilujące. Analizowano poprawność przyjętej konstrukcji rolek profilujących, strategii gięcia oraz zachowanie się pasma giętego w stacji bieżącej, w której realizowane było gięcie i jednocześnie stacji poprzedzającej. Ze względu na ograniczenia czasowe związane z posiadaną licencją przyjęcie takiej strategii uznano za najbardziej optymalne. W ustawieniach procesowych uwzględniono dodatkowo operację cięcia kształtownika na wymiar, po wyjściu z ostatniej stacji profilującej. Miało to na celu identyfikację wartości naprężeń resztkowych (pozostałych) w wyprofilowanym kształtowniku, jak również określenie kąta sprężynowania.

W przeprowadzonych analizach numerycznych nie zdefiniowano współczynnika tarcia pomiędzy taśmą stalową a powierzchniami rolek profilujących. Głównymi przesłankami takiej decyzji było: skrócenie czasu obliczeń oraz niepewność co do danych opisujących środek smarny tj. mieszaninę oleju i nafty. Po wczytaniu kompletnych zestawów profilujących do środowiska COPRA RF FEA, zdefiniowano każdorazowo ścięcie naroża taśmy stalowej, co miało za zadanie łatwiejsze wejście materiału w rolki profilujące – rys. 80.

Identyczny zabieg praktykowany jest w rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Poglądowy model taśmy stalowej oraz zaimplementowanego zestawu profilującego przedstawiono na rys. 80-81. Elektrody zbiorcze typu: (Sigma III i rynnową) analizowano jako profile symetryczne, co przekładało się na skrócenie czasu obliczeń i zmniejszenie obciążenia procesora.



Rys. 80. Dyskretyzacja pasma giętego (taśmy stalowej) – elektroda Sigma III

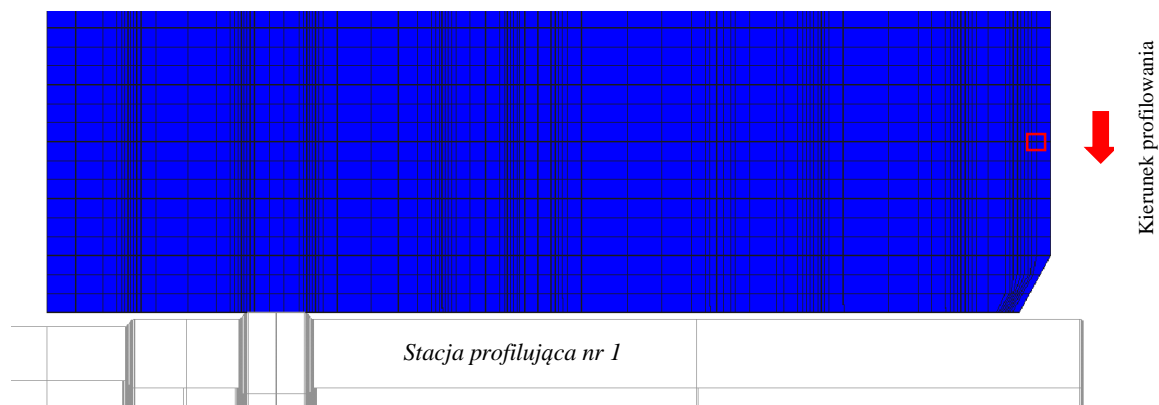


Rys. 81. Model 3D stacji profilujących elektrode ZT24 zaimplementowany do środowiska COPRA RF FEA

Na rys. 81 oznaczono triadę widoku wskazującą kierunki osi bezwzględnego układu współrzędnych, względem którego wyliczono wartości odkształceń, naprężeń oraz pozostałych analizowanych parametrów. Poszczególnym kierunkom odpowiadają odpowiednio: X – szerokość taśmy, Y – grubość taśmy, Z –kierunek profilowania.

## 11.7 Analiza odkształceń na krawędziach profilowanych kształtowników

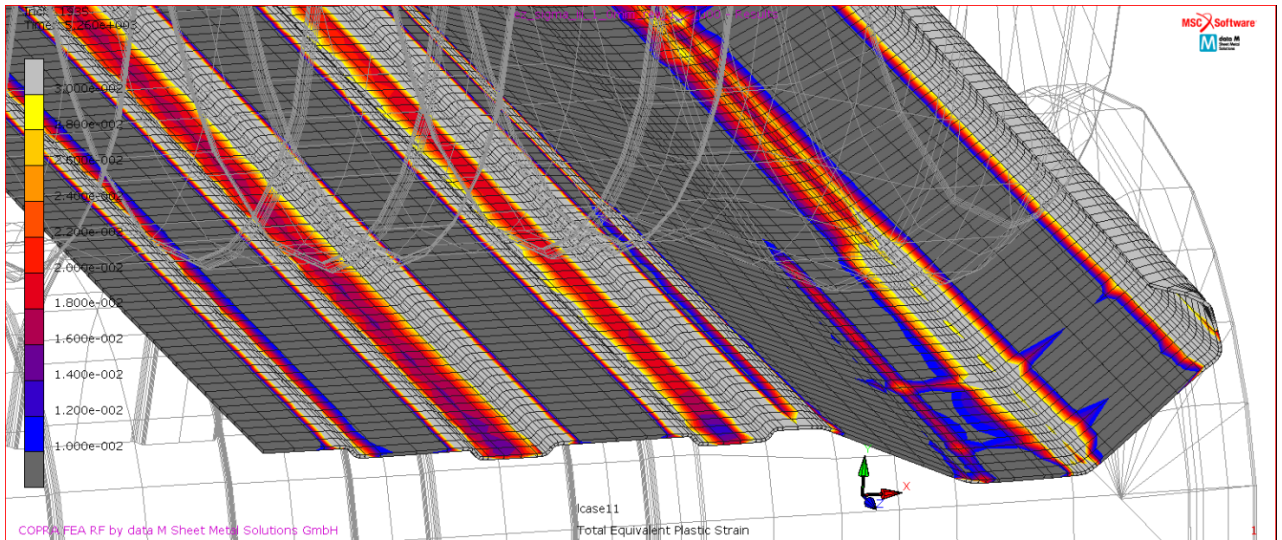
Jednym z ważniejszych parametrów analizowanych w procesie wielotaktowego gięcia rolkowego jest odkształcenie wzdłużne występujące w materiale na krawędzi profilowanego kształtownika. Omawiany parametr został wyliczony dla punktu pomiarowego (węzła siatki), który zdefiniowano w płaskiej taśmie stalowej przed jej wejściem do pierwszego przepustu. W celu uniknięcia błędów obliczeniowych ustalono, że punkt pomiarowy będzie znajdował się w odległości jednego elementu skończonego od krawędzi profilowanego pasma – rys. 82. W przedmiotowej analizie zdefiniowano parametry materiałowe odpowiadające stali niskowęglowej DC01 na podstawie średnich wartości  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$  z próbki statystycznej – rozdział 10.1.



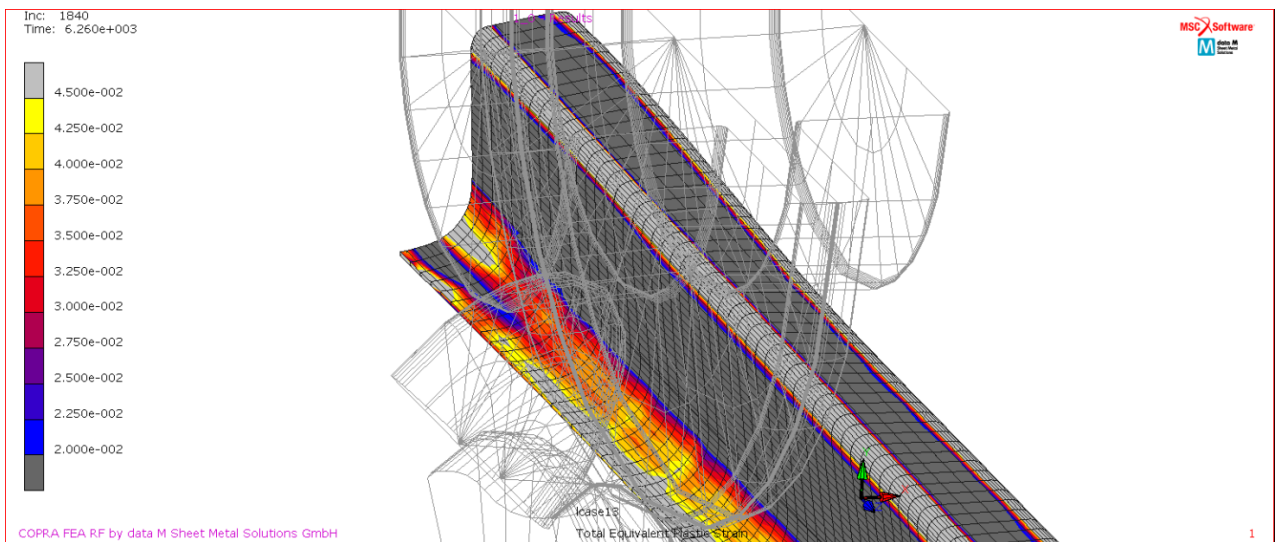
Rys. 82. Wybór punktu pomiarowego (węzła siatki) w analizie odkształceń wzdłużnych

Na rys. 83-85 pokazano mapy odkształceń plastycznych dla wybranych stacji profilujących, natomiast wykresy z rys. 86 obrazują przebieg odkształcenia wzdłużnego w profilowanym materiale na krawędziach pasma giętego dla analizowanych profili elektrod. Obliczenia wykonano dla wszystkich zdefiniowanych stacji roboczych.

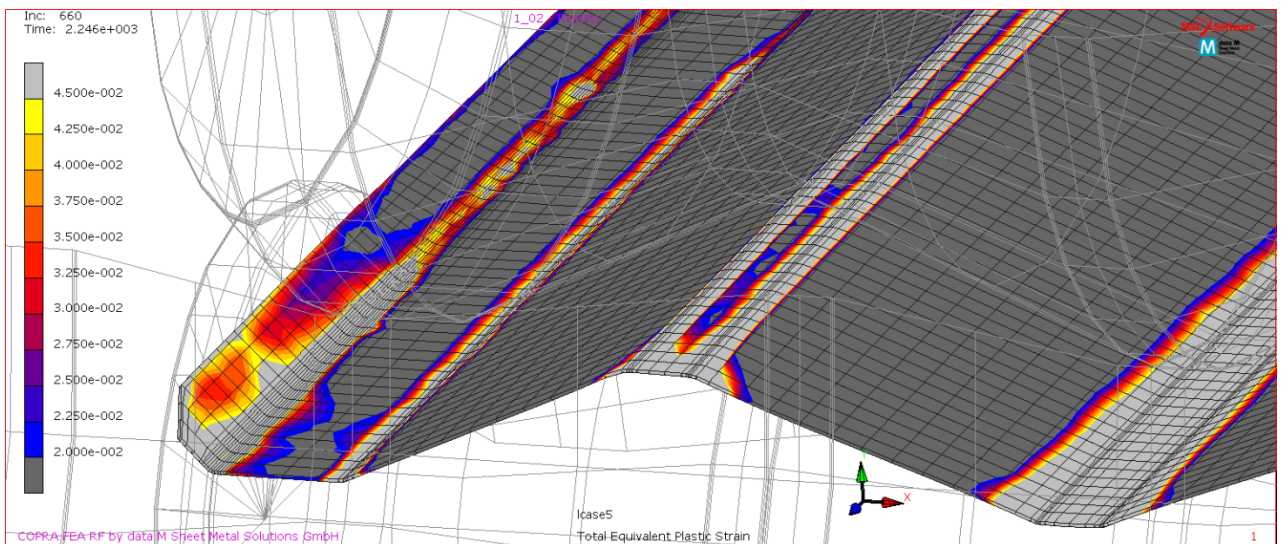
Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że dla elektrody typu Sigma i rynnowej zidentyfikowane wartości odkształcenia są wynikiem zarówno rozciągania, jak i ściskania materiału (wartości dodatnie i ujemne na poniższych wykresach). Tylko w przypadku profilu ZT24 uwidacznia się znacznie większy udział odkształceń wywołanych rozciąganiem taśmy. Rozkład odkształcenia wzdłużnego podczas profilowania profilu płytowego (ZT24) jest najbardziej wyrównany. Kształtownik ten charakteryzuje się największymi wartościami odkształcenia zidentyfikowanego na krawędzi profilowanej taśmy (maksimum  $\sim 0,82\%$  dla stacji nr 12). Na jedenastu stacjach profilujących wartość odkształcenia przekracza maksymalne odkształcenie sprężyste pasma giętego  $e_{gr}=0,31\%$ , które wyliczono z zależności (33). Profil rynnowy charakteryzuje się największymi wartościami odkształceń będących skutkiem ściskania taśmy. W tym przypadku dla stacji nr 5 otrzymano wartość odkształcenia  $\sim 0,38\%$ . W kolejnych rozdziałach zostanie przeprowadzona analiza redukcji grubości profilowanego materiału oraz sprawdzenie zaprojektowanych kształtowników pod kątem wystąpienia pęknięć, co stanowi w pewnym zakresie kontynuację badanego zagadnienia.



Rys. 83. Mapa zastępczych odkształceń plastycznych dla elektrody Sigma III – stacja 11

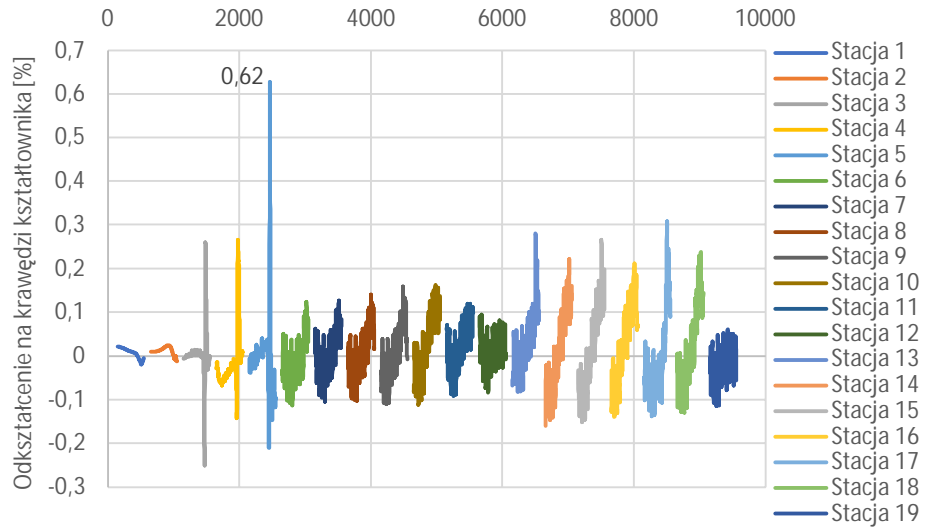


Rys. 84. Mapa zastępczych odkształceń plastycznych dla elektrody rynnowej – stacja 13

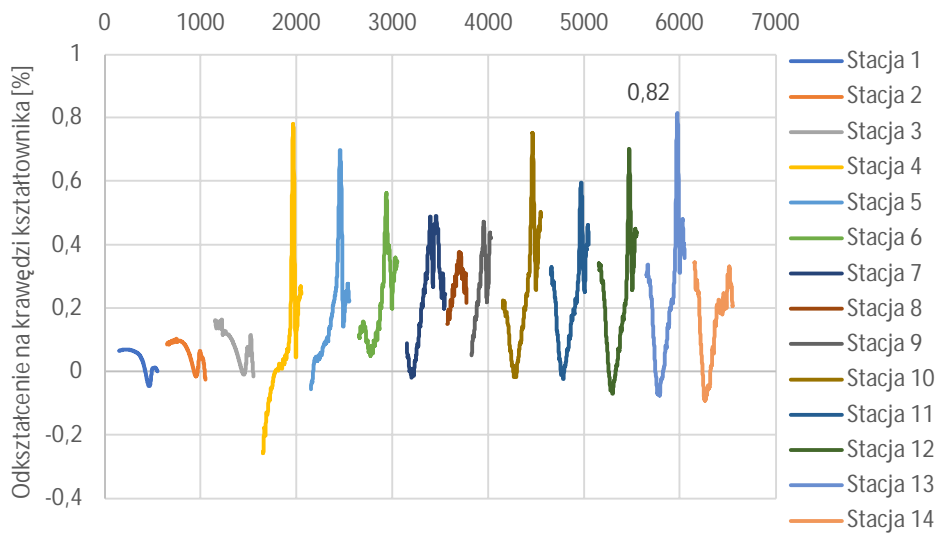


Rys. 85. Mapa zastępczych odkształceń plastycznych dla elektrody ZT24 – stacja 5

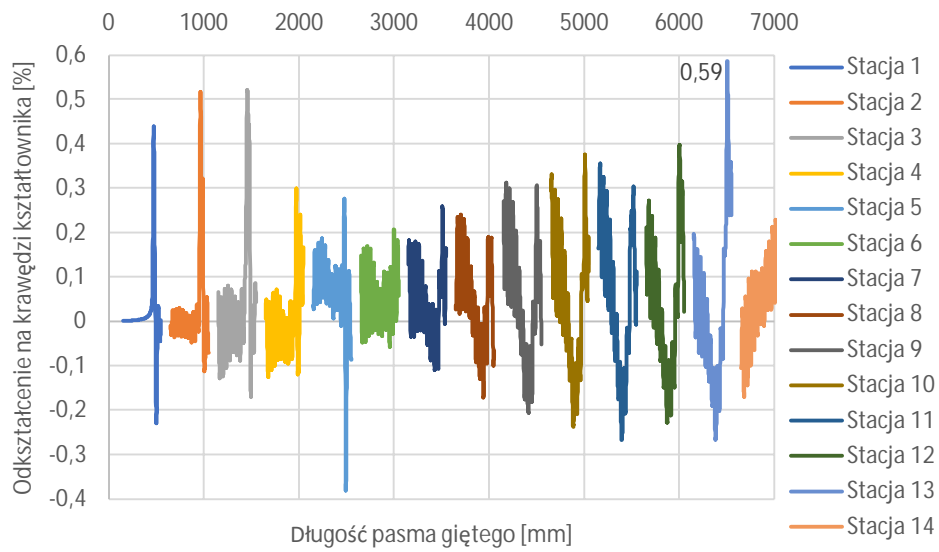
a)



b)



c)



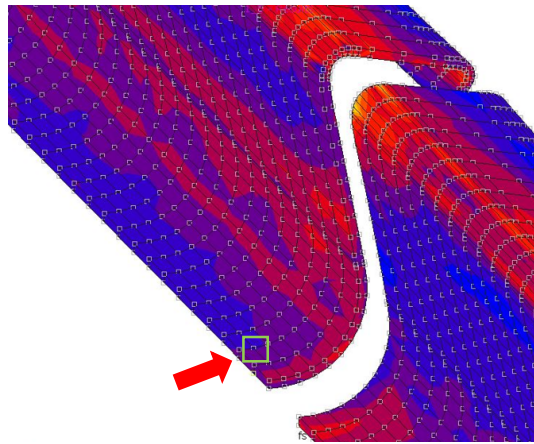
Rys. 86. Rozkład odkształcenia wzdłużnego w paśmie giętym dla wszystkich stacji profilujących:  
a) Sigma III, b) ZT24, c) profil rynnowy

## 11.8 Ocena stopnia pocienienia materiału oraz zmiany szerokości pasma giętego podczas wielotaktowego gięcia rolkowego

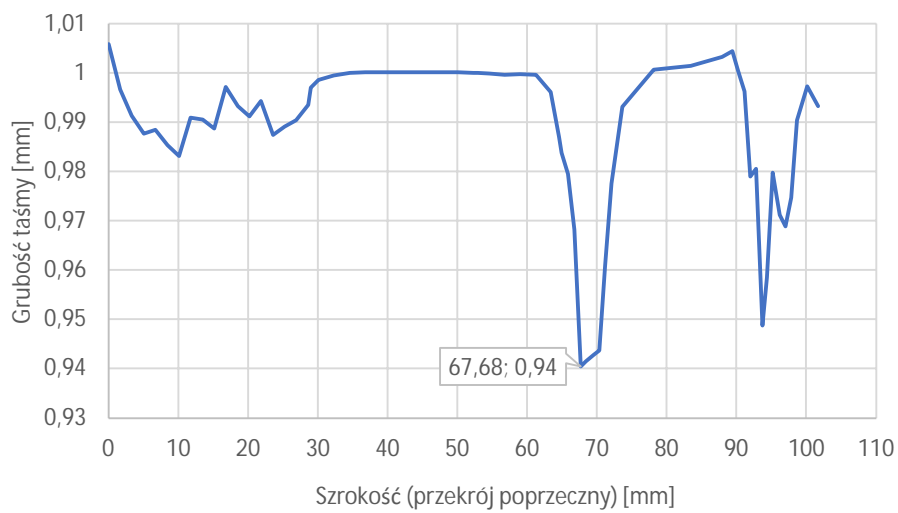
W procesie profilowania kształtowników w strefach gięcia występuje zjawisko pocienienia taśmy stalowej. Na wielkość pocienienia ma wpływ m.in. grubość materiału, zastosowane kąty gięcia w poszczególnych przepustach oraz przyjęta metoda kalibrowania. Pocienienie jest zjawiskiem niekorzystnym. Jego wpływ uwidacznia się szczególnie podczas profilowania kształtowników charakteryzujących się bardzo dużą liczbą zagięć. Norma DIN 6935 [184] dopuszcza dla kształtowników ogólnego przeznaczenia zmniejszenie grubości profilowanego kształtownika do 20% grubości wsadu technologicznego. W praktyce inżynierskiej firmy zajmujące się analizami numerycznymi przyjmują za wartość krytyczną 25% pocienienia materiału [16]. W założeniu pracy planowano produkcję profili elektrod zbiorczych z cieńszej od bazowej (1,5 mm) taśmy stalowej, co daje redukcję masy odpowiednio: 16,7% dla  $g=1,25$  mm i 33,3% dla  $g=1$  mm. Mając na uwadze trzy różne przekroje poprzeczne elektrod zbiorczych oraz trzy różne grubości taśmy stalowej, sprawdzono w jakim stopniu ten parametr wpływał na wartość pocienienia pasma giętego.

Dodatkowo przeprowadzono ocenę wpływu omawianego czynnika na zmianę szerokości pasma giętego po jego przejściu przez wszystkie stacje profilujące. W tym przypadku wyniki analizy numerycznej odniesiono do teoretycznej długości rozwinięcia każdego typu elektrody osadczej. Powyższe informacje są istotne z uwagi na aspekty technologiczne, jak również eksploatacyjne. Należy nadmienić, że sekcja elektrod zbiorczych w elektrofiltrze poddawana jest cyklicznym udom mechanicznym w celu oczyszczenia płata z nagromadzonego pyłu. Strefy gięcia płyt elektrod są obszarami o największym ryzyku wystąpienia pęknięć. Określenie rzeczywistego przyrostu szerokości taśmy pozwala na optymalizację materiałową (szerokość rozwinięcia kształtownika) oraz ewentualne korekty w konstrukcji zestawów profilujących. Analizę porównawczą przeprowadzono dla taśmy stalowej zimnowalcowanej w gatunku DC01, dla której zdefiniowano średnią wartość granicy plastyczności  $R_e$  z danych pomiarowych (rozdział 10.1). Analogicznych zależności poszukiwano w przypadku procesu profilowania płyty elektrody rynnowej wykonanej z taśmy o grubości 1,0 mm w gatunku DC01, 1.4541 i Corten A. Dla wyszczególnionych gatunków jako dane materiałowe definiowano parametry krzywej umocnienia.

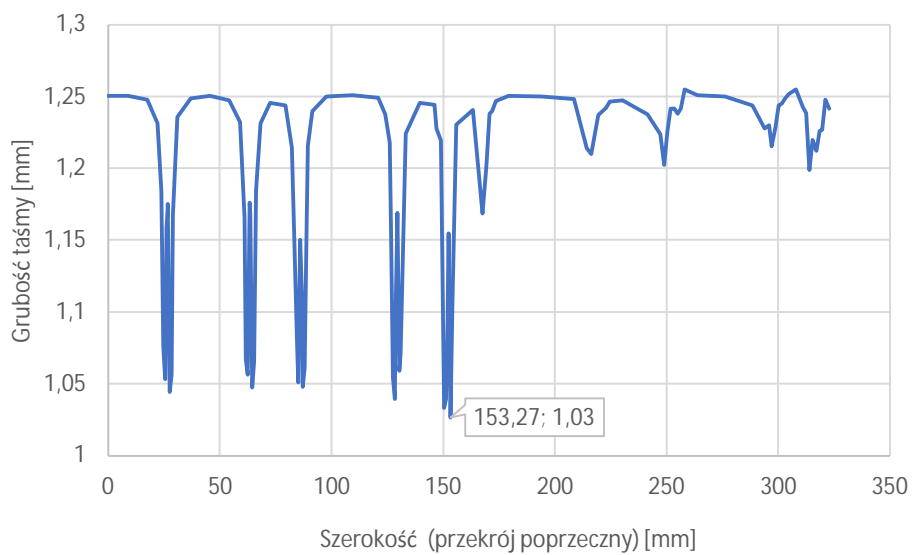
Pomiar pocienienia i wydłużenia taśmy został wykonany w gotowych (wyprofilowanych numerycznie) kształtownikach po procesie cięcia na wymiar w odległości 3 elementów skończonych od krawędzi cięcia – rys. 87. Elektrode Sigma III i rynnową analizowano jako profile symetryczne (1/2 przekroju poprzecznego). Największe wartości pocienienia materiału zidentyfikowano dla Sigma III – element kształtownika nr 51 (przetłoczenie), dla ZT24 – element kształtownika nr 8, dla profilu rynnowego – element kształtownika nr 4. Przykładowe rozkłady pocienienia materiału na szerokości profilowanych elektrod pokazano na rys. 88-90 (analizy numeryczne dla średniej wartości  $R_e$ ). Na rys. 91 zobrazowano wpływ grubości taśmy stalowej na wartość pocienienia pasma giętego (przy przyjętej średniej wartości  $R_e$ ). Wykres prezentuje maksymalne wartości pocienienia materiału.



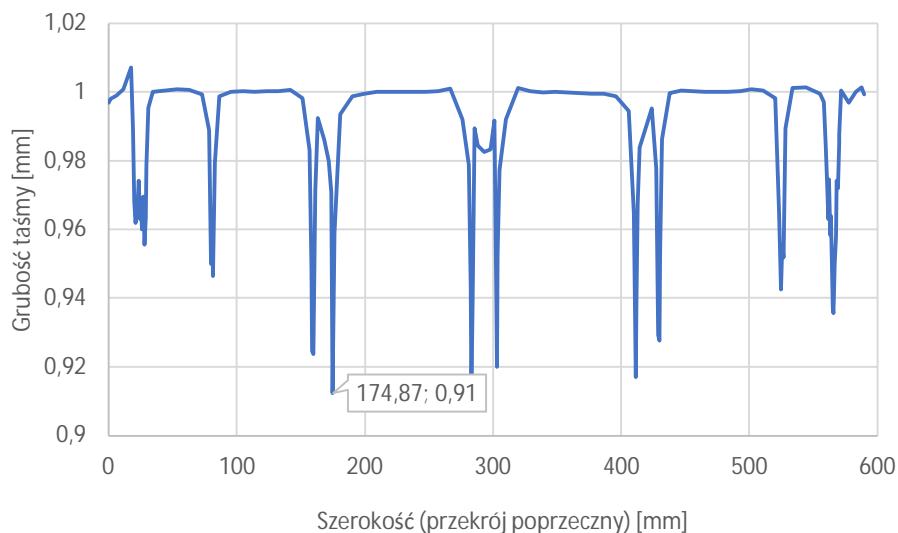
Rys. 87. Lokalizacja miejsca wykonania pomiaru pocienienia i wydłużenia taśmy stalowej dla profilu rynnowego



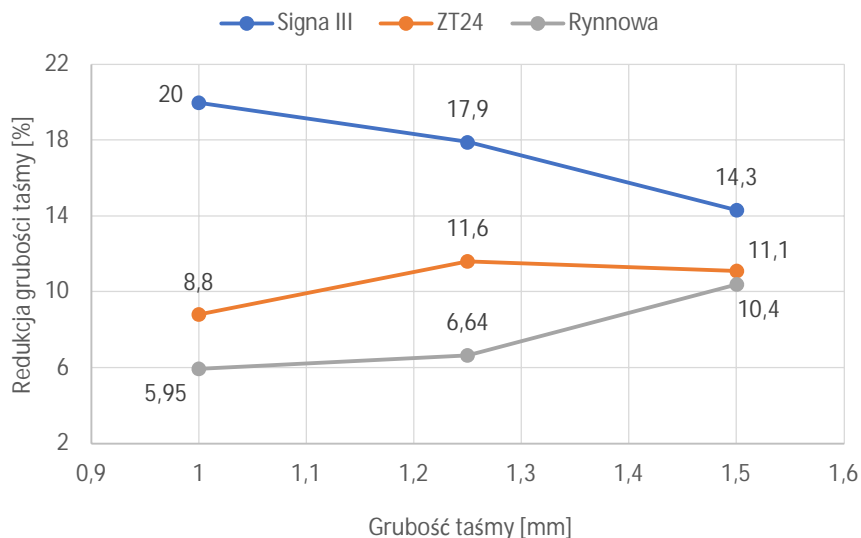
Rys. 88. Rozkład pocienienia taśmy na szerokości profilowanej elektrody zbiorczej rynnowej o grubości 1,0 mm



Rys. 89. Rozkład pocienienia taśmy na szerokości profilowanej elektrody zbiorczej Sigma III o grubości 1,25 mm



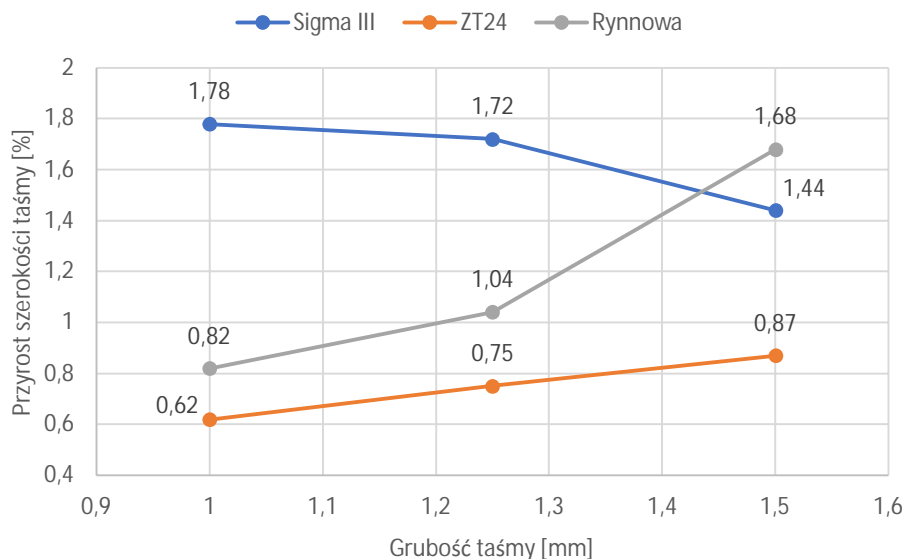
Rys. 90. Rozkład pocienienia taśmy na szerokości profilowanej elektrody zbiorczej ZT24 o grubości 1,0 mm



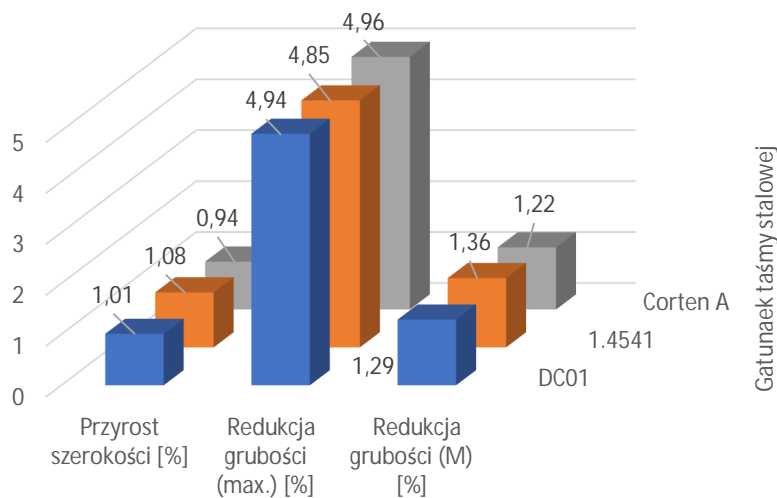
Rys. 91. Redukcja grubości wsadu technologicznego (wartości maksymalne) w zależności od typu elektrody i typoszeregu grubości kształtownika

Krzywe na rys. 91 dowodzą, że największą redukcją grubości taśmy charakteryzuje się profil typu Sigma III ~20%. Omawiany parametr zmniejsza swoją wartość wraz z wzrostem grubości materiału. Najmniejszy ubytek grubości wykazał profil rynnowy (5,95%), przy profilowaniu taśmy  $g=1,0$  mm. Można zauważyć wyraźny wzrost tego parametru od grubości pośredniej tj. 1,25 mm. Na rys. 92 przedstawiono zależność obrazującą procentowy przyrost szerokości pasma giętego od grubości zastosowanego materiału (średnia wartość  $R_e$ ). Na rys. 93 zestawiono wartości omawianych parametrów w odniesieniu do trzech gatunków taśmy stalowej zdefiniowanej na podstawie parametrów krzywej umocnienia (elektroda osadca rynnowa o grubości  $g=1,0$  mm).





Rys. 92. Zmiana szerokości taśmy stalowej w zależności od typu elektrody zbiorczej i grubości kształtownika

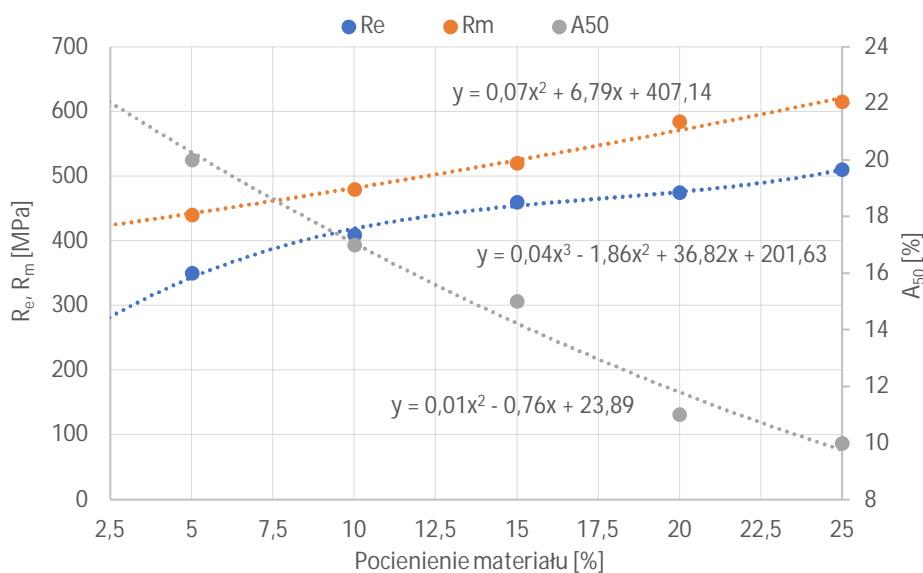


Rys. 93. Porównanie wartości poszerzenia i pocienienia pasma giętego podczas profilowania elektrody zbiorczej rynnowej o grubości 1,0 mm

Największy przyrost szerokości taśmy stalowej wykazał profil Sigma III - 1,78% dla materiału o grubości 1,0 mm. W przypadku profilu Sigma przyrost szerokości wykazuje tendencję spadkową wraz z wzrostem grubości wsadu technologicznego. Odwrotną zależnością charakteryzuje się profil rynnowy dla którego wzrost względnego wydłużenia pasma jest wyraźny w całym zakresie analizowanych grubości materiału. Dla płyty elektrody ZT24 zależność ma postać liniową co zobrazowano na rys. 92. Analizując zestawienie porównawcze z rys. 93 można wysunąć wniosek, że zakres względnego poszerzenia i pocienienia profilowanego materiału dla wszystkich analizowanych gatunków taśmy jest zbliżony. Powyższa zależność może stanowić wskazówkę na etapie projektowania profilowania elektrod i konstrukcji zestawów profilujących.

W wyniku odkształceń w strefach zginania kształtowników, wykonywanych za pomocą procesu profilowania, następuje umocnienie materiału w strefach gięcia, co skutkuje powstaniem zmian właściwości mechanicznych nie tylko w tych obszarach, ale również w przyległych odcinkach prostych. Wykorzystując dane literaturowe [172] oraz wyniki badań własnych (stopień pocienienia materiału) oszacowano zmianę właściwości mechanicznych analizowanych typów kształtowników w zależności od stopnia gniotu materiału. Dane dotyczące tej kwestii ilustruje rys. 94. Dane pomiarowe pokazane na poniższym rysunku aproksymowano wielomianem drugiego i trzeciego stopnia. Na podstawie otrzymanych równań wyliczono zakresy wartości granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia finalnych produktów. Analizę porównawczą zestawiono w tabelicy 60. Przedstawione zakresy właściwości mechanicznych dotyczą produkcji elektrod zbiorczych o grubości 1, 1,5 mm wykonanych z taśmy stalowej zimnowalcowanej o parametrach ( $R_e=229$  MPa,  $R_m=345$  MPa,  $A_{80}=37\%$ ). Zdając sobie sprawę, że jest to oszacowanie przybliżone, gdyż otrzymana wartość pocienienia obliczona została przez program przy przyjęciu stałych właściwości mechanicznych, wyliczono zmianę  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$  podczas profilowania na podstawie danych literaturowych.

Ograniczenia czasowe i możliwości oprogramowania nie pozwoliły wykonać wielokrotnych symulacji z uwzględnieniem zależności materiałowych od lokalnego pocienienia materiału wsadu, co przybliżyłoby wyniki profilowania do rzeczywistego procesu jeszcze bardziej.



Rys. 94. Krzywe obrazujące zmianę właściwości mechanicznych profili elektrod zbiorczych w zależności od stopnia pocienienia materiału

Szczegółowa analiza problemu potwierdziła, że w wyniku profilowania możliwe jest uzyskanie elektrod osadczych o zwiększonych właściwościach wytrzymałościowych i tym samym zwiększenie żywotności tych wyrobów przy minimalnej ich masie. Wzrostowi  $R_e$  i  $R_m$  towarzyszy jednoczesny spadek wydłużenia.

Tablica 60. Zmiana właściwości mechanicznych profilowanych elektrod w zależności od stopnia gniotu

Typ elektrody zbiorczej	Właściwości mechaniczne gotowego produktu		
	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A <sub>50</sub> [%]
Sigma	519, 571	460, 514	13, 15
ZT 24	472, 491	421, 443	17, 18
Rynnowa	450, 485	379, 437	17, 20
Wzrost / spadek względem wartości parametrów opisujących wsad technologiczny [%]			
Sigma	58	112,7	37,6
ZT 24	39,7	88,6	46,8
Rynnowa	35,7	78,2	49,7
(*) Odniesiono do wartości środkowych R <sub>e</sub> , R <sub>m</sub> , A <sub>50</sub> podanych przedziałów			

Z przytoczonych danych liczbowych wynika, że profil typu Sigma charakteryzuje się największym wzrostem wartości granicy plastyczności ~112,7% oraz wytrzymałości na rozciąganie ~58%. Można zauważyć, że granica plastyczności jest parametrem, który wyróżnia największy wzrost procentowy (78, 113%). Zmiana wartości R<sub>e</sub> jest najbardziej zauważalna w zakresie 2,5, 10% pocienienia materiału - rys. 94. Przedstawiona w rozdziale metodyka pomiaru parametrów mechanicznych może być wykorzystana w wstępnej fazie opracowywania nowego produktu.

### 11.9 Weryfikacja opracowanych modeli numerycznych w zakresie wystąpienia pęknięć

Jednym z kryteriów oceny poprawności przyjętej strategii gięcia blach jest Graniczna Krzywa Tłoczności (FLD – Forming Limit Diagram), dzięki której możliwe jest zweryfikowanie opracowanego procesu technologicznego gięcia. Wspomniane kryterium jest powszechnie stosowane w analizach tłoczenia blach. Narzędzie FLD dostarcza informacji, jak można formować określony gatunek stali i czy obliczone odkształcenia znajdują się w bezpiecznym obszarze formowania. Oprogramowanie Copra FEA również bazuje na wykresie FLD jako kryterium pęknięcia materiału. W pierwszym etapie wyliczono rozkład odkształceń w przekrojach poprzecznych analizowanych kształtowników dla każdego węzła siatki. Punkt pomiarowy definiowano analogicznie, jak w przypadku pomiaru grubości taśmy stalowej. Obliczone przez oprogramowanie odkształcenia główne: większe  $\epsilon_1$  (major strain) i mniejsze  $\epsilon_2$  (minor strain) zestawiono na poniższych wykresach wraz z krzywą formowania (FLC – Forming Limit Curve). Punkt FLD<sub>0</sub> na wykresie wyliczono z zależności (34) [8] dla trzech rozpatrywanych gatunków stali, bazując na grubości taśmy oraz wykładniku n obliczonym na podstawie statycznej próby rozciągania. Punkt FLD<sub>0</sub> jest punktem przecięcia Krzywej Formowania FLC z osią, gdzie wartość mniejszych odkształceń głównych  $\epsilon_2=0$ . Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 61.

$$FLD_0 = (67,304 * t + 110,95) * n \quad (34)$$

gdzie:

FLD<sub>0</sub> – punkt przecięcia krzywej formowania z osią dla której wartość odkształceń  $\epsilon_2=0$  [%];

t – grubość taśmy, mm;

n – wykładnik potęgowy krzywej umocnienia.

Krzywą formowania wykreślono jako wykres funkcji  $y=f(x)$ , gdzie:  $y$  – główne odkształcenia  $\epsilon_1$ ,  $x$  – główne odkształcenia  $\epsilon_2$ . Kształt krzywej formowania (lewa i prawa strona FLC) określono na podstawie zależności (35-36) biorąc pod uwagę wartości odkształceń  $\epsilon_2$ . Na rys. 95 przedstawiono wykresy Forming Limit Diagram dla analizowanych profili elektrod zbiorczych, przy uwzględnieniu grubości materiału. Na wykresach wykreślono krzywą formowania FLC dla gatunku taśmy stalowej DC01 i grubości 1 mm.

$$\epsilon_1 = \{0,3 - \epsilon_2; \epsilon_2 \leq 0\} [\%] \quad (35)$$

$$\epsilon_1 = \{0,3 + 0,5 * \epsilon_2 - 0,3 * \epsilon_2^2; \epsilon_2 > 0\} [\%] \quad (36)$$

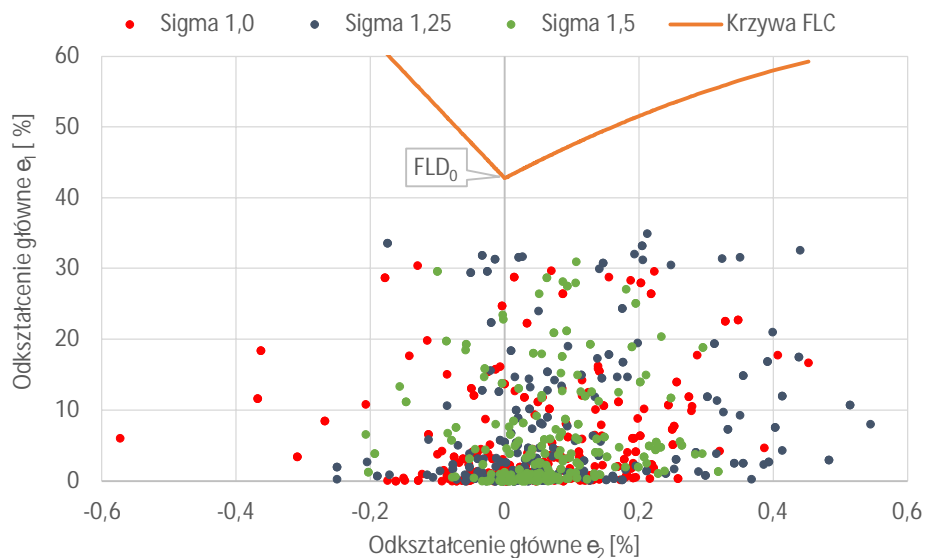
Wykres FLD można podzielić na dwie części. Przy wartości mniejszych odkształceń głównych  $\epsilon_2 > 0$  występuje rozciąganie materiału, natomiast przy  $\epsilon_2 < 0$  jego ścinanie.

Tablica 61. Wartości punktu  $FLD_0$  wyliczone dla analizowanych gatunków stali

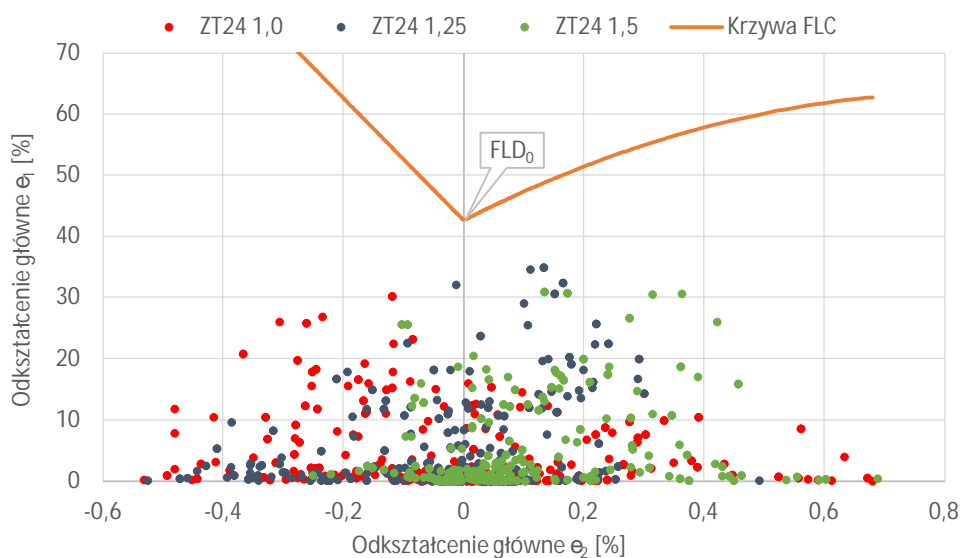
Gatunek materiału	Grubość materiału [mm]			Zmniejszenie wartości $FLD_0$ względem bazowej [%]	
	$g=1,5$	$g=1,25$	$g=1,0$	$g=1,25$	$g=1,0$
	$FLD_0$ [%]			$g=1,25$	$g=1,0$
DC01	50,9	46,8	42,8	4,0	8,1
CORTEN A	42,4	39,0	35,7	3,4	6,7
1.4541	127,1	117,0	107,0	10,1	20,2

(\*) - wartość bazowa  $g=1,5$  [mm]

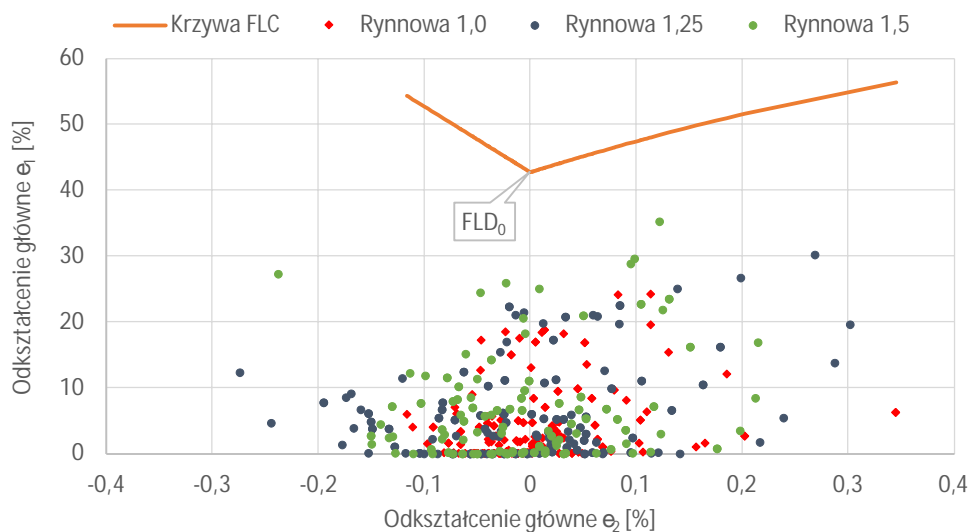
a)



b)



c)



Rys. 95. Wykresy FLD (Forming Limit Diagram) opracowane dla elektrod: a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa ze stali DC01

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że we wszystkich analizowanych przypadkach wartości odkształceń głównych nie przekroczyły granicy utworzonej przez krzywe formowania FLC. Dotyczy to wszystkich rozpatrywanych gatunków stali. Opracowane projekty zostały poprawnie ocenione pod względem możliwości wystąpienia ewentualnych pęknięć. Najszerszy rozrzut wartości odkształceń  $\epsilon_2$  zidentyfikowano dla profilu płytowego ZT24. Stal trudnordzewiejąca Corten A stosowana na elektrody zbiorcze wykazała najmniejszą wartość  $FLD_0$  spośród rozpatrywanych gatunków stali. Zmiana grubości taśmy stalowej na elektrody zbiorcze z powyższego gatunku z 1,5 do 1,0 mm powoduje obniżenie położenia punktu  $FLD_0$  o 6,7% co jest wartością najmniejszą otrzymaną w przedmiotowej analizie. Stal nierdzewna okazała się materiałem, który wraz z redukcją grubości powoduje ponad 20% obniżenie położenia krzywej formowania FLC.

## 11.10 Identyfikacja stanu naprężenia i odkształcenia w procesie profilowania

Przedmiotem rozważań w tym rozdziale jest analiza stanu naprężenia i odkształcenia, zidentyfikowanych w profilowanych kształtownikach na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych. Podstawowy problem przedmiotowej analizy sprowadza się do postawienia pytania, czy i w jakim zakresie grubość materiału wsadowego przeznaczonego do produkcji elektrod zbiorczych oddziałuje na powyższe wielkości. W tym celu posłużono się parametrycznym testem wartości oczekiwanej (średniej).

W pierwszym kroku przedstawiono graficznie rozkład składowej naprężenia normalnego w kierunku profilowania – rys. 96 w trzech analizowanych profilach elektrod osadczych, uwzględniając wszystkie stacje profilujące (podano maksymalne wartości naprężenia zidentyfikowanego w strefach gięcia). Podobnie, jak w poprzednich analizach materiał profilowany został zdefiniowany przez określenie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia. Przyjęto wartości średnie, które wyszczególnione zostały w rozdziale dotyczącym analizy statystycznej wsadu technologicznego (10.1).

Dla elektrody rynnowej o grubości 1,0 mm analizowano dodatkowo rozkład naprężeń zastępczych Hubera-von Misesa-Hencky'ego (H-M-H) i odkształceń zastępczych, porównując trzy różne gatunki stali, gdzie wsad technologiczny został opisany na podstawie parametrów krzywej umocnienia. Wartości intensywności naprężenia i odkształcenia oraz ich składowe wyliczone zostały przez oprogramowanie wg zależności (37-38):

$$\sigma_{zast} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (37)$$

gdzie:

$\sigma_{zast}$  – naprężenie zastępcze, [Pa];

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – składowe tensora naprężenia, naprężenia główne, [Pa].

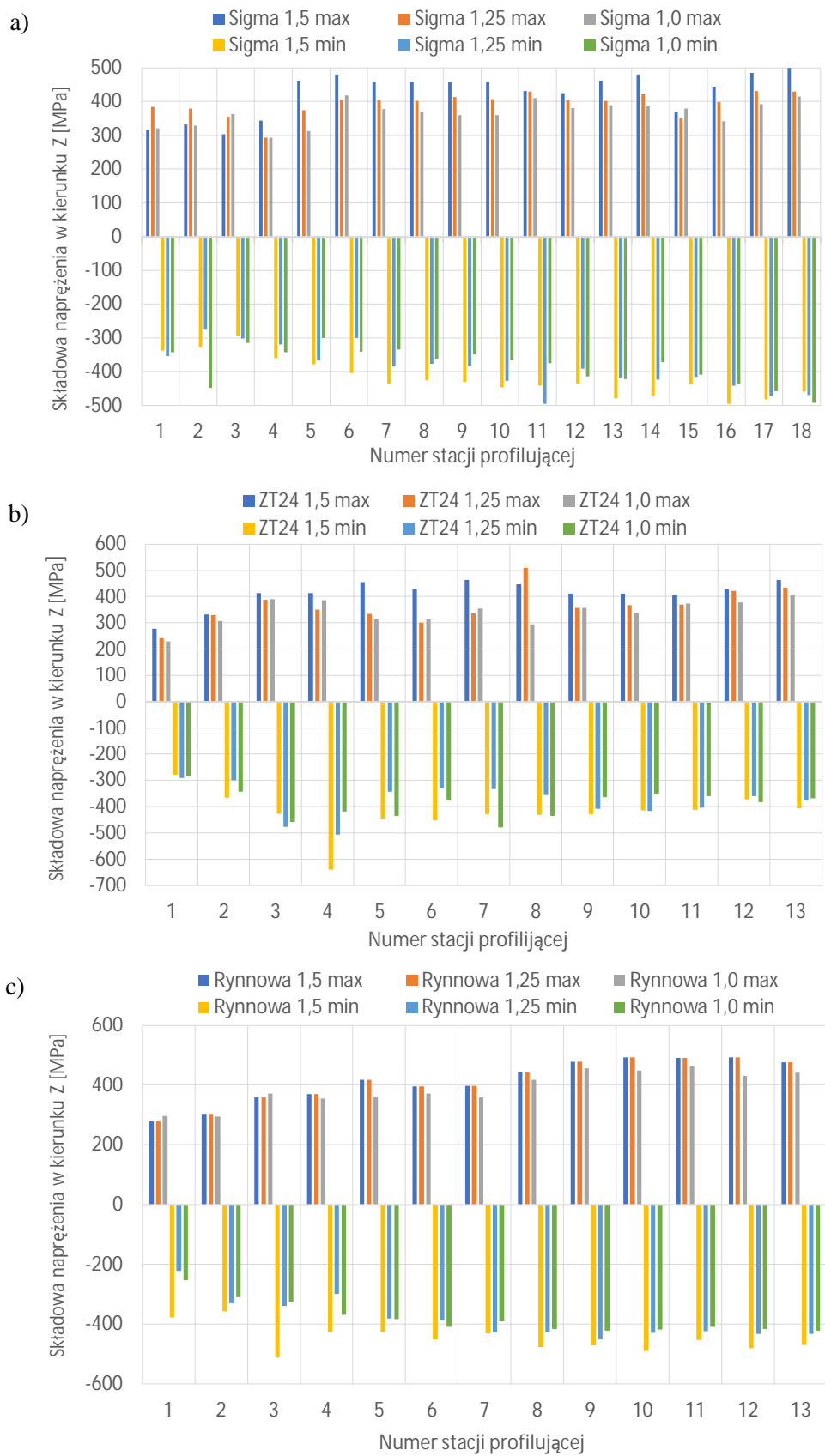
$$\varepsilon_{zast} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (38)$$

gdzie:

$\varepsilon_{zast}$  – odkształcenie zastępcze, [-];

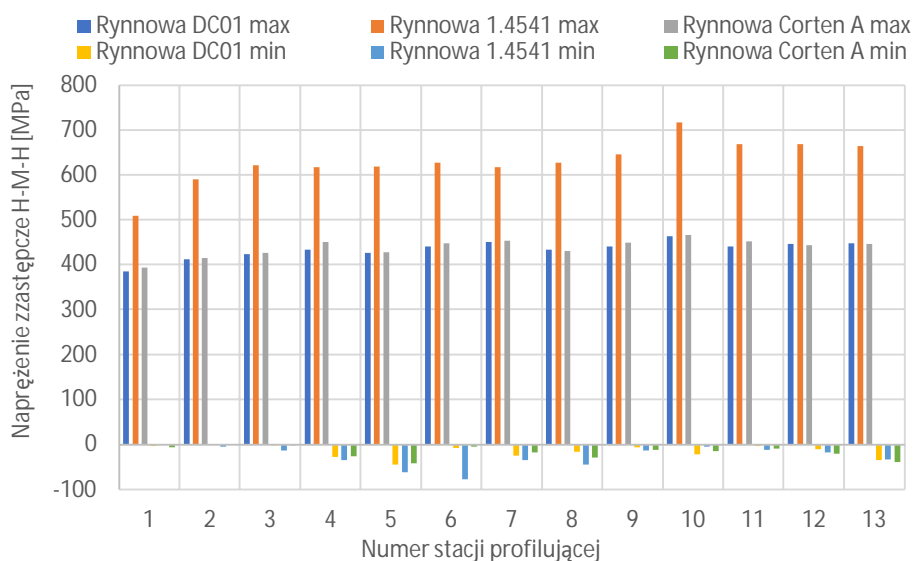
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – składowe tensora odkształcenia, odkształcenia główne, [-].

W większości przypadków wartość składowej naprężenia normalnego w kierunku profilowania, wyliczonego przez oprogramowanie nie przekroczyła 500 MPa. Dla profilu ZT24 i rynnowego ( $g=1,5$  mm) zauważono nieznaczne przekroczenie tej granicy, odpowiednio dla przepustu 4 i 8 (ZT24) oraz 3 (rynnowa). Dla profilu ZT24 ( $g=1,5$  mm) – stacja nr 4, odnotowano największą wartość analizowanej składowej naprężenia - około 640 MPa. Można przypuszczać, że jest to błąd obliczeniowy, ponieważ otrzymane wartości na pozostałych stacjach nie wykazują tendencji wzrostowych. Jak można zauważyć na rys. 96, tylko profil rynnowy charakteryzuje się pewną prawidłowością tj. wartość składowej naprężenia zastępczego maleje wraz z redukcją grubości materiału profilowanego.



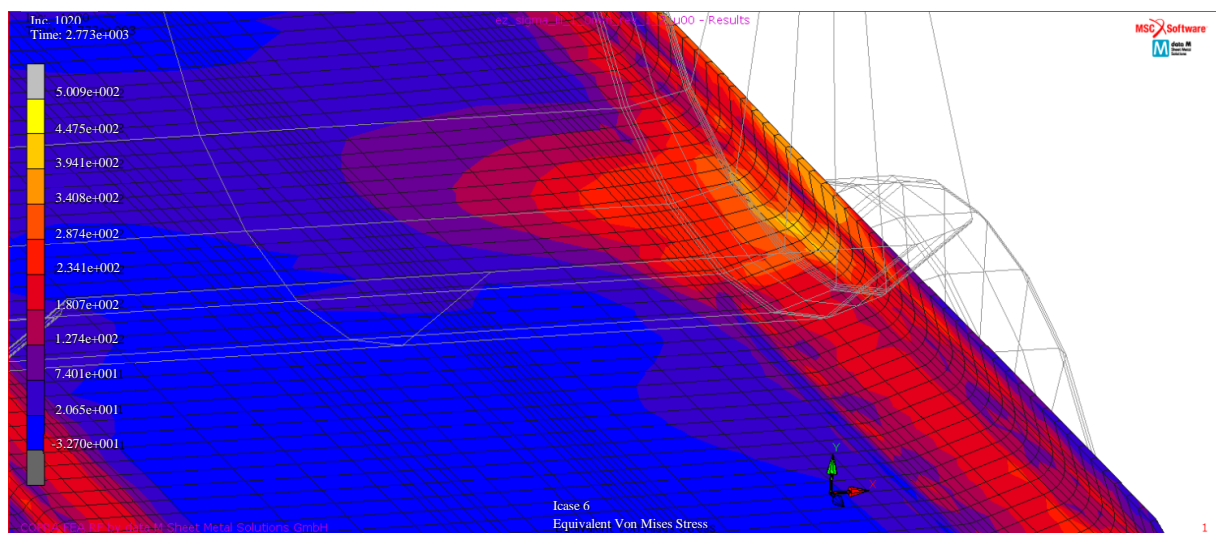
Rys. 96. Rozkład naprężenia normalnego w kierunku profilowania (Z) na poszczególnych stacjach profilujących: a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa (stal DC01)

Rozpatrując natomiast wstępne wyniki symulacji zestawione na rys. 97 nasuwa się następujący wniosek. Różnica średniej wartości naprężenia zastępczego uzyskanego dla stali nierdzewnej i węglowej wynosi ~196 MPa. Dla gatunków DC01 i Corten A różnica ta wynosi ~4%.



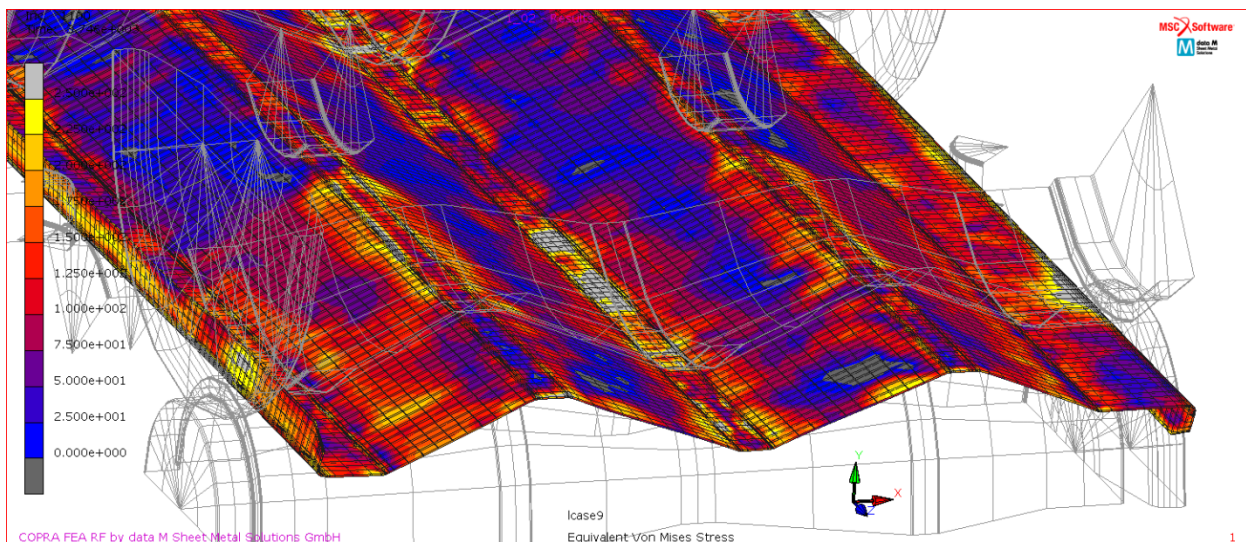
Rys. 97. Porównanie wpływu gatunku stali na wartości maksymalne i minimalne naprężenia zastępczego H-M-H na poszczególnych stacjach profilujących dla profilu rynnowego ( $g=1,0$  mm)

Na rys. 98-100 zobrazowano przykładowe mapy naprężeń zastępczych H-M-H otrzymane dla wybranych stacji profilujących. Graficzna prezentacja wyników wskazuje, że obszary kontaktu rolek profilujących z taśmą stalowa w miejscach gięcia charakteryzują się największymi wartościami omawianego parametru. Bazując na danych literaturowych [172] wykorzystanych na rys. 94 można wnioskować, że otrzymane wartości naprężenia zastępczego  $> R_e=229$  MPa (referencyjny parametr wsadu technologicznego) nie spowodują uszkodzenia materiału, gdyż w rzeczywistości właściwości mechaniczne wzrosną, ze względu na umocnienie materiału pasma giętego w strefach gięcia, co wiąże się bezpośrednio ze wzrostem granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. Ma to potwierdzenie w praktyce produkcyjnej m.in. przedsiębiorstwa Budmat [81].

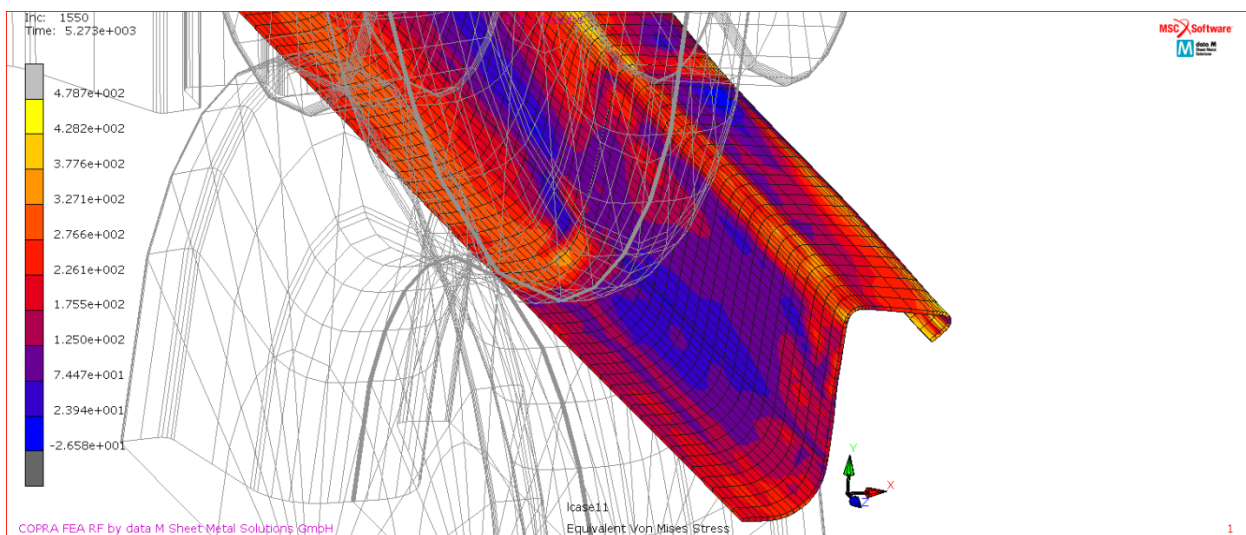


Rys. 98. Mapa naprężenia zastępczego H-M-H (elektroda zbiorcza Sigma – stacja nr 6)



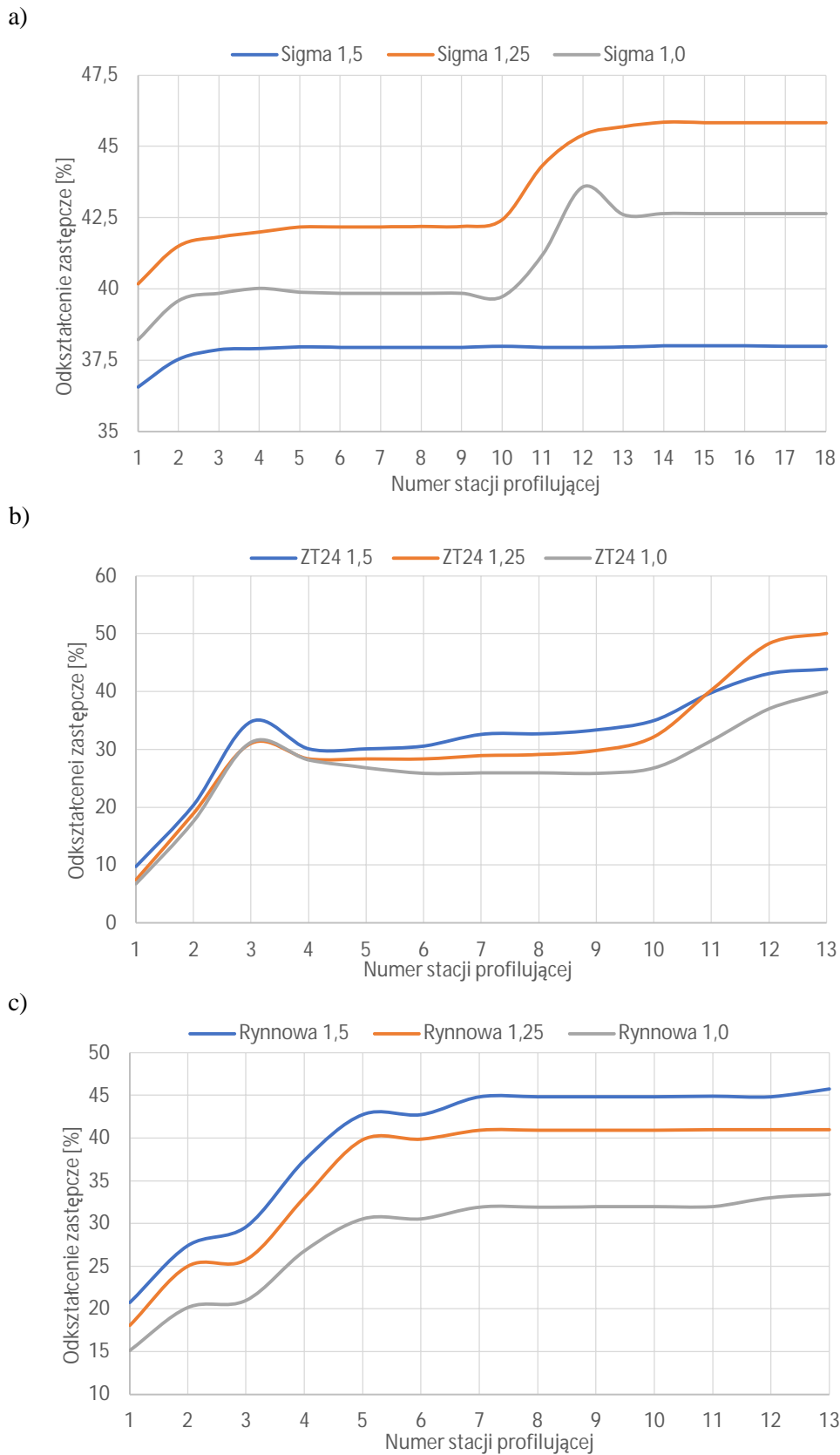


Rys. 99. Mapa naprężenia zastępczego H-M-H (elektroda zbiorcza ZT24 – stacja nr 9)

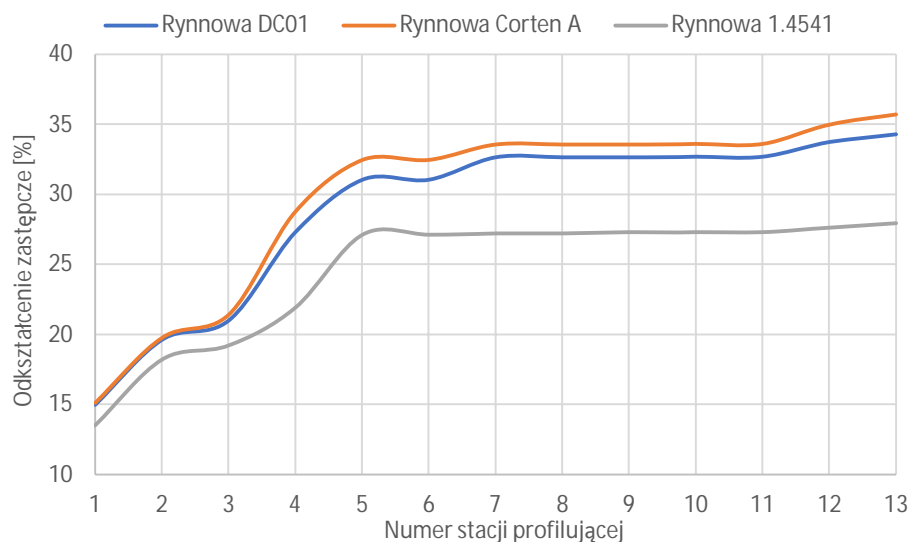


Rys. 100. Mapa naprężenia zastępczego H-M-H (elektroda zbiorcza rynnowa – stacja nr 11)

Na rys. 101-102 przedstawiono rozkład wartości odkształcenia zastępczego w paśmie giętym dla wszystkich analizowanych kształtowników. W analizie uwzględniono wartości maksymalne. Dane przedstawione na rys. 101 skłaniają do stwierdzenia, że tylko w przypadku elektrody rynnowej i ZT24 spadek grubości profilowanego materiału powoduje wyraźną redukcję wartości odkształcenia zastępczego na wszystkich stacjach profilujących. Dla profilu ZT24 krzywe na poniższym wykresie charakteryzują się podobną prawidłowością tylko do stacji nr 11, gdzie uwidacznia się tendencja wzrostu odkształcenia zastępczego (taśma  $g=1,25$  mm). Osiąga ono wartość największą  $\sim 50\%$ . Symulacja numeryczna profilowania płyty elektrody zbiorczej typu Sigma wykazała, że najmniejsze wartości odkształcenia zastępczego występują dla wsadu technologicznego o grubości 1,5 mm. Krzywa na poniższym wykresie wskazuje, że otrzymane wartości odkształcenia pomiędzy stacjami profilującymi 2-18 są na bardzo zbliżonym poziomie tzn. około 38%. Analizując proces gięcia profilowanego materiału można stwierdzić, że wzrost sumarycznego kąta gięcia na kolejnych stacjach profilujących nie wpływa na zmianę omawianego parametru.



Rys. 101. Rozkład wartości maksymalnego odkształcenia zastępczego w paśmie giętym:  
 a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa (stal DC01)



Rys. 102. Porównanie wpływu gatunku stali na wartość maksymalnego odkształcenia na poszczególnych stacjach profilujących dla profilu rynnowego ( $g=1,0$  mm)

Rezultaty analizy porównawczej – rys. 102 wskazują, że najmniejsze wartości odkształcenia zidentyfikowane zostały w kształtowniku wykonanym z stali nierdzewnej. Maksymalna wartość  $\epsilon_{zastępcze}$  dla stacji nr 13 wynosi  $\sim 28\%$ . Stale węglowe gatunku DC01 i Corten A wykazały zbliżony trend wzrostu i spadku analizowanego parametru. Warto również nadmienić, że nie otrzymano znaczącej różnicy wyników definiując materiał, zarówno na podstawie średniej wartości:  $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$ , jak również poprzez określenie parametrów krzywej umocnienia (elektroda zbiorcza rynnowa  $g=1,0$  mm). W dalszej części rozdziału przeprowadzono analizę porównawczą otrzymanych wyników symulacji numerycznych. Główną przesłanką była chęć pokazania rozrzutu wyników oraz określenie wpływu zmiany grubości wsadu technologicznego na analizowane parametry. Wyniki badań odnośnie ww. kwestii przedstawiono w tablicach 62-65. W tablicach 62-63 zestawiono przedziały ufności oraz dokładność oszacowania dla średnich wartości naprężenia i odkształcenia zastępczego. Wartości odkształcenia zastępczego podano bezwymiarowo.

Tablica 62. Przedziały ufności dla średniej wartości naprężenia zastępczego H-M-H

Typ elektrody	Grubość taśmy [mm]	Przedział ufności dla średniej wartości naprężenia zastępczego [MPa]	Dokładność oszacowania $B(\bar{x})$ [MPa]
<i>Oszacowanie na podstawie średniej wartości <math>R_e</math>, <math>R_m</math> i <math>A_{80}</math> (DC01)</i>			
Sigma	1	$549,2 < s_{zastępcze} < 564,1$	14,9
	1,25	$575,7 < s_{zastępcze} < 602,5$	13,4
	1,5	$555,4 < s_{zastępcze} < 581,3$	13
ZT24	1	$487,5 < s_{zastępcze} < 568,6$	40,5
	1,25	$488,9 < s_{zastępcze} < 584$	47,5
	1,5	$483,6 < s_{zastępcze} < 585,9$	51,1
Rynnowa	1	$442,9 < s_{zastępcze} < 475,5$	16,3
	1,25	$466,5 < s_{zastępcze} < 512,5$	23
	1,5	$496,5 < s_{zastępcze} < 546,4$	24,9
<i>Oszacowanie na podstawie parametrów krzywej umocnienia</i>			
Rynnowa	1,0 (DC01)	$422,2 < s_{zastępcze} < 445,7$	11,8
	1,0 (Corten A)	$426,6 < s_{zastępcze} < 449,7$	11,6
	1,0 (1.4541)	$600,3 < s_{zastępcze} < 659,2$	29,5

Tablica 63. Przedział ufności dla średniej wartości odkształcenia zastępczego

Typ elektrody	Grubość taśmy [mm]	Przedział ufności dla średniej wartości odkształcenia zastępczego	Dokładność oszacowania $B(\bar{x})$
<i>Oszacowanie na podstawie średniej wartości <math>R_e</math>, <math>R_m</math> i <math>A_{80}</math> (DC01)</i>			
Sigma	1	0,402 < e zastępcze < 0,445	0,01
	1,25	0,426 < e zastępcze < 0,445	0,01
	1,5	0,337 < e zastępcze < 0,379	0,002
ZT24	1	0,219 < e zastępcze < 0,319	0,05
	1,25	0,242 < e zastępcze < 0,376	0,67
	1,5	0,266 < e zastępcze < 0,375	0,05
Rynnowa	1	0,249 < e zastępcze < 0,321	0,04
	1,25	0,312 < e zastępcze < 0,408	0,05
	1,5	0,347 < e zastępcze < 0,447	0,05
<i>Oszacowanie na podstawie parametrów krzywej umocnienia</i>			
Rynnowa	1,0 (DC01)	0,251 < e zastępcze < 0,328	0,04
	1,0 (Corten A)	0,259 < e zastępcze < 0,339	0,04
	1,0 (1.4541)	0,217 < e zastępcze < 0,274	0,03

W kolejnym kroku wyliczona została średnia różnica zmiany wartości naprężenia i odkształcenia zastępczego, a następnie odchylenie standardowe dla tych wielkości. Wykorzystując test dotyczący wartości oczekiwanej (średniej) sprawdzono, czy zmiana grubości typoszeregu taśmy stalowej rzeczywiście powoduje wzrost lub spadek analizowanych parametrów. Sprawdzenie hipotezy realizowano wg zależności (39). Wyliczone zależności ilustrują dane zawarte w tablicy 64-65.

$$t = \frac{\Delta\bar{y}}{S\Delta\bar{y}} * \sqrt{n-1} \quad (39)$$

gdzie:

t – statystyka testowa;

$\Delta\bar{y}$  - średni przyrost, spadek wartości y (naprężenia i odkształcenia zredukowanego);

$S\Delta\bar{y}$  - odchylenie standardowe przyrostu, spadku wartości (naprężenia i odkształcenia zredukowanego).

Tablica 64. Analiza porównawcza w zakresie otrzymanych wartości naprężeń zastępczych H-M-H

Typ elektrody	Zmiana grubości typoszeregu taśmy [mm] / gatunku materiału	Średnia różnica zmiany s H-M-H [MPa]	Odchylenie standardowe zmiany s H-M-H [MPa]	Wartość statystyki empirycznej t	Siła efektu zmiany d Cohena
<i>Oszacowanie na podstawie średniej wartości <math>R_e</math>, <math>R_m</math> i <math>A_{80}</math> (DC01)</i>					
Sigma	1,0 @ 1,25	24,98	44,19	41,95	-0,87
	1,25 @ 1,5	-20,79	26,1	59,10	0,78
ZT24	1,0 @ 1,25	8,42	30,26	12,53	-0,12
	1,25 @ 1,5	-1,74	52,33	1,50	0,02
Rynnowa	1,0 @ 1,25	30,3	20,43	55,86	-0,93
	1,25 @ 1,5	31,92	25,98	55,32	-0,81
<i>Oszacowanie na podstawie parametrów krzywej umocnienia</i>					
Rynnowa	DC01 @ Corten A	4,19	5,7	33,1	-0,22
	DC01 @ 1.4541	195,77	31,89	276,48	-5,73
	Corten A @ 1.4541	191,58	33,66	256,30	-5,73
Wartość statystyki testowej $t_{kr}$ : Sigma (1,739), ZT24 (1,782), rynnowa (1,782). Sformułowano hipotezę zerową $H_0$ : $\Delta\bar{y} = 0$ oraz alternatywną $H_1$ : $\Delta\bar{y} > 0$ . Jeżeli $t > t_{kr}$ odrzucamy hipotezę zerową. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ stwierdza się, że zmiana grubości taśmy istotnie wpływa na zmiany wartości naprężenia zastępczego H-M-H.					

Tablica. 65. Analiza porównawcza w zakresie otrzymanych wartości odkształceń zastępczych

Typ elektrody	Zmiana grubości typoszeregu taśmy [mm] / gatunku materiału	Średnia różnica zmiany odkształcenia zastępczego	Odchylenie standardowe zmiany odkształcenia zastępczego	Wartość statystyki empirycznej t	Siła efektu zmiany d Cohena
<i>Oszacowanie na podstawie średniej wartości <math>R_{es}</math>, <math>R_m</math> i <math>A_{80}</math> (DC01)</i>					
Sigma	1,0 @ 1,25	0,03	0,01	352,73	-1,44
	1,25 @ 1,5	-0,06	0,02	231,47	4,89
ZT24	1,0 @ 1,25	0,04	0,04	47,08	-0,41
	1,25 @ 1,5	0,01	0,03	15,95	-0,11
Rynnowa	1,0 @ 1,25	0,08	0,02	158,55	-1,08
	1,25 @ 1,5	0,04	0,01	234,39	-0,45
<i>Oszacowanie na podstawie parametrów krzywej umocnienia</i>					
Rynnowa	DC01 @ Corten A	0,01	0,005	91,66	-0,15
	DC01 @ 1.4541	-0,04	0,02	112,64	0,8
	Corten A @ 1.4541	-0,05	0,02	112,8	0,94
Wartość statystyki testowej $t_{kr}$ : Sigma (1,739), ZT24 (1,782), rynnowa (1,782). Sformułowano hipotezę zerową $H_0$ : $D\bar{y} = 0$ oraz alternatywną $H_1$ : $D\bar{y} > 0$ . Jeżeli $t > t_{kr}$ odrzucamy hipotezę zerową. Na poziomie istotności $\alpha=0,05$ stwierdza się, że zmiana grubości taśmy istotnie wpływa na zmiany wartości odkształcenia zastępczego.					

Dla określenia siły (efektu) zmiany posłużono się wskaźnikiem d Cohena. Statystykę d Cohena obliczano wg poniższej zależności:

$$d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{(S_1 + S_2)/2} \quad (40)$$

gdzie:

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$  – średnia z pierwszej i drugiej grupy danych;

$S_1, S_2$  – odchylenie standardowe z pierwszej i drugiej grupy danych.

Siła efektu pozwala na ocenę rzeczywistego, praktycznego znaczenia otrzymanego wyniku. Przyjmuje się następującą skalę oceny siły efektu d Cohena:

$|d \text{ Cohena}| < 0,2$  – mało znaczące różnice;

$0,2 < |d \text{ Cohena}| < 0,5$  – małe różnice;

$0,5 < |d \text{ Cohena}| < 0,8$  – średnie różnice;

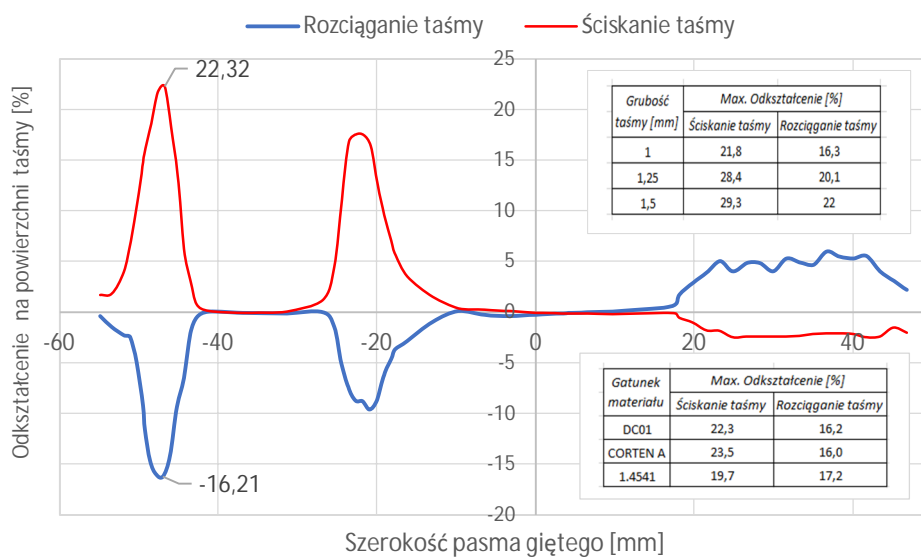
$|d \text{ Cohena}| > 0,8$  – duże różnice.

Jak przedstawiono w tablicy 64 tylko w przypadku elektrody zbiorczej rynnowej wraz ze wzrostem grubości materiału w zakresie 1,0, 1,5 mm nastąpił przyrost naprężenia zastępczego H-M-H i jest on największy spośród analizowanych kształtowników (max ~32 MPa). Potwierdziła to również wartość współczynnika d Cohena. Pozostałe profile nie wykazały takiej prawidłowości przy zmianie grubości taśmy 1,0 @ 1,25 mm. Analiza porównawcza, gdzie zmienną jest gatunek materiału wskazuje, że średnia różnica przyrostu  $S$  zastępczego, pomiędzy stalami węglowymi, a nierdzewną wynosi około 196 MPa. W tych przypadkach uzyskano bardzo wysoką wartość wskaźnika d Cohena.

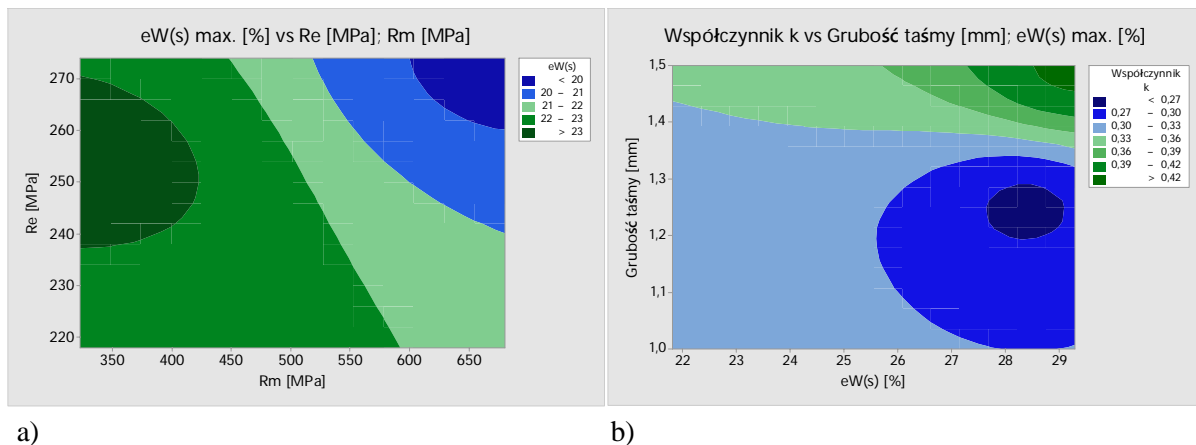
Dane dotyczące szczegółowej analizy porównawczej odkształceń zastępczych zamieszczono w tablicy 64. Na podstawie przedmiotowego zestawienia stwierdzono, że wzrost masy profilu typu Sigma na poziomie około 20% ( $g=1,25 @ 1,5$  mm) powoduje średni spadek odkształcenia zastępczego, który wynosi 0,06 (6%). Dla pozostałych par (zestawów danych) uzyskano trend wzrostowy.

Największą wartość współczynnika d Cohena odnotowano na poziomie 4,89 (elektroda Sigma), co świadczy o dużej sile wpływu zmiany grubości taśmy stalowej na wartość odkształcenia zastępczego. W przypadku kryterium materiałowego wyniki dowodzą, że stal nierdzewna ulega znacznie mniejszym odkształceniom w procesie profilowania, aniżeli stale niskowęglowe do obróbki plastycznej na zimno.

W ostatnim etapie podrozdziału zbadano wpływ gatunku profilowanego materiału oraz jego grubości na wartość odkształcenia występującego na powierzchni profilowanej blachy. Analizie poddano odkształcenie spowodowane rozciąganiem i ścisaniem taśmy stalowej na szerokości pasma giętego. Jako obiekt badań wybrano profil elektrody rynnowej, z uwagi na najmniejszy przekrój poprzeczny tego kształtownika oraz największy stopień skomplikowania jego wykonania. Wyniki analizy zaprezentowano na rys. 103-104. Pomiaru odkształcenia dokonano w gotowym kształtowniku przyjmując analogiczny punkt pomiaru, jak w przypadku badania stopnia pocienienia wsadu – rys. 87. Punkt „0” na osi X oznacza początek elementu (prostego) nr 5 - kształtownik pokazany na rys. 65c.



Rys. 103. Zmiana wartości odkształcenia  $eW(s)$  na powierzchni profilowanej taśmy (profil rynnowy)



Rys. 104. Analiza porównawcza w zakresie: a) wpływu  $R_e$  i  $R_m$  na zmianę wartości odkształcenia  $eW(s)$ , b) zmiany współczynnika  $k$  w funkcji grubości taśmy stalowej oraz odkształcenia  $eW(s)$

Na podstawie analizy porównawczej można wysunąć następujące wnioski. Wartość maksymalnego odkształcenia  $e_W(s)$  spowodowanego ścisaniem taśmy (wewnętrzna strona gięcia) jest około 3,8% mniejsza dla stali nierdzewnej w odniesieniu do rozpatrywanych gatunków stali węglowych. Zmiana grubości taśmy 1,5@ 1,25 mm nie powoduje znaczącego spadku analizowanego parametru ~1%. Zmiana uwidacznia się przy redukcji grubości wsadu o ponad 33% względem grubości bazowej ( $g=1,5$  mm) ~7,5%. Dla stali węglowych wartości współczynnika  $k$  określającego położenie warstwy obojętnej od wewnętrznej strony gięcia zawiera się w przedziale (0,29, 0,33), natomiast w przypadku stali nierdzewnej 1.4541 wartość współczynnika  $k$  jest o ponad 30% większa względem stali niskowęglowej DC01 i trudnordzewiejącej Corten A ( $k=0,43$ ).

Dyskusja i interpretacja wyników.

1. Przyjęcie uproszczonego modelu materiałowego ( $R_e$ ,  $R_m$  i  $A_{80}$ ) prowadzi do znacznie zawyżonego naprężenia zastępczego H-M-H.
2. Przyjęcie modelu materiałowego opisanego krzywą umocnienia znacznie poprawia dokładność symulacji numerycznej.
3. Wyniki symulacji numerycznych wskazują, że wpływ modelu materiałowego opisującego wsad technologiczny jest wyraźny w przypadku analizy naprężenia zastępczego, mniej wyraźny w przypadku odkształcenia zastępczego.
4. Wielkość siatki rolek profilujących może prowadzić do zawyżonych wartości naprężenia zastępczego.
5. Przeprowadzona analiza numeryczna ma charakter wstępnych wytycznych projektowych i wskazuje na konieczność stosowania gęstszej siatki na powierzchni profilowanego materiału, jak i sztywnych rolek profilujących. W strefach gięcia należałoby rozważyć zastosowanie 2-3 warstw elementów skończonych, co mogłoby mieć przełożenie na jakość otrzymanych wyników. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie takiego rozwiązania znacznie wydłużyłoby czas obliczeń biorąc pod uwagę złożoność geometrii analizowanych kształtowników i ilość opracowanych stacji profilujących. Przyjęty w pracy zakres projektu linii technologicznej 13-18 przepustów uniemożliwił, ze względu na ograniczenia czasowe, przeprowadzenie dokładniejszych symulacji.
6. W rzeczywistych warunkach warsztatowych przy profilowaniu elektrod zbiorczych o podobnej geometrii oraz parametrach materiałowych nie następuje pękanie materiału jak pokazano na rys. 26.

### 11.11 Analiza wpływu parametrów wsadu technologicznego na wartość kąta sprężynowania dla przyjętych założeń projektowych

Na etapie opracowywania technologii profilowania elektrod oraz wstępnej weryfikacji przyjętych założeń projektowych, uzasadnione było sprawdzenie wpływu parametrów taśmy stalowej na wartość kąta sprężynowania. Weryfikację przeprowadzono w środowisku COPRA RF jeszcze przed analizą numeryczną. Biorąc pod uwagę różne kształty profilowanych kształtowników, przedmiotowa analiza pozwoliła dostarczyć dodatkowe praktyczne informacje. Sprężynowanie powrotne materiału podczas profilowania kształtowników jest zjawiskiem, które wpływa bezpośrednio na strategię gięcia, szczególnie w ostatnich przepustach. Przyjęcie niewłaściwej wartości kąta sprężynowania może powodować tzw. otwarcie kształtu po wyjściu z ostatniej stacji roboczej (sprężynowanie dodatnie). Zjawisko to może zostać dodatkowo spotęgowane po procesie cięcia elektrody zbiorczej na zadaną długość, za pomocą nożycy gilotynowej.

Analizowano wpływ dwóch czynników tj. granicy plastyczności  $R_e$  i grubości taśmy stalowej, na wartość kąta sprężynowania kształtowników po przejściu pasma giętego przez wszystkie stacje profilujące. W tym celu przeprowadzono eksperyment za pomocą dwuczynnikowej analizy wariancji bez powtórzeń w układzie  $3^{(2)} \times 1$  (2 analizowane czynniki, 3 poziomy czynników, jedno powtórzenie). Dla grubości taśmy przyjęto następujące wartości: 1, 1,25 i 1,5 mm. Poziom granicy plastyczności taśmy w gatunku DC01 odniesiono bezpośrednio do danych empirycznych, na podstawie których wyliczono wartość minimalną, maksymalną oraz średnią. Sprężynowanie powrotne określonych ramion kształtowników elektrod zbiorczych wyliczono za pomocą zaimplementowanego narzędzia Springback – rys. 105.

Obliczenia sprężynowania powrotnego wykonano wykorzystując metodę Biswas. Zgodnie z danymi dystrybutora oprogramowania kąta przegięcia i promień gięcia (kompensacja kąta sprężynowania) we wspomnianej metodzie są obliczane na podstawie zdefiniowanych wartości: modułu Younga oraz granicy plastyczności stali – zależność (39-40) [28]. Wartości otrzymanego kąta sprężynowania powrotnego dla wszystkich możliwych kombinacji czynników oraz wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji zestawiono w tablicach 66-68.

$$\frac{r_{i1}}{r_{i2}} = 1 - 1,5 * \frac{r_{i1}}{r_f} + 0,5 * \left[ \frac{r_{i1}}{r_f} \right]^3 \quad (39)$$

gdzie:

$r_{i1}$  – projektowany promień gięcia [mm];

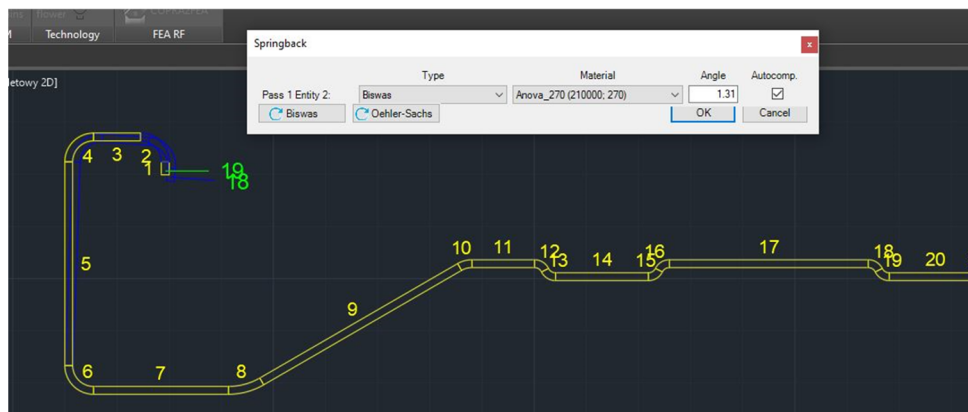
$r_{i2}$  – promień po sprężynowaniu powrotnym [mm]

$r_f$  – współczynnik [mm];

gdzie:

$$r_f = \frac{\text{moduł Younga [MPa]} * \text{grubość taśmy stalowej [mm]}}{2 * \text{granica plastyczności [MPa]}} \quad (40)$$





Rys. 105. Okno dialogowe narzędzia Springback (COPRA RF) z wyliczony kątem sprężynowania powrotnego dla półki elektrody zbiorczej Sigma III (kolor niebieski na rysunku)

W eksperymencie wprowadzono następujące oznaczenia: czynnik A to granica plastyczności  $R_e$  [MPa], czynnik B to grubość taśmy stalowej [mm]. Analizowano wpływ każdego z czynników z osobna na zmienną objaśnianą oraz sprawdzono, czy pomiędzy czynnikami A i B występują efekty interakcyjne. Obliczenia przeprowadzono na poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Wprowadzone zostały następujące oznaczenia: SS – suma kwadratów, df – stopnie swobody, MS – średni kwadrat, F – statystyka Fishera Snedecora. Graficzną prezentację wyników przedstawiono na rys. 106-114. Sformułowano hipotezę zerową:

$H_0$ :

1. Czynnik A nie wpływa różnicująco na wyniki eksperymentu;
2. Czynnik B nie wpływa różnicująco na wyniki eksperymentu;
3. Nie występuje współdziałanie między poziomami czynnika A i B.

Tablica 66. Matryca planu eksperymentu i wyniki (Two-way-Anova) – elektroda zbiorcza Sigma III

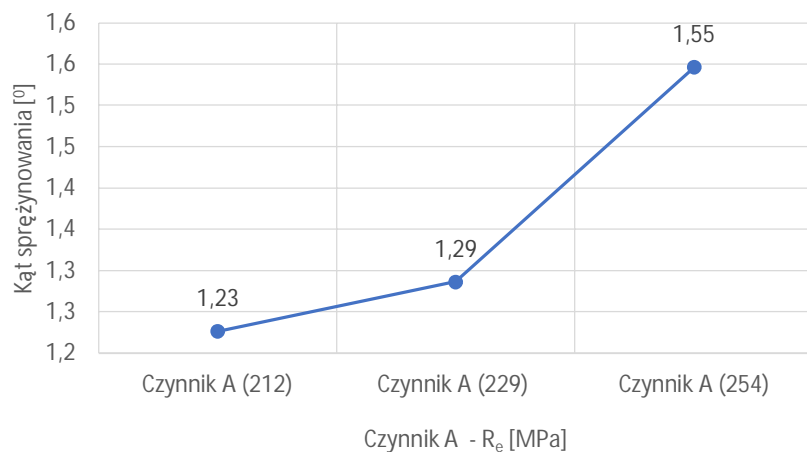
Elektroda zbiorcza typ Sigma III						
Czynnik B / Czynnik A		Czynnik A - $R_e$ [MPa]				
		Czynnik A (212)	Czynnik A (229)	Czynnik A (254)		
Czynnik B Grubość taśmy stalowej [mm]	Czynnik B (g=1)	1,42	1,49	1,76		
	Czynnik B (g=1,25)	1,2	1,26	1,49		
	Czynnik B (g=1,5)	1,06	1,11	1,39		
<i>PODSUMOWANIE</i>		<i>Licznik</i>	<i>Suma</i>	<i>Średnia</i>	<i>Wariancja</i>	
Czynnik B (g=1)	3	4,67	1,56	0,032		
Czynnik B (g=1,25)	3	3,95	1,32	0,023		
Czynnik B (g=1,5)	3	3,56	1,19	0,032		
Czynnik A (212)	3	3,68	1,23	0,033		
Czynnik A (229)	3	3,86	1,29	0,037		
Czynnik A (254)	3	4,64	1,55	0,037		
Analiza wariancji						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Czynnik B	0,2114	2	0,1057	422,8	2,217E-05	6,94
Czynnik A	0,1736	2	0,0868	347,2	3,280E-05	6,94
Błąd	0,001	4	0,00025	Wpływ czynnika [%]	Czynnik A	55%
Razem	0,386	8			Czynnik B	45%

Tablica 67. Matryca planu eksperymentu i wyniki (Two-way-Anova) – elektroda zbiorcza ZT24

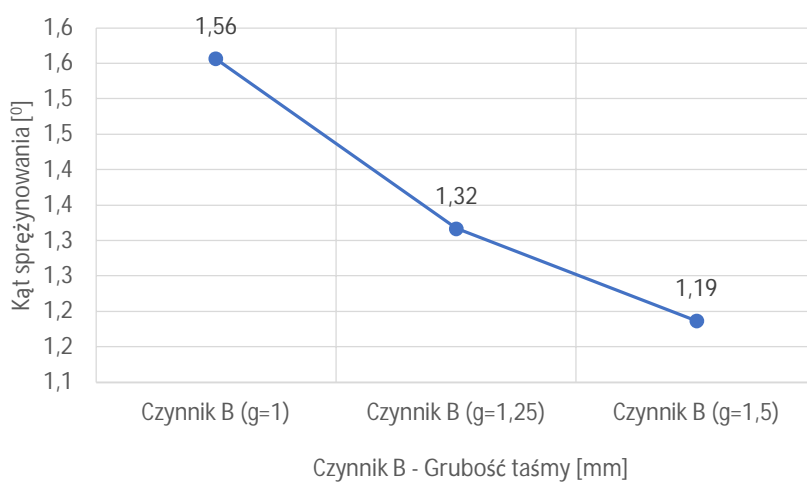
<i>Elektroda zbiorcza typ ZT24</i>						
Czynnik B / Czynnik A		Czynnik A - R <sub>e</sub> [MPa]				
		Czynnik A (212)	Czynnik A (229)	Czynnik A (254)		
Czynnik B Grubość taśmy stalowej [mm]	Czynnik B (g=1)	2,16	2,27	2,67		
	Czynnik B (g=1,25)	1,86	1,96	2,31		
	Czynnik B (g=1,5)	1,67	1,75	2,07		
<i>PODSUMOWANIE</i>		<i>Licznik</i>	<i>Suma</i>	<i>Średnia</i>	<i>Wariancja</i>	
Czynnik B (g=1)	3	7,1	2,37	0,072		
Czynnik B (g=1,25)	3	6,13	2,04	0,056		
Czynnik B (g=1,5)	3	5,49	1,83	0,045		
Czynnik A (212)	3	5,69	1,90	0,061		
Czynnik A (229)	3	5,98	1,99	0,068		
Czynnik A (254)	3	7,05	2,35	0,091		
Analiza wariancji						
<i>Źródło wariancji</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Wartość-p</i>	<i>Test F</i>
Czynnik B	0,4381	2	0,2190	268,2,	5,48E-05	6,94
Czynnik A	0,3421	2	0,1710	209,43	8,95E-05	6,94
Błąd	0,003	4	0,0008	Wpływ czynnika [%]	Czynnik A	56%
Razem	0,783	8			Czynnik B	44%

Tablica 68. Matryca planu eksperymentu i wyniki (Two-way-Anova) – elektroda zbiorcza rynnowa

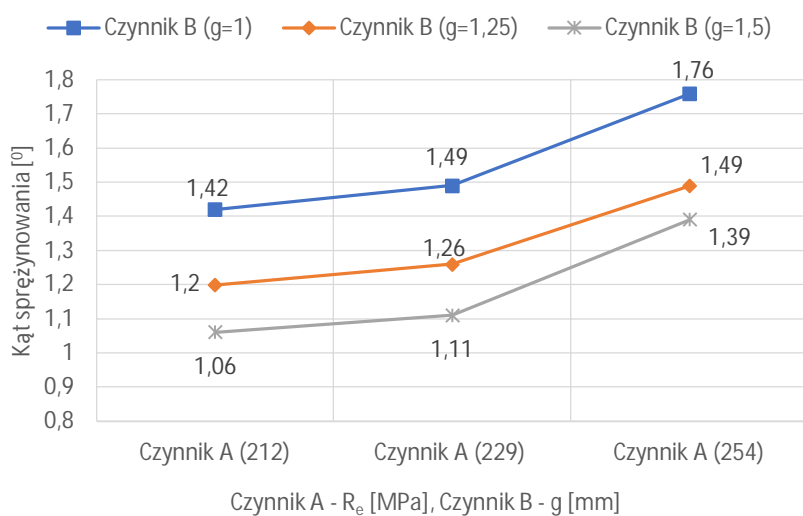
<i>Elektroda zbiorcza typ rynnowy</i>						
Czynnik B / Czynnik A		Czynnik A - R <sub>e</sub> [MPa]				
		Czynnik A (212)	Czynnik A (229)	Czynnik A (254)		
Czynnik B Grubość taśmy stalowej [mm]	Czynnik B (g=1)	5,24	5,51	6,5		
	Czynnik B (g=1,25)	4,26	4,48	5,28		
	Czynnik B (g=1,5)	3,61	3,79	4,47		
<i>PODSUMOWANIE</i>		<i>Licznik</i>	<i>Suma</i>	<i>Średnia</i>	<i>Wariancja</i>	
Czynnik B (g=1)	3	17,25	5,75	0,440		
Czynnik B (g=1,25)	3	14,02	4,67	0,288		
Czynnik B (g=1,5)	3	11,87	3,96	0,206		
Czynnik A (212)	3	13,11	4,37	0,673		
Czynnik A (229)	3	13,78	4,59	0,749		
Czynnik A (254)	3	16,25	5,42	1,044		
Analiza wariancji						
<i>Źródło wariancji</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Wartość-p</i>	<i>Test F</i>
Czynnik B	4,889	2	2,4444	218,9	8,20E-05	6,94
Czynnik A	1,823	2	0,9116	81,64	5,72E-04	6,94
Błąd	0,045	4	0,0112	Wpływ czynnika [%]	Czynnik A	72%
Razem	6,757	8			Czynnik B	27%



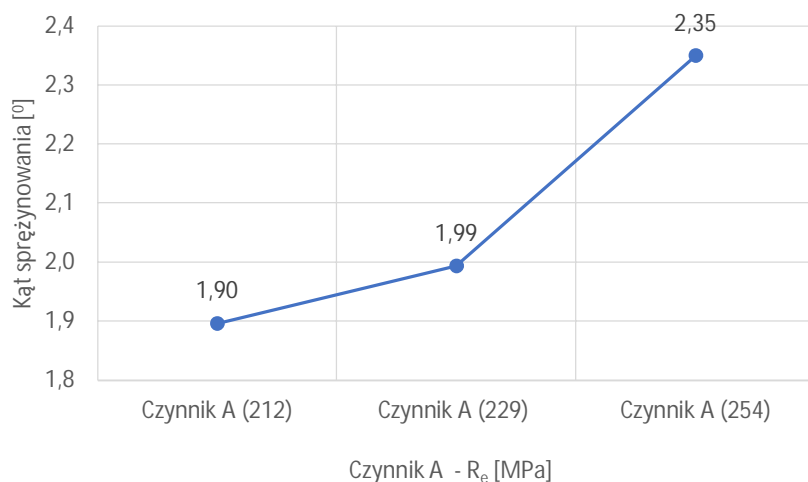
Rys. 106. Wpływ czynnika A na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza Sigma III)



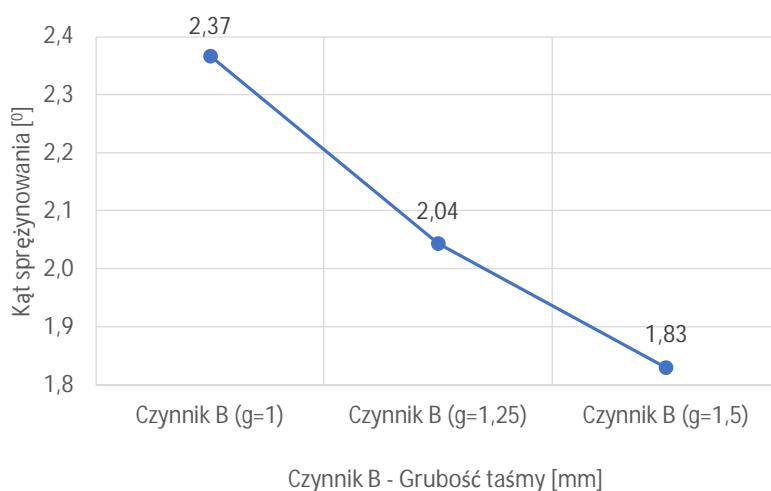
Rys. 107. Wpływ czynnika B na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza Sigma III)



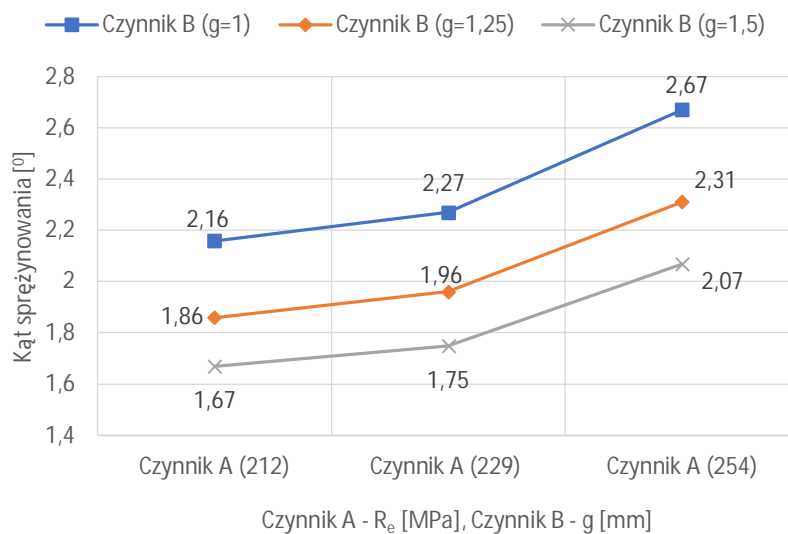
Rys. 108. Wykres interakcji obrazujący wpływ (czynnika A\*czynnik B) na wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza Sigma III)



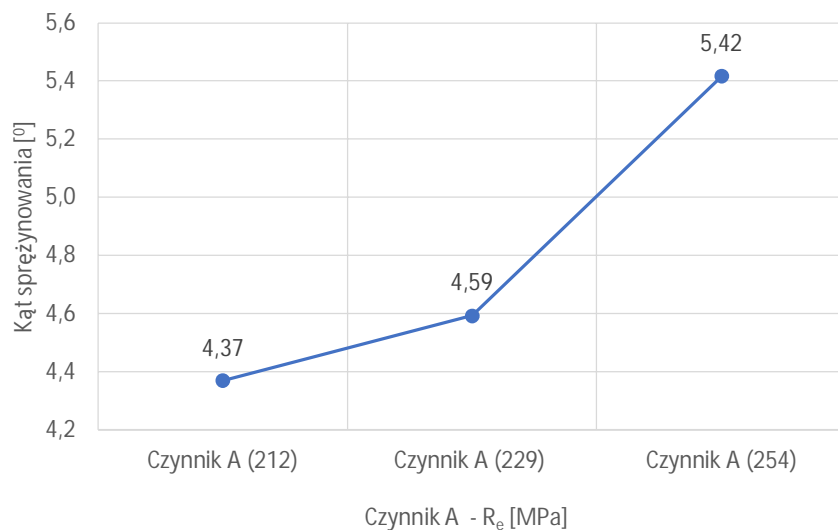
Rys. 109. Wpływ czynnika A na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza ZT24)



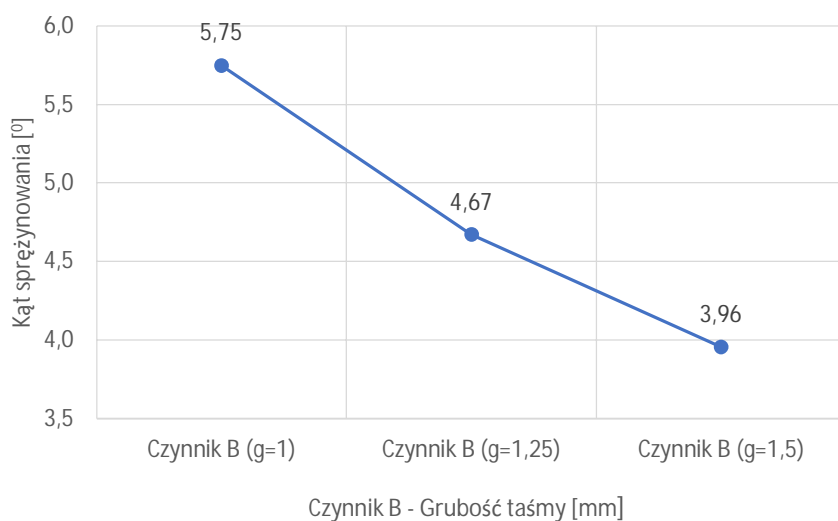
Rys. 110. Wpływ czynnika B na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza ZT24)



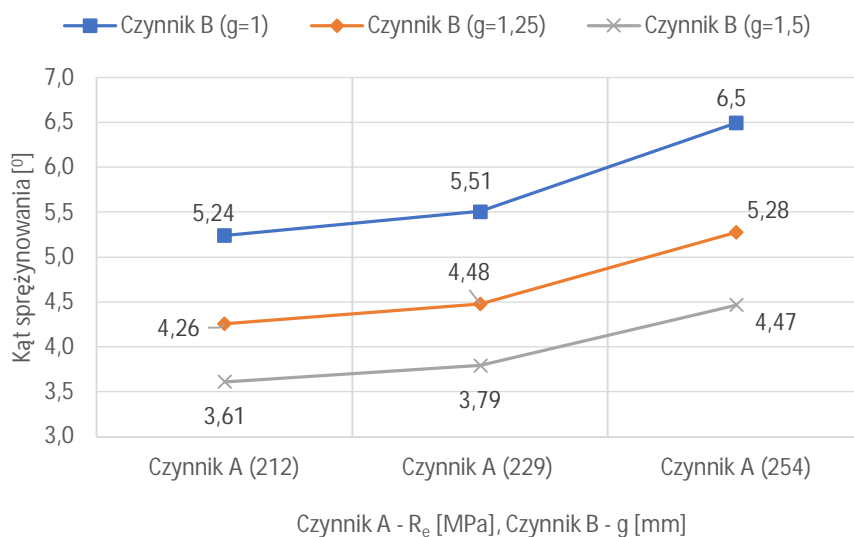
Rys. 111. Wykres interakcji obrazujący wpływ (czynnika A\*czynnik B) na wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza ZT24)



Rys. 112. Wpływ czynnika A na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza rynnowa)



Rys. 113. Wpływ czynnika B na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza rynnowa)



Rys. 114. Wykres interakcji obrazujący wpływ (czynnika A\*czynnika B) na wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza rynnowa)

#### Interpretacja wyników:

1. Czynniki główne A – granica plastyczności  $R_e$  [MPa] ma istotny wpływ na wartość kąta sprężynowania: poziom prawdopodobieństwa  $p < \alpha$  ( $F > \text{Test } F$ );
2. Czynniki główne B – grubość taśmy [mm] ma istotny wpływ na wartość kąta sprężynowania: poziom prawdopodobieństwa  $p < \alpha$  ( $F > \text{Test } F$ );
3. Z analizy wariancji wynika, że nie zachodzi interakcja pomiędzy czynnikami głównymi;
4. Wartość prawdopodobieństwa  $p$  została wyszczególniona w tablicach 66-68.

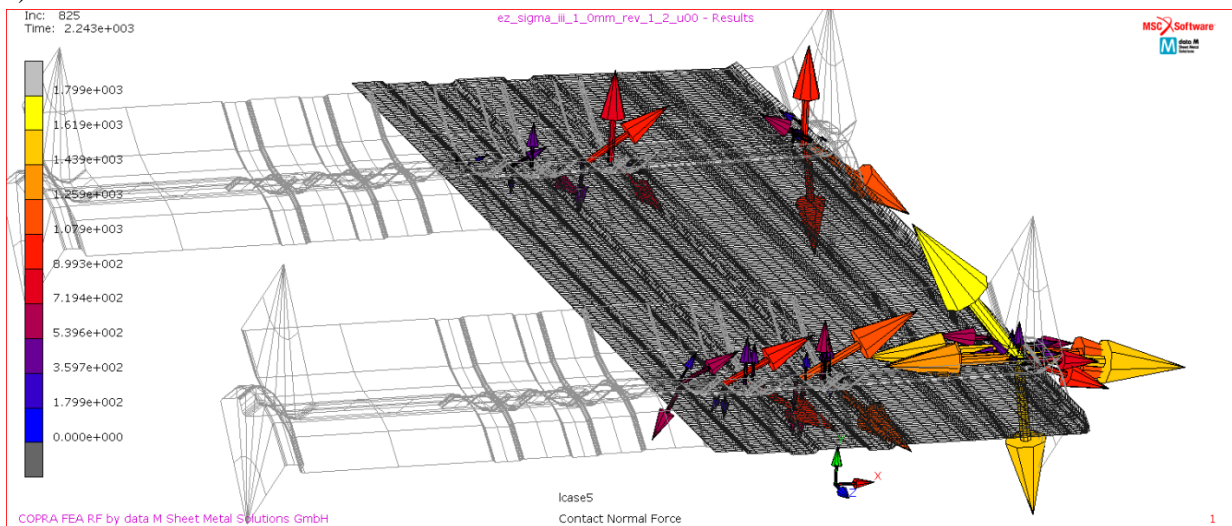
Łamane linie na wykresach interakcji obrazują wpływ poziomów czynnika A na kąt sprężynowania powrotnego przy określonym poziomie czynnika B. Wykresy potwierdzają, że pomiędzy badanymi czynnikami nie zachodzi efekt interakcji. Odcinki łamanych nie przecinają się w badanym zakresie zmienności. W wszystkich analizowanych przypadkach wpływ  $R_e$  jest większy od wpływu grubości taśmy stalowej. Największa różnica wpływu czynników głównych (A i B) wystąpiła w przypadku elektrody rynnowej – tablica 68. Największe (średnie) wartości kąta sprężynowania otrzymano dla profilu elektrody rynnowej.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu potwierdziły, że wzrost kąta sprężynowania wzrasta wraz ze wzrostem  $R_e$ . W zakresie  $R_e$  (minimum – średnia) przyrost analizowanego czynnika wynosi odpowiednio (4,9% - Sigma III, 5,1% - ZT24, 5,1% - rynnowa). Dla zakresu  $R_e$  (średnia – maksimum) odnotowano ponad trzykrotny wzrost średniej wartości kąta sprężynowania powrotnego (20,2% - Sigma III, 17,9% - ZT24, 17,9% - rynnowa). Analogicznie, jak dla  $R_e$  sprawdzono wpływ grubości taśmy stalowej na analizowaną zmienną. W tym przypadku wzrost nastawów czynnika B powoduje spadek analizowanego parametru, co zobrazowano na wykresach – rys. 107, 110, 113. Spadek (średniej) wartości kąta sprężynowania jest silniejszy w pierwszym zakresie grubości (1,0, 1,25 mm) i wynosi odpowiednio (18,2% - Sigma III, 15,8% - ZT24 i 23% - rynnowa). Dla grubości taśmy (1,25, 1,5 mm) otrzymano następujące wyniki: (Sigma III – 11%, ZT24 – 11,7%, rynnowa – 18,1%). Dla elektrody zbiorczej typu Sigma III różnica w zakresie redukcji kąta sprężynowania dla przedziałów grubości, jak opisano powyżej, okazała się największa i wyniosła 7,3%.

## 11.12 Określenie sił występujących podczas profilowania oraz oszacowanie pracy wykonanej na gięcie elektrod zbiorczych

Celem tego rozdziału było określenie i porównanie wartości sił występujących podczas profilowania analizowanych profili elektrod osadczych oraz oszacowanie pracy wykonanej na wielotaktowe gięcie rolkowe. W tym celu zostały zidentyfikowane siły występujące na rolkach profilujących będące wynikiem oddziaływania profilowanego materiału i powierzchni górnych i dolnych walców. Siły zostały wyliczone przez oprogramowanie dla 3 kierunków (x – szerokość pasma giętego, y – grubość materiału profilowanego, z – kierunek profilowania). Należy przewidywać, że zmniejszenie grubości typoszeregu taśmy stalowej będzie prowadziło do obniżenia poszukiwanych wielkości. Na rys. 115 zobrazowano przykładowy rozkład wektorów sił na wybranej stacji profilującej.

a)



b) **Forces on Axis in Station 5:**

Axis Name	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Top Axis	-8997	9418	147
Bottom Axis	6338	-9342	184

Rys. 115. Wielotaktowe gięcie rolkowe: a) rozkład wektorów sił zidentyfikowanych na górnych i dolnych rolkach profilujących, b) wartości sił [N] wyliczone dla kierunków x, y i z, elektroda zbiorcza Sigma ( $g=1,0$  mm) – stacja nr 5

Na rys. 116-117 przedstawiono zależność wartości wypadkowej siły  $F$  na poszczególnych stacjach profilujących w odniesieniu do grubości profilowanego materiału. Wypadkową wyliczono jako pierwiastek ze składowych siły podniesionych do kwadratu. Następnie wykorzystując całkowanie numeryczne metodą trapezów obliczone zostały pola ograniczone krzywymi co odpowiada pracy  $W$  siły zmiennej na przemieszczeniu od pierwszej do ostatniej stacji profilującej. Całkowita praca  $W$  określona została zależnością (41):

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (41)$$

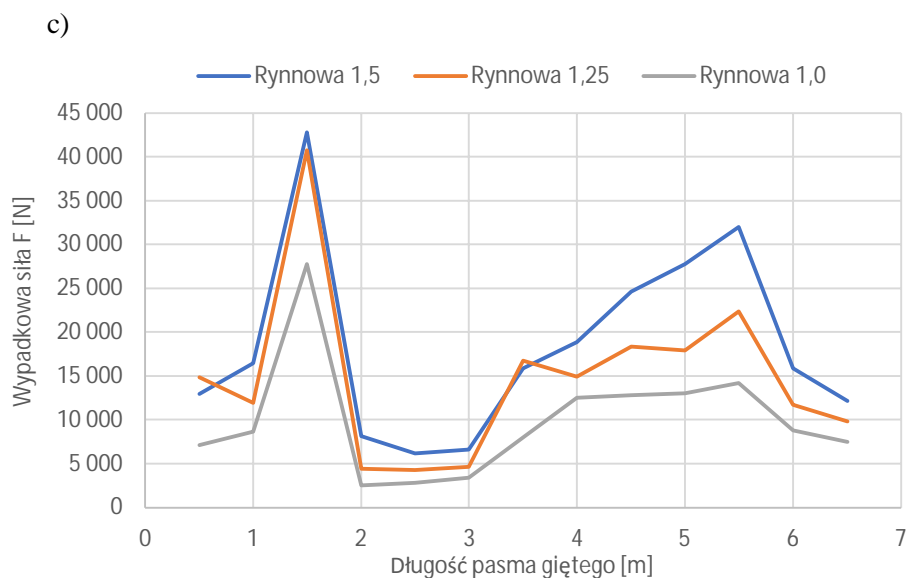
gdzie:

$W$  – praca wykonana przez zmienną siłę [Nm];

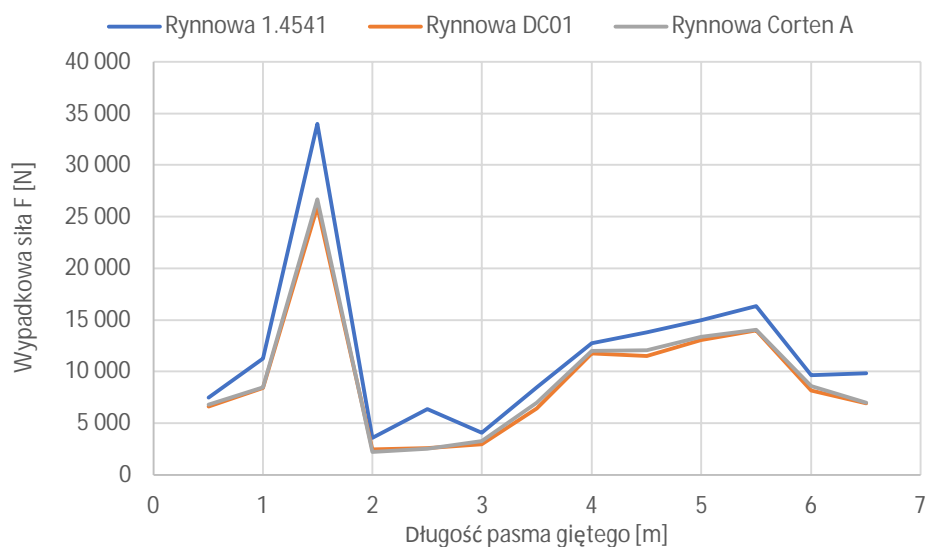
$x_1, x_2$  – początek i koniec pasma giętego [m].







Rys. 116. Zmiana wartości wypadkowej siły F na długości pasma giętego, elektrody zbiorcze:  
a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa



Rys. 117. Zmiana wartości wypadkowej siły F na długości pasma giętego, elektroda zbiorcza rynnowa wykonana z stali węglowej i nierdzewnej

Uzyskane informacje dotyczące omawianej zależności ujęto w tabelicy 69. Dane liczbowe wskazują, że w przypadku profilowania elektrody rynnowej ze stali niskowęglowej można spodziewać się redukcji pracy gięcia na poziomie około 46 punktów procentowych ( $g=1,5$  @  $g=1,0$  mm). Dla omawianego kształtownika otrzymano ponadto największy spadek wartości pracy gięcia  $\sim 25,8\%$  przy jednoczesnym obniżeniu jego masy  $\sim 17\%$  ( $g=1,25$  @  $g=1,0$  mm). Najmniejszą różnicę dla identycznego typoszeregu grubości materiału otrzymano dla modelu numerycznego opisującego profilowanie płyty elektrody płytowej ZT24 (5,6%). Podsumowując przeprowadzoną analizę porównawczą warto nadmienić, że zmiana gatunku wsadu technologicznego nie pociąga za sobą istotnych zmian wartości wyliczonego parametru.

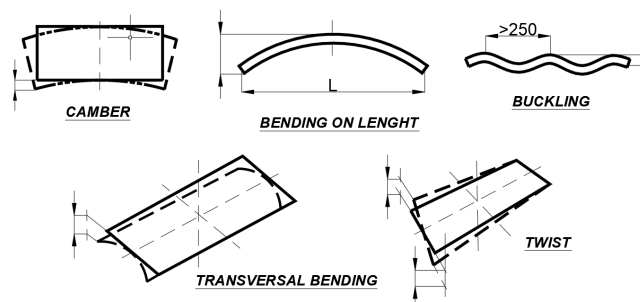
W rozdziale tym starano się określić wpływ grubości profilowanego materiału na wartość sił występujących podczas gięcia omawianych kształtowników oraz na ich podstawie określić wartość całkowitej pracy niezbędnej do gięcia kształtowników o zadanej geometrii. Analiza ta jest orientacyjna, gdyż nie uwzględniono tarcia podczas modelowania. Jednak ma wartość poznawczą przy opracowaniu produkcji nowej elektrody zbiorczej.

Tablica 69. Analiza porównawcza w zakresie pracy gięcia potrzebnej do wykonania analizowanych typów elektrod zbiorczych na podstawie analizy numerycznej

Typ elektrody	Grubość taśmy [mm]	Praca gięcia W [Nm]	Praca gięcia [Nm / 1mb kształtownika]	Błąd względny szacunku [%]	Redukcja pracy gięcia [%]
<i>Oszacowanie na podstawie średniej wartości <math>R_e</math>, <math>R_m</math> i <math>A_{80}</math> (DC01)</i>					
Sigma	1	28 5749	15 878	10,6	42,9
	1,25	37 5676	20 871	10,9	24,9
	1,5	50 0221	27 790	10,4	-
ZT24	1	13 0838	10 064	28,5	31,3
	1,25	141 427	10879	19	25,7
	1,5	190 332	14 641	21,7	-
Rynnowa	1	60 787	4 676	28,6	46,6
	1,25	90 077	6 929	26,9	20,8
	1,5	113 778	8 752	26,4	-
<i>Oszacowanie na podstawie parametrów krzywej umocnienia</i>					
Rynnowa	1.4541	7 1951	5 535	27,2	-
	DC01	5 6963	4 382	29,5	20,8
	Corten A	5 8562	4 505	29,2	18,6

## 12. Analiza podstawowych wielkości geometrycznych elektrod zbiorczych na podstawie otrzymanych modeli numerycznych

Jednym z celów badawczych przytoczonych w niniejszej pracy była weryfikacja, czy i w jakim zakresie grubość profilowanego materiału wpływa na wybrane wielkości geometryczne profili elektrod osadczych. Z uwagi na pewne ograniczenia wynikające m.in. z finalnej długości modeli numerycznych otrzymanych kształtowników, nie było możliwe dokonanie pomiarów w sposób identyczny, jak to jest wykonywane w warunkach warsztatowych. Przyjęto metodykę pomiaru z wykorzystaniem zaimplementowanych narzędzi pakietu COPRA FEA oraz specjalistycznego oprogramowania GOM Inspect Professional. Docelowo analizowano wybrane odchyłki geometryczne jak pokazano na rys. 118. Pomiaru dokonano w gotowych profilach po procesie ich cięcia w wykrojniku umiejscowionym za maszyną profilującą. Długość finalnych płyt elektrod osadczych po procesie cięcia wynosiła 450 mm. W ten sposób próbowano odzwierciedlać warunki rzeczywiste produkcji analizowanego wyrobu.



Rys. 118. Wybrane cechy geometryczne profili elektrod zbiorczych poddane analizie wymiarowej: camber (sierpowatość), bending on length (wygięcie wzdłużne), buckling (pofalowanie powierzchni, płaskość), transversal bending (wygięcie poprzeczne profilu), twist (skręcenie poprzeczne profilu)

Pomiar sierpowatości (wygięcie w kierunku X) i wygięcia wzdłużnego (wygięcie w kierunku Y) realizowano poprzez przemieszczenie węzła w siatce elementów skończonych. W przypadku wygięcia wzdłużnego punkt węzłowy wskazywano w osi symetrii przekroju poprzecznego każdego z analizowanych kształtowników. Wartość sierpowatości profili elektrod identyfikowano przez definiowanie punktu węzłowego na ukształtowanych ramionach bocznych kształtowników. Pomiar był realizowany w kierunku od czoła profilu (przeciwna strona cięcia na wymiar), jak pokazano na rys. 119.

Należy przypuszczać, że zmniejszenie grubości taśmy stalowej będzie prowadziło do wzrostu rozpatrywanych wielkości geometrycznych. Na rys. 120-122 zobrazowano w formie wykresów rozkład wartości wygięcia profili elektrod osadczych w kierunku X i Y. Interpretację wyników analizy opracowano w formie tabelarycznej – tablice 70-72. Rozstęp rozrzutu wartości wygięcia profili w kierunku X i Y wyliczono z zależności (42).

$$R = \Delta * 6 * S \quad (42)$$

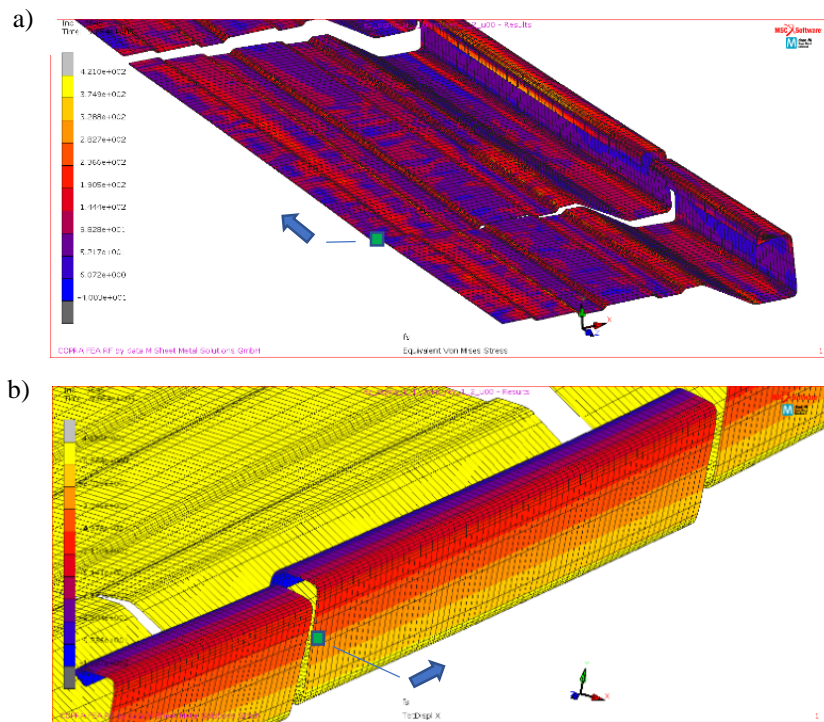
gdzie:

R – rozstęp rozrzutu mierzonych wielkości;

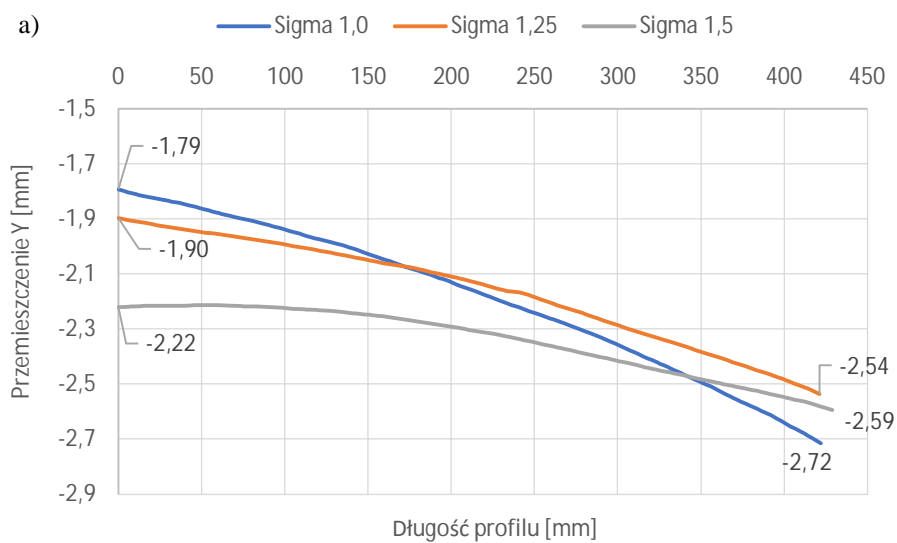
D - wartość współczynnika zależna od liczby próby (obserwacji);

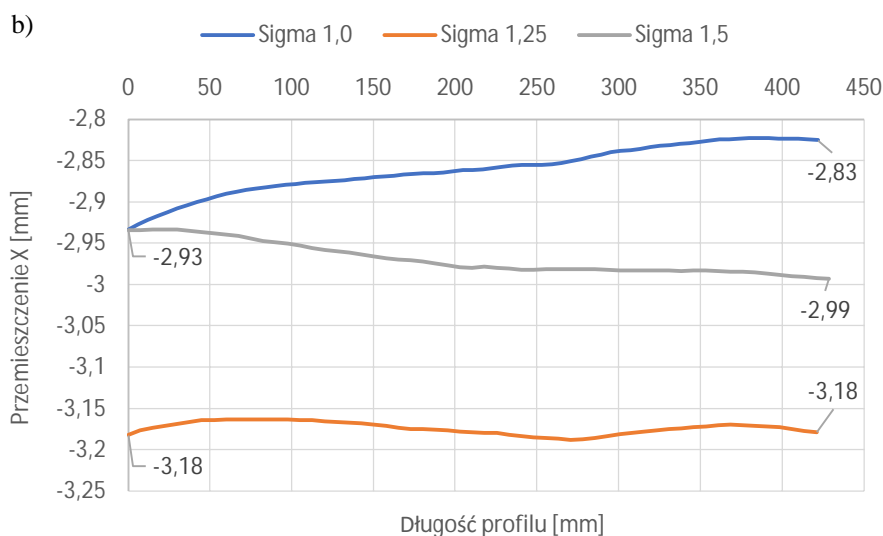
S – odchylenie standardowe obliczone z próby.

Tolerancja technologiczna powinna być co najmniej równa wartości rozrzutu rozstępu i spełniać warunek  $d_T$  (tolerancja technologiczna)<sup>3</sup> R. Spełnienie tego warunku nie spowoduje wystąpienia braków produkcyjnych.



Rys. 119. Lokalizacja punktu węzowego względem którego określano: a) zakres wygięcia wzdłużnego profilu, b) sierpowatości dla elektrody zbiorczej typu Sigma

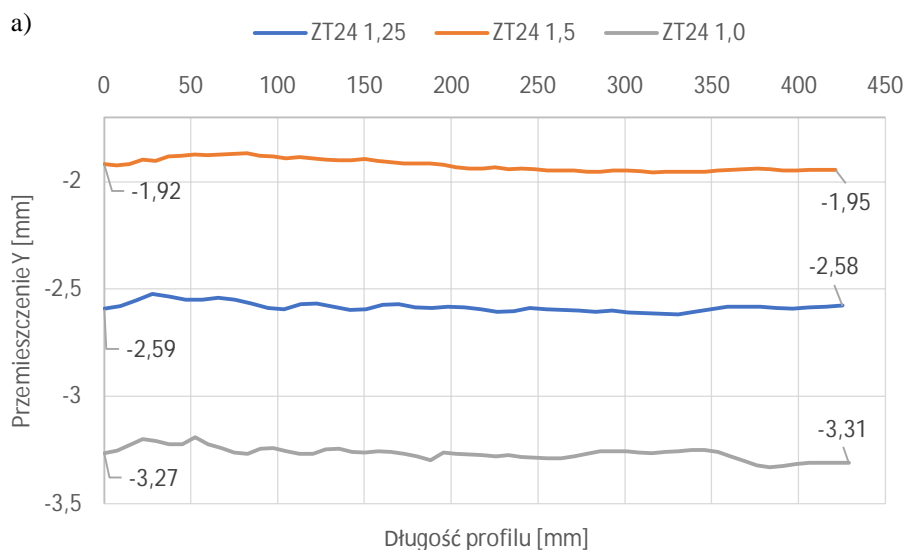


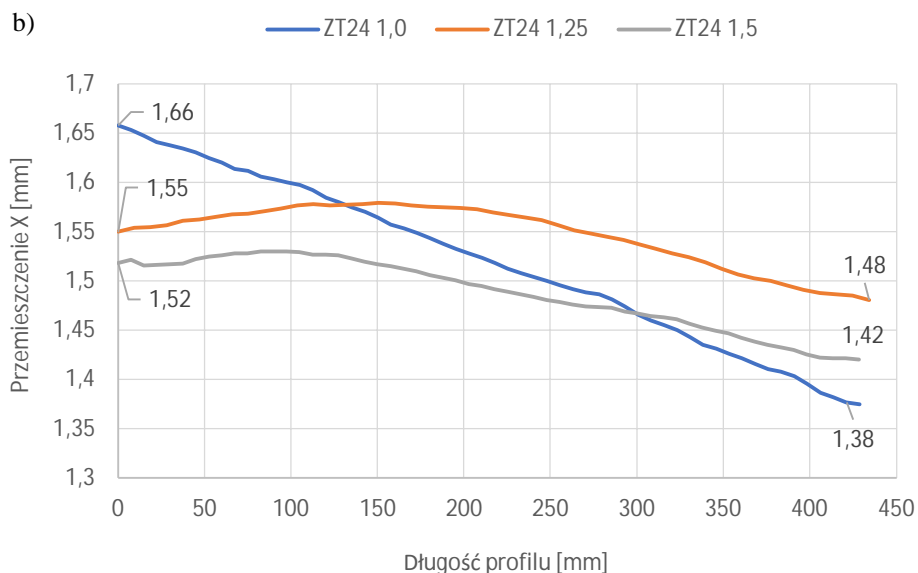


Rys. 120. Zmiana wartości przemieszczenia punktu węzłowego: a) kierunek Y (wygięcie wzdłużne), b) kierunek X (sierpowatość), elektroda zbiorcza typu Sigma

Tablica 70. Analiza porównawcza otrzymanych wartości wygięcia profilu Sigma

Typ elektrody zbiorczej	Odchylenie standardowe [mm]	Wsp. D	Rozstęp rozrzutu R	Tolerancja technologiczna $d_T$ [mm]
<i>Wygięcie wzdłużne (kierunek Y)</i>				
Sigma g=1,0 mm	0,27	1,22	1,98	$d_T^3$ 1,98
Sigma g=1,25 mm	0,19	1,25	1,42	$d_T^3$ 1,42
Sigma g=1,5 mm	0,12	1,25	0,92	$d_T^3$ 0,92
<i>Sierpowatość (kierunek X)</i>				
Sigma g=1,0 mm	0,03	1,22	0,21	$d_T^3$ 0,21
Sigma g=1,25 mm	0,01	1,25	0,05	$d_T^3$ 0,05
Sigma g=1,5 mm	0,02	1,25	0,14	$d_T^3$ 0,14

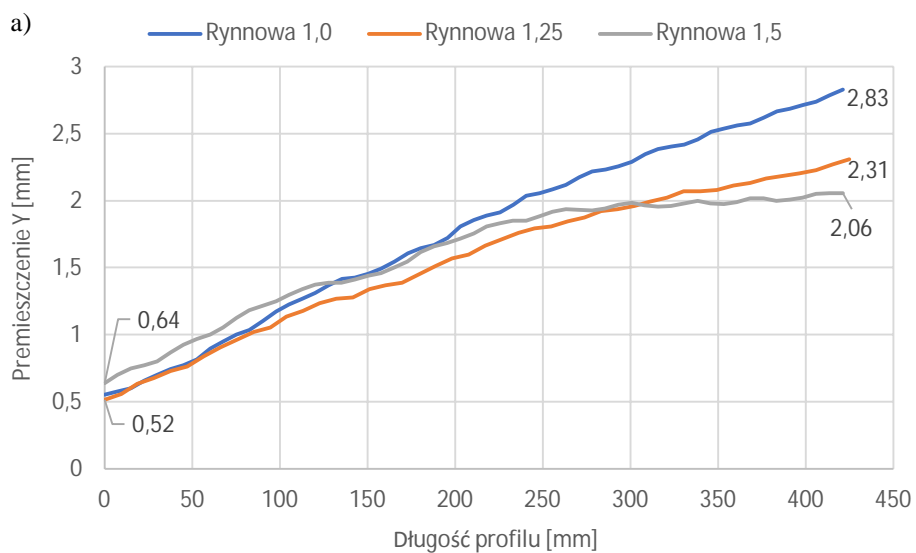


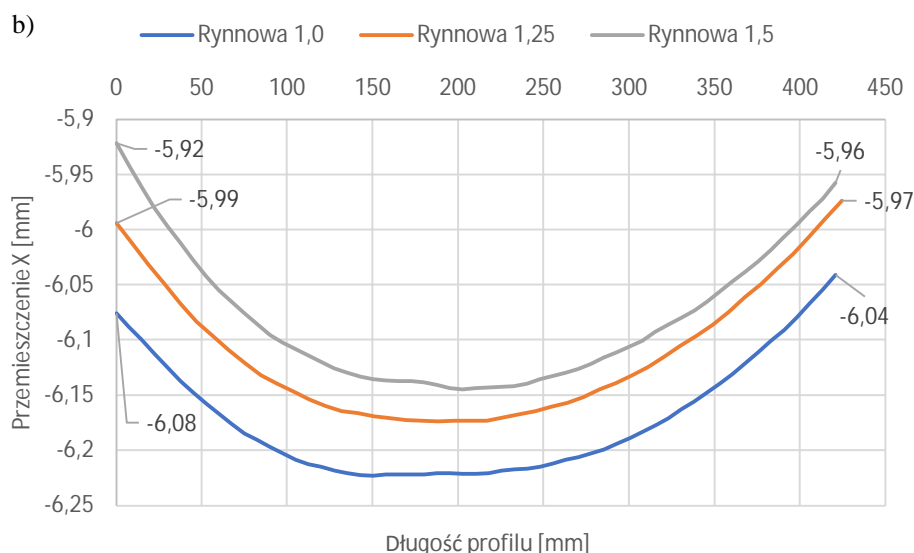


Rys. 121. Zmiana wartości przemieszczenia punktu węzłowego: a) kierunek Y (wygięcie wzdłużne), b) kierunek X (sierpowatość), elektroda zbiorcza typu ZT24

Tablica 71. Analiza porównawcza otrzymanych wartości wygięcia profilu ZT24

Typ elektrody zbiorczej	Odchylenie standardowe [mm]	Wsp. D	Rozstęp rozrzutu R	Tolerancja technologiczna $d_T$ [mm]
<i>Wygięcie wzdłużne (kierunek Y)</i>				
ZT24 g=1,0 mm	0,03	1,25	0,21	$d_T^3$ 0,21
ZT24 g=1,25 mm	0,02	1,28	0,16	$d_T^3$ 0,16
ZT24 g=1,5 mm	0,03	1,25	0,21	$d_T^3$ 0,21
<i>Sierpowatość (kierunek X)</i>				
ZT24 g=1,0 mm	0,08	1,25	0,63	$d_T^3$ 0,63
ZT24 g=1,25 mm	0,03	1,28	0,24	$d_T^3$ 0,24
ZT24 g=1,5 mm	0,02	1,25	0,27	$d_T^3$ 0,27





Rys. 122. Zmiana wartości przemieszczenia punktu węzłowego: a) kierunek Y (wygięcie wzdłużne), b) kierunek X (sierpowatość), elektroda zbiorcza rynnowa

Tablica 72. Analiza porównawcza otrzymanych wartości wygięcia profilu rynnowego

Typ elektrody zbiorczej	Odchylenie standardowe [mm]	Wsp. D	Rozstęp rozrzutu R	Tolerancja technologiczna $d_f$ [mm]
<i>Wygięcie wzdłużne (kierunek Y)</i>				
Rynnowa $g=1,0$ mm	0,69	1,25	5,18	$d_f^3$ 5,18
Rynnowa $g=1,25$ mm	0,54	1,28	4,12	$d_f^3$ 4,12
Rynnowa $g=1,5$ mm	0,44	1,25	3,27	$d_f^3$ 3,27
<i>Sierpowatość (kierunek X)</i>				
Rynnowa $g=1,0$ mm	0,05	1,25	0,39	$d_f^3$ 0,39
Rynnowa $g=1,25$ mm	0,06	1,28	0,46	$d_f^3$ 0,46
Rynnowa $g=1,5$ mm	0,06	1,25	0,47	$d_f^3$ 0,47

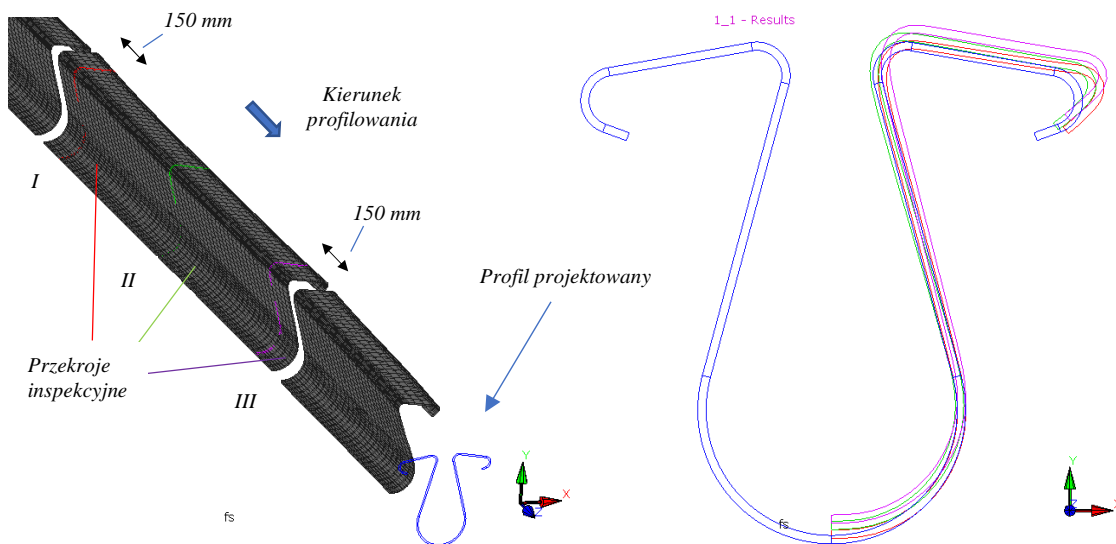
Podsumowanie pierwszej części rozdziału 12.

Analiza danych przedstawiona na rysunkach 120-122 wykazała, że każdy z rozpatrywanych kształtowników cechuje się odmiennym trendem rozkładu wartości wydłużenia wzdłużnego i sierpowatości na długości płyt elektrod. Dla elektrody typu Sigma wygięcie w kierunku Y maleje wraz z wzrostem długości profilu. Odmienną prawidłowością charakteryzuje się elektroda typu rynnowego, dla którego przyrost wartości rozpatrywanego parametru jest ponad pięciokrotny względem wartości początkowej. Dla pozostałych kształtowników wzrost odchyłki wygięcia w kierunku Y wynosi odpowiednio: ZT24 ~70%, Sigma ~52%. W przypadku profilu płytowego ZT24 wartość odchyłki sierpowatości i wygięcia wzdłużnego cechuje się najmniejszą zmiennością na całej długości elektrody, dla wszystkich grubości wsadu technologicznego.

Rezultaty analizy numerycznej wykazały, że wraz z redukcją masy elektrod zbiorczych wartości analizowanej cechy geometrycznej wzrasta. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na zwrot wygięcia elektrod w kierunku Y. Bazując na otrzymanych danych stwierdzono, że elektroda zbiorcza typu rynnowego wykazuje tendencję do wygięcia wzdłużnego (dodatniego), jak zobrazowano na rys. 122a.

Przedstawiona powyżej analiza w zakresie oceny wpływu grubości materiału na wartość sierpowatości prowadzi do następujących konkluzji. Profil płytowy typu ZT24 jest w najmniejszym stopniu podatny na wygięcie w kierunku prostopadłym do kierunku profilowania. Największe wartości sierpowatości (>5 mm) zidentyfikowano w profilu rynnowym. Dane zobrazowane na wykresie (rys. 120b) skłaniają do stwierdzenia, że w przypadku profilowania elektrod zbiorczych typu Sigma nie należy spodziewać się wzrostu wartości sierpowatości, przy jednoczesnym obniżeniu grubości wsadu. W tablicach 70-72 podano wyliczone zakresy tolerancji technologicznej (wykonawczej). Spełnienie warunku  $d_T^3 R$  oznacza, że w procesie wytwarzania elektrod zbiorczych nie powinny występować braki produkcyjne. Przytoczoną zależność stosuje się w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień technicznych związanych z inżynierią produkcji [82].

W drugiej części niniejszego rozdziału skupiono się na określeniu wartości pozostałych odchyłek geometrycznych, takich jak: wygięcie oraz skręcenie poprzeczne oraz płaskość (pofalowanie powierzchni płyty), w wybranych punktach pomiarowych kształtowników. W tym celu wykorzystano zaawansowane oprogramowania GOM Inspect Professional przeznaczone do analizy kształtu, wymiarów i kontroli 3D. Do przedmiotowej analizy porównawczej niezbędne było zdefiniowanie przekrojów inspekcyjnych w gotowych wyrobach (po procesie cięcia na wymiar). Na rys. 123, pokazano schematycznie sposób zdefiniowania przekrojów inspekcyjnych. Ustalono następującą lokalizację przekrojów poprzecznych: środek kształtownika oraz 150 mm od krawędzi płyty elektrody. Zakres skręcenia i wygięcia poprzecznego mierzono na końcu elektrody (przekrój III). Odchyłkę płaskości (pofalowania powierzchni płyty) badano w przekrojach (I – III).

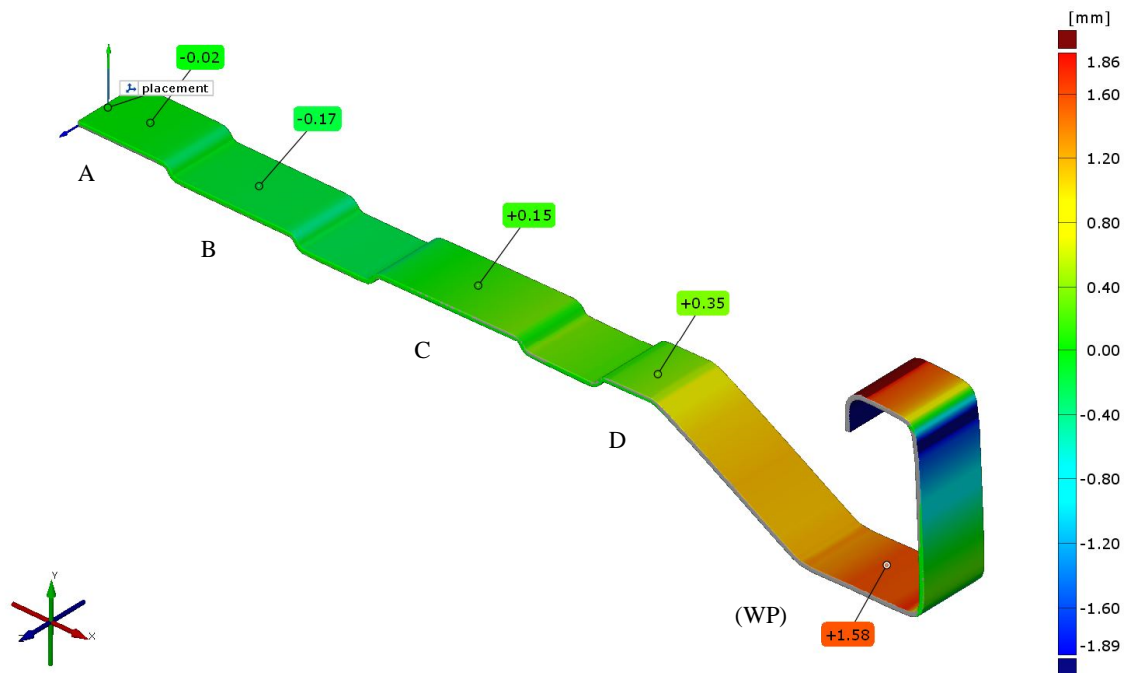


Rys. 123. Sposób definiowania przekrojów inspekcyjnych w gotowych wyrobach po procesie cięcia elektrod na wymiar, elektroda zbiorcza typu rynnowego

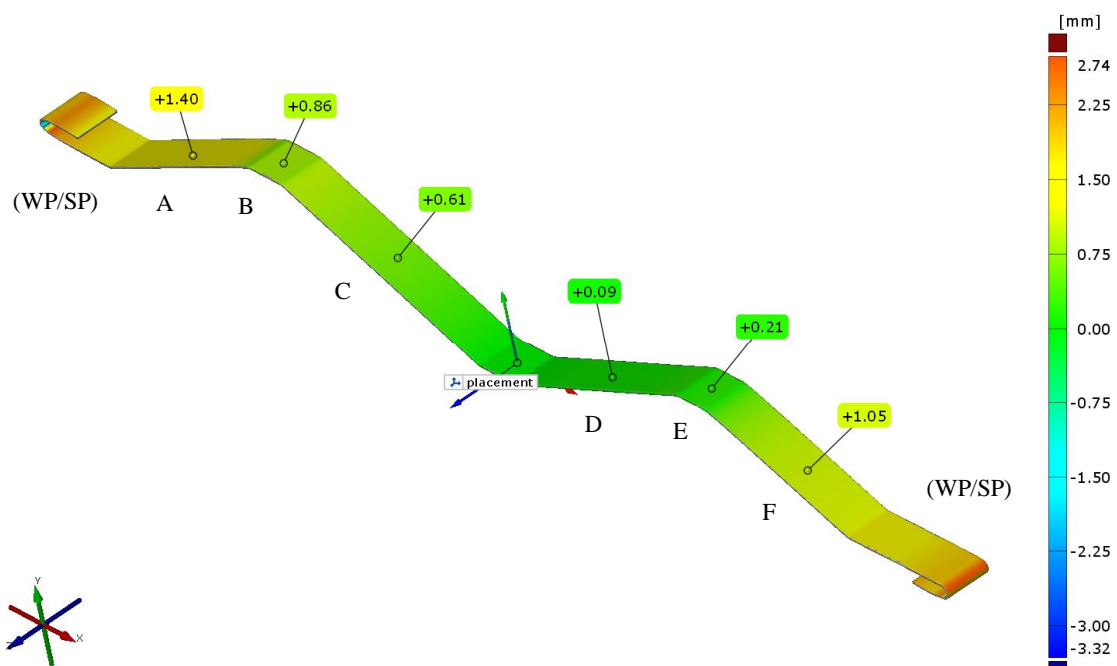
Na rys. 124-126 pokazano miejsca pomiaru odchyłki płaskości (A-F) oraz wygięcia poprzecznego (WP/SP) w analizowanych profilach elektrod. Otrzymane mapy przemieszczeń są wynikiem porównania idealnej geometrii kształtowników (referencyjnej), z powierzchnią otrzymaną po przejściu pasma giętego przez wszystkie zdefiniowane stacje profilujące.



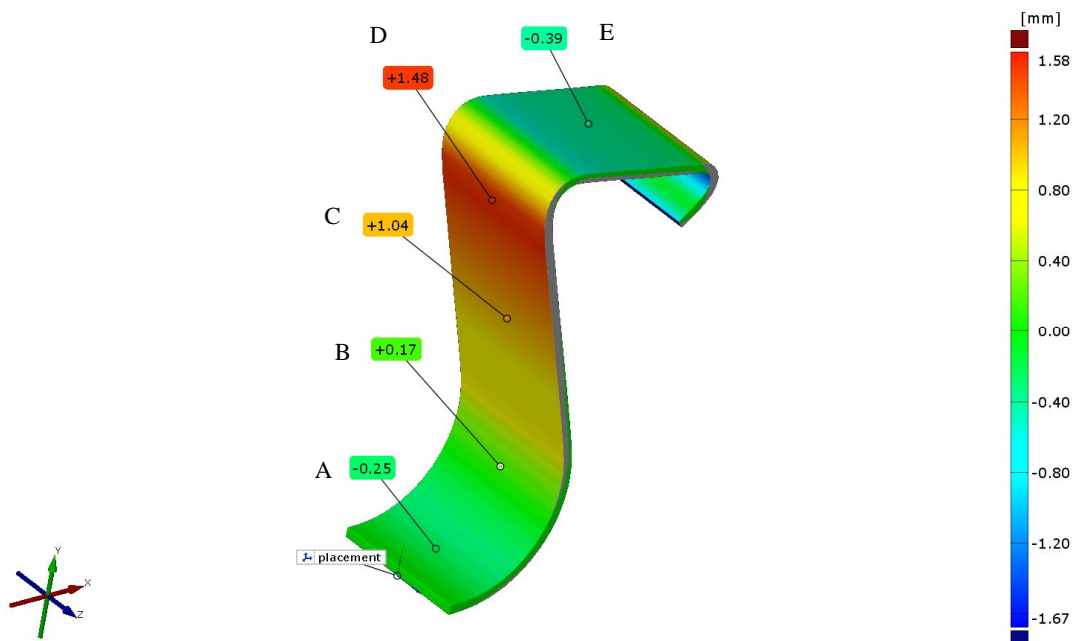
Strefy pomiaru oznaczono literami alfabetu. Pomiaru dokonywano pięciokrotnie na odcinku 10 mm (5 mm w prawą i lewą stronę) od zdefiniowanych przekrojów inspekcyjnych. W ten sposób wyliczono wartość średnią oraz odchylenie standardowe wyszczególnionych odchyłek.



Rys. 124. Mapa odchyłki płaskości (pofalowania powierzchni) oraz wygięcia poprzecznego profilu, elektroda zbiorcza typu Sigma  $g=1,25$  mm – przekrój III



Rys. 125. Mapa odchyłek płaskości (pofalowania powierzchni) oraz skręcenia poprzecznego profilu, elektroda zbiorcza płytowa ZT24  $g=1,0$  mm – przekrój II



Rys. 126. Mapa odchyłek płaskości powierzchni elektrody (pofalowania powierzchni), elektroda zbiorcza typu rynnowego  $g=1,25$  mm – przekrój III

Dane porównawcze dotyczące otrzymanych wartości odchyłki płaskości (pofalowania powierzchni) płyt elektrod zbiorczych przedstawiono w tabelicy 73. Jak wynika z przeprowadzonych badań zarówno profil Sigma, jak i płytowy ZT24 wykazuje wyraźny wzrost odchyłki płaskości, począwszy od osi symetrii płyty w kierunku prostopadłym do kierunku profilowania – rys. 124-125. Rozpatrując różne typy analizowanych kształtowników należy zwrócić uwagę na zupełnie odmienny trend w zakresie średniej wartości przedmiotowej odchyłki. Zgodnie z tabelarycznym zestawieniem danych, średnia wartość odchyłki płaskości wzrasta wraz ze zmniejszeniem grubości taśmy stalowej tylko w przypadku elektrody osadycznej typu Sigma.

Największymi wartościami odchyłki pofalowania powierzchni (płaskości) charakteryzuje się płyta elektrody ZT24 (lewa strona kształtownika - przekrój I i III), Jest to jedyny kształtownik niesymetryczny, którego profilowanie symulowano numerycznie. Dla określenia wartości dopuszczalnych odchyłek płaskości, przy których prawdopodobieństwo wystąpienia braków wyniesie 3% posłużono się wartością całki Laplace'a rozkładu normalnego standaryzowanego. Znając przyjęty poziom prawdopodobieństwa, odczytano z tablic wartość zmiennej  $z$  (patrz tablica 73).

Bezwzględna wartość odchyłki górnej  $|G|$  i dolnej  $|D|$  wyliczono jako iloczyn odchylenia standardowego i wartości zmiennej  $z$ . Otrzymane bezwzględne wartości odchyłek płaskości powierzchni płyt elektrod zbiorczych zestawiono w tabelicy 73. Analiza danych dowodzi, że profil płytowy ZT24 charakteryzuje się największym zakresem odchyłki płaskości. W odniesieniu do elektrody osadycznej typu Sigma otrzymane wartości wzrosły odpowiednio dla poszczególnych grubości typoszeregu: 1 mm ~92%, 1,25 mm ~38%, 1,5 mm ~113%.

Tablica 73. Analiza porównawcza odchyłki płaskości (pofalowania powierzchni elektrod)

Typ elektrody	Przekrój	Punkty pomiarowe						(M) [mm]	S(x) [mm]	Zmienna z	Bezwzględna wartość odchyłki górnej  G  i dolnej  D  [mm]
		A	B	C	D	E	F				
Sigma 1,0	I	0	-0,1	0,1	0,21	-	-	-0,3	0,89	2,15	1,92
	II	-0,02	-0,24	-1,18	-2,81	-	-				
	III	-0,03	-0,16	0	0,66	-	-				
Sigma 1,25	I	-0,01	-0,2	0,12	0,29	-	-	-0,26	0,74	2,15	1,6
	II	-0,02	-0,29	-0,93	-2,37	-	-				
	III	-0,02	-0,17	0,15	0,35	-	-				
Sigma 1,5	I	-0,02	-0,02	0,32	0,98	-	-	0,11	0,54	2,15	1,16
	II	0	-0,07	-0,37	-0,91	-	-				
	III	-0,02	-0,06	0,46	1,05	-	-				
ZT24 1,0	I	3,11	0,86	1	-1,1	-2,2	-1,7	0,18	1,71	2,15	3,68
	II	1,4	0,86	0,61	0,09	0,21	1,05				
	III	2,93	1,28	0,93	-0,95	-3,05	-2,1				
ZT24 1,25	I	2,1	0,7	0,82	0,68	0,72	1,92	0,65	1,03	2,15	2,21
	II	-1,21	0,05	0,54	0,33	-0,44	-1,59				
	III	2,28	0,9	0,76	0,71	0,67	1,8				
ZT24 1,5	I	2,77	0,84	0,75	0,41	0,68	2,64	0,79	1,15	2,15	2,47
	II	-0,29	-0,02	0,17	-0,01	-0,43	-1,03				
	III	3,08	0,93	0,61	0,32	0,63	2,13				
Rynnowa 1,0	I	-0,31	-0,3	0	-0,22	-0,15	-	-0,09	0,43	2,15	0,91
	II	-0,37	0	0,71	1,01	-0,67	-				
	III	-0,34	-0,29	-0,01	-0,24	-0,19	-				
Rynnowa 1,25	I	-0,2	-0,1	0,18	0,15	-0,21	-	0,10	0,51	2,15	1,1
	II	-0,25	0,17	1,04	1,48	-0,39	-				
	III	-0,26	-0,11	0,14	0,05	-0,18	-				
Rynnowa 1,5	I	-0,17	0	0,28	0,31	-0,38	-	0,15	0,60	2,15	1,29
	II	-0,25	0,24	1,11	1,72	-0,58	-				
	III	-0,21	-0,01	0,33	0,29	-0,41	-				

(M) – średnia, S(x) – odchylenie standardowe, zmienna z – wartość odczytana z tablic na podstawie funkcji Laplace'a rozkładu normalnego standaryzowanego

Mając na uwadze założenie optymalizacji produktu pod kątem redukcji masy, należałoby w rzeczywistych warunkach produkcyjnych zwrócić uwagę na jakość wsadu technologicznego, w szczególności na parametry wsadu, które mają istotny wpływ na kształtowanie się odchyłki pofalowania powierzchni. Analogiczną analizę wykonano w rozdziale dotyczącym badania wpływu właściwości profilowanego materiału na wartość poszczególnych cech geometrycznych.

W kolejnej części rozdziału podjęto próbę oceny wpływu grubości wsadu technologicznego na wartość odchyłki wygięcia poprzecznego i skręcenia poprzecznego symulowanych numerycznie kształtowników. W tabelicy 74 przedstawiono wyniki analizy wymiarowej w zakresie rozpatrywanych cech geometrycznych.

Tablica 74. Analiza wymiarowa odchyłki wygięcia / skręcenia przekroju poprzecznego

Typ elektrody zbiorczej	Maks. [mm]	(M) [mm]	S(x) [mm]	Wsp. D	Rozstęp rozrzutu R	Tolerancja technologiczna [mm]
<i>Wygięcie poprzeczne (strona prawa i lewa przekroju poprzecznego)</i>						
Sigma g=1,0 mm	2,8	2,76	0,03	1,46	0,22	$d_T^3$ 0,22
Sigma g=1,25 mm	1,58	1,55	0,02	1,46	0,17	$d_T^3$ 0,17
Sigma g=1,5 mm	2,74	2,7	0,04	1,46	0,31	$d_T^3$ 0,31
<i>Wygięcie poprzeczne / Skręcenie poprzeczne (Strona lewa przekroju poprzecznego)</i>						
ZT24 g=1,0 mm	0,49	0,32	0,14	1,46	1,24	$d_T^3$ 1,24
ZT24 g=1,25 mm	2,31	2,29	0,01	1,46	0,09	$d_T^3$ 0,09
ZT24 g=1,5 mm	3,3	3	0,14	1,46	1,22	$d_T^3$ 1,22
<i>Wygięcie poprzeczne / Skręcenie poprzeczne (Strona prawa przekroju poprzecznego)</i>						
ZT24 g=1,0 mm	-2,92	-2,94	0,02	1,46	0,17	$d_T^3$ 0,17
ZT24 g=1,25 mm	2,44	2,33	0,07	1,46	0,61	$d_T^3$ 0,61
ZT24 g=1,5 mm	3,55	3,44	0,1	1,46	0,86	$d_T^3$ 0,86

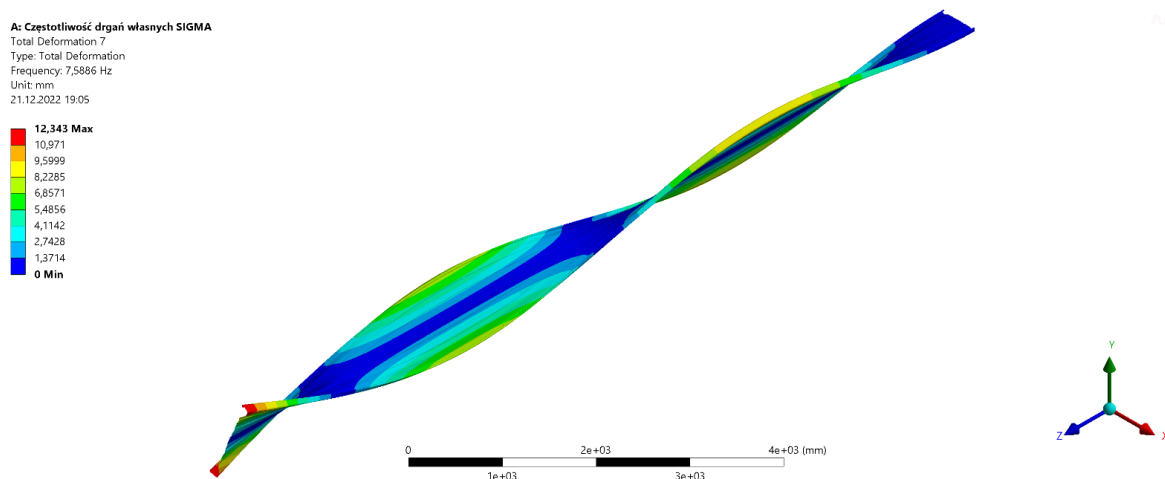
Opierając się na powyższych wynikach można stwierdzić, że tylko elektroda zbiorcza płytowa ZT24 (g=1,0 mm) wykazuje tendencję do skręcenia przekroju poprzecznego. Kierunek wygięcia lewej strony profilu jest przeciwny do strony prawej kształtownika. W pozostałych konfiguracjach zmierzone wartości odchyłki w przekroju inspekcyjnym III potwierdzają, że odstępstwo od geometrii projektowanej należy interpretować jako wygięcie poprzeczne.

Dane liczbowe zawarte w powyższej tabeli wskazują, że omawiany profil cechuje się największymi wartościami analizowanej odchyłki. Ponadto należy zwrócić uwagę, że dla lewej strony kształtownika (g=1 i 1,5 mm) otrzymana wartość odchylenia standardowego świadczy, że wartości badanej cechy geometrycznej są szeroko rozrzucone wokół średniej. W tabelarycznym opisie danych wyliczono i zestawiono wartość tolerancji technologicznej (wykonawczej). Przy spełnieniu warunku  $d_T^3 R$  nie zakłada się wystąpienia braków produkcyjnych.

Dla elektrody zbiorczej rynnowej nie pokazano wyników, gdyż zastosowana metodyka wykonania pomiarów nie wykazała dla tego kształtownika tendencji do skręcenia, jak również wygięcia przekroju poprzecznego po przejściu pasma giętego przez wszystkie zaprojektowane stacje profilujące.

### 13. Ocena cechy użytkowej elektrod zbiorczych na podstawie analizy numerycznej drgań własnych i wymuszonych

Celem analizy przeprowadzonej w tym rozdziale było oszacowanie wpływu grubości wsadu technologicznego na zmianę jednej własności użytkowych elektrod osadczych. Analizie poddano elektrody typu: Sigma, płytowego (ZT24) oraz rynnowego o długości 11 m, mierzono przyspieszenia, jakie uzyskują te elektrody. W branży energetycznej uznaje się powyższy parametr, jako główną miarę skuteczności strzepywania pyłu z powierzchni elektrod zbiorczych. Sprawdzone rozkład przyspieszeń na powierzchniach pojedynczych profili, a następnie obliczenia przeprowadzono dla sekcji elektrod osadczych, odzwierciedlając rzeczywiste warunki pracy tego podzespołu w elektrofiltrze. Wyniki symulacji przyspieszeń podano jako wielokrotność przyspieszenia ziemskiego  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ . Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie Ansys 2022 R1 (analizy typu: Modal i Harmonic Response) oraz Autodesk Nastran 2023 (analiza typu: Direct Transient Response). Biorąc pod uwagę gabaryty analizowanych konstrukcji, oraz zalecenia producentów oprogramowania [43] w tym zakresie, zdecydowano, że do analizy zostaną wykorzystane elementy skończone powłokowe w przypadku, gdy stosunek długości do grubości danej części jest większy od 20. W związku z powyższą wskazówką pojedyncze profile modelowano jako powierzchnie środkowe w środowisku CAD, a następnie definiowano dla tych powierzchni grubość w oprogramowaniu Ansys. Analogiczne podejście zastosowano w przypadku płyt elektrod zbiorczych (Autodesk Nastran), gdzie wykorzystano narzędzie mid surface. Takie podejście pozwoliło zredukować czas obliczeń o około 75%, w odniesieniu do konstrukcji w których siatkę tworzyłyby elementy skończone typu solid. Elektrodom osadczym oraz podzespołom sekcji elektrod przypisano materiał, którego parametry: ( $R_e=260 \text{ MPa}$ ;  $E=210\,000 \text{ MPa}$ ) odpowiadają stali konstrukcyjnej w gatunku S235 (gatunek zbliżony do DC01). W pierwszym kroku analizy wyliczono częstotliwość drgań własnych rozpatrywanych profili w zakresie grubości  $1,0 \div 1,5 \text{ mm}$ . Przykładowy wykres przemieszczeń całkowitych elektrody zbiorczej typu Sigma przedstawiono na rys. 127, a wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 75.



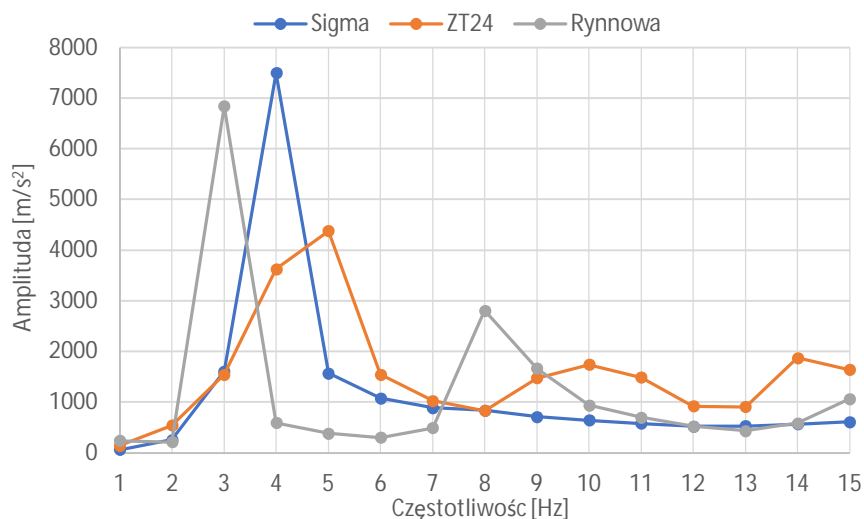
Rys. 127. Wykres przemieszczeń całkowitych, elektrody zbiorczej typu SIGMA o grubości 1 mm, dla częstotliwości wynoszącej 7,6 Hz (skala zdeformowana)

Otrzymane wyniki analizy modalnej wskazują, że zmiana grubości materiału nie powoduje znaczącej zmiany postaci drgań własnych. Zakres 10 pierwszych częstotliwości drgań własnych dla trzech analizowanych profili zawiera się w zakresie 0,3÷15 Hz.

Tablica 75. Częstotliwość drgań własnych elektrod zbiorczych o grubości bazowej i zmniejszonej

Typ elektrody zbiorczej	Grubość taśmy stalowej [mm]	Częstotliwość drgań własnych [Hz]									
		Numer postaci drgań własnych									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sigma	1	0,28	0,54	1,73	2,82	3,82	4,65	7,59	8,44	13,01	14,06
	1,25	0,28	0,60	1,74	2,90	3,82	4,73	7,63	8,70	13,43	14,38
	1,5	0,28	0,65	1,74	2,99	3,82	4,78	7,73	8,90	13,79	14,60
ZT24	1	0,29	0,45	1,79	2,04	3,64	4,83	5,32	9,01	9,83	13,57
	1,25	0,29	0,51	1,80	2,15	3,64	4,90	5,42	9,24	10,10	14,31
	1,5	0,29	0,57	1,81	2,28	3,64	4,95	5,54	9,40	10,29	14,79
Rynnowa	1	0,34	0,47	1,64	2,24	2,95	4,44	7,21	8,11	8,26	12,63
	1,25	0,35	0,47	1,80	2,53	2,95	4,71	8,10	8,26	8,61	13,21
	1,5	0,35	0,47	1,91	2,84	2,95	4,95	8,26	8,82	9,28	13,79

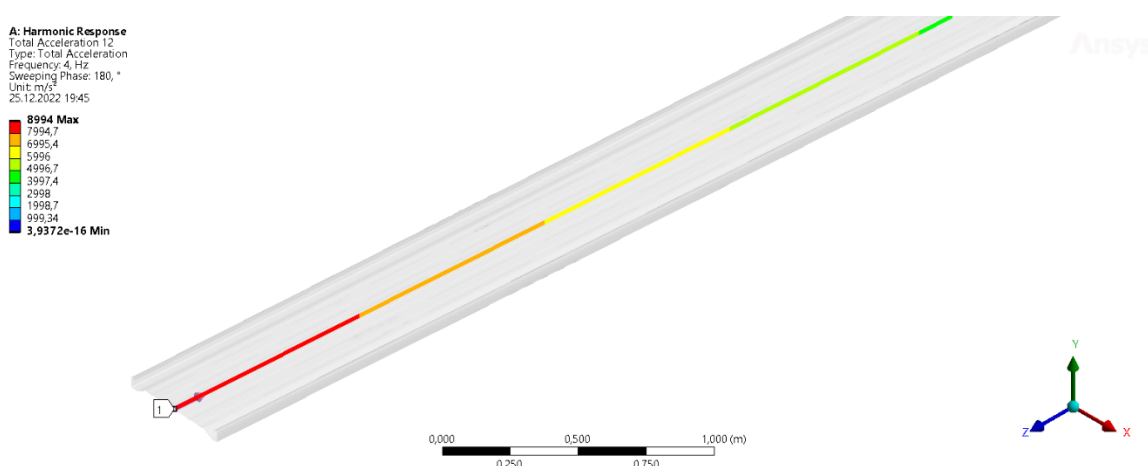
W następnym etapie wyznaczono charakterystykę amplitudowo – częstotliwościową. Miało to na celu określenie, które częstotliwości drgań własnych płyt elektrod zbiorczych są odpowiedzialne za maksymalne wartości przyspieszeń. Na rys. 128 zilustrowano zmianę wartości maksymalnego przyspieszenia w funkcji rozpatrywanego pasma częstotliwościowego.



Rys. 128. Charakterystyka amplitudowo – częstotliwościowa

Z danych zamieszczonych na powyższym wykresie wynika, że największe wartości przyspieszeń zostały zidentyfikowane w zakresie częstotliwości 3÷5 Hz, przy czym każdy rozpatrywany profil elektrody wykazał swoją indywidualną częstotliwość odpowiedzialną za szczytową wartość przyspieszeń. W paśmie częstotliwościowym 7÷15 Hz maksymalne wartości omawianego parametru nie przekraczają 3000 m/s<sup>2</sup>. Bazując na powyższych danych wyliczono średnie wartości przyspieszeń na powierzchniach pojedynczych profili w osi ich symetrii.

W tym celu zdefiniowano ścieżkę (geometrię konstrukcyjną), względem której odczytywano wyniki symulacji numerycznych – rys. 129. Płyty elektrod pobudzano do drgań siłą skupioną o wartości: 13610 N (profil typu Sigma i ZT24) oraz 1361 N (profil rynnowy). Powyższe wartości stanowiły odpowiednio 1/10 oraz 1/100 maksymalnej siły wymuszającej, którą zdefiniowano w dalszej części rozdziału dla sekcji elektrod zbiorczych. Pojedyncze płyty elektrod utwierdzono sztywno w miejscu ich zawieszenia oraz obciążono dodatkowo siłą grawitacji. Siła wymuszająca została przyłożona do dolnej krawędzi cienkościennych stalowych paneli w kierunku X. W obliczeniach uwzględniono bezwymiarowy współczynnik tłumienia  $\eta=0,023$  (2,3%) definiowany, jako iloraz współczynnika tłumienia oraz tłumienia krytycznego. Przyjęta do obliczeń wartość współczynnika została oszacowana na podstawie danych literaturowych [87]. W przytoczonych pozycjach literaturowych analizowano podobne cienkościennie konstrukcje stalowe. W tabelicy 76 zestawione zostały wyniki symulacji numerycznej w opcji z tłumieniem i bez uwzględnienia tłumienia. W analizie porównawczej odniesiono się do grubości bazowej taśmy stalowej  $g=1,5$  mm.



Rys. 129. Sposób pomiar przyspieszenia całkowitego na powierzchni pojedynczego panelu, elektroda zbiorcza typu Sigma o grubości 1,0 mm

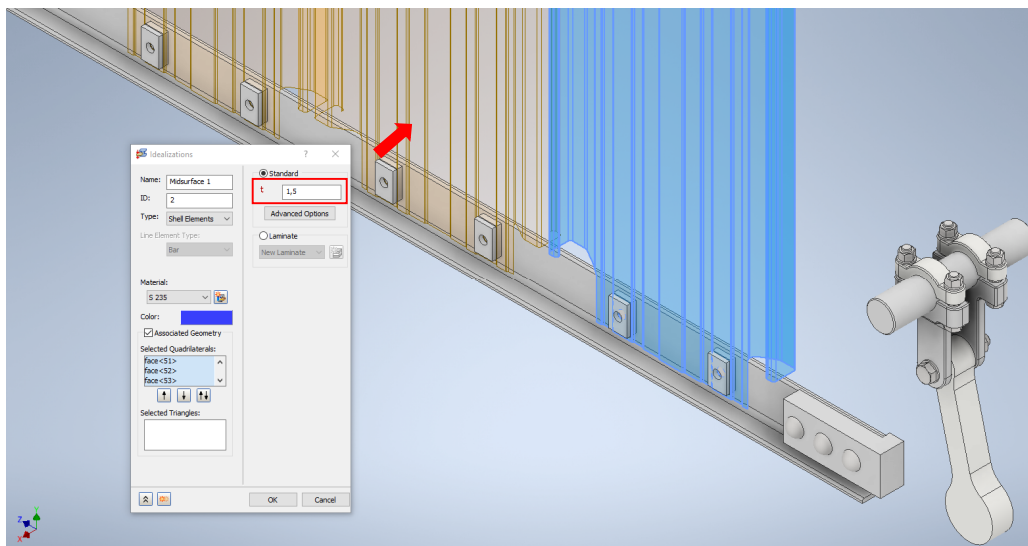
Tablica 76. Wartości przyspieszenia całkowitego na powierzchniach pojedynczych paneli elektrod zbiorczych

Typ elektrody zbiorczej	Grubość taśmy stalowej [mm]	Bez tłumienia		Wzrost wartości $a_{max}$ [%]	Uwzględnione tłumienie		Wzrost wartości $a_{max}$ [%]
		Średnia	Max.		Średnia	Max.	
Sigma	1,5	296	748	-	238	600	-
	1,25	355	897	19,9	285	720	19,9
	1	443	1119	49,5	356	899	49,7
ZT24	1,5	170	433	-	160	406	-
	1,25	204	519	19,8	192	487	19,8
	1	254	647	49,3	239	607	49,4
Rynnowa	1,5	287	684	-	94	235	-
	1,25	343	818	19,5	113	283	20,1
	1	427	1018	48,8	141	354	50,4

Wyniki pomiarów podano w przyspieszeniach ziemskich  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>

Dane zamieszczone w tabeli 76 wskazują, że redukcja masy płyt elektrod osadczycy powoduje wzrost wartości przyspieszenia całkowitego. Dla grubości taśmy stalowej  $g=1,25$  mm (redukcja masy  $\sim 16,7\%$  względem bazowej) odnotowano wzrost przyspieszenia na poziomie  $\sim 20\%$ . Dla grubości wsadu technologicznego  $g=1,0$  mm (redukcja masy  $\sim 33,3\%$ ) wzrost przyspieszenia całkowitego na powierzchni płyt wynosi  $\sim 50\%$ . W przedmiotowej analizie sprawdzono ponadto wpływ tłumienia na zmianę analizowanego parametru. Otrzymane wyniki symulacji numerycznej dowodzą, że geometria analizowanych profili wpływa znacząco na różnicę w odniesieniu do propagacji drgań konstrukcji bez uwzględnienia tego parametru oraz z tłumieniem. Dla rozpatrywanych profili odnotowano spadek wartości przyspieszenia odpowiednio: Sigma  $\sim 19,6\%$ , ZT24  $\sim 6,2\%$ . W przypadku elektrody rynnowej różnica ta wynosi  $\sim 65,4\%$ .

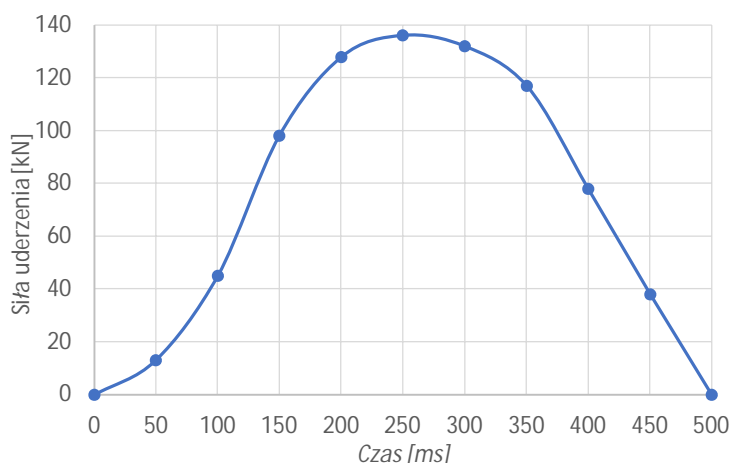
W dalszej części tego rozdziału sprawdzono rozkład przyspieszenia całkowitego na powierzchniach sekcji elektrod osadczycy. Podjęto próbę odzwierciedlenia rzeczywistych warunków pracy wspomnianego podzespołu elektrofiltru o poziomym przepływie spalin. Na etapie budowy modeli numerycznych sekcji elektrod zbiorczych zdefiniowano kontakty pomiędzy poszczególnymi podzespołami sekcji, w celu zapewnienia prawidłowego ich połączenia - rys. 130.



Rys. 130. Sposób definiowania grubości dla poszczególnych paneli sekcji elektrod zbiorczych typu Sigma

Drgania wywoływane były uderzeniem młotka przerzutowego o masie 5,8 kg i ramieniu  $l=250$  mm, w drąg strzepujący. Na rys. 131 przedstawiono przebieg udaru mechanicznego w czasie. Maksymalna siła uderzenia została zidentyfikowana w czasie 0,25s (136,1 kN) [132]. Wartość impulsu siły uderzenia wyliczono z zasady zachowania pędu, otrzymując wartość 18,34 Ns. Analogicznie, jak w przypadku pojedynczych paneli płyty elektrod osadczycy obciążono siłą grawitacji. W obliczeniach uwzględniono tłumienie. Przyjęto identyczną wartość bezwymiarowego współczynnika tłumienia  $g$  jak dla pojedynczych paneli. W przedmiotowych analizach zastosowano elementy skończone powłokowe (quadrilateral shell elements – siatka liniowa) dla płyt elektrod. Ilość elektrod osadczycy w poszczególnych sekcjach wynosiła: Sigma – 6, ZT24 – 6, rynnowa – 12.





Rys. 131. Wykres zmian wartości siły uderzenia młotka w czasie [132]

Pomiaru przyspieszenia dokonywano w ośmiu punktach na każdej elektrodzie w płacie. Odległość punktów pomiarowych od strony zamocowania elektrody do drąga strzepującego wynosiła: 250, 1750, 3250, 4750, 6250, 7750, 9250, 10750 mm. Odczytu wartości przyspieszenia całkowitego dokonywano w osi symetrii płyt. Wyniki analizy numerycznej zestawiono w tabelicy 77. Na rys. 132 pokazano przykładowa mapę rozkładu przyspieszenia na powierzchni płyta składającego się z 6-ciu płyt typu Sigma.

Tablica 77. Wartości przyspieszenia całkowitego na powierzchniach analizowanych sekcji elektrod zbiorczych

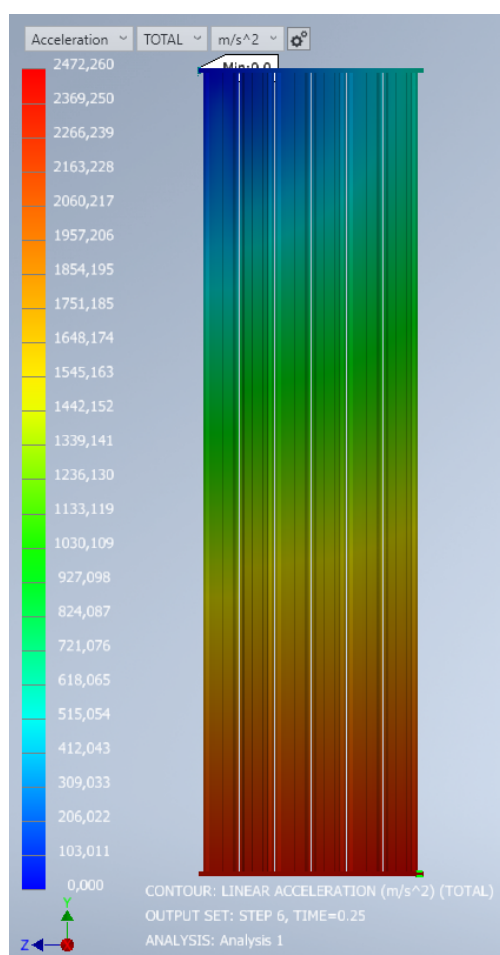
Typ elektrody zbiorczej	Grubość taśmy stalowej [mm]	Średnia	Max.	Moment wystąpienia max. wartości przyspieszenia [s]	Wzrost wartości $a_{max}$ [%]	Masa sekcji EZ [kg]	Energia uderu przypadająca na jednostkę masy [Ns/kg]
Sigma	1,5	96	188	0,25	-	704	2,60E-02
	1,25	109	213		13,6	626	2,93E-02
	1	127	247		31,7	547	3,36E-02
ZT24	1,5	112	220	0,23	-	558	3,29E-02
	1,25	127	249		13,1	482	3,80E-02
	1	146	287		30,3	407	4,51E-02
Rynnowa	1,5	60	89	0,3	-	325	5,64E-02
	1,25	71	105		17,9	275	6,67E-02
	1	87	128		43,8	223	8,21E-02

Wyniki pomiarów podano w przyspieszeniach ziemskich  $g=9,81 \text{ m/s}^2$

Podane w tabelicy 77 wartości analizowanego parametru wskazują, że w przypadku instalacji w elektrofiltrze sekcji składających się z elektrod typu Sigma i płytowego - ZT24 o zmniejszonej masie należy spodziewać się wzrostu przyspieszenia w zakresie  $\sim 13,1 \div 13,6\%$  (dla grubości taśmy stalowej  $g=1,25 \text{ mm}$ ) oraz  $\sim 30,3 \div 31,7\%$  (dla grubości  $g=1,0 \text{ mm}$ ). Są to najczęściej stosowane profile w elektrofiltrach o poziomym przepływie spalin. Należy podkreślić, że otrzymane średnie wartości przyspieszenia na powierzchni ww. płyt spełniają postulowany w literaturze oraz branży energetycznej warunek intensywności strzepywania tj. 100 g. Wyjątek stanowi sekcja składająca się z płyt typu Sigma o grubości  $g=1,5 \text{ mm}$  (3,7%) z wynikiem poniżej wartości granicznej.

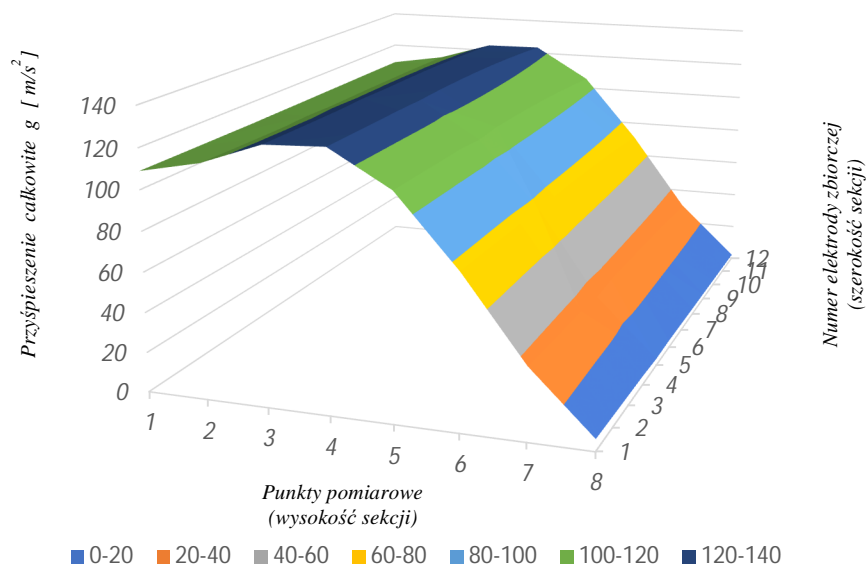
Ze względu na pewne uproszczenia konstrukcyjne należałoby traktować powyższą wartość jako akceptowaną z punktu widzenia skuteczności oczyszczania płyt ze zgromadzonego na nich pyłu. Przedmiotowa analiza numeryczna uwzględniała również profil typu rynnowego. Dane zestawione w tablicy 77 dowodzą, że wspomniany typ elektrody zbiorczej cechuje największy wzrost wartości przyspieszenia całkowitego w odniesieniu do grubości bazowej ( $g = 1,5 \text{ mm}$ ). Dla taśmy stalowej o grubości  $1,0 \text{ mm}$  otrzymano wzrost współczynnika „g” na poziomie  $\sim 44\%$ .

Jednak zastosowanie tego typu profilu o długości  $11 \text{ m}$ , z punktu widzenia wymaganej skuteczności strzepywania mogłoby okazać się ryzykowne. Dlatego też zbadano numerycznie inne długości wspomnianej elektrody i stwierdzono, że sekcje elektrod zbiorczych złożone z paneli typu rynnowego nie powinny przekraczać długości:  $6 \text{ m}$  przy  $g = 1,25 \text{ mm}$  oraz  $8 \text{ m}$  przy  $g = 1,0 \text{ mm}$ .



Rys. 132. Mapa przyspieszenia całkowitego na powierzchni płyta elektrod zbiorczych typu Sigma wykonanych z taśmy stalowej o grubości  $1,0 \text{ mm}$

Wymieniony profil wykazuje wysoki i równomierny rozkład przyspieszenia na tych powierzchniach płyt do określonych długości. Po przekroczeniu wyszczególnionych długości płyty elektrody, zauważalny jest gwałtowny spadek wartości przyspieszenia – rys 133. Powyższa uwaga może stanowić wskazówkę dla projektantów elektrofiltrów.



Rys. 133. Obliczone numerycznie wartości przyspieszenia w funkcji długości i szerokości sekcji elektrod typu rynnowego o grubości  $g=1,0$  mm

W niniejszym rozdziale szukano odpowiedzi na problemy badawcze dotyczące wpływu redukcji masy elektrod osadczych elektrofiltru na drgania własne i wymuszone. Wyznaczono charakterystyki częstotliwościowo – amplitudowe na podstawie których, określono zakres częstotliwości odpowiedzialnych za maksymalne wartości amplitud przyspieszeń. Sprawdzone rozkład przyspieszenia na powierzchni pojedynczych paneli, a następnie sekcji elektrod zbiorczych, stanowiących jeden z najważniejszych węzłów konstrukcyjnych elektrofiltru. Oszacowano wzrost wartości omawianego parametru w odniesieniu do bazowej (standardowej) grubości płyt elektrod osadczych.

## 14. Ekonomiczne aspekty procesu produkcyjnego w określonych warunkach warsztatowych

Tendencja rynkowa wymusiła na producentach elektrofiltrów i części zamiennych dla tych urządzeń, poszukiwanie przewag konkurencyjnych, co związane jest z koniecznością optymalizacji linii produktów i procesu wytwórczego. Dla analizowanego podzespołu elektrofiltru, jakim jest elektroda zbiorcza, na wstępie przeprowadzono analizę szans i zagrożeń związanych z wprowadzeniem nowego produktu na rynek. W tabelicy 78 przedstawiono wyniki analizy słabych i mocnych stron.

Tablica. 78. Wyniki analizy korzyści i zagrożeń wynikających z wprowadzenia nowego produktu

<i>Elektroda zbiorcza o zmniejszonej masie</i>	
<i>Wyraźne korzyści</i>	<i>Potencjalne zagrożenia</i>
<i>Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej linii produkcyjnej podczas profilowania</i>	<i>Większe tendencje do powstawania wad podczas procesu produkcyjnego</i>
<i>Zmniejszenie energii elektrycznej napędów strzępywaczy elektrod zbiorczych elektrofiltru</i>	
<i>Zmniejszenie poziomu hałasu</i>	<i>Zmniejszenie sztywności profilu elektrody osadczej – prawdopodobieństwo zmniejszenia długości profilu elektrody kosztem zwiększenia szerokości komory elektrofiltru</i>
<i>Uzyskanie przewagi konkurencyjnej i utrzymanie się w gronie strategicznych dostawców</i>	
<i>Lepsze wykorzystanie przestrzeni magazynowej</i>	
<i>Zmniejszenie zużycia oprzyrządowania technologicznego (mniejsze siły nacisku występujące podczas profilowania / zmniejszenie potrzebnej siły wykrawania)</i>	<i>Wzrost niepożądanego zjawiska sprężynowania powrotnego wsadu (taśmy stalowej) podczas profilowania</i>
<i>Zwiększenie liczby elektrod transportowanych jednocześnie</i>	<i>Zmniejszenie żywotności poszczególnych węzłów konstrukcyjnych sekcji elektrod zbiorczych w przypadku błędnie dobranych parametrów eksploatacyjnych</i>
<i>Jednoczesne zmniejszenie masy innych podzespołów układu elektrod zbiorczych</i>	

W następnym etapie na przykładzie zlecenia produkcyjnego obejmującego produkcję 12 448 szt. elektrod osadczych typu Sigma III (~1200 ton), porównano materiałochłonność i energochłonność produkcji. Zestawienie opracowano dla typoszeregu trzech grubości taśmy stalowej zimnowalcowanej, przyjmując jako bazową  $g=1,5$  mm. Wyniki zestawiono w tabelicy 79.

Tablica 79. Koszt materiałowy elektrod zbiorczych na przykładzie wielkogabarytowego elektrofiltru

<i>Elektroda zbiorcza Sigma III L=13 000 mm / liczba: 12 448 szt.</i>		
<i>Grubość taśmy: 1,5 mm</i>	<i>Grubość taśmy: 1,25 mm</i>	<i>Grubość taśmy: 1,0 mm</i>
<i>Masa 1 m.b.– 7,41 kg Masa 1 szt. L=13 000 mm – 96,33 kg Masa 12 448 szt. = 1199,1 t</i>	<i>Masa 1 m.b.– 6,18 kg Masa 1 szt. L=13 000 mm – 80,34 kg Masa 12 448 szt. = 1000,1 t</i>	<i>Masa 1 m.b.– 4,94 kg Masa 1 szt. L=13 000 mm – 64,22, kg Masa 12 448 szt. = 799,4 t</i>
<i>Rynkowa cena taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 – 1376,3 €/t    1 € - 4,65 zł</i>		
<i>Oszczędności wynikające z redukcji masy elektrody zbiorczej</i>		
<i>Redukcja masy: 16,67% 1199,1 t – 1000,1 t = 199 t 199 t x 1376,3 € = 273 892,5 € x 4,65 zł = <b>1 273 600,0 zł</b></i>	<i>Redukcja masy: 33,34% 1199,1 t – 799,4 t = 399,7 t 399,7 t x 1376,3 € = 550 131,9 € x 4,65 zł = <b>2 558 113,8 zł</b></i>	

W tablicach 80-81 porównano wskaźniki materiałochłonności w odniesieniu do trzech analizowanych grubości taśmy stalowej zimnowalcowanej zastosowanej do produkcji, oraz wskaźniki oceny kosztów i ich odchylenia względne. Udział kosztów materiałowych w odniesieniu do całkowitych kosztów wytworzenia wyliczono za pomocą wskaźnika struktury:

$$W_s = \frac{Km}{CKP} * 100 \quad (43)$$

gdzie:

$W_s$  – wskaźnik struktury [%];

$Km$  – koszty wsadu technologicznego [zł];

$CKP$  – całkowity koszt wytworzenia [zł].

Otrzymane wyniki analizy ekonomicznej opracowano na podstawie kalkulacji przedmiotowego zlecenia produkcyjnego. Koszty materiałowe stanowią ponad 90% całkowitych kosztów wytworzenia. Materiałochłonność produkcji w głównej mierze kształtuje całkowity koszt wytworzenia elektrod zbiorczych i jednocześnie pozwala zidentyfikować obszar o dużym potencjale optymalizacyjnym.

Tablica 80. Podstawowe wskaźniki procesu produkcyjnego w przypadku zlecenia obejmującego 12 448 szt. elektrod zbiorczych

Wskaźniki procesu produkcyjnego	Grubość taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 [mm]		
	$g=1,5$	$g=1,25$	$g=1,0$
<i>Wielkość zamówienia: 12 448 szt. (800, 1200 ton). Czas realizacji produkcji: 692 roboczogodziny</i>			
$\frac{\text{Produktywność maszyn wykonane produkty [t]}}{\text{czas pracy maszyn [godz]}}$	1,75	1,45	1,16
$\frac{\text{Produktywność pracy wykonane produkty [t]}}{\text{liczba pracowników}}$	171,3	142,8	114,2
$\frac{\text{Produktywność powierzchni wykonane produkty [t]}}{\text{powierzchnia produkcyjna [m²]}}$	0,37	0,31	0,25
$\frac{\text{Materiałochłonność produkcji zużyte materiały [t]}}{\text{liczba wytworzonych produktów [szt.]}}$	0,096	0,08	0,064
$\frac{\text{Wskaźnik uwzględniający parametr użytkowy masa elektrody [kg/1mb]}}{\text{powierzchnia osadczą SCA 1mb EZ [m²]}}$	11,76	9,81	7,84

Miarą zmian kosztów materiałochłonności produkcji są ich odchylenia, czyli różnica między stanem rzeczywistym a wielkością bazową. W analizie wskaźnikowej, jako wielkość bazową przyjęto grubość taśmy stalowej zimnowalcowanej  $g=1,5$  mm. W tablicy 81 wyszczególniono najważniejsze wskaźniki oceny kosztów materiałowych oraz ich odchylenia względne. Jednostkowy koszt produktu obniża się wraz z redukcją masy elektrody zbiorczej odpowiednio o 16,2% dla  $g=1,25$  i 32,2% dla  $g=1$  mm.

Kwotę bezwzględną obniżki kosztów materiałowych  $\Delta K_m$  i wskaźnik względnej obniżki kosztów materiałowych  $'\Delta K_m$  wyliczono dla analizowanego zlecenia produkcyjnego, porównując całkowity koszt udziału materiałowego w zleceniu produkcyjnym.  $\Delta K_{m1}$  – przyjęto jako punkt odniesienia ( $g=1,5$  mm), natomiast  $\Delta K_{m2}$  stanowi koszt materiałowy dla dwóch pozostałych grubości materiału produkcyjnego. Z otrzymanych wartości wskaźnika  $'\Delta K_m$  wynika, że obniżka kosztów materiałowych wynosi odpowiednio: 17,2% w przypadku redukcji masy produktu o 16,7% ( $g=1,25$  mm) i 34,2% dla grubości ( $g=1$  mm), gdzie redukcja masy wynosi aż 33,3%.

Tablica 81. Wskaźniki oceny kosztów materiałowych oraz ich odchylenia względne

Wskaźniki oceny kosztów materiałowych	Grubość taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 [mm]		
	$g=1,5$	$g=1,25$	$g=1,0$
Udział kosztów materiałowych w całkowitym koszcie wytworzenia [%]	93,0	91,9	90,3
Jednostkowy koszt produktu [zł/szt.]	690,14	578,6	467,8
Cena 1 szt. elektrody zbiorczej Sigma III $L=13\ 000$ mm [zł/kg]	7,16	7,2	7,28
Kwota bezwzględna obniżki kosztów materiałowych $\Delta K_m$ [zł] $\Delta K_m = \Delta K_{m2} - \Delta K_{m1}$	-	- 1 371 138,7	- 2 733 762,4
Wskaźnik względnej obniżki kosztów materiałowych $'\Delta K_m$ [%] $'\Delta K_m = \frac{\Delta K_m}{\Delta K_{m2} - \Delta K_{m1}} * 100$	-	- 17,16	- 34,21

W dalszej części analizy ekonomicznej zwrócono uwagę na aspekt energochłonności procesu produkcyjnego dla przyjętych warunków warsztatowych, tj. parku maszynowego, za pomocą którego realizowany był proces wytwórczy. W celu określenia energochłonności produkcji wykonano pomiar zużycia energii elektrycznej dla elektrody zbiorczej typu Sigma III o długości  $L=13175$  mm, wykonanej z taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 o grubości 1,25 i 1,5 mm. W tablicy 82 zestawiono zmierzone wartości. W rzeczywistych warunkach produkcyjnych nie przeprowadza się pomiaru zużycia energii elektrycznej. Na potrzeby pracy zmierzono te wielkości w czasie kilku prób.

Tablica 82. Dane zmierzone z próby technologicznej profilowania

Grubość taśmy stalowej [mm]	Zużycie energii elektrycznej [kWh]	Czas profilowania [s]
1,25	0,2	68
1,5	0,3	66

Do obliczenia zużycia energii elektrycznej w odniesieniu do grubości zastosowanej taśmy stalowej oraz mocy, posłużono się następującymi zależnościami przy założeniu stałej długości wykonywanej elektrody zbiorczej:

$$\frac{E_{el}}{g} \left[ \frac{kWh}{mm} \right] \text{ (wskaźnik)} \quad (44)$$

$$N_{el} = \frac{E_{el}}{\tau} [kW] \quad (45)$$

gdzie:

$N_{el}$  – moc elektryczna pobierana w czasie procesu technologicznego gięcia [kW];

$E_{el}$  – zużycie energii elektrycznej [kWh];

$g$  – grubość taśmy stalowej [mm];

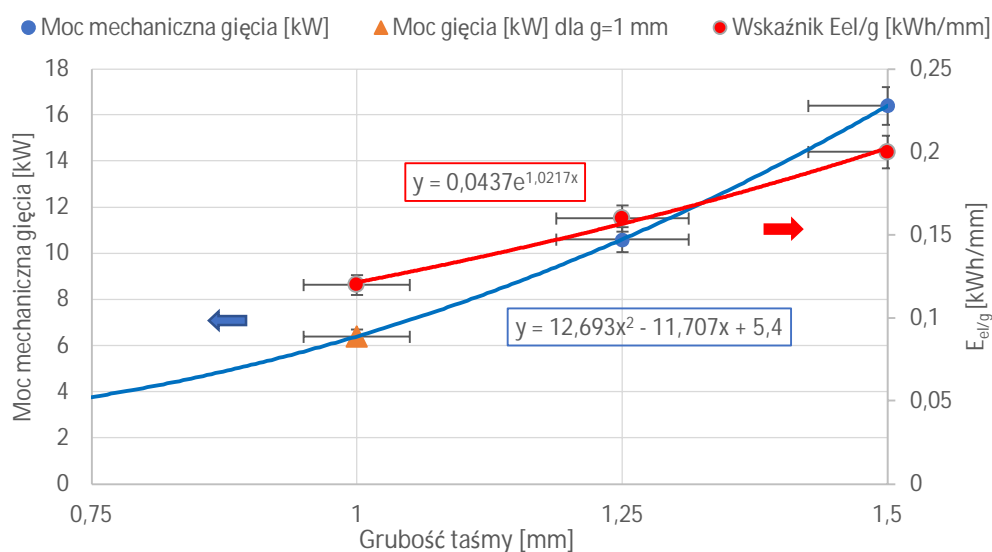
$t$  – czas profilowania [s].

Wykorzystując powyższe zależności otrzymano następujące wartości (tablica 83):

Tablica 83. Wartości wskaźników energetycznych określających proces gięcia

Grubość taśmy stalowej [mm]	$\frac{E_{el}}{g} \left[ \frac{kWh}{mm} \right]$	$N_{el} [kW]$
1,25	0,16	10,6
1,5	0,2	16,4

Dla określenia mocy napędów w procesie wielotaktowego gięcia rolkowego taśmy stalowej o grubości 1 mm wykorzystano zależność funkcyjną, jak przedstawiono na rysunku 134. W oszacowaniu tego parametru uwzględniono moc profilarki na biegu jałowym (bez obciążenia – 5,4 kW), którą zmierzono podczas pomiarów w warunkach warsztatowych. Zależność pomiędzy grubością taśmy a mocą mechaniczną gięcia aproksymowano wielomianem drugiego stopnia. Na podstawie otrzymanej wartości  $N_{el}$  wyliczono zużycie energii elektrycznej i następnie wskaźnik określający zużycie energii elektrycznej w odniesieniu do grubości taśmy  $g=1$  mm, gdyż takiej grubości materiału do tej pory nie stosowano w produkcji. Do obliczeń przyjęto identyczny czas profilowania jak dla grubości taśmy  $g=1,25$  mm, ponieważ czas profilowania elektrod zbiorczych dla 2 zmiennych grubości taśmy stalowej był porównywalny. Zależność  $E_{el}/g$  aproksymowano funkcją wykładniczą. Zależność funkcyjną zobrazowano na rys. 134.



Rys. 134. Zależności funkcyjne: zużycie energii elektrycznej – grubość taśmy stalowej (czerwony), moc mechaniczna gięcia – grubość taśmy stalowej przeznaczonej do produkcji elektrody zbiorczej (niebieski)

W tabelicy 84 zestawiono podstawowe wskaźniki energochłonności produkcji. Koszt zużycia energii elektrycznej dla przedmiotowej analizy oszacowano dla taryfy G11 i aktualnie obowiązującej stawki 0,65 zł/kWh w X 2022. W tabelicy 85 zestawiono porównanie i analizę struktury kosztów energochłonności produkcji elektrody osadczą Sigma III, dla trzech wariantów grubości wsadu technologicznego.

Tablica 84. Podstawowe wskaźniki energochłonności produkcji

<i>Elektroda zbiorcza Sigma III L=13 500 mm</i>		
<i>g=1,0 mm (*)</i>	<i>g=1,25 mm</i>	<i>g=1,5 mm</i>
<i>Moc mechaniczna gięcia [kW]</i>		
6,39	10,6	16,4
<i>Energia elektryczna zużyta w procesie gięcia [kWh]</i>		
0,12	0,2	0,31
<i>Koszt energii elektrycznej zużytej w procesie gięcia zł/1szt</i>		
0,077	0,128	0,198
<i>Wskaźnik <math>E_{el/g}</math> [kWh/mm]</i>		
0,121	0,16	0,2
(*) – oszacowano na podstawie tablicy 82-83		

Tablica 85. Wskaźniki oceny kosztów zużycia energii elektrycznej oraz ich odchylenia względne

<i>Wskaźniki oceny kosztów zużycia energii elektrycznej</i>	<i>Grubość taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 [mm]</i>		
	<i>g=1,5</i>	<i>g=1,25</i>	<i>g=1,0</i>
$\frac{\text{Produktywność energii wykonane produkty [zł]}}{\text{zużycie energii elektrycznej [zł]}}$	3481,0	4515,3	6059,1
Kwota bezwzględna obniżki kosztów zużycia energii elektrycznej DK Eel [zł] $\Delta K Eel = \Delta K Eel2 - \Delta K Eel1$	-	- 872,8	- 1 506,9
Wskaźnik względnej obniżki kosztów zużycia energii elektrycznej 'DK Eel [%] $'\Delta K Eel = \frac{\Delta K Eel}{\Delta K Eel2 - \Delta K Eel} * 100$	-	- 35,37	- 61,06

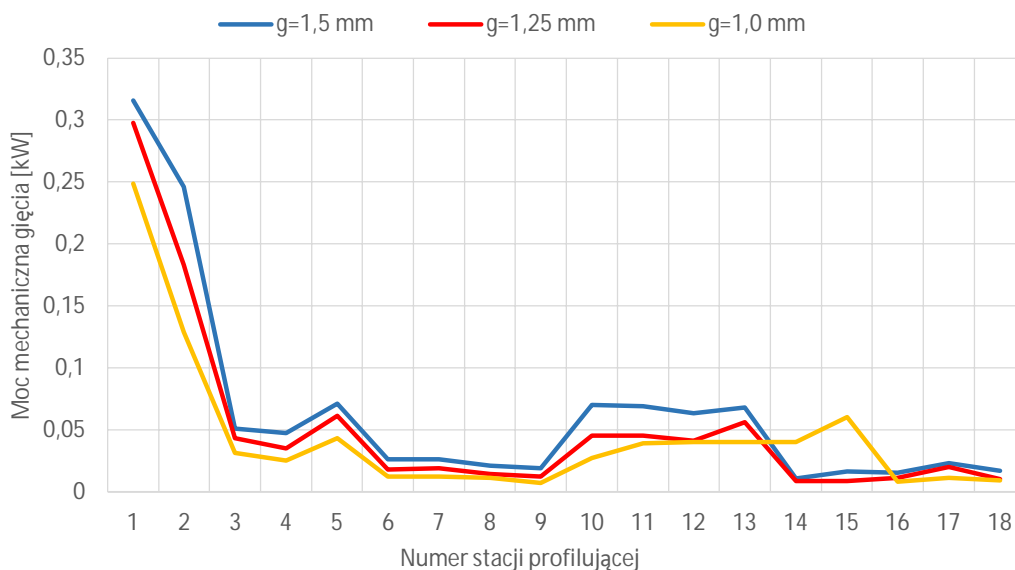
Kwotę bezwzględną obniżki kosztów zużycia energii elektrycznej DK Eel i wskaźnik względnej obniżki zużycia energii elektrycznej 'DK Eel wyliczono analogicznie, jak w przypadku materiałochłonności produkcji. Z otrzymanych wartości wskaźnika 'DK Eel wynika, że obniżka kosztów zużycia energii elektrycznej wynosi odpowiednio: 35,4% w przypadku redukcji masy produktu o 16,7% (g=1,25 mm) i 61,1% dla elektrody której masa została obniżona o 34,2% (g=1 mm). W odniesieniu do warunków warsztatowych (rzeczywistych) porównano wartość mocy mechanicznej gięcia z wynikami analizy numerycznej procesu profilowania – tablica 86. Rozkład wartości analizowanego parametru w poszczególnych stacjach profilujących na etapie modelowania numerycznego przedstawiono na rys. 135.



Tablica 86. Porównanie mocy mechanicznej wielotaktowego gięcia rolkowego (warunki rzeczywiste i symulacja numeryczna)

<i>Elektroda zbiorcza Sigma III</i>		
<i>g=1,0 mm</i>	<i>g=1,25 mm</i>	<i>g=1,5 mm</i>
<i>Moc mechaniczna gięcia [kW] – warunki warsztatowe</i>		
6,39 (*)	10,6	16,4
<i>Moc mechaniczna gięcia [kW] – modelowanie numeryczne</i>		
1,59	1,86	2,35
(*) – wartość oszacowana (tablica 84)		

Różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami w głównej mierze wynikają z faktu nie uwzględnienia w symulacji numerycznej takich czynników jak: współczynnik tarcia między taśmą a powierzchniami rolek profilujących, dodatkowe opory związane z pracą osprzętu profilarki elektrod zbiorczych oraz nieprzewidziane rozwałcowywanie taśmy między rolekami profilującymi, gdy wsad technologiczny cechuje się dodatnią wartością tolerancji grubości.



Rys. 135. Wartość mocy mechanicznej wielotaktowego gięcia rolkowego otrzymana dla poszczególnych stacji profilujących w etapie modelowania numerycznego

Otrzymane wyniki symulacji numerycznej mogą być użyteczne do oszacowania rzeczywistej mocy gięcia potrzebnej do wykonania kształtownika o złożonym przekroju poprzecznym i następnie do oszacowania zużycia energii elektrycznej w procesie produkcyjnym. Zaprezentowana metodyka może mieć również zastosowanie w etapie wyceny nowego produktu przed uruchomieniem produkcji seryjnej. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że wartości mocy mechanicznej gięcia w analizie numerycznej stanowią: 14,4%, 17,5%, 24,8% rzeczywistej mocy mechanicznej dla grubości typoszeregu taśmy (1,5, 1,25 i 1 mm).

## 15. Analiza czynników wpływających na zmniejszenie wielkości i jakości produkcji oraz zysku przed wprowadzeniem zmian modernizacyjnych

W celu określenia głównych czynników wpływających na zmniejszenie aktualnego stanu produkcji, wykorzystano diagram Pareto-Lorenza. Analiza danych wg zasady Pareto umożliwia identyfikację i hierarchizację głównych powodów wystąpienia problemów produkcyjnych, wpływających na zmniejszenie wielkości wolumenu produkcji, jakości oraz zysku [77]. Zgodnie z ideą Pareto 20% przyczyn powoduje 80% skutków. Do analizy przyjęto dane przekrojowe z produkcji około 1000 ton elektrod zbiorczych w okresie trzech ostatnich lat działalności przedsiębiorstwa. W tablicy 87 zestawiono dziewięć przyczyn mających wpływ na obniżenie wielkości i jakości produkcji. W tablicy 88 uszeregowano analizowane przyczyny wg częstości ich występowania, biorąc pod wagę czas [rbh] powodujący opóźnienia w produkcji i problemy jakościowe.

Tablica 87. Identyfikacja przyczyn wpływających na zmniejszenie wolumenu i jakości produkcji

P1	Dodatkowa produkcja z tytułu braków produkcyjnych
P2	Awarie
P3	Brak właściwego przeszkolenia operatorów
P4	Kalibracja osprzętu profilarki w trakcie realizacji procesu produkcyjnego
P5	Zestaw rolek profilujących obciążony błędami projektowymi
P6	Częsta regeneracja rolek profilujących, stempli dziurujących i okrawających
P7	Wsad technologiczny o dużym współczynniku zmienności (wiele wytopów od różnych dostawców)
P8	Wykonywanie zabiegu dziurowania, okrawania płyt elektrod na kilku prasach
P9	Wysoki koszt materiałowy i pracochłonność wykonania opakowania elektrod

Tablica 88. Uszeregowanie przyczyn wg częstości ich występowania

Przyczyna	Czas [rbh]	Wartość narastająca	Udział procentowy [%]	Udział skumulowany [%]
P8	207	207	36,06%	36,06%
P7	90	297	15,68%	51,74%
P9	77	374	13,41%	65,16%
P5	70	444	12,20%	77,35%
P4	50	494	8,71%	86,06%
P1	30	524	5,23%	91,29%
P6	30	554	5,23%	96,52%
P3	10	564	1,74%	98,26%
P2	10	574	1,74%	100,00%

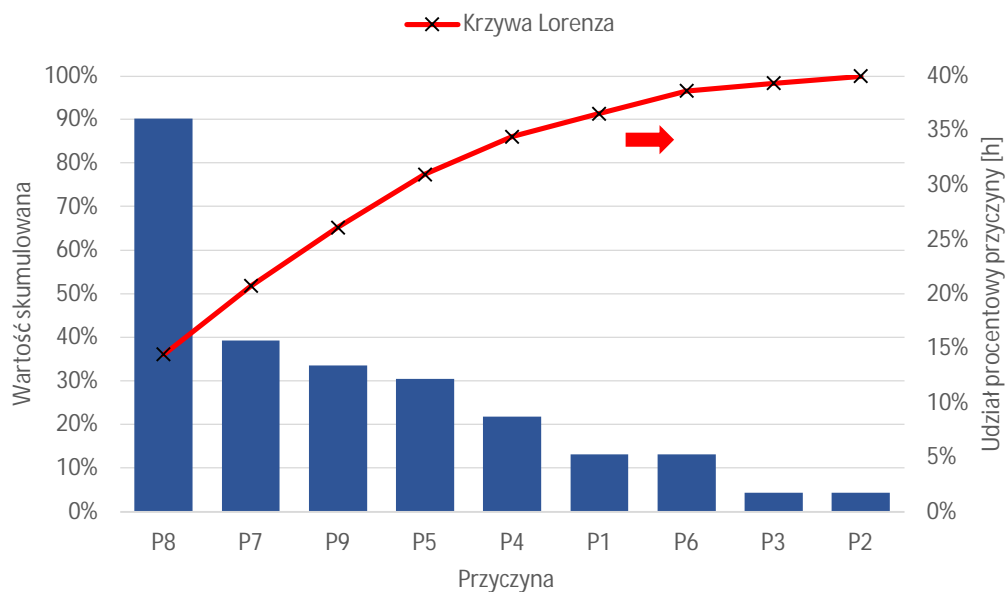
Łącznie  
czas:

574

P5, P7-P9 – główne przyczyny awarii opisanych w tablicy 87

Na rys. 136 przedstawiono diagram Pareto-Lorenza dla analizowanego procesu produkcyjnego. Z wykresu wynika, że za 73% zmniejszenia produkcji odpowiadają przyczyny: (P7-P9 i P5) i zgodnie z zasadą 20-80 należy traktować je jako obszary o największym potencjale optymalizacyjnym. Sumaryczne straty dla tych przyczyn wynoszą łącznie 444 roboczogodziny. Warto również zwrócić uwagę na udział procentowy przyczyny P4 ze względu na jej ścisły związek z P7.

W celu poprawy procesu produkcyjnego wyszczególnione przyczyny powinny zostać zminimalizowane, co opisano w kolejnym rozdziale pracy. Największy udział procentowy otrzymano dla przyczyny P8 związanej z wykonaniem operacji wykrawania otworów montażowych.



Rys. 136. Diagram Pareto-Lorenza dla analizy przyczyn wpływających na zmniejszenie wielkości produkcji, jakości i zysku

W tabelicy 89 zestawiono wskaźniki określające wpływ strat czasu pracy maszyn i urządzeń oraz materiału na zmniejszenie produkcji elektrod zbiorczych. Analizę wskaźnikową przeprowadzono dla produkcji około 1000 ton elektrod osadczych. Na podstawie obliczeń określono, że łączny udział procentowy strat produkcyjnych wynosi około 11,4%. Ze względu na wysokie koszty wsadu technologicznego sugeruje się wprowadzenie działań optymalizacyjnych w tym zakresie.

Tablica 89. Analiza wskaźnikowa dotycząca zmniejszenia wolumenu produkcji na skutek strat materiałowych i strat czasu pracy linii profilowania elektrod zbiorczych w obecnych warunkach warsztatowych

DP – zmniejszenie wielkości produkcji na skutek strat czasu pracy maszyn i urządzeń [szt.]	DM – zmniejszenie wielkości produkcji na skutek strat materiałowych [szt.]
$\Delta P = \frac{P * 100}{100 - Wh} - P$ gdzie: P-ilość sztuk, Wh – strata czasu pracy [%]	$\Delta M = \frac{P * 100}{100 - Wm} - P$ gdzie: P-ilość sztuk, Wm – strata materiałowa [%]
1124	234
<i>Udział procentowy w wytworzonej produkcji [%]</i>	
9,03	2,36
<i>Koszty związane ze zmniejszeniem wielkości produkcji [zł]</i>	
775 426	202 995

## 16. Propozycja zmian modernizacyjnych oraz ocena opłacalności produkcji i ryzyka projektu inwestycyjnego

W celu przystosowania procesu wytwarzania elektrod zbiorczych do obowiązujących obecnie standardów produkcyjnych, wydajnościowych i jakościowych, zaproponowano rozwiązania mające na celu wzrost konkurencyjności analizowanej wytwórni na rynku produkcji części do elektrofiltrów przemysłowych. Głównym założeniem tańszej produkcji jest wprowadzenie do produkcji elektrody osadczej o zmniejszonej masie ( $g=1,25$  mm). Biorąc pod uwagę przyczyny zmniejszające produkcję, konieczne jest wprowadzenie zmian mogących przyczynić się do zwiększenia wydajności i produktywności obecnej produkcji. W tablicy 90 zestawiono propozycję zmian modernizacyjnych oraz szacowany koszt realizacji.

Tablica 90. Propozycje zmian modernizacyjnych aktualnego procesu wytwarzania elektrod zbiorczych

Lp.	Propozycje zmian	Uzasadnienie	Koszt [zł]
1	Opracowanie projektu i wykonanie nowego zestawu profilującego dla taśmy stalowej $g=1,25$ mm	Optymalizacja kątów gięcia w odniesieniu do liczby istniejących zestawów profilujących. Zastosowanie tzw. kątów odpuszczenia „relief angle” dla powierzchni rolek nie biorących udziału w gięciu w celu minimalizacji niepożądanych naprężeń w profilowanym materiale i powstawaniu wad – rys. 140	200 000,0
2	Optymalizacja czasu wykrawania otworów montażowych i wycięć w płytach elektrod zbiorczych	Realizacja procesu cięcia i dziurowania profilu elektrody podczas jednej operacji w prasie głównej. Eliminacja przyczyny mającej największy wpływ na straty czasu pracy maszyn. Wymagany projekt i wykonanie nowego narzędzia	204 000,0
3	Pokrycie wybranych rolek profilujących i stempli wykrawających powłoką PVD	Redukcja zjawiska zacierania powierzchni rolek profilujących, stempli i powierzchni elektrody. Proponowana powłoka: BALINIT HARDLUBE (TiAlN)+BALINIT C (WC/C). Zmniejszenie ilości braków produkcyjnych i czasu potrzebnego na regenerację narzędzi – rys. 137	1000,0
4	Zmiana konstrukcji i materiału opakowania elektrod osadczych	Zmniejszenie kosztów materiałowych i kosztów wytworzenia opakowania przez zastosowanie opakowania drewnianego w miejsce stalowego i eliminację kosztownego procesu spawania	5000,0
5	Zakup i instalacja głowicy turka w maszynie profilującej	Redukcja czasu związanego z kalibracją zestawów profilujących podczas realizacji procesu produkcyjnego. Większa kontrola nad tolerancjami wymiarowymi produktu	70 000,0
<i>Koszty łącznie: 480 000,0 [zł]</i>			

Na rys. 137 zobrazowano problemy występujące w procesie wytwarzania opisane w tablicy 90. Kwestie związane z wpływem właściwości wsadu technologicznego na jakość procesu profilowania omówiono w rozdziałach 10.2-10.3. Przeprowadzona analiza Pareto potwierdziła, że jest to jeden z dominujących problemów produkcyjnych, dla którego udział procentowy w obniżeniu wielkości produkcji wynosi 15,7%. Przyjęto, że oszacowany koszt modernizacji linii produkcyjnej wynoszący 480 000 zł będzie finansowany w 50% z środków UE (Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka). Pozostała część inwestycji pokryta zostanie z kredytu inwestycyjnego dla firm z 3 letnim okresem spłaty.



Rys. 137. Zjawisko zacierania półki elektrody oraz jej deformacja związane z błędami konstrukcyjnymi zestawu profilującego oraz dużą zmiennością właściwości wsadu technologicznego [10]

W celu sprawdzenia opłacalności zaproponowanej inwestycji, przeprowadzono ocenę projektu inwestycyjnego oraz określono jego ryzyko. Analizę wskaźnikową wykonano dla trzech scenariuszy, w których zmieniano wartości dwóch czynników (wielkość produkcji w skali roku i koszt wsadu technologicznego) w zakresie 20%. Miało to na celu porównanie otrzymanych wartości mierników dla różnych uwarunkowań gospodarczych. Jako bazowy przyjęto scenariusz najbardziej prawdopodobny. W analizie przyjęto wewnętrzną stopę zwrotu inwestycji  $r=20\%$ . Wyniki analizy opłacalności projektu zestawiono w tablicach 91-92. Do oceny efektywności inwestycji wykorzystano dyskontowe mierniki opłacalności (46-48).

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (46)$$

gdzie:

NPV – wartość bieżąca netto (net present value) [zł];

$CF_t$  – przepływ pieniężny generowany przez projekt w okresie  $t$  [zł];

$r$  – stopa dyskontowa [%];

$n$  – liczba okresów (lat) trwania projektu;

$I_0$  – początkowy nakład inwestycyjny [zł].

$$IRR = r_a + \frac{NPV_a * (r_b - r_a)}{NPV_a - NPV_b} \quad (47)$$

gdzie:

IRR – wewnętrzna stopa zwrotu (internal rate of return) [%];

$r_a$  – stopa dyskontowa, dla której NPV ma najmniejszą wartość dodatnią;

$r_b$  – stopa dyskontowa, dla której NPV ma najmniejszą wartość ujemną, najbliższą zeru;

$NPV_a$  – wartość bieżąca netto dla  $r_a$ ;

$NPV_b$  – wartość bieżąca netto dla  $r_b$ .

$$T_d = t_- + \frac{|CF_t|}{|CF_{t+1}|} \quad (48)$$

gdzie:

$T_d$  – zdyskontowany okres zwrotu (lata);

$t_-$  - rok, w którym nie zwróciła się jeszcze inwestycja;

$|CF_t|$  - nakłady nie zwrócone w roku  $t$ ;

$|CF_{t+1}|$  - przychody netto w roku  $t+1$ .

Tablica 91. Struktura kosztów operacyjnych oraz przepływy finansowe dla trzech rozpatrywanych scenariuszy projektu inwestycyjnego

Okres zwrotu [rok]	$I_0$ , zł	Przychody, zł	Koszty zmienne, zł	Koszty stałe, zł	Koszty razem, zł	A, zł	Przepływy środków pieniężnych CF, zł	CF (d), zł	CFd (s), zł
<i>Scenariusz najbardziej prawdopodobny (wielkość produkcji 1000 ton, cena wsadu technologicznego 6 200 zł/tonę)</i>									
0	-240000						-240000	-240000	-240000
1		9995522,4	7688863,4	1665231,1	9354094,5	132000,0	544636,6	453863,8	213863,8
2		9995522,4	7688863,4	1665231,1	9354094,5	132000,0	544636,6	378219,9	592083,7
3		9995522,4	7688863,4	1665231,1	9354094,5	132000,0	544636,6	315183,2	907266,9
4		9995522,4	7688863,4	1558200,0	9247063,4	132000,0	631331,8	304461,7	1211728,6
5		9995522,4	7688863,4	1558200,0	9247063,4	132000,0	631331,8	253718,1	1465446,7
<i>Scenariusz optymistyczny (wielkość produkcji 1200 ton, cena wsadu technologicznego 5 780 zł/tonę)</i>									
0	-240000						-240000	-240000	-240000
1		11255413,3	8658010,2	1665231,1	10323241,3	132000,0	780139,3	650116,1	410116,1
2		11255413,3	8658010,2	1665231,1	10323241,3	132000,0	780139,3	541763,4	951879,4
3		11255413,3	8658010,2	1665231,1	10323241,3	132000,0	780139,3	451469,5	1403348,9
4		11255413,3	8658010,2	1558200,0	10216210,2	132000,0	866834,5	418033,6	1821382,5
5		11255413,3	8658010,2	1558200,0	10216210,2	132000,0	866834,5	348361,3	2169743,9
<i>Scenariusz pesymistyczny (wielkość produkcji 800 ton, cena wsadu technologicznego 6 820 zł/tonę)</i>									
0	-240000						-240000	-240000	-240000
1		7643591,3	5879685,6	1665231,1	7544916,7	132000,0	105006,4	87505,3	-152494,7
2		7643591,3	5879685,6	1665231,1	7544916,7	132000,0	105006,4	72921,1	-79573,6
3		7643591,3	5879685,6	1665231,1	7544916,7	132000,0	105006,4	60767,6	-18806,0
4		7643591,3	5879685,6	1558200,0	7437885,6	132000,0	191701,6	92448,7	73642,7
5		7643591,3	5879685,6	1558200,0	7437885,6	132000,0	191701,6	77040,6	150683,3
I <sub>0</sub> – inwestycja, A – amortyzacja, CF(d) – przepływy pieniężne zdyskontowane, CFd (s) – skumulowane CF (d)									

Tablica 92. Wartości dyskontowych mierników opłacalności oraz prawdopodobieństwo wystąpienia

Sytuacja gospodarcza	NPV [zł]	IRR [%]	$T_a$ [lata/dni]	Prawdopodobieństwo wystąpienia $p_i$ [%]
Scenariusz najbardziej prawdopodobny	1 465 446,7	227,3	1 / 293	0,6
Scenariusz optymistyczny	2 169 743,9	325,3	1 / 135	0,25
Scenariusz pesymistyczny	150 683,3	42,7	3 / 74	0,15

Dla wszystkich rozpatrywanych scenariuszy wartość bieżąca netto  $NPV > 0$ , co oznacza, że 5 letni projekt inwestycyjny jest opłacalny. Realizacja projektu dla scenariusza najbardziej prawdopodobnego (bazowego) spowodowałaby zwiększenie wartości przedsiębiorstwa o około 1,5 mln zł. Otrzymane wartości wewnętrznej stopy zwrotu IRR dla 3 analizowanych wariantów są większe od przyjętej stopy dyskontowej  $r=20\%$ . Oznacza to, że projekt jest opłacalny, ponieważ osiągnąłby stopę zwrotu większą od żądanej przez inwestora. Zdyskontowany okres zwrotu inwestycji dla każdego rozpatrywanego scenariusza mieści się w okresie 5 letniego okresu trwania projektu inwestycyjnego. W związku z tym należy przyjąć, że nakłady inwestycyjne zostaną pokryte przez dodatnie przepływy pieniężne generowane przez inwestycję (dla scenariusza pesymistycznego w przeciągu 3 lat i 74 dni).

W kolejnym etapie oszacowano ryzyko inwestycyjne. Analiza ryzyka mała na celu minimalizację ewentualnych strat oraz maksymalizację oczekiwanych dochodów, w odniesieniu do wstępnie przyjętych założeń techniczno-ekonomiczno-finansowych projektu inwestycyjnego (modernizacyjnego). Do oceny ryzyka w tym zakresie wykorzystano analizę scenariuszy i wrażliwości [52, 153]. Bazowano na podstawowych miarach, takich jak: wartość oczekiwana wartości bieżącej netto  $E(NPV)$ , odchylenie standardowe wartości bieżącej netto  $S(NPV)$  oraz współczynnik zmienności  $V(NPV)$  (49-51).

$$E(NPV) = \sum_{i=1}^n p_i * NPV_i \quad (49)$$

$$S(NPV) = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i * (NPV_i - E(NPV))^2} \quad (50)$$

$$V(NPV) = \frac{S(NPV)}{E(NPV)} \quad (51)$$

gdzie:

$E(NPV)$  – wartość oczekiwana wartości bieżącej netto [zł];

$S(NPV)$  – odchylenie standardowe wartości bieżącej netto [zł];

$V(NPV)$  – współczynnik zmienności;

$p_i$  – prawdopodobieństwo wystąpienia i-tego stanu natury;

$NPV_i$  – wartość NPV uzyskana otrzymana w przypadku wystąpienia i-tego stanu natury;

$n$  – liczba możliwych stanów natury.

Jako uzupełnienie wyliczono wielkość wolumenu produkcji, jaki zapewni przedsiębiorstwu osiągnięcie progu rentowności w okresie po zakończeniu projektu modernizacyjnego. Wykorzystano w tym celu zależności (52-55). Strukturę kosztów odniesiono do scenariusza najbardziej prawdopodobnego. Wyniki analizy ryzyka i rentowności zestawiono w tablicy 93.

$$R_x = \frac{KSC}{c_j - kz_j} \quad (52)$$

$$SB_w = \frac{R - R_x}{R} * 100\% \quad (53)$$

$$DOL = \frac{S - Kz}{S - Kz - Ks} \quad (54)$$

$$C_{min} = \frac{Kz + Ks}{P_x} \quad (55)$$

gdzie:

$R_x$  – ilościowy próg rentowności [tona];

$SB_w$  – strefa (margines) bezpieczeństwa [%];

$DOL$  – dźwignia operacyjna,

$C_{min}$  – graniczny poziom ceny sprzedaży [zł/tona];

$KSC$  – koszty stałe całkowite [zł];

$c_j$  – cena jednostkowa [zł/tona];  $kz_j$  – koszt zmienny jednostkowy [zł/tona];

$R$  – wielkość produkcji [tona];

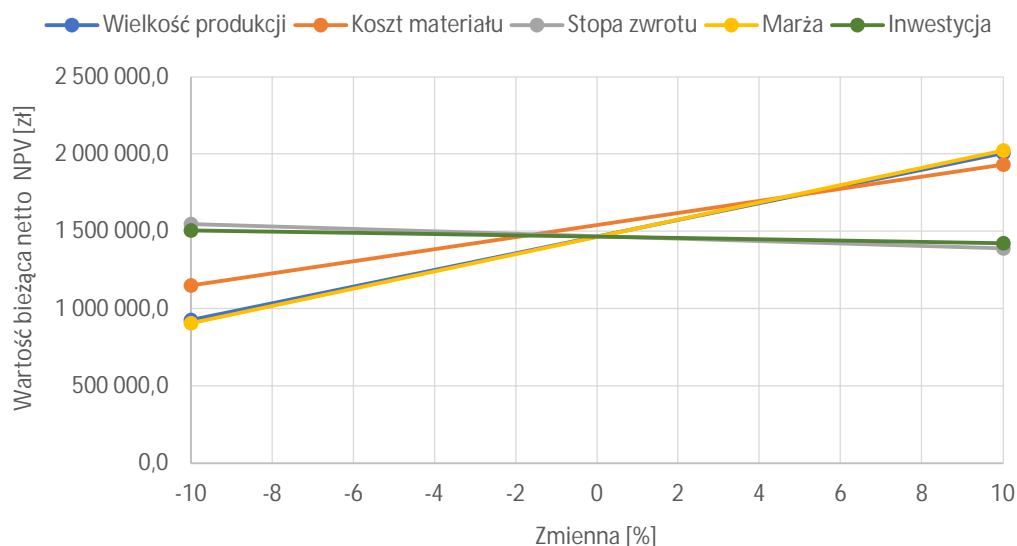
$S$  – wielkość sprzedaży [zł],  $KZ$ ,  $KS$  – koszty zmienne i stałe [zł],  $P_x$  – prognoza popytu [tona].

Tablica 93. Wartości wskaźników oceny ryzyka projektu inwestycyjnego oraz mierniki prognozy rentowności

Wskaźniki oceny ryzyka projektu inwestycyjnego (modernizacyjnego)		
E(NPV) [zł]	S(NPV) [zł]	V(NPV)
1 444 306,5	618 750,5	0,43
Wskaźniki ekonomiczne prognozy rentowności produkcji		
Ilościowy próg rentowności $R_x$ [tona]	Strefa (margin) bezpieczeństwa $SB_w$ [%]	
703,4	29,7	
Dźwignia operacyjna DOL	Graniczny poziom ceny sprzedaży $C_{min}$ [zł/tona]	
3,6	9 354,1	

Wartość odchylenia standardowego wartości bieżącej netto S(NPV) wskazuje, że wartość oczekiwana NPV może być mniejsza lub większa o około 618 750,5 zł. Nie stanowi to zagrożenia dla planowanej inwestycji (scenariusz realny). Dodatkowo otrzymana wartość współczynnika zmienności  $V(NPV) < 1$ , pozwala potwierdzić, że projekt może być przyjęty do realizacji (nie jest obciążony nadmiernym ryzykiem). Na podstawie miernika ryzyka operacyjnego DOL stwierdzono, że wzrost sprzedaży o 1% spowoduje wzrost zysku operacyjnego przedsiębiorstwa o 3,6%. Graniczny poziom ceny sprzedaży elektrod zbiorczych powinien wynosić min. 9 354,1 zł/tonę wytworzonego produktu.

W ostatnim etapie sprawdzono wrażliwości projektu na zmianę wartości zmiennych kształtujących wartość bieżącą netto NPV. Analizowano 5 czynników: wielkość produkcji, koszt materiału, stopę zwrotu, marżę i wielkość inwestycji, których wartość zmieniano w zakresie +/- 10% względem bazowej. Wyniki analizy wyżej wymienionych czynników zobrazowano na wykresie – rys. 138.



Rys. 138. Analiza wrażliwości projektu na zmiany wybranych czynników kształtujących wartość NPV



Z wykresu wynika, że zmiany wielkości produkcji i marży najbardziej wpływają na otrzymaną wartość NPV ( $\pm D$  38,1%). Można zauważyć, że tylko w przypadku stopy zwrotu i wielkości inwestycji zachodzi tendencja spadkowa NPV ( $\pm D$  2,9%). Wyniki analizy wskazują, że wzrost i spadek wartości bieżącej netto nie są równe co do modułu dla czynnika reprezentującego cenę wsadu technologicznego (+D 31,8, -D 21,5%). Wskaźniki ekonomiczne zestawione w tabeli 96 dowodzą, że w okresie po zakończeniu inwestycji przedsiębiorstwo powinno utrzymać wielkość produkcji w skali roku na poziomie 494,5 tony, co pozwoli osiągnąć opłacalność działalności produkcyjnej tzw. próg rentowności.

Obecnie, w warunkach dynamicznie zmieniającego się otoczenia, podejmowanie decyzji jest w większym lub mniejszym stopniu obciążone ryzykiem inwestycyjnym, co może skutkować możliwością uzyskania przez inwestora innego rezultatu, niż oczekiwał. Dlatego też tak ważne jest monitorowanie, również w ujęciu czasowym, poszczególnych faz życia projektu inwestycyjnego oraz dokonywanie analizy wrażliwości projektu na zmiany wybranych czynników kształtujących wartość NPV.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano metodykę oceny projektu modernizacyjnego inwestycyjnego na przykładzie przedsiębiorstwa świadczącego usługi dla branży energetycznej. Określono propozycje zmian modernizacyjnych, ich uzasadnienie oraz sposób finansowania. Analizowany projekt oceniono na podstawie podstawowych mierników inwestycyjnych i ekonomicznych.

## 17. Podsumowanie

Tematem pracy doktorskiej jest: „Modernizacja produkcji elektrody zbiorczej dla przemysłu energetycznego”. Elektroda zbiorcza uznawana jest za podstawowy element sekcji elektrod zbiorczych w elektrofiltrze, stanowiący około 24% jego masy całkowitej. Analizowany węzeł konstrukcyjny odpowiedzialny jest za uzyskiwanie wysokiej skuteczności odpylania. Dodatkowo podzespół ten stwarza duże możliwości optymalizacji konstrukcji pod kątem redukcji masy. Szczególnie ważne są działania mające na celu zmniejszenie masy elektrod osadczych. Doświadczenie zdobyte podczas wieloletniej pracy zawodowej w dziele technologicznym i produkcji byłej Fabryki Elektrofiltrów ELWO S. A. w Pszczynie skłoniło autora pracy do wielu przemyśleń i zaprezentowania w pracy doktorskiej całokształtu zagadnień związanych z procesem wytwórczym elektrod osadczych elektrofiltru. W zamierzeniu autora rozprawy doktorskiej było opracowanie pewnego rodzaju studium wykonalności, za pomocą którego przeanalizowano nowy produkt pod kątem ewentualnych ograniczeń technicznych, jakościowych oraz rynkowych. Wobec powyższego konieczne było uwzględnienie wielu aspektów w taki sposób, aby niniejsza praca miała charakter użytkowy.

Z tezy pracy wynika, że możliwe jest kompleksowe opracowanie sposobu wykonania nowej elektrody zbiorczej, która będzie tańsza w produkcji od obecnie wykonywanej, co może skutkować osiągnięciem przewagi konkurencyjnej na rynku krajowym i zagranicznym.

Jako metodę obniżenia kosztu produkcji przyjęto kryterium grubości wsadu technologicznego. Zgodnie z tezą pracy możliwe jest obniżenie masy elektrod zbiorczych, nawet do poziomu 33%, przy jednoczesnym zachowaniu ich walorów użytkowych i jakościowych. Na podstawie pracy autor stwierdził, że można symulować proces ich profilowania oraz badać numerycznie drgania elektrod osadczych podczas strzepywania pyłu z ich powierzchni oszczędzając czas i środki finansowe. Możliwa jest również wstępna weryfikacja trwałości układu elektrod zbiorczych i układu strzepującego metodą elementów skończonych przed wykonaniem warsztatowym instalacji pilotażowej wymienionych węzłów konstrukcyjnych. W opracowaniu uwzględnione zostały takie zagadnienia, jak: analiza danych opisujących właściwości wsadu technologicznego, w celu osiągnięcia wymaganego poziomu jakości profilowanych paneli elektrod osadczych, ekonomiczne aspekty procesu produkcyjnego wraz z oceną projektu inwestycyjnego, a także sprawdzenie produktu pod kątem jego waloru użytkowego.

W pracy wykorzystano zaawansowane narzędzia informatyczne takie jak: COPRA RF, COPRA FEA (projektowanie narzędzi oraz symulacje numeryczne procesu profilowania), Ansys i Autodesk Nastran (analizy numeryczne w zakresie drgań analizowanych profili elektrod zbiorczych). W przypadku przeprowadzonych analiz w obrębie danych empirycznych posłużono się oprogramowaniem do zaawansowanych analiz statystycznych Minitab, oraz arkuszem kalkulacyjnym MS Excel.

Na podstawie otrzymanych modeli numerycznych dokonano oceny jakościowej (porównawczej) bazując na wybranych funkcjach oprogramowania przeznaczonego do analizy geometrii - GOM Inspect Professional. Przyjęta metodyka obliczeń, testy i narzędzia statystyczne oraz wykorzystane oprogramowanie pozwoliło w pełni zrealizować postawione w pracy cele.

Niniejsza praca doktorska podzielona została na 5 głównych bloków tematycznych:

- przegląd literatury;
- analiza danych procesowych;
- analiza wskaźnikowa w zakresie ekonomiki produkcji;
- modelowanie numeryczne procesu profilowania;
- analiza danych dotyczących wybranych wielkości geometrycznych paneli elektrod;
- walidacja produktu pod kątem waloru użytkowego.

W pierwszej części pracy, tj. rozdziałach 3-9 dokonano przeglądu literatury, scharakteryzowano elektrofiltr i jego podzespoły z uwzględnieniem elektrod zbiorczych stanowiących obiekt badań, wskazując ich rolę w elektrofiltrze. Wskazano również kierunki rozwoju tych urządzeń. Autor pracy pozyskał wiedzę na temat możliwości symulowania procesu profilowania cienkościennych kształtowników o przekroju otwartym, analizy danych procesowych, oraz analizy drgań przy użyciu współczesnych narzędzi informatycznych. W kolejnym kroku usystematyzowano dane dotyczące gatunków stali stosowanych do produkcji omawianego podzespołu. Nie odrzucano starszych pozycji literaturowych ze względu na bardzo bogate treści merytoryczne. Dodatkowo w celu wzbogacenia wiedzy w tych obszarach posiłkowano się zapisami ze sprawozdań wewnętrzzakładowych, dotyczących prób technologicznych oraz analiz technicznych wykonanych przez jednostki zewnętrzne.

W rozdziale 10 została przedstawiona obszerna analiza statystyczna danych empirycznych z dużego zlecenia produkcyjnego około 100 ton, które wykorzystano dzięki uprzejmości dużego koncernu energetycznego - firmy VALMET Technologies Oy z Finlandii. Problematyka badania współzależności i zależności funkcyjnych pomiędzy zmiennymi opisującymi wsad technologiczny a tolerancjami wykonania gotowego produktu nie została wcześniej podjęta w opracowaniach naukowych, co prawdopodobnie wynika z braku dostępu do tego typu danych procesowych. Przygotowanie statystyki opisowej umożliwiło autorowi m.in. zdefiniowanie parametrów taśmy stalowej na etapie budowania modeli numerycznych. Za pomocą zastosowanych narzędzi informatycznych wyliczono podstawowe statystyki opisowe, testowano założenia normalności rozkładu danych empirycznych. Określono szereg zależności korelacyjnych i funkcyjnych z uwzględnieniem optymalnych nastawów analizowanych zmiennych. Modele regresji wielorakiej wyliczono za pomocą krokowej metody wprowadzania zmiennych objaśniających do modelu.

Modelowanie procesu wielotaktowego gięcia rolkowego opisano szczegółowo w rozdziale 11. Walidacja modeli numerycznych została poprzedzona opracowaniem projektów zestawów profilujących dla trzech analizowanych typów elektrod zbiorczych, które następnie weryfikowano w środowisku COPRA FEA. Projekty uwzględniały nastawy parametrów profilarki (warunki warsztatowe). Nie skupiano się wyłącznie na ocenie stanu naprężeń zastępczych i odkształceń plastycznych w paśmie giętym. Z uwagi na zmniejszone grubości wsadu technologicznego zwrócono uwagę na konieczność określenia stopnia pocienienia i wydłużenia materiału w gotowych kształtownikach oraz weryfikację opracowanych modeli pod kątem wystąpienia pęknięć. Dla przyjętych założeń projektowych zbadany został również wpływ parametrów profilowanego materiału na wartość kąta sprężynowania przy zastosowaniu metodyki eksperymentu.

W rozdziale 12 zaproponowano metodykę pomiarów wybranych cech geometrycznych elementów wykonywanych za pomocą procesu profilowania w wybranych punktach pomiarowych (przekrojach inspekcyjnych) kształtowników. Jednym z celów badawczych było sprawdzenie czy i w jakim zakresie grubość profilowanego materiału wpływa na analizowane wielkości geometryczne. W niniejszym rozdziale określone zostały zakresy tolerancji technologicznej (wykonawczej).

W rozdziale 13 pracy poszukiwano odpowiedzi na pytanie w jakim zakresie zmiana grubości materiału wpływa na walor użytkowy pojedynczych paneli oraz sekcji elektrod zbiorczych. Przedmiotowa analiza pozwoliła opracować charakterystykę częstotliwościowo – amplitudową na podstawie której oszacowano, które częstotliwości odpowiadają za szczytową amplitudę przyspieszenia poszczególnych płyt elektrod osadczych. Wspomniany parametr jest powszechnie stosowanym w branży energetycznej miernikiem skuteczności oczyszczania płyt elektrod osadczych z nagromadzonego na nich pyłu.

W rozdziale 14 przeprowadzono analizę szans i zagrożeń związanych z wprowadzeniem nowego produktu na rynek. Na podstawie wielkogabarytowego elektrofiltru porównano materiałochłonność i energochłonność produkcji dla trzech rozpatrywanych grubości taśmy stalowej. Wyliczono wskaźniki oceny kosztów materiałowych i wskaźniki oceny kosztów zużycia energii elektrycznej oraz wartość mocy mechanicznej wielotaktowego gięcia rolkowego dla analizowanych typów elektrod osadczych.

W rozdziale 15 wykorzystano diagram Pareto-Lorenza do identyfikacji głównych czynników wpływających na zmniejszenie wielkości i jakości produkcji oraz zysku. Do analizy przyjęto dane przekrojowe z okresu 3 ostatnich lat działalności przedsiębiorstwa produkcyjnego.

W rozdziale 16 przedstawiono propozycję zmian modernizacyjnych oraz ocenę opłacalności i ryzyka projektu inwestycyjnego. Do oceny efektywności inwestycji zastosowano dyskontowe mierniki opłacalności. Przeprowadzono analizę wrażliwości projektu na zmiany wybranych czynników kształtujących wartość bieżącą netto NPV.

Badania i analizy przeprowadzone w niniejszej pracy doktorskiej pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Możliwe jest profilowanie paneli elektrod zbiorczych z taśmy stalowej o zmniejszonej grubości w stosunku do grubości bazowej tj. 1,5 mm przy zachowaniu ich walorów użytkowych, jakościowych oraz bez ryzyka wystąpienia pęknięć.
2. Zaproponowana metodyka badań oraz narzędzia informatyczne dają projektantom możliwość sprawdzenia nowego produktu już na etapie opracowywania projektu, w tym oceny wybranych cech geometrycznych, określenia zakresu tolerancji technologicznej i odchyłek geometrycznych.
3. Otrzymane wyniki symulacji numerycznej mogą być użyteczne do oszacowania rzeczywistej mocy mechanicznej gięcia, potrzebnej do wykonania kształtownika o złożonym przekroju poprzecznym i następnie do oszacowania zużycia energii elektrycznej w procesie produkcyjnym.

4. Koszty materiałowe związane z produkcją elektrod osadczycy stanowią ponad 90% całkowitych kosztów wytworzenia. Jest to obszar o dużym potencjale optymalizacyjnym. Z tego względu zastosowanie statystycznych metod planowania doświadczeń w procesie wielotaktowego gięcia rolkowego, umożliwia otrzymanie wyników w postaci opisu procesu, jak również jego optymalnych parametrów. W praktyce może prowadzić to do minimalizacji czasu wprowadzenia nowego produktu do produkcji seryjnej, lub przewidywania przebiegu bieżących procesów wytwórczych. W konsekwencji możliwa jest redukcja nakładów finansowych związanych z powstaniem tzw. braków produkcyjnych i obniżeniem wydajności procesu.

Największą trudność w prowadzeniu badań w ramach rozprawy doktorskiej stanowiło przygotowanie projektów zestawów profilujących na potrzeby analiz numerycznych, optymalnych ze względu na czas trwania symulacji związany z ilością stacji roboczych, a także rozmiar siatki elementów skończonych, który musiał stanowić pewnego rodzaju kompromis.

Z uwagi na chęć przeanalizowania różnych typów elektrod zbiorczych w analizach numerycznych nie uwzględniono tarcia pomiędzy powierzchnią rolek profilujących, a taśmą stalową. Wprowadzenie tego dodatkowego parametru wydłużyłoby znacząco czas realizacji obliczeń. Biorąc pod uwagę rozmiar kształtowników zrezygnowano z wprowadzania 2-3 warstw elementów skończonych na grubości taśmy stalowej w obszarach w których realizowane było gięcie. Podobne trudności związane z rozmiarem siatki napotkano na etapie walidacji sekcji elektrod osadczycy pod kątem propagacji drgań, gdzie ilość elementów skończonych wynosiła ponad 550 tys.

Problematyka poruszona w niniejszej pracy doktorskiej może być wykorzystana w literaturze branżowej przez osoby zajmujące się zagadnieniami obróbki plastycznej, inżynierii produkcji, jak również szeroko pojętą analizą danych procesowych. Zakres zagadnień przedstawionych przez autora może być również interesujący dla podmiotów branży energetycznej, szczególnie działów badań i rozwoju.

Zgodnie z sugestią autora dalsze badania powinny być ukierunkowane na sprawdzenie przydatności innych gatunków stali, które mogłyby stanowić alternatywę dla gatunków analizowanych w pracy. Z uwagi na cel poznawczy wskazane byłoby przeprowadzenie analogicznych symulacji dla różnych wariantów kontaktu pasma giętego z powierzchnią rolek profilujących, promieni gięcia, kątów podgięcia w poszczególnych przepustach oraz parametrów materiałowych. Tego typu analiza pozwoliłaby w sposób kompleksowy zbadać wpływ poszczególnych nastawów procesu na wybrane wielkości geometryczne i jednocześnie zoptymalizować proces technologiczny. Tak szeroka analiza procesu produkcji jest zadaniem dla badaczy, ale głównie biur projektowych.

Redukcja masy paneli elektrod zbiorczych powinna w opinii autora pociągać za sobą optymalizację pozostałych podzespołów sekcji elektrod zbiorczych, weryfikację sposobu ich wzajemnego połączenia oraz określenie optymalnej siły udaru mechanicznego, co może stanowić obszar do dalszych badań.

Autor pracy ma nadzieję, że praca skłoni czytelników do zainteresowania się zagadnieniem wielotaktowego gięcia rolkowego cienkościennych profili oraz metodami analizy parametrów techniczno-ekonomicznych procesu produkcji.

## Bibliografia i wykaz norm

1. Adamiec-Wójcik I., Awrajcewicz J., Nowak A., Wojciech S.: Vibration Analysis of Collecting Electrodes by means of the Hybrid Element Method, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2014, Article ID 832918.
2. Adamiec-Wójcik I., Nowak A., Wojciech S.: Comparison of methods for modeling vibrations of collecting electrodes in dry electrostatic precipitators. *The Archive of Mechanical Engineering*, 2013, Nr.3, s.431-449, Vol. LX.
3. Adamiec-Wójcik I., Wojciech S.: Numeryczne Aspekty w Modelowaniu Drgań Elektrofiltrów, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 4, no.2, 2010.
4. Adamiec-Wójcik I.: Nowak P. A., Wojciech S.: Dynamic Analysis of Electrostatic Precipitators Using Finite Strip Method, 10 th Conference on Dynamical Systems Theory and Applications, December 7-10, 2009, Łódź, Poland.
5. Adamiec-Wójcik I.: Modeling of Systems of Collecting Electrodes of Electrostatic Precipitators by Means of the Rigid Finite Element Method, *The Archive of Mechanical Engineering*, 2011, Nr, 1, Vol. LVIII.
6. Ando H. Shiromaru N., Mochizuki Y.: Recent technology of moving electrode electrostatic precipitators. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, Vol. 5, No. 2, september 2011, pp. 130-134.
7. Arif S., Branken D. J., Everson R. C., Neomagus H. W. J. P., Noras M. A., le Grange L. A., Arif A.: An experimentally validated computational model to predict the performance of a single-channel laboratory-scale electrostatic precipitator equipped with spiked and wire discharge electrodes. *Journal of Electrostatics*. Volume 112, July 2021, 103595. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103595>.
8. ASAME. The automated strain analysis and measurement environment. Reference manual. Version 4.1. June 2000.
9. Atole V. P., Koarde D. N.: Predicting Vibration Performance of Collecting plates of Electrostatic Precipitators. *International Engineering Research Journal*, Issue 2, pages 5108-5111, 2015, ISSN 2395-1621.
10. Bacciarelli T.: Materiały własne (niepublikowane). Konsultacje. Dział głównego technologa. Pszczyna 2016.
11. Bach S., Karwat B., Machnik R.: Pomiary rezystywności pyłu w wybranych procesach technologicznych. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry” 19-21 wrzesień, Kraków 2002.
12. Bach S., Machnik R.: Rezystywność pyłu w elektrofiltrach. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry”, 19-21 wrzesień, Kraków 2002.
13. Bach S., Szwed H., Wróbel J.: Wpływ sposobu połączenia belki mechanizmu strzepującego z elektroda osadczą w elektrofiltrze na wartość przyśpieszeń elektrody. *Ochrona powietrza i problemy odpadów*, 3/1996, str. 80-84, PL ISSN 1230-7408.
14. Bach S.: Badania laboratoryjne i przemysłowe warstwy pyłu w elektrofiltrach suchych, V Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry” 2000, 14-16 września, Kraków 2000.
15. Bach S.: Problemy regeneracji elektrod zbiorczych w elektrofiltrach suchych. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry 2002”, Materiały konferencyjne. str. 31-35, ISBN-83-916516-2-2.

16. Białek K.: Weryfikacja poprawności procesu tłoczenia blach przed wykonaniem narzędzi formujących. *Virtual Prototyping for Industry*. Strefa wiedzy, 2018. <https://vpi-polska.pl/weryfikacja-poprawnosci-procesu-tloczenia-blach/>
17. Brytan Z.: *Vademecum Stali Nierdzewnych*. Stowarzyszenie Stal Nierdzewna. Wydanie pierwsze Katowice (2014).
18. Brzozowski K., Nowak A.: Weryfikacja obliczeniowa hybrydowej metody elementów skończonych. *Modelowanie Inżynierskie*, 39, S.27-34, Gliwice 2010.
19. Bui Q.V., et al: Springback and twist prediction of roll formed parts. ResearchGate, January 2016.
20. Cha W, Kim N.: Study on twisting and bowing of roll formed products made of high strength steel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 14(9) (2013) 1527-1533. doi: 10.1007/s12541-013-0206-8.
21. Chen J., Wei Y., Han H., Zong X., Yuan Y.: A study of transverse bowing defect in cold roll forming asymmetric corrugated channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 124, 3567-3577 (2023).
22. Choi D. H., Self S. A., Mitchner M., Leach M.: Experimental study of the collector plates in lab-scale electrostatic precipitators, VIIth EPA/EPRI Symposium on Particulate Control Technology, San Diego, California, March 20-23, 1990.
23. Choi J-H., Kim Je-H., Lim B-D., Kim Ji-H.: Mathematical vibration modeling for an electrostatic precipitator system. *Journal of Vibroengineering*, 1(15), (2013) 374-382.
24. Choi J-H., Kim Ji-H.: Research for effective vibrational rapping performance of multiple electrostatic precipitators in series and parallel arrangements. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 9 (14), (2013), 4163-4141.
25. Cid N., Patino D., Perez-Orozco R., Porterio J.: Performance analysis of a small-scale electrostatics precipitator with biomass. *Biomass and Bioenergy*. Volume 162, July 2022, 106500. <https://doi.org/10.1016/j.biom.bioe.2022.106500>.
26. Cid N., Rico J. J., Orozco R. P., Larranaga A.: Experimental study of the performance of laboratory-scale ESP with biomass combustion. *Sustainability* 2021, 13 (18), 10344. <https://doi.org/10.3390/su131810344>.
27. ClientEarth Prawnicy dla Ziemi. *Konkluzje BAT – kolejny krok ku ograniczeniu emisji zanieczyszczeń z dużych instalacji spalania*, lipiec 2017.
28. COPRA RF 2022 User Manual. *Deformation Technology (Simulation) & Flower Technology*. dataM Sheet Metal Solutions. 2022.
29. Crespo B., Patino D., Regueiro A., Granda E.: Performance of a lab-scale tubular electrostatic precipitator using a diesel engine particle emission source. *Energy* 116 (2016) 1444-1453. doi: 10.1016/j.energy.2016.03.067.
30. Czyrski W.: *Stale konstrukcyjne trudnordzewiejące*. Wydawnictwo Akcydensowe, Warszawa (1988).
31. da Silva Martins A. S.: Simulation of cold rolling process of steel profiles for shelter applications. *Dissertation*. Department of Mechanical Engineering. Faculty of Engineering. University of Porto. 2018.
32. Dein A. Z. El., Usama K.: Experimental and simulation study of V-I characteristics of wire-plate electrostatic precipitators under clean air conditions. *Arabian Journal of Science Engineering*, 39 (2014) 4037-4045. doi: 10.1007/s13369-014-1046-2.

33. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa. Wymiana elektrofiltru nr 3 odpylania gazów konwertorowych w KGHM Polska Miedź S.A. oddział Huta Miedzi „Legnica”. Bilfinger ELWO Sp. z o. o., ul. Ks. Bp. H. Bednorza 26, 43-200 Pszczyna. 2017, Nr D1-337-05 rew.01.
34. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa. Wymiana kompletnego elektrofiltru bloku nr 7 w Elektrowni Kozienice S.A. Fabryka Elektrofiltrów ELWO S.A., ul. Bielska 44, 43-200 Pszczyna. 2006, Nr D1-239-05/C.
35. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2010/75/EU z dn. 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola – IED).
36. Electrostatic Precipitator Systems for a pollution-free tomorrow. Pennar Industries Limited, brochure, India 2022.
37. Elektrofiltry. Biuletyn Informacyjny Techniki Elektrofiltrów i Transportu Popiołu Fabryki Elektrofiltrów ELWO S. A., nr 16, październik 2006.
38. Engelbrecht Heinz L.: Rapping systems for collecting surfaces in an electrostatic precipitators, Environment International, Vol. 6, 297-305, 1981. 85
39. Filipowski K.: Doświadczenia w zakresie stosowania kondycjonowania spalin we współpracy z instalacjami odsiarczania i odazotowania spalin. Materiały firmy Pentol-Enviro Polska Sp. z o. o., 2015.
40. Fulczyk T., Głowacki E.: Problemy eksploatacyjne elektrofiltrów i instalacji odsiarczania spalin związane ze współspalaniem biomasy, Energetyka, 2010, nr 6, str. 379.
41. Gamża A., Kudła M., Sarna M., Kopeć M., Koczy B., Ryguła Cz.: Anlage für „Bericht über schwingung-messungen der NE-Platten mit der länge von 16,0 m, april-mai 1996”, Biblioteka techniczna Fabryki Elektrofiltrów ELWO S. A., nr 1047/spr. Pszczyna, wrzesień 1996.
42. Gazdowicz J.: Możliwości zastosowania stali o podwyższonej odporności na korozję atmosferyczną na elektrody zbiorcze. Opracowanie IMŻ Gliwice, Laboratorium Badań Własności i Struktury Materiałów, 2003, Zleceniodawca: Fabryka Elektrofiltrów ELWO S. A., ul. Bielska 44, 43-200 Pszczyna.
43. Gillman E.: Combining solid, shell and line elements with Inventor Nastran. Autodesk University. 2023.
44. Górecka-Zbrońska A., Kijo-Kleczkowska A.: The influence of biomass type and mass fraction on NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> maximum emission during the co-combustion process with hard coal and brown coal, Archives of Waste Management and Environmental Protection, vol.17, issue 1, 2015, p. 17-32, ISSN 1733-4381.
45. Grochowska J.: Kurs ekonometria. www.etrpez.pl. 2023.
46. Gromaszek K., Wójcik W., Kotyra A., Iskakova A., Shegebayeva Z., Talgatkyzy I.B.: Modelling and analysis of elctrostatic precipitator (ESP) in combustion process. Przegląd elektrotechniczny, 8(92) (2016) 121-124. doi: 10.15199/48.2016.08.33.
47. Guo B., Yu A., Guo J.: Numerical modelling of ESP for design optimization. Procedia Engineering, 102 (2015) 1366-1372.
48. Halmos T.G.: Roll Forming Handbook. CRC Taylor & Francis Group, New York 2006.



49. Hao-ge P., Jun-an L., Yi D., Qi X.: Analysis of electrostatic precipitator's vibration cleaning device. *Advances Materials Research*, Vols. 143-144, pp 1424-1428, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.143-144.1424, 2011.
50. Hartmann H., Turowski P., Kiener S.: Electrostatic precipitators for small-scale wood combustion systems – Results from lab - and field tests. *Central European Biomass Conference (CEBC)*, 26-28 January, 2011 Graz.
51. Heibao Z., Yuzhong H., Yuping Y.: Study on brush of moving electrode type electrostatic precipitators (MEEP). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 121, 2018, 052024, pp. 1-7, doi: 10.1088/1755-1315/121/5/052024.
52. Homa M.: *Analiza ryzyka projektów inwestycyjnych*. Uniwersytet Wrocławski. Wydział Prawa Administracji i Ekonomii. Materiały dla studentów. 2017.
53. Hong S., Lee S., Kim N.: A parametric study on forming length in roll forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (2001) 774-778.
54. <http://czh.pl/obszar/elektrofiltr-kominowy/>.
55. <http://www.ien.gda.pl>. Instytut Energetyki, Oddział Gdańsk.
56. <http://www.redecam.com/air-filtration-products/>.
57. <https://katowice.tvp.pl/34426922/elektrofiltry-kominowe-poprawia-jakosc-powietrza>.
58. <https://www.babcock.com>. Electrostatic precipitator delivers maximum efficiency, 2015.
59. Huang Y., Zeng S. Li, Q., Shen X., Wang S., Han P., Liu Z., Yan K.: Recent progress of dry electrostatic precipitation for PM 2.5 emission control from coal-fired boilers. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, Vol.9, No.2, October 2015, pp. 69-95.
60. Hui X., Wang X.: Forming quality analysis on the cold roll forming C-channel steel. *Materials* 11 (2018) 1911. doi:10.3390/ma11101911.
61. Huta im. Sendzimira. Tymczasowe warunki techniczne. Blachy w kręgach walcowane na zimno oraz taśmy cięte z blach walcowanych na zimno przeznaczone do produkcji elektrofiltrów w gat. 12H1JA, nr TWT 41/92, 1992.
62. Iller E., Chmielewska D. K., Koczy B., Ryguła Cz.: Badania parametrów pracy małogabarytowego elektrofiltru do usuwania aerozoli higroskopijnych soli amonowych z gzów odlotowych. *Raporty IChTJ*, seria A, nr 5, 2002, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2002, ISSN 1425-7345.
63. Isaac R., Balusamy T.: Modification of discharge electrode in electrostatic precipitator. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 11(3) (2014) 312-315.
64. Janka R. M.: Czynniki wpływające na skuteczność odpylania gazów oraz tendencje występujące w budowie elektrofiltrów. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, vol. 37, nr 1-2, styczeń-kwiecień 2003.
65. Jędrusik M. Świerczok A.: Reduction of PM2.5 particle emission by electrostatic precipitator . *Przegląd Elektrotechniczny*, R 93, Nr 2/2017, ISSN 0033 2097, doi: 10.15199/48.2017.02.48.
66. Jędrusik M., Świerczok A.: Elektrofiltry odpalające spaliny z kotłów rusztowych. Dobór konstrukcji elektrody ulotowej. *Technologie w Energetyce*, nr 2, 2012, str. 57-60.
67. Jędrusik M.: *Elektrofiltry. Rozwinięcie wybranych technik podwyższania skuteczności odpylania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2008. ISBN 978-83-7493-387-2.

68. Juda J., Nowicki M.: Urządzenia odpylające. PWN, W-wa 1986. ISBN 83-01-00849-0.
69. Juricic D., Hermann G.: Modeling on simulation of dust dislodgment on collecting plates in electrostatic precipitators, Modeling and Simulation, Vol 9, Pt1: Energy and Power System, Modeling Ecological and Biomedical Modeling, Proceedings of the Ninth Annual Pittsburg Conference, pp 161-166, Inst. Society of America, 1978.
70. Juricic D., Hermann G.: On the dynamics of electrostatically precipitated fly ash. Journal of Engineering for Power, Vol. 101, Oct.1979, pp 584-591.
71. Jurkovic M., Jurkovic Z., Buljan S., Obada M.: An experimental and modelling approach for improving utilization rate of the cold roll forming production line. Advances in Production Engineering & Management. 13(1) (2018) 57-68. doi: 10.14743/apem2018.1.273.
72. Kabsch P.: Odpylanie i odpylacze t.1. Mechanika aerozoli i odpylanie suche. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1992. ISBN 83-204-1563-2.
73. Kang W., Zhao Y., Yu W., Wang S., Ma Y., Yan P.: Numerical simulation and parametric analysis for roll forming of martensitic steel MS980. Procedia Engineering, 81 (2014) 251-256.
74. Karwat B., Nocuń M., Machnik R., Niedźwiedzki J.: Modelling and study of selected features for the operating parameters of industrial electrostatic precipitators. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 18(3) (2016) 352-332. doi: 10.17531/ein.2016.3.2.
75. Kasaei M. M., Naeini H. M., Liaghat G. H., Silva C. M. A.: Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. (2015) 1-14.
76. Katalog reklamowy formy EWES Stalfjader AB – Szewcja.
77. Knosala T.: Inżynieria Produkcji. Kompendium wiedzy. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa 2017. ISBN 978-83-208-2270-0.
78. Kombinat Metalurgiczny Huta im. Lenina. Tymczasowe warunki techniczne. Blachy w kręgach walcowane na zimno oraz taśmy cięte z blach walcowanych na zimno przeznaczone do produkcji elektrod dla elektrofiltrów, nr TWT-34/89, 1989.
79. Kondycjonowanie spalin jako alternatywa dla budowy nowego elektrofiltru – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy. Materiały firmy Pentol–Enviro Polska Sp. z o. o., 2012.
80. Kondycjonowanie spalin jako metoda redukcji emisji spalin z kotłów węglowych. Materiały firmy Pentol-Enviro Polska Sp. z o. o., wrzesień 2015.
81. Konsultacje Budmat (konsultacje techniczne).
82. Korzyński M.: Metodyka Eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. Wydanie II zmienione. Wydawnictwo WNT 2017. ISBN 978-43-01-19318-8.
83. Kubica K., Ściążko M., Raińczak J.: Współspalanie biomasy z węglem. Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze, Polityka Energetyczna, 2003, T.6, spec. 2, str. 297-307.

84. Kubiczek M., Spiewok W.: Analiza chemiczna odcinków próbnych blachy grubości 1,5 mm z gatunku DC01. Raport z badań IMŻ w Gliwicach nr 00676/18, Zakład Chemii Analitycznej, lipiec 2018, Zamawiający: Bufil Sp. z o. o., ul. Bielska 44, 43-200 Pszczyna. Za zgodą Valmet Technologies OY.
85. Kubosz W., Radwański K.: Badania własności mechanicznych odcinków próbnych blachy grubości 1,5 mm z gatunku DC01. Raport z badań IMŻ w Gliwicach nr N0-0284/88/BL/2018, Zakład Badań Właściwości i Struktury Materiałów, lipiec 2018, zamawiający: Bufil Sp. z o. o., ul. Bielska 44, 43-200 Pszczyna. Za zgodą Valmet Technologies OY.
86. Kufel T.: Ekonometria. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem programu GRETL. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2013. ISBN 978-83-01-16513-0.
87. Lewandowski R.: Dynamika konstrukcji budowlanych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. 2003.
88. Liang C., Li S., Liang J., Li J.: Method for controlling edge wave defects of part during roll forming of high-strength steel. *Metals*, 2022, 12, 53, <https://doi.org/10.3390/met12010053>.
89. Lindgren M.: Experimental investigations of the roll load and roll torque when light strength steel is roll formed. *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (2007) 44-47.
90. Lindgren M.: Workbook Copra RF and Copra FEA RF. dataM Scandinavia AB. 2013.
91. Lodhi A., Baghel P., Patel N., Pareyani S.: Removal of fine particles in industrial emission through electrostatic precipitators. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 5, Special issue 3, pp.85-88, November 2016, doi: 10.17148/IJARCCE.
92. Lotfi Neyestanak A. A., Adib Nazari S., Sadeghbeigi N., Karimzadeh A.: Electrical behaviour of Glass/Carbon-Phenolic conductive hybrid composite woven used in electrostatic precipitators filter. *International Journal of Electrochemical Science*, 9 (2014) pp. 6416-6430.
93. Lotfi Neyestanak A. A., Nazari S. A., Imam A., Aghanajafi C.: Fatigue durability analysis of collecting rapping system in electrostatic precipitators under impact loading, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014 (6), Article ID 136059, pp.1-9, DOI: 10.1155/2014/136059.
94. Łukowski J., Szarowicz K., Stańczyk M.: Wpływ parametrów procesu profilowania na jakość geometryczną kształtowników zimnociętych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej – Transport*, 48 (2003) 163-168.
95. Łukowski J., Szarowicz K.: Wpływ naprężeń własnych na jakość geometryczną kształtowników zimnociętych. *Mechanik*, 1 (2004) 33-35.
96. Łukowski J., Szarowicz K.: Wyznaczanie parametrów siłowo-energetycznych procesu profilowania na zimno. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, 11 (2002) 418-422.
97. Maciosowski A., Cesarz S., Gazdowicz J., Wiedermann J.: Badania i analiza porównawcza własności stali stosowanych na elektrody zbiorcze. Sprawozdanie z pracy badawczej IMŻ Gliwice nr B0-1196/BL/2006, lipiec 2006, Laboratorium Badań Właściwości i Struktury Materiałów. Zamawiający: Fabryka Elektrofiltrów ELWO S. A. ul. Bielska 44, 43-200 Pszczyna. Zasoby biblioteki zakładowej.
98. Maliński M.: Wybrane zagadnienia statystyki matematycznej w excelu i pakiecie statistica. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2015.

99. Mandloi A., Yadav A.: Numerical simulation and optimization of cold rolling process parameters for strain. *International Journal of Engineering Research and Science & Technology*, vol. 4, No. 4, November 2015. ISSN 2319-5991.
100. Materiały Fabryki Elektrofiltrów ELWO S. A. „Elektrofiltry” – folder reklamowy. (niepublikowane), 2006.
101. More P., Burande D. H.: Vibration Performance Evaluation of Collecting plates of Electrostatic Precipitators Using FEA Approach. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, Issue 4, Jul-Aug 2013, pp.442-446, ISSN: 22489622.
102. Muller M., Barrans S. M., Blunt L.: Predicting plastic deformation and work hardening during V-band formation. *Journal of materials Processing Technology*, 4 (2011) 627-636. doi: 10.1016/j.matprotec.2016.11.020.
103. Nicol K.: Recent developments in particulate control. IEA Clean Coal Centre, March 2013, ISBN 978-92-9029-538-9.
104. Niewielski G., Lalik S.: Dobór materiałów dla filtra gorącego (450<sup>0</sup>C) dla odpylania taśmy spiekalniczej rud cynku w Duisburgu. Sprawozdanie dla Fabryki Elektrofiltrów ELWO S. A., Ośrodek Badawczo-Rozwojowy ORGHUT, ul. Karpacka 1/1, 40-216 Katowice, lipiec 2001.
105. Nowak A., Brzozowski K.: Symulacje Numeryczne Drgań Zespołu Elektrod Osadczych, *Logistyka*, 6/2011, s. 3097-3106.
106. Nowak A., Nowak P., Awrajcewicz J.: Influence of an anvil beam on vibrations of collecting electrodes, 13th International Conference on Dynamical Systems-Theory and Applications, Lodz University of Technology, DSTA 2015, ISBN: 978-83-7283-705-9.
107. Nowak A., Nowak P., Kurz M., Ryguła Cz.: Study of the effect of the stiffness of the anvil beam for vibration propagation in the system of collecting electrodes. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93 Nr 2/2017, doi: 10.15199/48.2017.02.51.
108. Nowak A., Nowak P.: Influence of Impulse Force Loading on Vibrations of the Collecting Electrodes, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 17, No. 5, (2017), 174011, doi: 10.1142/S0219455417400119.
109. Nowak A., Ryguła Cz.: Proces upraszczania modeli układu strzepywacz-elektrody zbiorcze. *Ochrona i Inżynieria Środowiska – Zrównoważony Rozwój*, Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, vol. 37, 2008, s. 133-140, ISBN 83-89772-32-9.
110. Nowak A.: Modelowanie i pomiary drgań elektrod osadczych elektrofiltrów suchych. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej. Bielsko-Biała 2011. ISBN 978-83-62292-66-0.
111. Nowak A.: Optymalizacja parametrów geometrycznych bijaka oraz analiza przyspieszeń elektrod zbiorczych elektrofiltru, Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej, 2000 (Praca doktorska).
112. Nowak A.: Vibration of collecting electrodes in electrostatic precipitators-Modeling, measurements and simulation tests, *Journal of Electrostatic*, Volume 70, Issue3, June 2012, pages 327-332.
113. Nowak A.: Wpływ modeli połączeń elektrod i belek na dokładność wyników w analizie drgań. *Modelowanie Inżynierskie*, 43, S. 219-230, Gliwice 2012.

114. Nowak A.: Wpływ modyfikacji kształtu bijaka na drgania elektrod osadczych elektrofiltru. *Ekotechnologia* Nr 2-3, 2001, ISSN 1508-3489.
115. Omine N., Ishizaka H., Orita K., Nagayasu T., Miyake K., Kagawa S.: AQCS (Air Quality Control System) for thermal power plants capable of responding to wide range of coal properties and regulations. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, Vol. 54, No.3, september 2017, pp. 55-62.
116. Pająk J.: Ulot wsteczny w elektrofiltrach. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry” 2004, 16-18 wrzesień, Kraków 2004.
117. Parker K. R.: *Applied Electrostatic Precipitation*. Blake Academic Professional. London 1997.
118. Parker K.: *Elektrostatyczne działanie elektrofiltrów*. Instytut Inżynierów Elektryków, Londyn Wielka Brytania, 2003.
119. Podatność stali nierdzewnych na przeróbkę plastyczną, Seria: Materiały i zastosowania, zeszyt 8, Euro Inox 2008, [www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/FormingPotential\\_PL.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/FormingPotential_PL.pdf).
120. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, Dz. U. z 2014 r. poz. 1546.
121. Ruckelshausen K.: *Über die Beseitigung von Staubansätzen auf Techniken glatten Oberflächen durch Klopfen oder Vibrien*. Tech. Hoch. Stutgart, 1957 (Disertation).
122. Safdarian R., Naeini H.M.: The effects of forming parameters on the cold forming of channel section. *Thin-Walled Structures*, 92 (2015) 130-136.
123. Sarna M.: Analiza i synteza dyskretno-ciągłego układu mechanicznego. *Rozprawy Inżynierskie, Engineering Transactions*, 24, 1, 149-160, 1975, Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki.
124. Sarna M.: Badania dyskretno-ciągłego układu mechanicznego o własnościach losowych. *Rozprawy Inżynierskie, Engineering Transactions*, 25, 3, 415-426, 1977.
125. Sarna M.: Drgania młotków strzepywaczy elektrod zbiorczych elektrofiltrów. *Ochrona Powietrza*, Rok VII-1973, Nr 1, (33).
126. Sarna M.: Dynamika belek wzbudzających drgania w elektrodach zbiorczych elektrofiltrów. *Ochrona Powietrza*, Rok VI-1972, Nr 1 (27).
127. Sarna M.: Numeryczna analiza wzbudzania drgań elektrod elektrofiltru. *Inżynieria Włókiennicza i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej*, Zeszyt 3, nr 21, 11.089/C2, Bielsko-Biała 1994, ISSN 1230-5995.
128. Sarna M.: Optimization problem of induction of vibrations to electrostatic precipitators collection electrode. *Staub-Reinhalt, Luft* 35 (1975), Nr 10 Oktober.
129. Sarna M.: Przyspieszenia drgań skrętnych cienkościennego pręta o przekroju otwartym. *Rozprawy Inżynierskie*, 4, 18, 1970.
130. Sarna M.: *Wybrane zagadnienia elektrostatycznego odpylania gazów przemysłowych*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej. Bielsko-Biała 2005. ISBN 83-89086-53-0.
131. Sarna M.: *Zagadnienia badań modelowych konstrukcji elektrofiltrów*. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2001, ISBN 83-87087-28-9.

132. Seredyński A.: Sprawozdanie z pomiarów przyspieszeń drgań dla układu elektrod EZ i EU wykonanych wg wariantów I i II. Zleceniodawca: Fabryka Elektrofiltrów ELWO S.A. w Pszczynie. 2008.
133. Shah K. P.: Construction, Working, Operation and Maintenance of Electrostatic Precipitators (ESPs). Handbook. Edition: January 2017, India.
134. Shaikh A. I., Nilaj Deshmukh N.: Simulation and experimental study of acoustic waves for cleaning of shot in proces equipments, *Advances in Inteligent System Research*, 2017, vol. 137, pp. 242-251.
135. Sheikh M. A., Palavilayil R. R.: An assessment of finite element software for application to the roll-forming process. *Journal of Materrials Processing Technology*. 180 (2006) 221-232.
136. Skrzypczyk G.: Sekcjonizacja zasilania jako sposób zwiększenia skuteczności odpylania elektrofiltrów. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry” 19-21 wrzesień, Kraków 2002.
137. Sładkowska-Rybka B., Sarna M.: Możliwości poprawy skuteczności odpylania w elektrofiltrze dzięki nierównomiernemu przepływowi spalin, *Nauka, Przyroda, Technologie*, zeszyt 4, tom 5, 2011, str. 1-10.
138. Sładkowska-Rybka B., Sarna M.: Wpływ składu frakcyjnego pyłu na skuteczność elektrostatycznego odpylania spalin. *Ekotechnologia*, nr 1-2, styczeń-czerwiec 2003.
139. Sobczyk M.: *Ekonometria*. Wydawnictwo C. H. BECK. Warszawa 2013. ISBN 978-83-255-4344-0.
140. Sobczyk M.: *Statystyka. Aspekty praktyczne i teoretyczne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej. Lublin 2006. ISBN 83-227-2423-3.
141. Sproull Wayne T.: (1956) Fundamentals of Electrode Rapping in Industrial Electrical Precipitators, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 15:2, DOI: 10.1080/00022470.1956.10468335.
142. Su Ch., Li X., Feng Z., Li X., Selvan Naven N., Zhao L., Huang W.: Rebound control in multipass roll forming of cap-shaped parts based on segmental boundary optimization function. *Materials & Design*, Vol. 225 (2023) 111512. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111512>.
143. Szarowicz K.: Szkolenie i konsultacje z zakresu oprogramowania COPRA RF i COPRA FEA. Materiały autorskie firmy dataM Sheet Metal Solutions GmbH. Tychy 2020.
144. Szwed H., Bach S.: Badania nad przyczynami niskich skuteczności odpylania w elektrofiltrach suchych. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry”, 19-21 wrzesień, Kraków 2002.
145. Szwed H., Bach S.: Praca elektrofiltrów przy odpylaniu gazów powstałych ze spalania węgla z Zagłębia Lubelskiego. *Problemy Projektowe Przemysłu i Budownictwa*, nr 2, 2001, str. 48-51, ISSN 0239-7404.
146. Szwed H.: Dobór komory na podstawie analizy rozkładu masy pyłu na elektrodzie zbiorczej. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry” 2004, 16-18 wrzesień, Kraków 2004.
147. Szwed H.: Doświadczenia z eksploatacji elektrofiltrów taśm spiekalniczych Huty Katowice. *Problemy Projektowe Przemysłu i Budownictwa*, nr 2, 2002, str. 51-55, I SSN 0239-404.

148. Szwed H.: Kryteria doboru urządzeń odpylających dla wybranych procesów technologicznych. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry”, 19-21 wrzesień, Kraków 2002.
149. Szwed H.: Znaczenie elektrofiltrów w procesie ochrony środowiska. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Elektrofiltry” 2004. 16-18 września, Kraków 2004.
150. Tajdari M., Farzin M.: Numerical analysis of cold forming of symmetrical open sections. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126 (2002) 633-637.
151. Tajik Y., Naeini H. M., Tafti R. A., Bidabadi B. S.: A strategy to reduce the twist defects in cold-formed asymmetrical-channel section. *Thin-Walled Structures*. 2018, 130, 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.05.013>.
152. Tehrani M. S., Naeini H. M., Hartley P., Khadesmizadeh H.: Localized edge buckling in cold-forming of circular tube section. *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (2006) 617-620.
153. Thlon M., Sieradzki R.: Ocena opłacalności i ryzyka inwestycji. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie. Kraków 2016. ISBN 978-83-7252-724-0.
154. Tomczykiewicz J. i zespół: Dobór optymalnego gatunku stali na blachy tłoczne, walcowane na zimno, przeznaczone do produkcji elektrod zbiorczych typu SF-735 oraz SIGMA II, stosowanych w elektrofiltrach poziomych. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Hutniczego w Polsce, Zespół Rzeczoznawców, ekspertyza nr 331/88. Biblioteka techniczna Zakładu Produkcji Urządzeń Mechanicznych ELWO w Pszczynie, nr 913/spr., 1988 r.
155. Tomitatsu K., Kato M., Ueda Y., Nagata C.: Development of advanced electrostatic fabric filter. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. Vol. 8, No. 1, pp. 37-44, march 2014.
156. Tracz P., Bacciarelli T., Waclawiak K., Kościelniak B.: Material and technological issues in production of electrostatic precipitators collecting electrodes. *Inżynieria Materiałowa*, nr 4, 2017, str. 198-203, pkt. 13. DOI:10.15199/28.2017.4.7.
157. Tracz P., Biały L., Waclawiak K.: Directions of improvements of modern electrostatics precipitators. *Archiwum gospodarki odpadami i ochrony środowiska*, vol. 18, issue 1 (2016), p.45-60, ISSN 1733-4381.
158. Tracz P., Waclawiak K., Sokołowski P.: Analiza dynamiczna i kinematyczna wybranych cech konstrukcyjnych mechanizmów udarowych stosowanych w elektrofiltrach przemysłowych. *Energetyka*, nr 10, październik 2017, str. 660-663, ISSN 0013-7294.
159. Tracz P., Waclawiak K.: Możliwości modernizacyjne układu elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego. *Energetyka Zeszyt tematyczny nr XXVII*, listopad 2016, str. 39-42, ISSN 0013-7294.
160. Tracz P., Waclawiak K.: Wpływ topologii profili elektrod zbiorczych elektrofiltru na drgania własne i wymuszone. *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, vol. 83, nr 7, 2016, str. 308-313, DOI: 10.15199/24.2016.7.5.
161. Traub T., Groche P.: Energy efficient roll forming process through numerical simulations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1063 012182. doi:10.1088/1742-6596/1063/1/012182.

162. Tsang K.S., Ion W., Blackwell P., English M.: Validation of a finite element model of the cold roll forming process on the basis of 3D geometric accuracy. *Procedia Engineering*, 207 (2017) 1278-1283.
163. Tu G., Yao Q., Song Q.: Experimental and numerical study of particle deposition on perforated plates in a hybrid electrostatic filter precipitators. *Powder Technology*, Vol. 321, pp. 143-153, November 2017.
164. Wang A., Song Q., Tu G., Wang H., Yue Y., Yao Q.: Influence of flue gas cleaning system on characteristic of PM<sub>2.5</sub> emission from coal-fired power plants. *International Journal of Coal Science & Technology*, Vol.1, Issue 1, pp. 4-12, march 2014.
165. Wang J., Liu H., Li S., Chen W.: Cold roll forming process design for complex stainless-steel section based on Copra and orthogonal experiment. *Materials* 2022, 15, 8023. <https://doi.org/10.3390/ma15228023>.
166. Wang T., Groche P.: Sheet metal profiles with variable height: numerical analysis on flexing roller beading. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 3, 19: doi:10.3390/jmmp3010019.
167. Wang Y., Xu X., Liu H., Liu J., Zhao R.: Optimizat on of the forming method on torsion defect in cold-roll forming of Z section steel. *ACS Omega*, 2022, 7, 4804-4811, <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04969>.
168. Wang Y., Xu X., Ren B., Liu J., Zhao R.: Effect of geometrical factors on torsion in cold roll forming of the lower side beam of a car. *Applied Sciences*. 2021, 11, 7852, <https://doi.org/10.3390/app11177852>.
169. Wanjari P., Narkar K. M.: Design Modification of Rapping System to Improve the Dust Collection Efficiency of Electrostatic Precipitator, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vo. 3, Issue 8, August 2014, ISSN: 2319-8753.
170. Wanjari P., Ryguła Cz Narkar K. M.: Traditional and Hybrid Method of Rapping Systems in Electrostatic Precipitator, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 4., No. 4, (Aug 2014), E-ISSN 227-4106.
171. Warych J.: Procesy oczyszczania gazów. *Problemy projektowo–obliczeniowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1999. ISBN 83-7207-112-8.
172. Widuch A.: *Kształtowniki stalowe gięte*. Poradnik. Wydawnictwo Śląsk, Katowice (1975). ISBN 83-216-0240-1.
173. Wierzbńska M., Kędzior B.: Sposoby regeneracji elektrod zbiorczych e elektrofiltrach, *Inżynieria Ekologiczna*, vol. 38, 2014, str. 106-116, DOI: 10.12912/2081139X.37.
174. Wiśniowska E.: Najlepsze dostępne techniki (BAT) jako instrument ochrony środowiska. *Inżynieria i ochrona środowiska*, 2015, t. 18, nr 3, s.385-387.
175. Yao Y., Youngshui Z., Yong W.: The airflow distribution design of ESP-FF hybrid dust collector and the application at Balco power plant in India. *ICESP XIII conference papers*, Bangalore, India 16th-21st, September 2013.
176. Yesane D. P. , Hingole R. S.: The investigation of effects of roll forming parameters on shape defects of channels section. *International Journal of Current Engineering and Technology*. Special Issue-6 (Oct. 2016).



177. Yi Ch., Yin T., Huang H., Du Y., Yi R.: Study on new laboratory scale transverse plate precipitator collecting fly ash. *Applied Mechanics and Materials*, 433-435, (2013), 2260-2264.
178. Zhang Y., Jung D.W.: Study of roll forming bending in different temperature. *International Journal of Materials Science and Applications*. 2016, 5(3), 129-135. doi: 10.11648/j.ijmsa.20160503.13.
179. Zhang Y., Nguyen H-P., Jung D-W.: Optimization of the spring-back in roll forming process with finite element simulation. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 5(4) (2016) 272-275.
180. Zou T., Zhou N., Peng Y., Tang D., Li D.: Numerical simulation of the roll forming process of aluminium folded micro-channel tube. *Journal of Physics: Conference Series*, 734 (2016) 032016. doi: 10.1088/1742-6596/734/032016.

#### WYKAZ NORM

181. DIN 1623-1:1986-02. Kaltgewalztes Band und Blech. Technische Lieferbedingungen. Weiche unlegierte Stähle zum Kaltumformen.
182. DIN 1623-2:1986-02. Kaltgewalztes Band und Blech. Technische Lieferbedingungen. Allgemeine Baustähle.
183. DIN 1623-3:1986-02. Kaltgewalztes Band und Blech. Technische Lieferbedingungen. Weiche unlegierte Stähle zum Emaillieren.
184. DIN 6935. Cold bending of Flat Rolled Steel Products. October 1975.
185. PN-89/H-84023/03. Stal niskowęglowa na blachy i taśmy. Gatunki.
186. PN-89/H-84023/05. Stal okresowego stosowania. Stal niskowęglowa wyższej jakości niestopowa i stopowa. Gatunki.
187. PN-EN 10025-2:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.
188. PN-EN 10025-2:2007. Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2. Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.
189. PN-EN 10055:96. Stale konstrukcyjne trudnordzewiejące. Techniczne warunki dostawy.
190. PN-EN 10088-1:2007. Stale odporne na korozję. Część 1: Gatunki stali odpornych na korozję.
191. PN-EN 10088-2:2007. Stale odporne na korozję. Część 2: Warunki techniczne dostawy blach i taśm ze stali nierdzewnych ogólnego przeznaczenia.
192. PN-EN 10111:2001. Blachy i taśmy walcowane na gorąco w sposób ciągły, przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno. Warunki techniczne dostawy.
193. PN-EN 10130+A1:1999. Wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali niskowęglowych do obróbki plastycznej na zimno. Techniczne warunki dostawy.
194. PN-EN 10131:2008. Wyroby płaskie ze stali niskowęglowych i stali o podwyższonej granicy plastyczności walcowane na zimno, niepowlekane i powlekane elektrolitycznie powłoką cynkową lub cynkowo-niklową, przeznaczone do obróbki plastycznej na zimno. Tolerancje wymiarów i kształtu.

## Spis rysunków

Rys. 1. Możliwości separacyjne odpylaczy: N – zakres nominalny, H – zakres o wyższej skuteczności odpylania, L – odpylanie tańszymi metodami .....	10
Rys. 2. Budowa typowego elektrofiltru o poziomym przepływie spalin .....	11
Rys. 3. Schemat działania elektrofiltru: 1-zespół zasilający, 2-elektrody emisyjne, 3-elektrody zbiorcze, 4-kanal doprowadzający zapyłony gaz, 5-lej zsypany, 6-kanal odprowadzający odpyłony gaz .....	12
Rys. 4. Zasada jonizacji i odpylania gazu .....	12
Rys. 5. Przykładowe charakterystyki zmian oporności właściwej pyłu dla różnych temperatur i wilgotności dla pyłu suchego i wilgotnego .....	13
Rys. 6. Wpływ ziarnistości pyłu na skuteczność elektrofiltru .....	14
Rys. 7. Zakres spotykanych składów frakcyjnych pyłów z węgla kamiennego spalane w kotłach pyłowych .	15
Rys. 8. Zmiana rezystywności popiołu lotnego wraz ze zmianą temperatury gazu i jego wilgotności .....	17
Rys. 9. Układy elektrod w elektrofiltrze: a) płaski, b) rurowy, c) plastrowy, d) współśrodkowy .....	19
Rys. 10. Płaski układ elektrod (elektroda zbiorcza typu Sigma i elektroda ulotowa ramowa taśmowa).....	19
Rys. 11. Płaski układ elektrod (elektroda zbiorcza typu Sigma i elektroda ulotowa typ U) .....	20
Rys. 12. Elektroda zbiorcza typu Sigma .....	20
Rys. 13. Różne typy elektrod ulotowych w postaci cienkościennej rury z elementami emitującymi w postaci prętów oraz elektroda ulotowa w postaci drutu ukształtowanego w sprężynę – produkcja EWES .....	21
Rys. 14. Elektroda ulotowa w postaci taśmy kolczastej zamocowanej w ramie – efekt uszkodzenia (zerwania taśmy) .....	21
Rys. 15. Schemat przedstawiający nagromadzony pył na elektrodzie zbiorczej .....	28
Rys. 16. Nadmierne osady pyłu na elektrodach: a) zbiorczych, b) ulotowych, świadczące o nieprawidłowej pracy odpylacza (zdjęcie własne autora).....	29
Rys. 17. Kontener z instalacją kondycjonowania spalin .....	32
Rys. 18. Schemat instalacji kondycjonowania spalin na płynną siarkę .....	33
Rys. 19. Wpływ kondycjonowania gazów odlotowych SO <sub>3</sub> na rezystywność popiołu lotnego .....	33
Rys. 20. Przykładowy schemat systemu sterowania PLC i wizualizacji pracy elektrofiltru .....	34
Rys. 21. Maski wizualizacyjne pracy elektrofiltru .....	35
Rys. 22. Innowacyjny elektrofiltr kominowy zamontowany w budynku mieszkalnym w Goczałkowicach-Zdroju .....	36
Rys. 23. Filtr hybrydowy: a) schemat działania filtra hybrydowego, b) przegroda (kierownica) oddzielająca strefy stanowiące elektrofiltr od strefy w której zabudowano filtr workowy .....	37
Rys. 24. Zasada oczyszczania elektrod zbiorczych w elektrofiltrze z wykorzystaniem technologii MEEP Moving Electrode Electrostatic Precipitator .....	38
Rys. 25. Różne typy elektrod zbiorczych. Od prawej: GS 750, EEC USA, CSV i ZT24 Lurgi (płytowe), Sigma VI, Sigma I .....	49
Rys. 26. Proces profilowania elektrody zbiorczej: a) widok wzdłuż poszczególnych stacji roboczych, b) etap kształtowania półki elektrody .....	54
Rys. 27. Wady elektrody zbiorczej spowodowane zastosowaniem wsadu o nienormowych parametrach: a) deformacja półki elektrody, b) zjawisko pofalowania powierzchni środkowej płyty elektrody zbiorczej .....	56
Rys. 28. Przykład niepożądanego zjawiska „zblżenia” elektrod zbiorczych w komorze elektrofiltru spowodowane przekroczeniem tolerancji wygięcia wzdłużnego płyty elektrody .....	56
Rys. 29. Układ elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego: 1-elektrody zbiorcze, 2-belka zawieszniowa, 3-draż strzepujący, 4-kowadło, 5-mechanizm udarowy .....	57
Rys. 30. Zależność oddzielania pyłu od elektrody w funkcji przyspieszenia i częstotliwości drgań: a) przyspieszenia wymagane do usunięcia 50% pyłu zgromadzonego na elektrodzie zbiorczej, b) przyspieszenia wymagane do usunięcia 90% pyłu na elektrodzie zbiorczej .....	58

Rys. 31. Przykłady eksploatacyjnych uszkodzeń elementów sekcji elektrod zbiorczych: a) deformacja młotków strzepywaczy, b) propagacja pęknięć w strefie mocowania elektrody zbiorczej do drąga strzepującego .....	59
Rys. 32. Rozrzut wielkości pola elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego dla przemysłu energetycznego w zależności od wartości opałowej paliwa i zawartości popiołu w paliwie w przypadku węgla kamiennego ....	62
Rys. 33. Rozrzut wielkości pola elektrod zbiorczych elektrofiltru suchego dla przemysłu energetycznego w zależności od wartości opałowej paliwa i zawartości popiołu w paliwie w przypadku węgla brunatnego .....	63
Rys. 34. Proces dostawy i magazynowania taśmy stalowej (wsadu) w hali produkcyjnej .....	65
Rys. 35. Proces uzbrajania i kalibracji profilarki elektrod zbiorczych Daniel Smith LTD .....	66
Rys. 36. Sposób pomiaru wzajemnego położenia kolejnych przepustów profilarki .....	66
Rys. 37. Zdjęcie poglądowe wydziału produkcji firmy krajowej .....	67
Rys. 38. Mapa procesu technologicznego i kontrola produkcji elektrod zbiorczych .....	68
Rys. 39. Proces profilowania i konserwacji elektrod zbiorczych .....	69
Rys. 40. Przykładowe operacje obróbki plastycznej na zimno wykonywane na prasach bocznych przynależnych do linii produkcyjnej .....	69
Rys. 41. Przygotowanie elektrod zbiorczych do procesu pakowania .....	70
Rys. 42. Opakowanie elektrod zbiorczych – proces przygotowania paczek: a) opakowanie stalowe, b) opakowanie drewniane .....	71
Rys. 43. Przygotowanie do wysyłki i załadunek gotowego produktu .....	71
Rys. 44. Przykładowa dokumentacja warsztatowa elektrody zbiorczej GS-800.....	73
Rys. 45. Przykładowy protokół z pomiarów elektrod zbiorczych .....	74
Rys. 46. Sposób sprawdzenia tolerancji wykonania warsztatowego elektrod zbiorczych: a) wygięcie wzdluzne, b) skręcenie poprzeczne, c) odległość od osi środkowej (średnika) profilu elektrody, d) sierpowatość .....	75
Rys. 47. Sprawdzenie nieciągłości powierzchni płyty elektrody zbiorczej za pomocą badania penetracyjnego .	75
Rys. 48. Geometria oraz wymiary płyty elektrody zbiorczej Sigma 735 na podstawie dokumentacji warsztatowej firmy VALMET Technologies Oy.....	76
Rys. 49. Kręgi taśmy stalowej zimnowalcowanej zakupionej do produkcji oraz odcinki próbne wycięte do badań właściwości mechanicznych i składu chemicznego .....	77
Rys. 50. Rozkład wybranych właściwości badanych materiałów .....	80
Rys. 51. Wykres interakcji węgla i fosforu - predykcja modelu szacującego skręcenie poprzeczne elektrody zbiorczej .....	106
Rys. 52. Wykres interakcji węgla i siarki - predykcja modelu szacującego pofalowanie płyty elektrody zbiorczej .....	107
Rys. 53. Wartości współczynnika determinacji $R^2$ jako miara oceny wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych z osobna na poszczególne tolerancje wykonania elektrod zbiorczych .....	107
Rys. 54. Porównanie wartości współczynnika determinacji $R^2$ [%] w kontekście sprawdzenia redukcji tej miary statystycznej przy szacowaniu modeli regresji jedną zmienną objaśniającą .....	108
Rys. 55. Porównanie względnych skumulowanych wartości współczynnika determinacji $R^2$ [%] dla modeli regresji wielorakiej, w których zmienne objaśniające reprezentują skład chemiczny wsadu technologicznego .	109
Rys. 56. Optymalne nastawy parametrów strukturalnych modelu regresji wielorakiej szacującego średnią wartość wygięcia Ac panelu elektrody zbiorczej .....	114
Rys. 57. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego wygięcie Ac .....	115
Rys. 58. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego wygięcie Bc .....	116
Rys. 59. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego skręcenie poprzeczne H .....	116
Rys. 60. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego sierpowatość K .....	117

Rys. 61. Wykresy interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi reprezentującymi właściwości mechaniczne taśmy stalowej - predykcja modelu szacującego pofalowanie powierzchni .....	118
Rys. 62. Wartości współczynnika determinacji $R^2$ jako miara oceny wpływu poszczególnych właściwości mechanicznych, z osobna na poszczególne tolerancje wykonania elektrod zbiorczych .....	118
Rys. 63. Porównanie względnych skumulowanych wartości współczynnika determinacji $R^2$ [%] dla modeli regresji wielorakiej, w których zmienne objaśniające reprezentują właściwości mechaniczne wsadu technologicznego .....	119
Rys. 64. Modelowane numerycznie profile elektrod zbiorczych: a) Sigma, b) rynnowy, c) ZT24.....	123
Rys. 65. Podział analizowanych kształtowników na elementy proste i łukowe oraz położenie płaszczyzny rozwinięcia, elektrody: a) Sigma III, b) ZT24, c) rynnowa .....	125
Rys. 66. Definicja płaszczyzny rozwinięcia oraz sekwencji gięcia elektrody zbiorczej rynnowej, (oprogramowanie COPRA RF) .....	126
Rys. 67. Arkusz SpreadSheet – projektowanie rozwinięcia kształtowników zimnogiętych .....	126
Rys. 68. Kolejne etapy definiowania wymaganych parametrów podczas tworzenia wirtualnej maszyny profilującej .....	127
Rys. 69. Sekwencje gięcia analizowanych elektrod zbiorczych, elektrody: a) rynnowa, b) Sigma III, c) ZT24 ..	128
Rys. 70. Pasek narzędzi COPRA RF DTM (symulacja wydłużeń z wybraną opcją „Przebieg odkształceń w środku kształtownika) .....	129
Rys. 71. Walidacja opracowanych projektów rozwinięcia elektrod zbiorczych na podstawie analizy odkształceń zidentyfikowanych na krawędzi profilowanego kształtownika: a) Sigma III, b) ZT24, c) rynnowa.....	131
Rys. 72. Przykładowa konstrukcja rolek profilujących – elektroda zbiorcza Sigma III (stacja 13).....	132
Rys. 73. Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne z zastosowaniem rolek bocznych – elektroda zbiorcza rynnowa (stacja 12).....	132
Rys. 74. Kształt i wymiary próbek wykorzystanych w statycznej próbie rozciągania .....	133
Rys. 75. Maszyna wytrzymałościowa za pomocą której wykonano statyczną próbę rozciągania próbek.....	134
Rys. 76. Przykładowy wykres rozciągania stali nierdzewnej 1.4541 .....	135
Rys. 77. Przykładowe ustawienia symulacji numerycznej (zakładka meshing) .....	135
Rys. 78. Wykres (czas symulacji – poszczególne kroki obliczeniowe - increments) – elektroda zbiorcza Sigma III $g=1,5$ mm .....	136
Rys. 79. Przykładowe ustawienia symulacji numerycznej (zakładka material i process).....	137
Rys. 80. Dyskretyzacja pasma giętego (taśmy stalowej) – elektroda Sigma III .....	138
Rys. 81. Model 3D stacji profilujących elektrodę ZT24 zaimplementowany do środowiska COPRA RF FEA .....	138
Rys. 82. Wybór punktu pomiarowego (węzła siatki) w analizie odkształceń wzdłużnych .....	139
Rys. 83. Mapa zastępczych odkształceń plastycznych dla elektrody Sigma III – stacja 11.....	140
Rys. 84. Mapa zastępczych odkształceń plastycznych dla elektrody rynnowej – stacja 13.....	140
Rys. 85. Mapa zastępczych odkształceń plastycznych dla elektrody ZT24 – stacja 5 .....	140
Rys. 86. Rozkład odkształcenia wzdłużnego w paśmie giętym dla wszystkich stacji profilujących: a) Sigma III, b) ZT24, c) profil rynnowy .....	141
Rys. 87. Lokalizacja miejsca wykonania pomiaru pocienienia i wydłużenia taśmy stalowej dla profilu rynnowego .....	143
Rys. 88. Rozkład pocienienia taśmy na szerokości profilowanej elektrody zbiorczej rynnowej o grubości 1,0 mm .....	143
Rys. 89. Rozkład pocienienia taśmy na szerokości profilowanej elektrody zbiorczej Sigma III o grubości 1,25 mm .....	143
Rys. 90. Rozkład pocienienia taśmy na szerokości profilowanej elektrody zbiorczej ZT24 o grubości 1,0 mm.....	144

Rys. 91. Redukcja grubości wsadu technologicznego (wartości maksymalne) w zależności od typu elektrody i typoszeregu grubości kształtownika .....	144
Rys. 92. Zmiana szerokości taśmy stalowej w zależności od typu elektrody zbiorczej i grubości kształtownika.....	145
Rys. 93. Porównanie wartości poszerzenia i pocienienia pasma giętego podczas profilowania elektrody zbiorczej rynnowej o grubości 1,0 mm .....	145
Rys. 94. Krzywe obrazujące zmianę właściwości mechanicznych profili elektrod zbiorczych w zależności od stopnia pocienienia materiału .....	146
Rys. 95. Wykresy FLD (Forming Limit Diagram) opracowane dla elektrod: a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa ze stali DC01 .....	149
Rys. 96. Rozkład naprężenia normalnego w kierunku profilowania (Z) na poszczególnych stacjach profilujących: a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa (stal DC01).....	151
Rys. 97. Porównanie wpływu gatunku stali na wartości maksymalne i minimalne naprężenia zastępczego H-M-H na poszczególnych stacjach profilujących dla profilu rynnowego (g=1,0 mm) .....	152
Rys. 98. Mapa naprężenia zastępczego H-M-H (elektroda zbiorcza Sigma – stacja nr 6) .....	152
Rys. 99. Mapa naprężenia zastępczego H-M-H (elektroda zbiorcza ZT24 – stacja nr 9).....	153
Rys. 100. Mapa naprężenia zastępczego H-M-H (elektroda zbiorcza rynnowa – stacja nr 11) .....	153
Rys. 101. Rozkład wartości maksymalnego odkształcenia zastępczego w paśmie giętym: a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa (stal DC01) .....	154
Rys. 102. Porównanie wpływu gatunku stali na wartość maksymalnego odkształcenia na poszczególnych stacjach profilujących dla profilu rynnowego (g=1,0 mm).....	155
Rys. 103. Zmiana wartości odkształcenia eW(s) na powierzchni profilowanej taśmy (profil rynnowy) .....	158
Rys. 104. Analiza porównawcza w zakresie: a) wpływu $R_e$ i $R_m$ na zmianę wartości odkształcenia eW(s), b) zmiany współczynnika k w funkcji grubości taśmy stalowej oraz odkształcenia eW(s) .....	158
Rys. 105. Okno dialogowe narzędzia Springback (COPRA RF) z wyliczony kątem sprężynowania powrotnego dla półki elektrody zbiorczej Sigma III (kolor niebieski na rysunku) .....	161
Rys. 106. Wpływ czynnika A na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza Sigma III) .....	163
Rys. 107. Wpływ czynnika B na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza Sigma III) .....	163
Rys. 108. Wykres interakcji obrazujący wpływ (czynnika A*czynnik B) na wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza Sigma III).....	163
Rys. 109. Wpływ czynnika A na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza ZT24).....	164
Rys. 110. Wpływ czynnika B na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza ZT24).....	164
Rys. 111. Wykres interakcji obrazujący wpływ (czynnika A*czynnik B) na wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza ZT24).....	164
Rys. 112. Wpływ czynnika A na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza rynnowa) .....	165
Rys. 113. Wpływ czynnika B na średnią wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza rynnowa) .....	165
Rys. 114. Wykres interakcji obrazujący wpływ (czynnika A*czynnik B) na wartość kąta sprężynowania powrotnego (elektroda zbiorcza rynnowa) .....	165
Rys. 115. Wielotaktowe gięcie rolkowe: a) rozkład wektorów sił zidentyfikowanych na górnych i dolnych rolkach profilujących, b) wartości sił [N] wyliczone dla kierunków x, y i z, elektroda zbiorcza Sigma (g=1,0 mm) – stacja nr 5 .....	167
Rys. 116. Zmiana wartości wypadkowej siły F na długości pasma giętego, elektrody zbiorcze: a) Sigma, b) ZT24, c) rynnowa .....	169

Rys. 117. Zmiana wartości wypadkowej siły F na długości pasma giętego, elektroda zbiorcza rynnowa wykonana z stali węglowej i nierdzewnej .....	169
Rys. 118. Wybrane cechy geometryczne profili elektrod zbiorczych poddane analizie wymiarowej: camber (sierpowatość), bending on length (wygięcie wzdłużne), buckling (pofalowanie powierzchni, płaskość), transversal bending (wygięcie poprzeczne profilu), twist (skręcenie poprzeczne profilu) .....	171
Rys. 119. Lokalizacja punktu węzłowego względem którego określano: a) zakres wygięcia wzdłużnego profilu, b) sierpowatości dla elektrody zbiorczej typu Sigma .....	172
Rys. 120. Zmiana wartości przemieszczenia punktu węzłowego: a) kierunek Y (wygięcie wzdłużne), b) kierunek X (sierpowatość), elektroda zbiorcza typu Sigma .....	173
Rys. 121. Zmiana wartości przemieszczenia punktu węzłowego: a) kierunek Y (wygięcie wzdłużne), b) kierunek X (sierpowatość), elektroda zbiorcza typu ZT24.....	174
Rys. 122. Zmiana wartości przemieszczenia punktu węzłowego: a) kierunek Y (wygięcie wzdłużne), b) kierunek X (sierpowatość), elektroda zbiorcza rynnowa .....	175
Rys. 123. Sposób definiowania przekrojów inspekcyjnych w gotowych wyrobach po procesie cięcia elektrod na wymiar, elektroda zbiorcza typu rynnowego .....	176
Rys. 124. Mapa odchyłki płaskości (pofalowania powierzchni) oraz wygięcia poprzecznego profilu, elektroda zbiorcza typu Sigma g=1,25 mm – przekrój III .....	177
Rys. 125. Mapa odchyłki płaskości (pofalowania powierzchni) oraz skręcenia poprzecznego profilu, elektroda zbiorcza płytowa ZT24 g=1,0 mm – przekrój II .....	177
Rys. 126. Mapa odchyłki płaskości powierzchni elektrody (pofalowania powierzchni), elektroda zbiorcza typu rynnowego g=1,25 mm – przekrój III .....	178
Rys. 127. Wykres przemieszczeń całkowitych, elektrody zbiorczej typu SIGMA o grubości 1 mm, dla częstotliwości wynoszącej 7,6 Hz (skala zdeformowana) .....	181
Rys. 128. Charakterystyka amplitudowo – częstotliwościowa .....	182
Rys. 129. Sposób pomiar przyspieszenia całkowitego na powierzchni pojedynczego panelu, elektroda zbiorcza typu Sigma o grubości 1,0 mm .....	183
Rys. 130. Sposób definiowania grubości dla poszczególnych paneli sekcji elektrod zbiorczych typu Sigma ....	184
Rys. 131. Wykres zmian wartości siły uderzenia młotka w czasie .....	185
Rys. 132. Mapa przyspieszenia całkowitego na powierzchni płyta elektrod zbiorczych typu Sigma wykonanych z taśmy stalowej o grubości 1,0 mm .....	186
Rys. 133. Obliczone numerycznie wartości przyspieszenia w funkcji długości i szerokości sekcji elektrod typu rynnowego o grubości g=1,0 mm .....	187
Rys. 134. Zależności funkcyjne: zużycie energii elektrycznej – grubość taśmy stalowej (czerwony), moc mechaniczna gięcia – grubość taśmy stalowej przeznaczonej do produkcji elektrody zbiorczej (niebieski).....	191
Rys. 135. Wartość mocy mechanicznej wielotaktowego gięcia rolkowego otrzymana dla poszczególnych stacji profilujących w etapie modelowania numerycznego .....	193
Rys. 136. Diagram Pareto-Lorenza dla analizy przyczyn wpływających na zmniejszenie wielkości produkcji, jakości i zysku .....	195
Rys. 137. Zjawisko zacierania półki elektrody oraz jej deformacja związane z błędami konstrukcyjnymi zestawu profilującego oraz dużą zmiennością właściwości wsadu technologicznego .....	197
Rys. 138. Analiza wrażliwości projektu na zmiany wybranych czynników kształtujących wartość NPV .....	200

## Spis tablic

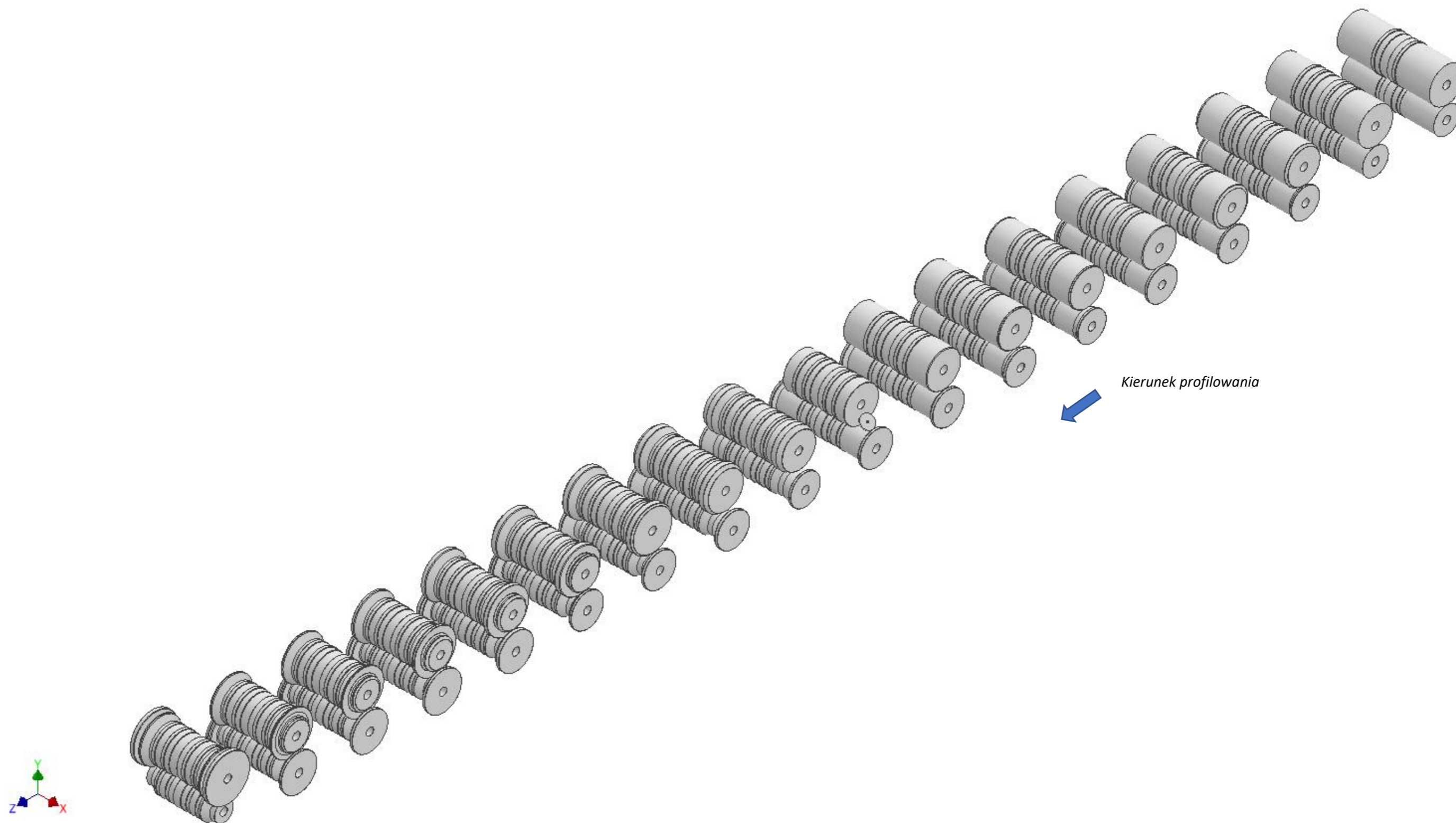
Tablica 1. Graniczne koncentracje pyłu w spalinach dla źródeł istniejących .....	9
Tablica 2. Graniczne koncentracje pyłu w spalinach dla źródeł nowych .....	9
Tablica 3. Skład chemiczny stali stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych .....	51
Tablica 4. Właściwości mechaniczne stali stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych .....	51
Tablica 5. Właściwości mechaniczne stali nierdzewnych stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych .....	53
Tablica 6. Skład chemiczny stali nierdzewnych stosowanych do produkcji elektrod zbiorczych .....	53
Tablica 7. Bazowe zestawienie danych i wskaźników projektowych elektrofiltru suchego na podstawie danych rzeczywistych .....	61
Tablica 8. Zestawienie danych do przygotowania wykresów .....	61
Tablica 9. Podstawowe dane oraz wskaźniki dotyczące procesu produkcyjnego .....	67
Tablica 10. Porównanie kosztu wytworzenia opakowania elektrod zbiorczych .....	70
Tablica 11. Etapy kontroli jakości w procesie produkcji elektrod zbiorczych .....	72
Tablica 12. Oznaczenie materiału zastosowanego do produkcji .....	78
Tablica 13. Liczba próbek w poszczególnych wytopach .....	78
Tablica 14. Zestawienie zmierzonych właściwości materiałowych dla poszczególnych kręgów taśmy .....	78
Tablica 15. Miary statystyczne opisujące właściwości materiałowe wszystkich wytopów z 12 kręgów .....	78
Tablica 16. Granice przedziału ufności dla właściwości wsadu technologicznego .....	79
Tablica 17. Podstawowa statystyka dla 7-miu analizowanych wytopów wsadu technologicznego .....	81
Tablica 18. Wyniki testu Shapiro-Wilka (badanie normalności rozkładu danych empirycznych).....	82
Tablica 19. Sumaryczne zestawienie wyprodukowanych elektrod w powiązaniu z ich długością w odniesieniu do zastosowanych rolek i wytopów hutniczych .....	82
Tablica 20. Wartości klasycznego wsp. zmienności dla analizowanych wielkości geometrycznych [%].....	83
Tablica 21. Wartości klasycznego wsp. zmienności dla analizowanych wielkości geometrycznych [%].....	83
Tablica 22. Podstawowa statystyka wielkości geometrycznych w odniesieniu do całej populacji (134 próbki) .	83
Tablica 23. Analiza statystyczna analizowanych wielkości geometrycznych dla najkrótszej elektrody (11).....	84
Tablica 24. Analiza statystyczna analizowanych wielkości geometrycznych dla najdłuższej elektrody (14).....	84
Tablica 25. Granice przedziału ufności dla analizowanych wielkości geometrycznych .....	85
Tablica 26. Wyniki testu zgodności I Kołmogorowa dla analizowanych wielkości geometrycznych .....	85
Tablica 27. Wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona dla par korelacyjnych w obrębie zmiennych objaśniających opisujących skład chemiczny i kombinacji zmiennych (wielkość geometryczna – skład chemiczny).....	87
Tablica 28. Wartości współczynnika korelacji cząstkowej pierwszego i drugiego rzędu dla zmiennych objaśniających reprezentujących skład chemiczny wsadu technologicznego .....	89
Tablica 29. Przedział ufności dla współczynnika korelacji liniowej Pearsona, wartość statystyki empirycznej z, wraz z oceną istotności .....	89
Tablica 30. Przedział ufności dla współczynnika korelacji liniowej Pearsona, wartość statystyki empirycznej z, wraz z oceną istotności .....	90
Tablica 31. Przedział ufności dla współczynnika korelacji cząstkowej pierwszego rzędu, wartość statystyki empirycznej z, wraz z oceną istotności .....	90
Tablica 32. Przedział ufności dla współczynnika korelacji cząstkowej drugiego rzędu, wartość statystyki empirycznej z wraz z oceną istotności .....	90
Tablica 33. Macierz zero-jedynkowa kombinacji zmiennych objaśniających .....	91
Tablica 34. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej wygięcie Ac .....	92

Tablica 35. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej wygięcie Bc .....	93
Tablica 36. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej skręcenie poprzeczne H .....	93
Tablica 37. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej sierpowatość K .....	94
Tablica 38. Wartości indywidualnych i integralnych wskaźników pojemności informacyjnej dla predyktorów i zmiennej objaśniającej reprezentującej pofalowanie powierzchni .....	94
Tablica 39. Współczynniki równania regresji wielorakiej wraz z wartościami poziomu istotności p .....	95
Tablica 40. Wartość czynnika inflacji wariancji dla zmiennych objaśniających w odniesieniu do poszczególnych modeli ekonometrycznych .....	96
Tablica 41. Miary określające stopień zgodności modelu z danymi empirycznymi .....	97
Tablica 42. Wartości względnego średniego błędu standardowego $V(a_i)$ oraz 95% przedziały ufności dla parametrów strukturalnych otrzymanych modeli ekonometrycznych .....	97
Tablica 43. Wyniki testu serii na sprawdzenie liniowości otrzymanych modeli ekonometrycznych .....	98
Tablica 44. Wyniki testu Jarque'a-Bery na sprawdzenie normalności rozkładu składnika losowego .....	100
Tablica 45. Wyniki testu Durбина-Watsona na sprawdzenie autokorelacji składnika resztowego .....	101
Tablica 46. Wyniki testu Harrisona-McCabe'a na sprawdzenie jednorodności wariancji składnika resztowego .....	102
Tablica 47. Wartości stosunków korelacyjnych Pearsona, wskaźników krzywoliniowości wraz z oceną istotności statystycznej dla kombinacji zmiennych objaśniających reprezentujących skład chemiczny stali .....	103
Tablica 48. Wartości stosunków korelacyjnych Pearsona, wskaźników krzywoliniowości wraz z oceną istotności statystycznej dla kombinacji zmiennych objaśniających i objaśnianych .....	104
Tablica 49. Modele regresji reprezentujące wpływ składu chemicznego taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 na tolerancje wykonania elektrod zbiorczych, otrzymane z wykorzystaniem opcji Regression analysis - Fit model and optimize response .....	105
Tablica 50. Wartości współczynnika korelacji rang Spearmana dla zmiennych zależnych oraz predyktorów reprezentujących właściwości mechaniczne taśmy stalowej zimnowalcowanej .....	111
Tablica 51. Przedział ufności dla współczynnika korelacji rang Spearmana, wartość statystyki empirycznej z wraz z oceną istotności .....	112
Tablica 52. Przedział ufności dla współczynnika korelacji rang Spearmana, wartość statystyki empirycznej z wraz z oceną istotności .....	112
Tablica 53. Modele regresji reprezentujące wpływ właściwości mechanicznych taśmy stalowej zimnowalcowanej DC01 na tolerancje wykonania elektrod zbiorczych, otrzymane przy wykorzystaniu opcji Regression analysis Fit model and optimize response .....	113
Tablica 54. Współczynniki równania regresji wielorakiej wraz z wartościami poziomu istotności p otrzymane przy predykcji tolerancji geometrycznych elektrod na podstawie właściwości mechanicznych (klasyczna metoda najmniejszych kwadratów).....	114
Tablica 55. Podstawowe wskaźniki opisujące analizowane typy elektrod osadczych .....	123
Tablica 56. Przyjęte parametry opisujące maszynę profilującą .....	127
Tablica 57. Parametry materiałowe wyznaczone w próbie rozciągania .....	133
Tablica 58. Parametry ( $\Theta$ , K i n) wyznaczone na podstawie krzywej umocnienia .....	134
Tablica 59. Dane dotyczące zastosowanych siatek elementów skończonych oraz czasu symulacji .....	136
Tablica 60. Zmiana właściwości mechanicznych profilowanych elektrod w zależności od stopnia gniotu .....	147
Tablica 61. Wartości punktu $FLD_0$ wyliczone dla analizowanych gatunków stali .....	148
Tablica 62. Przedziały ufności dla średniej wartości naprężenia zastępczego H-M-H .....	155
Tablica 63. Przedział ufności dla średniej wartości odkształcenia zastępczego .....	156
Tablica 64. Analiza porównawcza w zakresie otrzymanych wartości naprężeń zastępczych H-M-H .....	156



Tablica 65. Analiza porównawcza w zakresie otrzymanych wartości odkształceń zastępczych .....	157
Tablica 66. Matryca planu eksperymentu i wyniki (Two-way-Anova) – elektroda zbiorcza Sigma III .....	161
Tablica 67. Matryca planu eksperymentu i wyniki (Two-way-Anova) – elektroda zbiorcza ZT24.....	162
Tablica 68. Matryca planu eksperymentu i wyniki (Two-way-Anova) – elektroda zbiorcza rynnowa .....	162
Tablica 69. Analiza porównawcza w zakresie pracy gięcia potrzebnej do wykonania analizowanych typów elektrod zbiorczych na podstawie analizy numerycznej.....	170
Tablica 70. Analiza porównawcza otrzymanych wartości wygięcia profilu Sigma .....	173
Tablica 71. Analiza porównawcza otrzymanych wartości wygięcia profilu ZT24 .....	174
Tablica 72. Analiza porównawcza otrzymanych wartości wygięcia profilu rynnowego .....	175
Tablica 73. Analiza porównawcza odchyłki płaskości (pofalowania powierzchni elektrod).....	179
Tablica 74. Analiza wymiarowa odchyłki wygięcia / skręcenia przekroju poprzecznego .....	180
Tablica 75. Częstotliwość drgań własnych elektrod zbiorczych o grubości bazowej i zmniejszonej .....	182
Tablica 76. Wartości przyspieszenia całkowitego na powierzchniach pojedynczych paneli elektrod zbiorczych .....	183
Tablica 77. Wartości przyspieszenia całkowitego na powierzchniach analizowanych sekcji elektrod zbiorczych .....	185
Tablica 78. Wyniki analizy korzyści i zagrożeń wynikających z wprowadzenia nowego produktu .....	188
Tablica 79. Koszt materiałowy elektrod zbiorczych na przykładzie wielkogabarytowego elektrofiltru .....	188
Tablica 80. Podstawowe wskaźniki procesu produkcyjnego w przypadku zlecenia obejmującego 12 448 szt. elektrod zbiorczych .....	189
Tablica 81. Wskaźniki oceny kosztów materiałowych oraz ich odchylenia względne .....	190
Tablica 82. Dane zmierzone z próby technologicznej profilowania .....	190
Tablica 83. Wartości wskaźników energetycznych określających proces gięcia .....	191
Tablica 84. Podstawowe wskaźniki energochłonności produkcji .....	192
Tablica 85. Wskaźniki oceny kosztów zużycia energii elektrycznej oraz ich odchylenia względne .....	192
Tablica 86. Porównanie mocy mechanicznej wielotaktowego gięcia rolkowego (warunki rzeczywiste i symulacja numeryczna) .....	193
Tablica 87. Identyfikacja przyczyn wpływających na zmniejszenie wolumenu i jakości produkcji .....	194
Tablica 88. Uszeregowanie przyczyn wg częstości ich występowania .....	194
Tablica 89. Analiza wskaźnikowa dotycząca zmniejszenia wolumenu produkcji na skutek strat materiałowych i strat czasu pracy linii profilowania elektrod zbiorczych w obecnych warunkach warsztatowych .....	195
Tablica 90. Propozycje zmian modernizacyjnych aktualnego procesu wytwarzania elektrod zbiorczych .....	196
Tablica 91. Struktura kosztów operacyjnych oraz przepływy finansowe dla trzech rozpatrywanych scenariuszy projektu inwestycyjnego.....	198
Tablica 92. Wartości dyskontowych mierników opłacalności oraz prawdopodobieństwo wystąpienia .....	198
Tablica 93. Wartości wskaźników oceny ryzyka projektu inwestycyjnego oraz mierniki prognozy rentowności .....	200

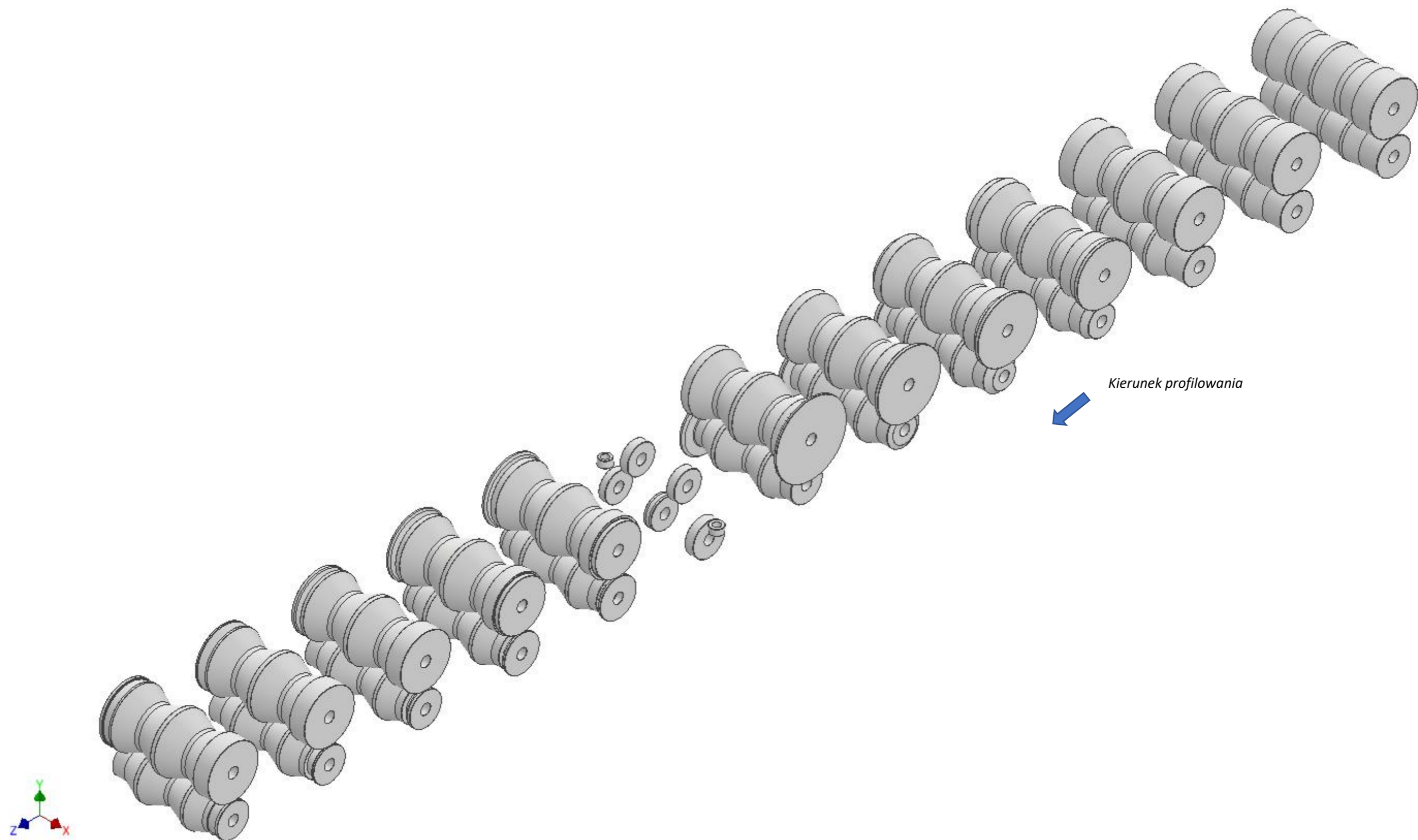
## WIDOK IZOMETRYCZNY ZESTAWU ROLEK PROFILUJĄCYCH – ELEKTRODA ZBIORCZA SIGMA III



## PROJEKT ROZWINIĘCIA PROFILU ELEKTRODY ZBIORCZEJ SIGMA III

Number of Entity	2 Entity		4 Entity		6 Entity		8 Entity		10 Entity		12 Entity		14 Entity		16 Entity		18 Entity		20 Entity		22 Entity		24 Entity		26 Entity		28 Entity		30 Entity		
Profile	Stripwidth	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle		
	639,39	4	90	4	90	4	90	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
			@ 0,0 (2,0)		@ 0,0 (2,0)		@ 0,0 (2,0)																								
18. station	639,39	4	92	4	92	4	92	1	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
			@ 0,0 (-2,0)		@ -12,0 (-2,0)		@ 0,0 (-2,0)																								
17. station	639,39	4	90	4	78	4	90	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
					@ -15,0																										
16. station	639,39	4	90	4	63	4	90	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							@ -11,0																								
15. station	639,39	4	90	4	63	4	79	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							@ -11,0																								
14. station	639,39	4	90	4	63	4	68	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							@ -11,0																								
13. station	639,39	4	90	4	63	4	57	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							@ -10,0																								
12. station	639,39	4	90	4	63	4	47	12	30	4	30	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							@ -12,0		@ -10,0		@ -10,0																				
11. station	639,39	4	90	4	63	4	35	12	20	4	20	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							@ -16,0		@ -10,0		@ -10,0																				
10. station	639,39	4	90	4	63	4	19	12	10	4	10	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
							= 0		= 0		= 0																				
9. station	639,39	4	90	4	63	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
					@ -15,0	0	0	0	0	0	0																				
8. station	639,39	4	90	4	48	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
					@ -16,0	0	0	0	0	0	0																				
7. station	639,39	4	90	4	32	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
					@ -16,0	0	0	0	0	0	0																				
6. station	639,39	4	90	4	16	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
					=0	0	0	0	0	0	0																				
5. station	639,39	4	90	--	--	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
			@ -30,0	0	0	0	0	0	0	0	0																				
4. station	639,39	4	60	--	--	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
			@ -30,0	0	0	0	0	0	0	0	0																				
3. station	639,39	4	30	--	--	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
			=0	0	0	0	0	0	0	0	0																				
2. station	639,39	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	=0		=0		=0		=0													
1. station	639,39	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7	1,5	63,7
		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. station	639,39	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		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	0

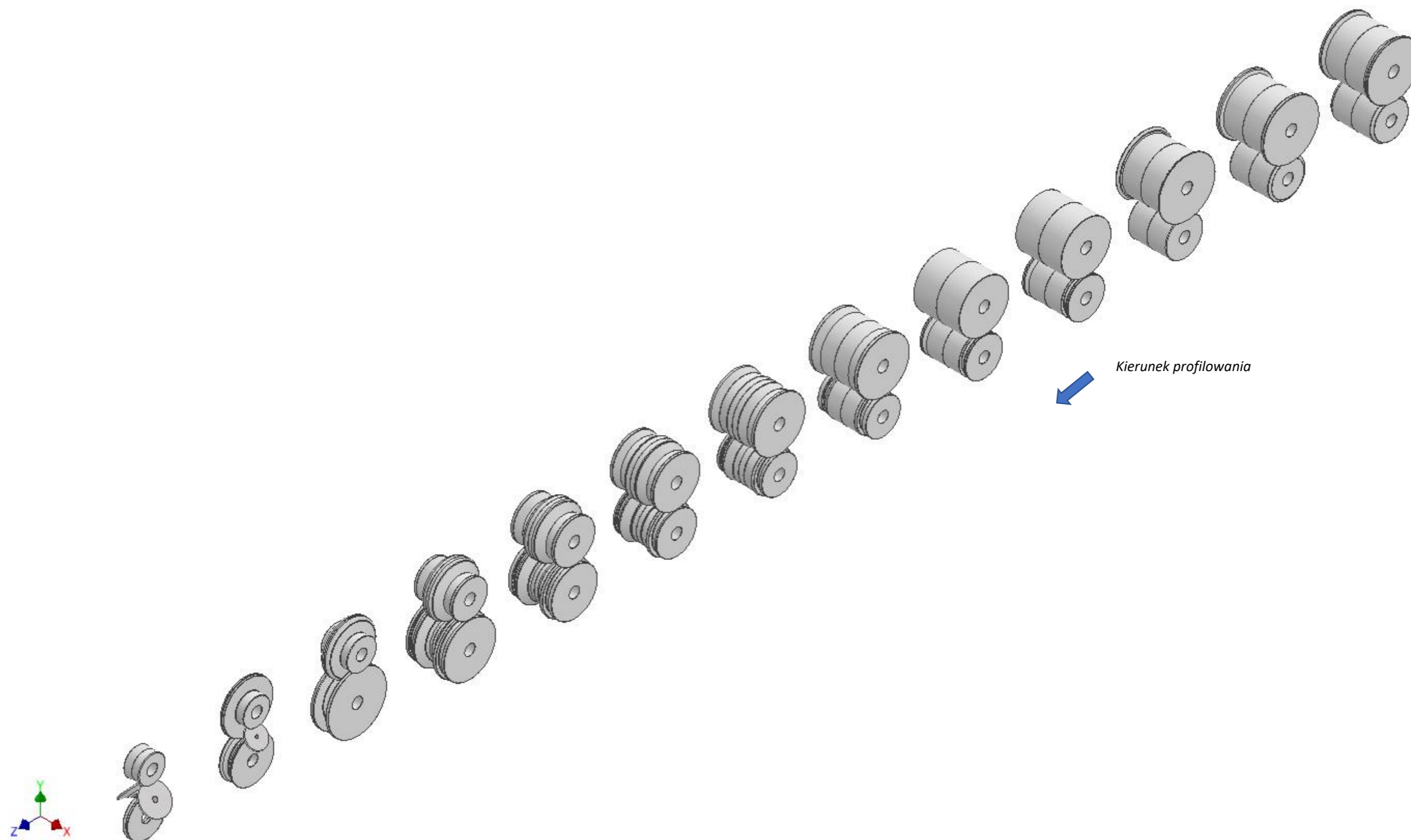
## WIDOK IZOMETRYCZNY ZESTAWU ROLEK PROFILUJĄCYCH – ELEKTRODA ZBIORCZA ZT24



## PROJEKT ROZWINIĘCIA PROFILU ELEKTRODY ZBIORCZEJ ZT24

Number of Entity	2. Entity		4. Entity		6. Entity		8. Entity		10. Entity		13. Entity		15. Entity		17. Entity		19. Entity		21. Entity			
Profile	Stripwidth	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	
	585,67	2,75	180	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	180	
			@ 0.0 (2.0)																		@ 0.0 (2.0)	
13. station	585,67	2,75	182	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	182.00	
			@ -22.0 (-2.0)																		@ -22.0 (-2.0)	
12. station	585,67	2,75	158	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	158	
			@ -21.0																		@ -21.0	
11. station	585,67	2,75	137	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	137	
			@ -17.0																		@ -17.0	
10. station	585,67	2,75	120	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	120	
			@ -17.0																		@ -17.0	
9. station	585,67	2,75	103	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	103	
			@ -18.0																		@ -18.0	
8. station	585,67	2,75	85	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	85	
7. station	585,67	2,75	85	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	85	
			@ -20.0																		@ -20.0	
6. station	585,67	2,75	65	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	65	
			@ -23.0																		@ -23.0	
5. station	585,67	2,75	42	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	42	
			@ -21.0																		@ -21.0	
4. station	585,67	2,75	21	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	2,75	21	
			= 0																		=0	
3. station	585,67	--	--	3	24	3	24	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	--	--	
					@ -8.0		@ -8.0		@ -8.0		@ -8.0		@ -8.0		@ -8.0		@ -8.0		@ -8.0			
2. station	585,67	--	--	3	16	3	16	3	13	3	13	3	13	3	13	3	13	3	13	--	--	
					@ -8.0		@ -8.0		@ -6.0		@ -6.0		@ -6.0		@ -6.0		@ -6.0		@ -6.0			
1. station	585,67	--	--	3	8	3	8	3	7	3	7	3	7	3	7	3	7	3	7	--	--	
					= 0		= 0		= 0		= 0		= 0		= 0		= 0		= 0			
0. station	585,67	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## WIDOK IZOMETRYCZNY ZESTAWU ROLEK PROFILUJĄCYCH – ELEKTRODA ZBIORCZA RYNNOWA



## PROJEKT ROZWINIĘCIA PROFILU ELEKTRODY ZBIORCZEJ RYNNOWEJ

Number of Entity	2. Entity		4. Entity		6. Entity		7. Entity		8. Entity		9. Entity		10. Entity		11. Entity		12. Entity		
Profile	Stripwidth	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle	Radius	Angle
	201.67	3	150.00	3	115	15	105	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====
							@ 0.0 (4.5)												0.00
13. station	201.67	3	150.00	3	115	14.37	12	14.37	15.00	14.37	18.49	14.37	18.00	14.37	19.99	14.37	18.00	14.37	8.00
					@ -15.0		@ 0.00 (-4.5)												= 0
12. station	201.67	3	150.00	3	100	23.25	7.5	14.37	15.00	14.37	18.49	14.37	18.00	14.37	19.99	14.37	18.00	--	--
					@ -15.0												= 0		
11. station	201.67	3	150.00	3	85	23.25	7.5	14.37	15.00	14.37	18.49	14.37	18.00	14.37	19.99	--	--	--	--
					@ -15.0										= 0				
10. station	201.67	3	150.00	3	70	23.25	7.5	14.37	15.00	14.37	18.49	14.37	18.00	--	--	--	--	--	--
					@ -15.0								= 0						
9. station	201.67	3	150.00	3	55	23.25	7.5	14.37	15.00	14.37	18.49	--	--	--	--	--	--	--	--
					@ -15.0						= 0								
8. station	201.67	3	150.00	3	40	23.25	7.5	14.37	15.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
					@ -15.0				= 0										
7. station	201.67	3	150.00	3	25	23.25	7.5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
					@ -15.0		= 0												
6. station	201.67	3	150.00	3	10	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
					= 0														
5. station	201.67	3	150.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
			@ -30.00																
4. station	201.67	3	120.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
			@ -30.00																
3. station	201.67	3	90.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
			@ -30.00																
2. station	201.67	3	60.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
			@ -30.00																
1. station	201.67	3	30.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
			= 0.00																
0. station	201.67	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00