



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

WPŁYW PROCESU PNEUMOKULKOWANIA NA NOŚNOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH ZE STOPU ALUMINIUM EN AW-2024-T3

mgr inż. Ewelina Ozga

Promotor:

dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRz

Promotor pomocniczy:

dr inż. Magdalena Bucior

Rzeszów 2023

Spis treści

Wykaz oznaczeń i skrótów	4
Wprowadzenie.....	6
1. Połączenia klejowe	8
1.1. Podstawowe pojęcia i mechanizmy konstituowania połączeń klejowych	8
1.2. Metody przygotowania powierzchni do klejenia	11
1.3. Wytrzymałość połączeń klejowych.....	16
1.4. Wpływ temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych.....	18
1.5. Wpływ cyklicznych zmian temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych..	21
1.6. Wybrane metody zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych	23
2. Nagniatanie dynamiczne	29
2.1. Klasyfikacja metod nagniatania	29
2.2. Charakterystyka procesu pneumokulkowania.....	32
2.3. Wpływ nagniatania dynamicznego na strukturę geometryczną powierzchni oraz właściwości fizyczne warstwy wierzchniej.....	35
2.4. Wpływ nagniatania dynamicznego na właściwości użytkowe obrabianych przedmiotów.....	38
2.5. Wpływ pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych	42
2.6. Metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu nagniatania dynamicznego .	49
3. Ocena stanu zagadnienia i wnioski.....	54
4. Temat, cel i program badań.....	57
5. Metodyka badań	61
5.1. Metodyka planu doświadczeń Hartleya	61
5.2. Charakterystyka materiałów	66
5.3. Proces klejenia.....	69
5.4. Proces pneumokulkowania.....	71
5.5. Kontrola intensywności procesu pneumokulkowania.....	74
5.6. Badanie struktury geometrycznej powierzchni	76
5.7. Badanie stanu naprężeń własnych.....	78
5.8. Badanie właściwości wytrzymałościowych	80
5.9. Badanie charakteru zniszczenia połączeń klejowych.....	81
5.10. Analiza MES połączeń klejowych	81

6. Wyniki badań i ich analiza.....	85
6.1. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych	85
6.2. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na intensywność obróbki.....	95
6.3. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na strukturę geometryczną powierzchni	100
6.4. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na stan naprężeń własnych	113
6.5. Wyniki analizy MES połączeń klejowych	116
Podsumowanie i wnioski	124
Literatura	128
Spis rysunków	142
Spis tabel.....	148
Streszczenie.....	151
Summary.....	152

Wykaz ważniejszych oznaczeń

R_t	– wytrzymałość na ścinanie
P_t	– nośność połączeń klejowych (siła styczna powodująca ścinanie)
σ_p	– naprężenia uplastyczniające
f_A	– strzałka ugięcia
K_O	– stopień pokrycia odciskami
PS/DS-P:Ha _k	– plan statyczny, zdeterminowany, sekwencyjny, poliselekcyjny, Hartleya dla k czynników wejściowych
PS/DK 2 ⁿ	– plan statyczny, zdeterminowany, kompletny, typu dwa do n -tej, gdzie n oznacza liczbę czynników wejściowych
x_k	– zakodowana wartość k -tego czynnika wejściowego
\hat{x}_k	– przyjmowana w doświadczeniu wartość k -tego czynnika wejściowego
\hat{x}_{k0}	– wartość centralna k -tego czynnika wejściowego
$\Delta\hat{x}_{k0}$	– jednostka zmienności k -tego czynnika wejściowego
N	– całkowita liczba doświadczeń w planie
r	– liczba pomiarów równoległych (powtórzeń)
y_{ui}	– wynik u -tego powtórzenia w i -tym doświadczeniu
\bar{y}_i	– średnia wyników pomiarów równoległych w i -tym doświadczeniu
b_0, \dots, b_k	– współczynniki regresji
b_{kk}, \dots, b_{kj}	– współczynniki regresji obrazujące skutki interakcji czynników wejściowych
t	– czas trwania procesu pneumokulkowania
d_k	– średnica kulek wykorzystanych w procesie pneumokulkowania
p	– ciśnienie sprężonego powietrza przyjęte w procesie pneumokulkowania
Rp	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości
Rv	– głębokość najniższego wgłębienia profilu chropowatości
Rc	– średnia wysokość elementów profilu chropowatości
Rt	– całkowita wysokość profilu chropowatości
Rz	– największa wysokość profilu chropowatości
Ra	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości
Rq	– średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości
Rsk	– współczynnik asymetrii profilu chropowatości
Rku	– współczynnik nachylenia profilu chropowatości

<i>Rdq</i>	– średni kwadratowy wznios profilu chropowatości
<i>RSm</i>	– średnia szerokość rowków elementów profilu chropowatości
<i>Rda</i>	– średnie arytmetyczne nachylenie na profilu chropowatości
<i>Sq</i>	– średnia kwadratowa wysokość powierzchni o ograniczonej skali
<i>Ssk</i>	– współczynnik asymetrii powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sku</i>	– współczynnik nachylenia powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sp</i>	– wysokość najwyższego wierzchołka powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sv</i>	– głębokość najgłębszego dołu powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sz</i>	– największa wysokość powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sa</i>	– średnia arytmetyczna wysokość powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sal</i>	– długość autokorelacji
<i>Str</i>	– współczynnik kształtu struktury geometrycznej powierzchni
<i>Sdq</i>	– średniokwadratowe nachylenie powierzchni o ograniczonej skali
<i>Sdr</i>	– współczynnik rozwinięcia obszaru powierzchni o ograniczonej skali
<i>Spd</i>	– gęstość wierzchołków
<i>Spc</i>	– średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołka
<i>S10z</i>	– dziesięciopunktowa wysokość powierzchni

Wprowadzenie

Technika łączenia elementów poprzez klejenie jest znana człowiekowi od dziesiątków tysięcy lat. Intensywny rozwój technologii klejenia zapoczątkowany w XVIII wieku n.e. sprawił, że klejenie znalazło szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu. Liczne zalety połączeń klejowych, takie jak wysoka wytrzymałość połączenia przy jednoczesnym ograniczeniu jego masy, możliwość łączenia elementów różniących się wymiarami i wykonanych z różnych materiałów, szczelność i brak konieczności naruszania struktury łączonych elementów, skłaniały i wciąż skłaniają liczne ośrodki badawcze do prowadzenia intensywnych prac badawczych w zakresie klejenia. Głównym celem prowadzonych prac jest poszukiwanie sposobów zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych, dzięki czemu możliwe jest poszerzanie ich potencjału aplikacyjnego. Szeroki potencjał aplikacyjny połączeń klejowych sprawia z kolei, że cieszą się one niesłabnącym zainteresowaniem konstruktorów, którzy znajdują dla nich coraz nowsze zastosowania.

Połączenia klejowe są zdolne do przenoszenia największych obciążeń wtedy, gdy są obciążone na ścinanie. Rozkład naprężeń w takich połączeniach nie jest równomierny. Naprężenia maksymalne są zlokalizowane na końcach zakładki. Zerwanie połączenia klejowego zaczyna się w punkcie, w którym naprężenia są największe. W związku z tym, chcąc zwiększyć wytrzymałość połączeń klejowych, należy dążyć do minimalizacji koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej. W tym celu można m.in. wprowadzać zmiany w geometrii zakładki. Zmiany te mogą polegać na zwężeniu końców zakładki, wykonaniu promienia w strefie przykrawędziowej, wykonaniu podcięcia wzdłuż krawędzi spoiny klejowej, czy wykonaniu otworów w końcowej części zakładki. Wspomniane modyfikacje w geometrii złącza zwiększają wytrzymałość połączeń klejowych, z drugiej jednak strony wiążą się z koniecznością wykonania dodatkowych operacji technologicznych, które wymagają zastosowania specjalistycznych urządzeń, prowadzą do wydłużenia cyklu produkcyjnego i wzrostu kosztów wytwarzania. Przeprowadzenie takich modyfikacji może być niekiedy problematyczne (np. w przypadku konieczności obróbki bardzo cienkich blach). Dodatkowo, obróbka taka prowadzi do powstania odpadów w postaci wiórów oraz może wymagać zastosowania cieczy chłodząco-smarujących.

Inną metodą, która również ma duży potencjał w zakresie umacniania połączeń klejowych zakładkowych, jest pneumokulkowanie strefy zakładki połączenia.

Pneumokulkowanie jest jedną z odmian nagniatania dynamicznego rozproszonego. Do zalet pneumokulkowania należą m.in. prostota, łatwość sterowania intensywnością obróbki i jej niskie koszty. Dostępne są wyniki badań, w których udowodniono, że pneumokulkowanie strefy zakładki może być z powodzeniem stosowane do umacniania połączeń klejowych wykonanych ze stali S235JR i stopu tytanu Ti6Al4V. Niemniej jednak, badania te są fragmentaryczne i ograniczone tylko do wspomnianych dwóch rodzajów stopów. W związku z tym uznano, że potencjalna możliwość umocnienia połączeń klejowych innych stopów z wykorzystaniem pneumokulkowania stanowi problem interesujący i aktualny. Zdecydowano się podjąć badania nad wpływem procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Stop ten jest stosowany między innymi w lotnictwie, które uważa się za pioniera technologii klejenia.

1. Połączenia klejowe

1.1. Podstawowe pojęcia i mechanizmy konstituowania połączeń klejowych

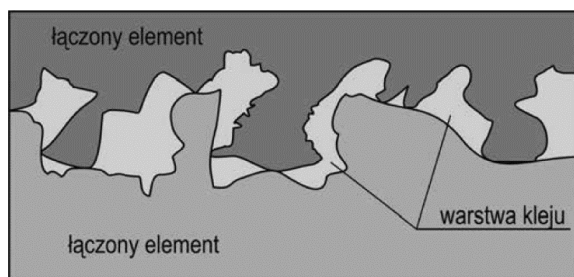
Klej, spoina klejowa oraz połączenie klejowe to podstawowe pojęcia, związane z technologią klejenia. Zgodnie z definicjami zamieszczonymi w normie [87], klejem nazywa się substancję niemetaliczną, która umożliwia łączenie materiałów poprzez połączenie ich powierzchni (adhezja), zapewniając jednocześnie odpowiednią wytrzymałość wewnętrzną spoiny klejowej (kohezja). Spoina klejowa to warstwa kleju między materiałami połączonymi w procesie klejenia. Połączeniem klejowym nazywa się połączenie elementów uzyskane z użyciem kleju.

Adhezja i kohezja są zjawiskami, które warunkują powstanie złącza klejowego. Kohezja przejawia się w zdolności materiału do przeciwstawiania się zmianom stanu obciążenia, a jej źródłem są oddziaływania pomiędzy atomami lub cząsteczkami materiału. Kohezja odpowiada za spójność wewnętrzną materiału [104, 121]. Dzięki zjawisku kohezji możliwe jest osiągnięcie określonej wytrzymałości mechanicznej przez spoinę klejową [41].

Mocne związanie spoiny z powierzchnią klejonego materiału możliwe jest dzięki adhezji [41]. Adhezja jest to zjawisko powierzchniowe, przejawiające się w szczepianiu stykających się ciał, którego źródłem jest oddziaływanie pola sił pomiędzy tymi ciałami [112]. Zgodnie z inną definicją, adhezja oznacza silne i trwałe łączenie spoiny klejowej z elementem klejonym, zachodzące na skutek adsorpcji, dyfuzji, zjawisk elektrostatycznych lub mechanicznego „zakotwiczenia” się kleju w mikronierównościach powierzchni klejonej [41].

Zjawisko adhezji wyjaśniane jest przez wiele teorii. Do podstawowych z nich należą: teoria mechaniczna, adsorpcyjna, dyfuzyjna i elektrostatyczna [41, 56, 80, 104, 112].

Teoria mechaniczna jest jedną z pierwszych teorii adhezji. Została ona opublikowana w 1926 r. przez D. G. Hopkinsa i J. W. Baina. Zakłada ona, że warunkiem powstania połączenia adhezyjnego jest wnikięcie kleju w mikropory powierzchni łączonych elementów i utworzenie tzw. zakotwień mechanicznych umożliwiających przenoszenie obciążeń [56, 112]. Schemat obrazujący mechaniczną teorię adhezji przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Schemat obrazujący mechaniczną teorię adhezji [104]

Zgodnie z teorią mechaniczną, kluczowe znaczenie dla wytrzymałości złączy klejowych ma charakter nierówności, porowatości i defektów znajdujących się na powierzchni łączonych elementów. Odpowiednie kształtowanie chropowatości powierzchni może spowodować jej rozwinięcie i doprowadzić do zwiększenia obszaru kontaktu pomiędzy klejem a łączonym elementem, a przez to do zwiększenia siły wiązań. Jednak z drugiej strony, liczne wąskie porowatości utrudniają wnikanie kleju i w efekcie mogą prowadzić do powstania pustych przestrzeni na granicy faz. Przestrzenie te mogą stanowić punkty koncentracji naprężeń, które znacznie osłabiają wytrzymałość złączy. W związku z tym, istotne jest zapewnienie odpowiedniej penetracji kleju, która zależy m.in. od jego lepkości, a także od ciśnienia, temperatury, czasu wnikania oraz głębokości i kształtu nierówności powierzchni [41, 104].

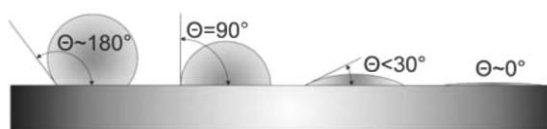
Teoria elektrostatyczna została wysunięta pod koniec lat czterdziestych XX wieku przez B. W. Dieriągina. Podstawą tej teorii jest twierdzenie, że do pewnego stopnia wolne ładunki istnieją w każdym skondensowanym materiale (nawet w najlepszym dielektryku). W związku z tym, na granicy faz pomiędzy dwoma stykającymi się materiałami zawsze istnieje określona różnica potencjałów. Różnica ta powoduje przepływ strumienia elektronów. Na skutek przepływu elektronów, dochodzi do utworzenia podwójnej warstwy elektrycznej, która powoduje efekt przyciągania [80, 112]. Wartość siły przyciągania, przypadająca na jednostkę powierzchni powstałego w ten sposób złącza, zależy przede wszystkim od gęstości ładunku powierzchniowego obecnego w obu częściach utworzonej warstwy elektrycznej [104, 112]. Obecnie uważa się, że mimo iż teoria ta dobrze tłumaczy niektóre aspekty zjawiska adhezji, to nie można przypisać jej znaczenia podstawowego w procesie tworzenia złączy klejowych [41, 104].

Teoria dyfuzyjna została rozwinięta przez badaczy rosyjskich na początku lat sześćdziesiątych XX wieku. Zgodnie z tą teorią, cząsteczki kleju przenikają przez granice faz do klejonego materiału, łącząc go w ten sposób ze spoiną klejową [41]. Dyfuzja następuje na skutek różnicy potencjałów termodynamicznych cząstek

znajdujących się w przylegających do siebie materiałach. Dyfuzyjne połączenia adhezyjne charakteryzują się nieskokową zmianą właściwości fizycznych na granicy faz i ograniczonymi naprężeniami własnymi w strefie międzyfazowej. Niewiele materiałów wykazuje jednak zdolność do tworzenia połączeń tego typu [104, 112]. Teoria dyfuzyjna odgrywa ważną rolę w przypadku połączeń adhezyjnych tworzyw sztucznych, gumy oraz skóry. W przypadku klejenia metali, obecność procesów dyfuzyjnych w dużej mierze zależy od struktury mikrowarstwy tlenków znajdującej się na powierzchni metalu [41].

Teorię adsorpcyjną sformułowali L.H Sharpe i H. Schornhorn w 1963 r. Teoria ta zakłada, że źródłem adhezji jest różnica między stanem energetycznym cząsteczek znajdujących się na powierzchni ciał stałych lub cieczy oraz cząsteczek występujących w głębi tych faz. Wspomniana różnica między stanem energetycznym sprawia, że cząsteczki kleju i klejonego materiału, znajdujące się na granicy faz, oddziałują na siebie. Jeżeli oddziaływania te mają charakter polarny, wówczas na granicy faz następuje orientacja cząsteczek. W efekcie dochodzi do adsorpcji fizycznej, a w niektórych przypadkach również do chemisorpcji cząsteczek kleju na powierzchni łączzonego materiału. Najważniejszą rolę w teorii adsorpcyjnej odgrywają siły van der Waalsa. Zwraca się również uwagę na oddziaływania dyspersyjne, polarne oraz wiązania wodorowe [41, 104, 112]. Słuszność teorii adsorpcyjnej potwierdza znaczne zmniejszanie się wytrzymałości złączy klejowych na skutek oddziaływania wody lub wilgoci. Pod wpływem wody może dochodzić do wymiany kleju na granicy faz i tworzenia tzw. słabej warstewki granicznej, przyczyniającej się do rozwarstwienia połączenia [41].

Adsorpcyjna teoria adhezji jest bezpośrednio związana z kwestią zwilżalności powierzchni przez klej [41]. Zwilżalność zależy od właściwości powierzchni klejonej oraz od rodzaju kleju. Jej miarą jest tzw. kąt zwilżania θ , tworzący się pomiędzy styczną do krzywizny menisku zwilżającej cieczy a powierzchnią zwilżanego ciała stałego. Przykłady różnych kątów zwilżania przedstawiono na rysunku 1.2.



Rys. 1.2. Przykłady kątów zwilżania: $\theta \sim 180^\circ$ brak zwilżalności, $\theta \sim 90^\circ$ zwilżalność niezadowalająca, $\theta \sim 30^\circ$ zwilżalność dobra, $\theta \sim 0^\circ$ zwilżalność bardzo dobra [63]

Wartość kąta θ mniejsza od 90° oznacza dobrą zwilżalność powierzchni przez klej. W przypadku kąta θ wynoszącego 0° ciecz rozplywa się po powierzchni, co świadczy o pełnym zwilżeniu powierzchni. Kąt θ równy 180° świadczy natomiast o absolutnej niezwilżalności [107]. Kąt zwilżania jest jednym ze wskaźników umożliwiających ocenę właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej klejonych części [63, 104].

Uważa się, że adsorpcyjna teoria adhezji najlepiej wyjaśnia charakter rzeczywistych zjawisk zachodzących na granicy międzyfazowej kleju i klejonego materiału. Niemniej jednak zjawiska związane z dyfuzją, oddziaływaniem elektrostatycznym oraz zakotwiczeniem mechanicznym kleju w mikronierównościach powierzchni łączonego materiału, również pomagają w lepszym zrozumieniu i opisanu mechanizmu powstawania połączeń klejowych [41].

1.2. Metody przygotowania powierzchni do klejenia

Proces klejenia składa się z kilku operacji, które powinny być wykonywane w ściśle określonej kolejności. Do operacji tych zalicza się: przygotowanie powierzchni łączonych elementów, przygotowanie masy klejowej, nakładanie kleju na łączone powierzchnie, ustawianie łączonych elementów, utwardzanie spoiny klejowej, obróbkę wykańczającą połączeń oraz kontrolę połączeń klejowych [66,106].

Jedną z najważniejszych operacji w procesie technologicznym klejenia jest odpowiednie przygotowanie powierzchni łączonych elementów. Operacja ta w dużej mierze decyduje o właściwościach złącza klejowego [66]. Dzięki przygotowaniu powierzchni do klejenia możliwe jest aktywowanie niezbędnych mechanizmów wiążących (fizycznych, chemicznych oraz mechanicznych) [41]. Prawidłowe przygotowanie powierzchni powinno zagwarantować:

- usunięcie z powierzchni klejonych elementów wszelkich zanieczyszczeń (tłuszczów, smarów, pyłów, luźno związanych warstw korozyjnych, mikroorganizmów itd.),
- uzyskanie odpowiedniego rozwinięcia geometrycznego powierzchni,
- uzyskanie prawidłowego uaktywnienia powierzchni,
- zapewnienie dobrej zwilżalności powierzchni [41, 105, 106].

Wyróżnia się wiele metod przygotowania powierzchni do klejenia. Najogólniej dzieli się je na trzy grupy:

- metody wstępnego przygotowania powierzchni,
- metody podstawowej (właściwej) obróbki powierzchni,

– metody dodatkowej obróbki powierzchni [107].

Do metod wstępnego przygotowania powierzchni zalicza się m.in. oczyszczanie mechaniczne, odtłuszczenie, obróbkę krawędzi oraz płukanie.

Oczyszczanie mechaniczne przeprowadza się w celu usunięcia zanieczyszczeń w postaci luźno związanych produktów korozji. Może być ono realizowane np. za pomocą młotkowania [107].

Odtłuszczenie (zwane inaczej oczyszczaniem chemicznym) stosuje się w celu usunięcia z powierzchni łączonych elementów zanieczyszczeń w postaci tłuszczów. Najczęściej stosowanymi środkami odtłuszczającymi są: aceton, etanol, benzen, benzyna, toluen, keton metyloewtylowy, trichloroetylen oraz tetrachloroetylen. Odtłuszczenie może być realizowane w myjkach komorowych, myjkach wannowych ultradźwiękowych oraz elektrolitycznych lub z wykorzystaniem tkanin nasączonych rozpuszczalnikami [41, 104]. Rodzaj zastosowanego środka odtłuszczającego i sposób jego aplikacji mają istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych [113].

Obróbka krawędzi polega na stępianiu ostrych krawędzi, usuwaniu zadziorów oraz usuwaniu nierówności powierzchni. Jest ona zwykle przeprowadzana z wykorzystaniem narzędzi ręcznych (np. pilników) lub za pomocą obróbki mechanicznej (frezowania, szlifowania) [107].

Do drugiej grupy metod obróbki powierzchni klejonej należą tzw. metody podstawowe, wśród których wymienia się: obróbkę mechaniczną, chemiczną, elektrochemiczną, utlenianie za pomocą ozonu, obróbkę laserową, plazmową, płomieniową, wyładowań koronowych oraz obróbkę z wykorzystaniem promieniowania elektromagnetycznego [107].

Głównym celem obróbki mechanicznej jest zapewnienie odpowiedniego rozwinięcia powierzchni klejonej [104, 107]. Do metod obróbki mechanicznej powierzchni klejonej zalicza się m.in. obróbkę strumieniowo-ścierną (piaskowanie), kulkowanie, obróbkę narzędziami ściernymi nasypowymi, szlifowanie, docieranie oraz szczotkowanie [32, 57, 103, 105, 108, 109]. Istnieje wiele prac badawczych, poruszających problem mechanicznej obróbki powierzchni klejonej. W pracy [109] porównano różne sposoby obróbki powierzchni, takie jak odtłuszczenie, piaskowanie, szlifowanie, trawienie, anodowanie i chromianowanie na wytrzymałość połączeń klejowych lotniczego stopu aluminium 2024. Wykazano, że dla przyjętego w badaniach zakresu zmienności parametrów wejściowych, największą wytrzymałość uzyskano

w przypadku połączeń, których powierzchnie klejone poddano chromianowaniu lub piaskowaniu. W pracy [110] zbadano wpływ wybranych parametrów technologicznych piaskowania na wytrzymałość złączy klejowych. Autorzy pracy wykazali, że rodzaj ścierniwa (stopień granulacji) ma większy wpływ na właściwości adhezyjne i wytrzymałościowe niż zastosowane ciśnienie. W pracy [14] zbadano wpływ prędkości posuwu podczas frezowania na nośność jednozakładkowych połączeń klejowych stopu aluminium 2024. Wykazano, że najwyższą nośność posiadały połączenia, których powierzchnie klejone były frezowane z największą prędkością wynoszącą 90 mm/min. Zgodnie z wynikami zamieszczonymi w pracy [147], połączenia klejowe ze stopu aluminium 2024-T3, których powierzchnie poddane były frezowaniu i obróbce strumieniowo-ścierniej, mają większą nośność niż złącza, których powierzchnie były tylko frezowane. Pozytywny wpływ piaskowania na wytrzymałość złączy klejowych zaobserwowano również w pracy [32], gdzie wzrost wytrzymałości połączenia dla próbek poddanych piaskowaniu wynosił 151%. W pracy [105] zbadano wpływ trzech metod mechanicznej obróbki powierzchni: szlifowania, docierania oraz dogładzania, na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych z blach stalowych. W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano wzrost wytrzymałości połączeń, których powierzchnie były obrabiane metodami mechanicznymi, w porównaniu do złączy, których powierzchnie poddano wyłącznie odłuszczeniu. Co więcej, stwierdzono, że największą wytrzymałością cechowały się złącza, których powierzchnie poddano docieraniu, natomiast najniższą wytrzymałość uzyskano w przypadku dogładzania. W pracy [143] dowiedziono, że istotny wpływ na nośność połączeń klejowych może mieć kierunkowość struktury geometrycznej uzyskanej w wyniku szlifowania. Wykazano, że w przypadku połączeń ze stopu aluminium 2024-T3 najkorzystniejsze było szlifowanie powierzchni klejonych prostopadle do kierunku działania siły obciążającej złącze. W przypadku połączeń wykonanych ze stali S235JR najwyższą nośność uzyskano, gdy powierzchnie były szlifowane pod kątem 45° do kierunku działania siły obciążającej i sklejone w taki sposób, aby tekstura się krzyżowała.

Metody chemiczne, takie jak trawienie w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej, stosowane są w celu usunięcia zanieczyszczeń silnie związanych z powierzchnią klejoną. Metody te umożliwiają również utworzenie na obrabianej powierzchni powłoki o określonych właściwościach. Dzięki metodom chemicznym możliwe jest aktywowanie właściwości fizykochemicznych powierzchni oraz rozwinięcie jej struktury geometrycznej [41, 69, 104].

Metody elektrochemiczne obejmują trawienie elektrochemiczne, które zachodzi w wyniku oddziaływania prądu elektrycznego, a także metody elektrochemicznego wytwarzania powłok konwersyjnych, takie jak anodowanie, fosforanowanie i chromianowanie [107]. W przypadku stopów aluminium, jedną z częściej stosowanych metod obróbki elektrochemicznej jest anodowe utlenianie [112]. Poprzez anodowanie powierzchni klejonej można zwiększać trwałość połączenia w wilgotnym środowisku [80].

Ozonowanie uważane jest za jedną z proekologicznych metod przygotowania powierzchni do klejenia. Metoda ta charakteryzuje się prostotą, niskimi kosztami oraz brakiem odpadów. Silne właściwości utleniające i rodnikotwórcze ozonu sprawiają, że dzięki ozonowaniu dochodzi do zwiększenia wartości swobodnej energii powierzchniowej, a w efekcie, do zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych m.in. ze stopu aluminium [52-54].

Metoda laserowa, umożliwia tworzenie na powierzchni przeznaczonej do klejenia precyzyjnych i skomplikowanych struktur geometrycznych za pomocą skupionej wiązki wytwarzanej przez laser. Metoda ta może być stosowana dla szerokiej gamy materiałów, jest łatwa do zautomatyzowania i przyjazna dla środowiska (brak konieczności stosowania niebezpiecznych chemikaliów) [32, 74, 124]. Autorzy pracy [74] udowodnili, że w wyniku obróbki laserowej stopu aluminium 2024-T3, na modyfikowanej powierzchni wzrasta liczba silnie aktywnych chemicznie tlenków glinu oraz dochodzi do zwiększenia zwilżalności powierzchni.

Obróbka metodą plazmową polega na wystawieniu warstwy wierzchniej modyfikowanego materiału na działanie plazmy. Zmiany zachodzące w strukturze modyfikowanej powierzchni zależą od składu zastosowanego gazu. W wyniku obróbki metodą plazmową, dochodzi do trawienia i oczyszczania powierzchni klejonej, następuje sieciowanie cząsteczek w warstwie wierzchniej oraz tworzenie nowych struktur chemicznych [21].

W przypadku metody płomieniowej, powierzchnia klejona, modyfikowana jest poprzez poddanie jej oddziaływaniu płomienia gazowego, powstałego na skutek spalania gazu w powietrzu. Zastosowanie obróbki płomieniowej umożliwia wprowadzenie zmian w strukturze molekularnej obrabianej powierzchni, a w efekcie uaktywnienie powierzchni i zwiększenie jej zwilżalności [107].

Metoda wyładowań koronowych, podobnie jak metoda płomieniowa, stosowana jest przede wszystkim w przypadku materiałów polimerowych. Jej celem jest aktywowanie powierzchni klejonej [107].

Metody wykorzystujące oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego różnią się m.in. zakresem długości fal elektromagnetycznych oraz rodzajem źródła emitującego fale. Metody te mogą wykorzystywać promieniowanie laserowe, elektronowe, jonizacyjne, nadfioletowe UV oraz promieniowanie γ . Znajdują one zastosowanie głównie do obróbki tworzyw polimerowych [107].

Ostatnia grupa metod przygotowania powierzchni do klejenia, czyli tzw. dodatkowa obróbka powierzchni, obejmuje płukanie, suszenie oraz nakładanie gruntu [107].

Płukanie wykonywane jest najczęściej po operacji trawienia w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej, a także po obróbce specjalnej (chemicznej lub mechanicznej). Celem płukania jest usunięcie pozostałości środków chemicznych oraz substancji tłuszczowych (smarów, olejów itp.) zgromadzonych na powierzchni przeznaczonej do klejenia. Może być ono realizowane z wykorzystaniem wody lub rozpuszczalników stosowanych do odtłuszczenia [41].

Suszenie przeprowadzane jest w celu usunięcia wody z powierzchni poddanej wcześniej płukaniu. Do najczęściej stosowanych metod suszenia zalicza się suszenie atmosferyczne, sprężonym powietrzem, gorącym powietrzem, absorpcyjne, próżniowe oraz suszenie organicznymi preparatami odwadniającymi [41, 107].

Nakładanie gruntów (promotorów adhezji, aktywatorów, primerów) przeprowadza się, jako ostatnią operację przygotowania powierzchni do klejenia. Dzięki stosowaniu aktywatorów, możliwe jest zwiększenie wytrzymałości adhezyjnej złącza klejowego oraz tempa sieciowania masy klejowej [41]. Autorzy pracy [69], porównali wpływ gruntowania przy użyciu aktywatora na bazie epoksydu, odtłuszczenia z wykorzystaniem trichloroetylenu oraz wytrawiania FPL (Forest Products Laboratory) na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych ze stopu aluminium. Wyniki badań wykazały, że wytrawianie metodą FPL zapewniło dobrą zwilżalność podłoża, najwyższą energię powierzchniową i chropowatość powierzchni, a przy tym największą wytrzymałość połączenia na ścinanie. Porównywalny efekt uzyskano w przypadku gruntowania powierzchni klejonej. Najniższą wytrzymałość zaobserwowano natomiast w przypadku złączy, których powierzchnie były wyłącznie odtłuszczone.

Podsumowując, stosuje się wiele metod obróbki powierzchni klejonej. Jedną z najpopularniejszych i najefektywniejszych metod jest obróbka strumieniowo-ścierna.

Niemiej jednak wybór odpowiedniej metody powinien być uzależniony m.in. od rodzaju kleju oraz klejonego materiału [21, 66, 104].

1.3. Wytrzymałość połączeń klejowych

Wytrzymałość, jest to zdolność do przenoszenia obciążeń. Wytrzymałość połączenia klejowego można rozumieć, jako odporność złącza na oddziaływanie różnego rodzaju obciążeń, które mogą być powodowane m.in. przez czynniki mechaniczne lub cieplno-mechaniczne [112].

W przypadku połączeń klejowych, najczęściej rozpatruje się ich wytrzymałość statyczną (doraźną, krótkotrwałą). Mogą one być analizowane również w aspekcie wytrzymałości długotrwałej (czasowej), zmęczeniowej oraz dynamicznej [104].

Wytrzymałość doraźna połączenia klejowego określana jest dla obciążeń oddziałujących na złącze w przyjętym okresie czasu (zwykle od kilku do kilkudziesięciu sekund). Wyznaczenie wytrzymałości doraźnej połączenia pozwala na określenie rodzaju oraz wartości obciążeń, w których złącze może być eksploatowane [104, 111, 151].

Wytrzymałość długotrwała oznacza czas, podczas którego złącze skutecznie przenosi obciążenie statyczne o określonej wartości [41]. Ze względu na właściwości lepkosprężyste klejów, złącza klejowe charakteryzują się ograniczoną statyczną trwałością czasową. Oznacza to, że poddanie złącza stałemu obciążeniu w ustalonej temperaturze spowoduje jego zniszczenie pod wpływem obciążenia znacznie niższego od obciążenia określonego w próbie badania wytrzymałości doraźnej [39, 40, 99, 100, 102].

Wytrzymałość zmęczeniowa rozpatrywana jest w przypadku, gdy na połączenie oddziałują naprężenia zmienne. Może być ona charakteryzowana za pomocą tzw. nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej i trwałości zmęczeniowej. Wytrzymałość zmęczeniowa wyznaczana jest, jako największe naprężenie cykliczne, przy którym złącze nie ulegnie zniszczeniu w ciągu założonej liczby cykli (równiej podstawie próby zmęczeniowej). Trwałość zmęczeniowa określana jest natomiast poprzez liczbę cykli jednakowych naprężeń, którą przeniesie połączenie do momentu zniszczenia [34, 41, 134]. Wytrzymałość zmęczeniowa połączeń jest niższa od ich wytrzymałości doraźnej [34, 36-38].

Wytrzymałość dynamiczna dotyczy połączeń klejowych obciążonych udarowo. Połączenia klejowe, które mogą być narażone na tego typu obciążenia stosowane są

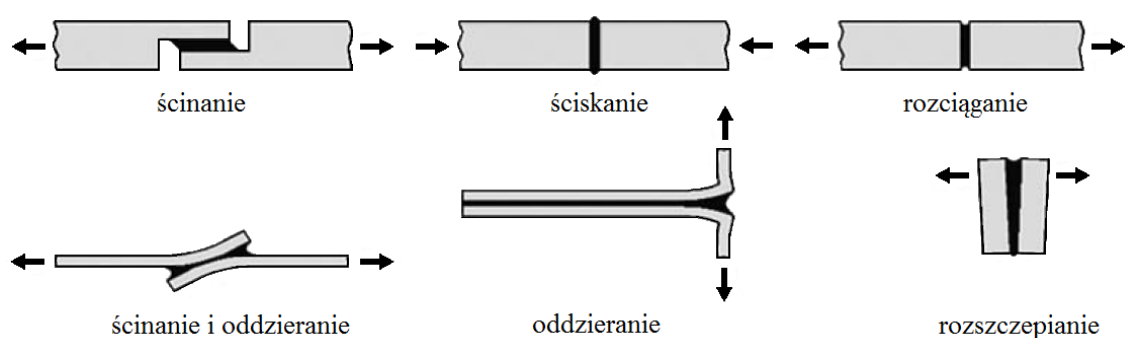
między innymi w elementach konstrukcyjnych samochodów (panelach drzwiowych, maskach, itd.). Elementy te narażone są na silne obciążenia dynamiczne podczas kolizji lub wypadków [58]. Do znormalizowanych metod wyznaczania udarności połączeń klejowych zalicza się metodę udarowego ścinania próbek blokowych wykorzystującą młot wahadłowy [86] oraz metodę rozszczepiania klinem [88]. Sposób i urządzenie służące do wyznaczania udarności połączeń klejowych zakładkowych zaproponowano m.in. w pracach [23, 58, 114]

Połączenia klejowe są zdolne do przenoszenia największych obciążeń wówczas, gdy w ich spoinach dominującą rolę odgrywają naprężenia normalne ujemne albo styczne. Jeżeli główną rolę w przenoszeniu obciążeń odgrywają naprężenia styczne, wówczas połączenia takie nazywa się połączeniami obciążonymi na ścinanie [33]. Wytrzymałość na ścinanie można obliczyć ze wzoru (1.1) [112]:

$$R_t = \frac{P_t}{A_0}, \quad (1.1)$$

gdzie: R_t – wytrzymałość na ścinanie, P_t – siła styczna (powodująca ścinanie), A_0 – pole powierzchni ścinanych przekrojów.

Oprócz obciążeń ścinających, na złącza klejowe mogą działać również obciążenia rozciągające, ściskające, oddzierające oraz rozszczepiające. Na rys. 1.3. przedstawiono wymienione rodzaje obciążeń [82].



Rys. 1.3. Przykłady obciążenia spoin w połączeniach klejowych [82]

Najczęściej stosowaną metodą badania wytrzymałości połączeń klejowych jest analiza wytrzymałości połączeń zakładkowych obciążonych na ścinanie przy rozciąganiu [119]. Metodyka tych badań została opisana w normie PN-EN 1465:2009 [84]. Badanie wytrzymałości złącza klejowego zgodnie z normą PN-EN 1465:2009 polega na przeprowadzeniu próby jednoosiowego rozciągania. W wyniku przeprowadzenia próby uzyskuje się wartość siły rozciągającej, przy której nastąpiło

zerwanie połączenia klejowego. Dzieląc uzyskaną wartość siły niszczącej przez pole powierzchni ścinanych przekrojów wyznacza się wytrzymałość połączenia klejowego obciążonego na ścinanie przy rozciąganiu [84].

1.4. Wpływ temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych

Połączenia klejowe mogą być narażone nie tylko na obciążenia mechaniczne, ale również na obciążenia cieplne. Wpływ temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych związany jest przede wszystkim z właściwościami termicznymi klejów [41]. Głównymi składnikami klejów są polimery. W związku z tym, właściwości termiczne polimerów w dużej mierze decydują o zachowaniu się kleju w podwyższonej, obniżonej lub zmiennej temperaturze [24].

Znaczne pogorszenie wytrzymałości połączeń klejowych poddanych oddziaływaniu podwyższonej temperatury, stanowi jedno z największych ograniczeń w stosowaniu technologii klejenia [78]. Pod wpływem wzrostu temperatury dochodzi do zmniejszenia wytrzymałości doraźnej tworzyw syntetycznych. Zjawisko to, przekłada się na zmniejszenie wytrzymałości kohezyjnej spoin klejowych [41, 104]. Ponadto, wzrost temperatury może przyczynić się do zmniejszenia wartości sił adhezji. Przyczyną spadku sił adhezji może być osłabienie sił van der Waalsa, które w podwyższonej temperaturze prawie zanikają [41].

Temperatura ma również wpływ na wartość modułu sprężystości podłużnej. Moduł sprężystości podłużnej klejów, podobnie jak większości tworzyw syntetycznych, zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. W pewnym zakresie temperatur spadek ten jest w przybliżeniu liniowy. Po przekroczeniu tzw. temperatury zeszklenia, charakterystycznej dla danego tworzywa, zależność ta przestaje być liniowa. Prędkość spadku wartości modułu sprężystości podłużnej wraz ze zwiększaniem temperatury ulega wówczas zwiększeniu [41].

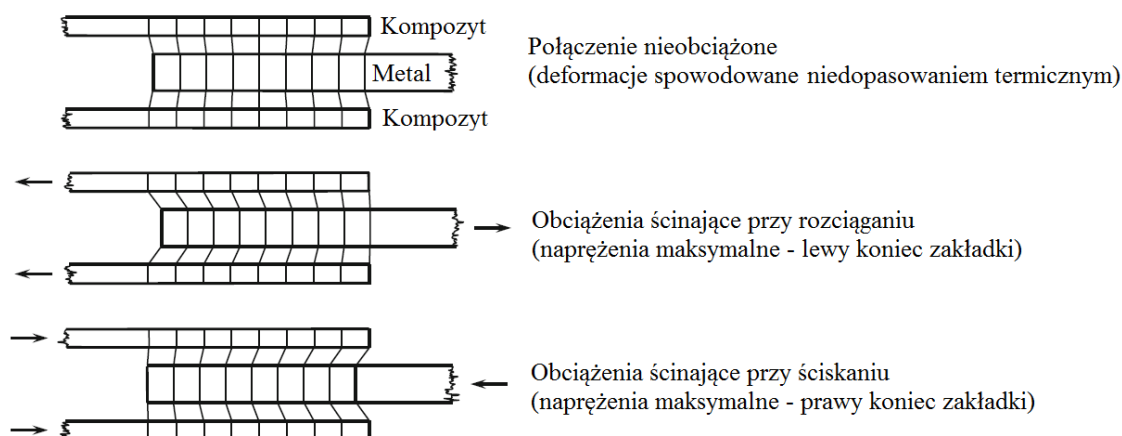
W przypadku połączeń klejowych, dla których wartość modułu sprężystości podłużnej kleju nie ma wpływu na wytrzymałość połączenia (połączenia obciążone na odrywanie), wraz ze wzrostem temperatury następuje spadek wytrzymałości złącza. Jeżeli natomiast wytrzymałość połączeń zależy zarówno od wartości naprężeń niszczących spoiny klejowej, jak i od wartości modułu sprężystości podłużnej kleju (połączenia obciążone na oddzieranie i ścinanie), istnieje pewna optymalna temperatura, w której wytrzymałość złączy jest największa [41].

W pracy [13] przeanalizowano wytrzymałość na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych stopu aluminium, wykonanych z wykorzystaniem kleju epoksydowego XN1244. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej oraz w temperaturach 100°C, 125°C, 150°C, 175°C i 200°C. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury następowało zmniejszenie wartości naprężenia rozciągającego i jednocześnie zwiększenie wytrzymałości połączenia, aż do osiągnięcia tzw. temperatury zeszklenia. Po jej przekroczeniu, wytrzymałość połączenia malała. Według autorów badań, przyczyną wzrostu wytrzymałości połączenia w temperaturze 100°C i 125°C było zwiększenie ciągliwości kleju. Podobne badania i wnioski przedstawiono w pracy [12]. Zmniejszenie sztywności połączeń w podwyższonej temperaturze (80°C) i towarzyszący temu wzrost wytrzymałości połączeń adhezyjnych zaobserwowano także w pracy [64].

Długotrwałe oddziaływanie podwyższonej temperatury na tworzywa polimerowe, a co za tym idzie, na spoiny klejowe, może doprowadzić do tzw. degradacji cieplnej. Degradacja polimeru polega na rozpadzie makrocząsteczek na mniejsze fragmenty. W niektórych przypadkach czynnik degradujący w postaci ciepła może w pierwszej fazie degradacji przyczynić się do poprawy pewnych właściwości kleju, na przykład jego wytrzymałości mechanicznej. Spowodowane jest to dodatkowym usieciowaniem struktury materiału. W późniejszej fazie procesu dochodzi jednak do nadmiernego usieciowania struktury lub do zmniejszenia masy cząsteczkowej, co prowadzi do pogorszenia właściwości wytrzymałościowych. Zmiany zachodzące w polimerze pod wpływem procesu degradacji najczęściej są nieodwracalne [98]. Efekt zwiększenia wytrzymałości mechanicznej tworzywa w pierwszej fazie degradacji cieplnej wykorzystuje się do poprawy właściwości wytrzymałościowych połączeń klejowych. Udowodniono, że dogrzewanie (dotwardzanie cieplne) połączeń klejowych na etapie ich utwardzania może powodować wzrost wytrzymałości statycznej zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturze podwyższonej [126]. Zgodnie z wynikami badań zamieszczonymi w pracy [149], wzrost wytrzymałości połączeń klejowych niepoddanych dodatkowej obróbce cieplnej można uzyskać również poprzez sezonowanie próbek w warunkach naturalnych. Niemniej jednak autorzy badań dodają, że sezonowanie próbek poddanych wcześniej dodatkowej obróbce cieplnej przyczynia się z kolei do zmniejszenia ich nośności.

Kolejną kwestią, istotną podczas omawiania wpływu temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych, są wartości liniowych współczynników rozszerzalności cieplnej

klejów i klejonych materiałów. Współczynniki te mogą się znacznie od siebie różnić. W efekcie, poddanie złącza klejowego oddziaływaniu zmiennej temperatury lub utwardzanie złącza w temperaturze innej niż temperatura normalnej eksploatacji może doprowadzić do ukonstytuowania w spoinie klejowej niekorzystnego (zazwyczaj) stanu naprężeń [24]. Przykładem połączenia charakteryzującego się niedopasowaniem termicznym klejonych elementów, może być złącze tytanowo kompozytowe utwardzone w podwyższonej temperaturze (rys. 1.4).



Rys. 1.4. Schemat połączenia tytanowo-kompozytowego przedstawiający zjawisko niedopasowania termicznego [44]

Jeżeli połączenie takie poddane jest obciążeniom mechanicznym na ścinanie, wówczas naprężenia i odkształcenia mają taki sam znak po obu stronach zakładki. Naprężenia spowodowane obciążeniem cieplnym mają natomiast przeciwne znaki. Połączenie będzie się więc charakteryzowało istnieniem naprężeń maksymalnych po jednej ze stron zakładki (zależnej od kierunku działania siły ścinającej) [44, 68, 126].

Poszukuje się różnych metod zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych narażonych na oddziaływanie podwyższonej temperatury. Jedną z metod może być modyfikowanie masy klejowej poprzez dodawanie napełniaczy. Pozytywny wpływ napełniaczy w postaci proszków miedzi i aluminium na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych z zastosowaniem modyfikowanego kleju Agomet F330 (żywica metakrylowa) stwierdzono m.in. w pracy [78]. Zaobserwowano, że wytrzymałość połączeń narażonych na oddziaływanie temperatury rzędu 100°C zwiększyła się o 28% w przypadku napełniacza w postaci proszku miedzi i o 21% w przypadku proszku aluminium. Innym napełniaczem wykorzystywanym do zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych w wyższych temperaturach może być nanokrzemionka. W pracy [17] udowodniono jej korzystny wpływ na wytrzymałość złączy wykonanych

z zastosowaniem modyfikowanej żywicy epoksydowej Epidian 53, narażonych na oddziaływanie temperatury wynoszącej 60°C, 80°C i 100°C. Poprawę statycznej trwałości czasowej złącza obciążonego długotrwale w podwyższonej temperaturze można osiągnąć natomiast poprzez modyfikowanie spoiny klejowej dodatkami, takimi jak tkanina szklana, elektrokorund czy wypełniacze metaliczne [99].

Na wytrzymałość połączeń klejowych ma wpływ nie tylko podwyższona, ale i obniżona temperatura. W pracy [41] zwrócono uwagę na to, że obniżenie temperatury złącza klejowego może przyczynić się do większego wyężenia materiału spoiny klejowej niż podwyższenie temperatury o identyczną wartość. Ponadto, w efekcie spadku temperatury wzrasta wartość modułu sprężystości podłużnej kleju, co niekorzystnie wpływa na wytrzymałość złącza.

Podsumowując, istnieje wiele czynników, które decydują o wpływie temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych. Do najważniejszych z nich należą jednak wartość modułu sprężystości podłużnej kleju oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej kleju oraz klejonych elementów [81].

1.5. Wpływ cyklicznych zmian temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych

Połączenia klejowe często narażone są na oddziaływanie cyklicznych zmian temperatury. Najczęstszymi przyczynami wahań temperatury w środowisku pracy złączy klejowych może być m.in. dobową czy sezonową różnicą temperatur oraz włączanie i wyłączanie zasilania urządzeń elektronicznych [81]. Na znaczne wahania temperatury narażone są m.in. połączenia klejowe stosowane w samolotach naddźwiękowych, których poszycie może schładzać się do -55°C i nagrzewać do ponad 200°C [118].

Badania nad wpływem cyklicznych zmian temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych zostały przedstawione m.in. w pracy [65]. Przeanalizowano w niej wpływ zmęczenia cieplnego na wytrzymałość zakładkowych i doczołowych połączeń klejowych próbek stalowych i stopu aluminium. W badaniach zastosowano dwa rodzaje klejów epoksydowych E5/Z-1/10:1 (sztywny klej) i E5/PAC/10:8 (klej o zwiększonej elastyczności). Próbki poddano 500 cyklom zmian temperatury. Temperatura maksymalna wynosiła 38°C, a temperatura minimalna -20°C. Kondycjonowanie próbek w każdej z temperatur trwało 15 min. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że w początkowym okresie badań wytrzymałość złączy nieznacznie się

zwiększyła, co mogło być efektem dodatkowego utwardzenia połączenia (złącza były utwardzane w temperaturze otoczenia). Po 500 cyklach obciążenia termicznego wytrzymałość złączy zmniejszyła się o około 4% w przypadku połączeń zakładowych i 2,5% w przypadku połączeń doczołowych. Oznacza to, że złącza zakładkowe i doczołowe w podobny sposób zareagowały na cykliczne zmiany temperatury. Co więcej, nie zaobserwowano istotnych różnic w wytrzymałości połączeń w zależności od rodzaju kleju, mimo że zastosowane kleje charakteryzowały się różnym stopniem sztywności po utwardzeniu.

Autorzy pracy [55] zbadali wytrzymałość na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych stali 316L, wykonanych z wykorzystaniem klejów dwuskładnikowych epoksydowych Hysol 9484 oraz Hysol 3421. Analizowane połączenia klejowe poddano 200 cyklom zmiennej temperatury w komorze szoków termicznych. Minimalna temperatura sięgała -40°C , natomiast maksymalna 60°C . Czas kondycjonowania próbek w każdej z temperatur wynosił 15 min. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że obciążenie cieplne spowodowało zwiększenie rozrzutu wyników badań wytrzymałościowych zarówno dla kleju Hysol 3421, jak i Hysol 9484. W przypadku kleju Hysol 9484 zaobserwowano zmniejszenie wartości średniej naprężenia ścinającego o 30%. W przypadku kleju Hysol 3421 zmniejszenie wytrzymałości było niewielkie i wynosiło około 2%.

Wpływ szoków termicznych na wytrzymałość jednozakładkowych połączeń klejowych wykonanych ze stali 316L został zbadany również w pracy [50]. Do badań wykorzystano kleje epoksydowe Epidian 5 i Epidian 6 utwardzone utwardzaczami Z1 i PAC. Próbkę zostały poddane 200 cyklom zmiennej temperatury w zakresie od -40°C do 60°C . Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że największy spadek wartości naprężeń ścinających w wyniku poddania próbek szokom termicznym, nastąpił w przypadku połączeń sklejonych za pomocą kleju Epidian 5 z utwardzaczem Z1. Wytrzymałość złączy zmniejszyła się w tym przypadku aż o 50%.

Podobne badania przeprowadzono w ramach pracy [51]. Materiałem klejonym była stal 316L, liczba cykli zmian temperatury wynosiła 200, wartości temperatury zmieniały się w zakresie od -40°C do 60°C , a czas kondycjonowania próbek wynosił 15 min. Do analizy zastosowano kleje na bazie żywic epoksydowych (Epidian 57, Epidian 53 oraz Epidian 5) z 10% dodatkiem utwardzacza Z1 (trietylenotetramina). W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano 50% zmniejszenie wytrzymałości połączeń wykonanych przy użyciu kleju na bazie żywicy Epidian 5, 20% zmniejszenie

wytrzymałości w przypadku żywicy Epidian 57 oraz 8% zmniejszenie wytrzymałości w przypadku żywicy Epidian 53.

Niemniej jednak, poddanie połączeń klejowych szokom termicznym może w pewnych warunkach pozytywnie oddziaływać na nośność połączeń klejowych, co wykazano w pracy [145].

Istnieją metody ograniczające niekorzystny wpływ zmiennej temperatury na wytrzymałość połączeń klejowych. Przykładem rozwiązania, które zapewnia zwiększenie wytrzymałości złączy pracujących zarówno w niskich, jak i w wysokich temperaturach może być zastosowanie dwóch rodzajów klejów o różnej sztywności. Klej o dużej wartości modułu sprężystości podłużnej należy wówczas aplikować w środkowej części zakładki. Klej charakteryzujący się mniejszą sztywnością powinien być natomiast nakładany na krawędzie podatne na koncentracje naprężeń [83]. Koncepcja stosowania dwóch rodzajów kleju w celu zwiększenia wytrzymałości złącza sprawdza się przede wszystkim w połączeniach typu metal-kompozyt (połączenia elementów znacznie różniących się wartościami liniowych współczynników rozszerzalności cieplnej) [117, 118].

1.6. Wybrane metody zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych

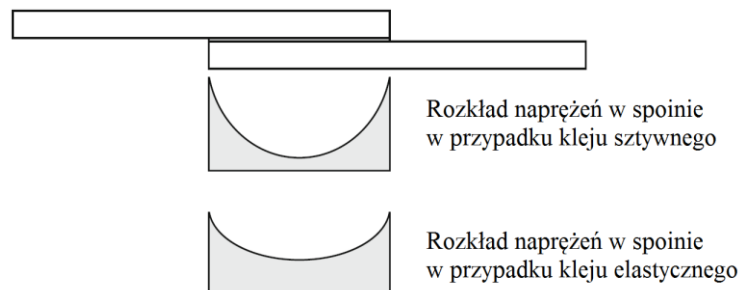
Wytrzymałość połączeń klejowych jest kształtowana przez wiele czynników zarówno technologicznych, jak i konstrukcyjnych. Wśród czynników technologicznych można wymienić m.in. stan warstwy wierzchniej łączonych elementów, poprawność przygotowania masy klejowej oraz warunki, w jakich miało miejsce utwardzanie spoiny klejowej (czas, temperatura, naciski). Do czynników konstrukcyjnych można zaliczyć natomiast: wymiary spoiny, kształt, wymiary oraz stopień symetrii złącza klejowego, rodzaj kleju oraz sposób obciążenia złącza klejowego [33].

Podczas analizowania wytrzymałości połączeń klejowych należy mieć na uwadze, że rozkład naprężeń stycznych w spoinach klejowych połączeń zakładkowych obciążonych na ścinanie nie jest równomierny. Maksymalne naprężenia występują na końcach zakładki [41]. Jedną z przyczyn nierównomiernego rozkładu naprężeń są zmiany wymiarów na końcach zakładki (karb geometryczny). Inną przyczyną tego zjawiska są różnice we właściwościach plastycznych kleju i materiału klejonego [2, 8, 49, 59]. Zerwanie połączenia klejowego zaczyna się w punkcie, w którym naprężenia są największe. Minimalizowanie koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej uznaje

się więc za jeden z podstawowych sposobów zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych [120]. Stopień koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej zakładkowych połączeń klejowych można zmniejszać między innymi poprzez:

- odpowiedni dobór rodzaju kleju [70, 71, 79, 120],
- odpowiedni dobór grubości spoiny [28, 33, 46, 67, 71, 101, 120, 122],
- odpowiedni dobór długości zakładki [33, 41, 120, 29],
- nieusuwanie wypływkę kleju [66],
- wykonanie promienia w strefie przykrawędziowej zakładki [22, 120, 139, 138],
- zwężanie końców zakładki [15, 22, 33, 41, 128],
- tworzenie stopni w obszarze zakładki [30],
- wykonanie podcięcia wzdłuż krawędzi spoiny klejowej [11, 19, 120, 128],
- wykonanie otworów w końcowej części zakładki [146],
- pneumokulkowanie strefy zakładki [144, 150-153, 141],
- piaskowanie strefy zakładki [35].

Na rozkład naprężeń w spoinie klejowej ma wpływ m.in. rodzaj kleju. Kleje charakteryzujące się dużą plastycznością i elastycznością są na ogół mało wytrzymałe. Mają one jednak zdolność do deformacji plastycznych oraz zapewniają bardziej równomierny rozkład naprężeń, niż kleje sztywne (rys. 1.5) [120].



Rys. 1.5. Porównanie rozkładu naprężeń wzdłuż spoiny klejowej w przypadku kleju sztywnego i elastycznego [120]

Kleje plastyczne są również mniej podatne na propagację pęknięć. W efekcie, dzięki zastosowaniu mniej wytrzymałego, plastycznego i elastycznego kleju, można w pewnych warunkach uzyskać połączenie bardziej wytrzymałe, niż w przypadku klejów pozornie mocnych, ale sztywnych i kruchych [73, 120].

Innym czynnikiem, wpływającym na rozkład naprężeń w spoinie klejowej i wytrzymałość złączy, może być grubość spoiny klejowej [120]. Zgodnie z analizami teoretycznymi, wytrzymałość połączeń klejowych powinna wzrastać wraz ze wzrostem

grubości spoiny [33, 122]. Wyniki badań eksperymentalnych dowodzą jednak, że wzrost grubości spoiny może niekiedy przyczyniać się do zmniejszenia wytrzymałości połączeń klejowych [46, 67, 101, 122]. W pracy [28] wykazano, że naprężenia ścinające rosną tylko do określonej wartości grubości spoiny, a po jej przekroczeniu zaczynają się zmniejszać [28, 41]. W innych badaniach [71] dowiedziono również, że energia niszczenia połączenia wykonanego z zastosowaniem kruchego kleju zwiększa się wraz ze zmniejszaniem grubości spoiny. Z kolei w przypadku połączeń wykonanych z użyciem kleju elastycznego, zmniejszanie grubości spoiny przyczynia się do zmniejszania energii niszczenia. W praktyce, grubość spoiny klejowej w połączeniach zakładkowych obciążonych na ścinanie wynosi zazwyczaj od 0,05 do 0,15 mm i uzależniona jest m.in. od rodzaju kleju, grubości łączonych materiałów czy rozwinięcia geometrycznego powierzchni [33, 104].

Wytrzymałość połączeń zakładkowych można regulować również poprzez zmianę długości zakładki. Wraz ze wzrostem długości zakładki wzrasta wytrzymałość złączy. Wzrost ten następuje jednak do momentu osiągnięcia tzw. granicznej długości zakładki [33, 41]. Graniczną długość zakładki (w przypadku klejenia jednakowych elementów) można wyznaczyć ze wzoru (1.2):

$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{Eg g_k}{2G_k}}, \quad (1.2)$$

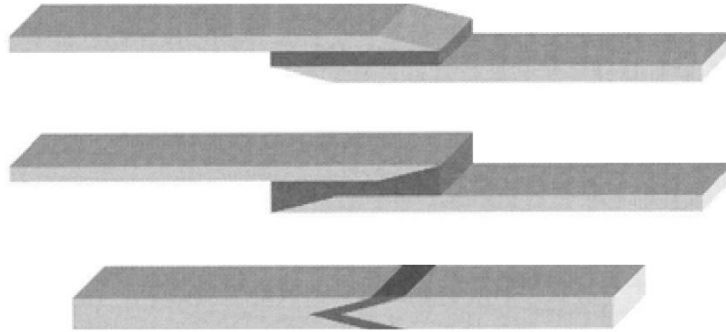
gdzie: E – współczynnik sprężystości wzdłużnej elementów klejonych, g – grubość elementów klejonych, g_k – grubość spoiny klejowej, G_k – współczynnik sprężystości postaciowej kleju w stanie utwardzonym. Na podstawie zależności (1.2) można stwierdzić, że wpływ długości zakładki na wytrzymałość połączenia w dużej mierze zależy od właściwości zastosowanego kleju (plastyczności, elastyczności), a także od grubości elementów klejonych i spoiny klejowej [41, 29, 120].

Zmniejszenie stopnia koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej, a w efekcie wzrost wytrzymałości połączenia zakładkowego, można uzyskać również poprzez nieusuwanie wypływkę kleju. Pozytywny efekt wypływkę na właściwości wytrzymałościowe zaobserwowano w szczególności w przypadku połączeń charakteryzujących się małą długością zakładki [66].

Innym sposobem umożliwiającym zwiększenie równomierności rozkładu naprężeń w spoinie klejowej może być wprowadzenie zmian w geometrii zakładek. Zmiany te mogą polegać na m.in. wykonaniu promienia w strefie przykrawędziowej [22, 120,

139]. W pracy [138] wykazano, że zaokrąglanie naroży zakładek przynosi więcej korzyści w przypadku połączeń klejonych kruchymi klejami. Zaobserwowano, że wytrzymałość połączeń może wzrosnąć wówczas o 40%.

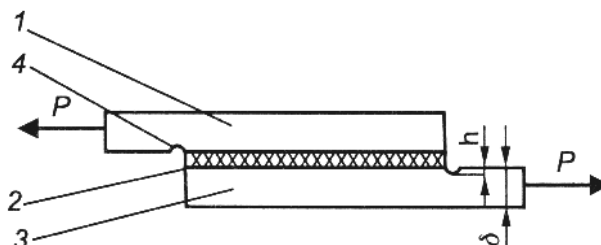
Geometrię złączy można zmieniać również poprzez zwężanie końców zakładek [15, 22, 41, 128]. Najczęściej spotykane rozwiązania przedstawiono na rys. 1.6.



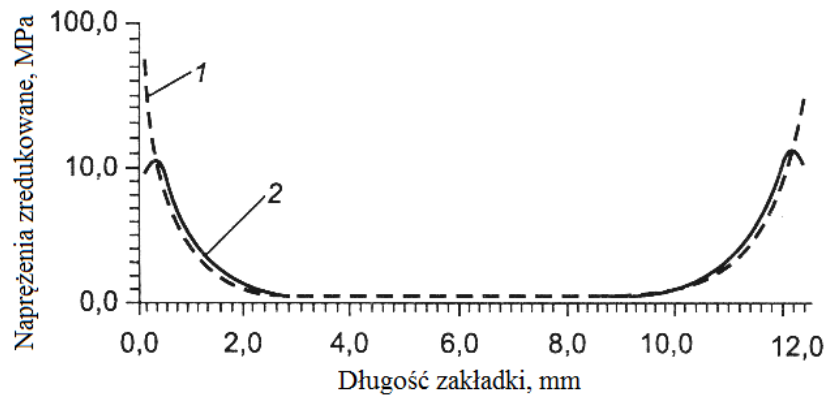
Rys. 1.6. Schemat połączeń klejowych, w których zwężono końce zakładek [128]

Zwężanie końców zakładek prowadzi do znacznego zmniejszenia naprężeń ścinających i odrywających. Wiąże się ono jednak ze wzrostem kosztów wytwarzania złączy. Co więcej, takie rozwiązanie może być kłopotliwe w przypadku obróbki cienkich blach [33]. Zwężanie końców zakładek może być prostsze do wykonania m.in. w przypadku kompozytów [128]. Podobny efekt można uzyskać poprzez tworzenie stopni w obszarze zakładki [30]. Niemniej jednak ta metoda jest obarczona podobnymi ograniczeniami, jak zwężanie końców zakładki.

Innym przykładem zmian w geometrii zakładek jest wykonanie niewielkiego podcięcia wzdłuż krawędzi spoiny klejowej (rys. 1.7-1.8). Dzięki takiemu podcięciu dochodzi do obniżenia wartości maksymalnych naprężeń w spoinie i odsunięcia maksymalnych naprężeń od krawędzi spoiny [48, 120, 128].



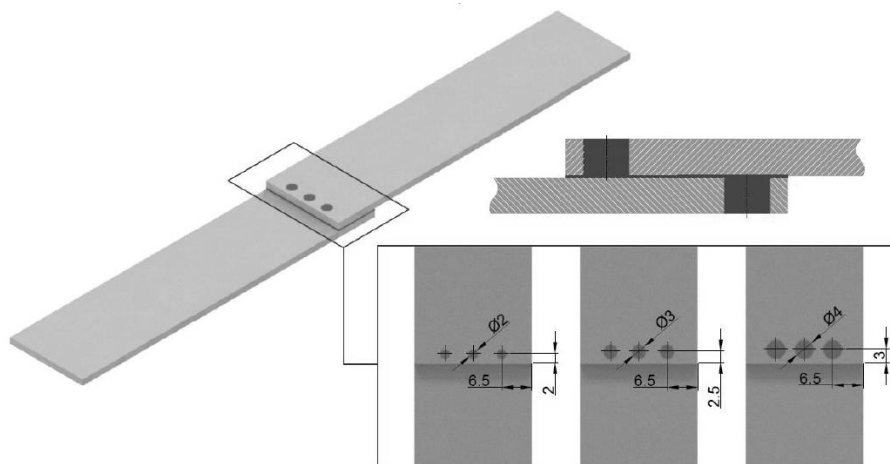
Rys. 1.7. Schemat połączenia klejowego z podcięciem przy krawędzi zakładki: 1, 3 – elementy klejone, 2 – spoina klejowa, 4 – podcięcie [128]



Rys. 1.8. Porównanie rozkładu naprężeń zredukowanych w spoinach połączeń klejowych z podcięciem (2) i bez podcięcia (1) [128]

Autorzy pracy [11] zbadali wpływ różnego rodzaju podcięć na wytrzymałość jednozakładkowych połączeń klejowych. Zaobserwowali oni, że najzwyczajsze podcięcie o głębokości karbu rzędu 20% może zwiększyć nośność połączeń o około 60%.

Innym sposobem umożliwiającym lokalne uelastycznienie połączenia klejowego jest wykonanie otworów w końcowej części zakładki (rys. 1.9). Zgodnie z wynikami badań przedstawionymi w [146], otwory takie mogą przyczynić się do zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych o 14,5%.



Rys. 1.9. Schemat połączeń klejowych z otworami w końcowej części zakładki [146]

Wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych można zwiększać poprzez piaskowanie strefy zakładek. W pracy [35] wykazano, że piaskowanie strefy zakładki może doprowadzić do 5% przyrostu wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych ze stali C35 i 58% przyrostu wytrzymałości połączeń ze stopu aluminium AW 2024-T3.

Metodą, która również przyczynia się do zmniejszenia spiętrzenia naprężeń w strefie przykrawędziowej, a w efekcie zwiększenia wytrzymałości połączeń

klejowych jest pneumokulkowanie strefy zakładki [144, 150-153, 141]. Opis metody pneumokulkowania oraz jej wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych zostanie szerzej omówiony w dalszej części pracy (podrozdział 2.2 i 2.5).

Podsumowując, istnieje wiele metod, które poprzez zmniejszanie koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej mogą w większym lub mniejszym stopniu przyczynić się do zwiększenia wytrzymałości zakładkowych połączeń klejowych. Każda z nich ma jednak swoje wady i ograniczenia. Niemniej jednak, jedną z najbardziej interesujących metod, umożliwiających zmniejszenie naprężeń na końcach spoiny klejowej, a w efekcie zwiększenie wytrzymałości połączeń klejowych, jest pneumokulkowanie strefy zakładki złącza klejowego. Pneumokulkowanie strefy zakładki cechuje się dużą prostotą, niskimi kosztami oraz brakiem odpadów w postaci wiórów. Można ją stosować zarówno w przypadku połączeń klejowych o małych, jak i dużych wymiarach. Pomimo swojego potencjału, metoda ta jest jednak wciąż mało poznana. Dostępne, fragmentaryczne badania nad wpływem pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych były kierowane dotychczas przez dr hab. inż. Władysława Zieleckiego, prof. Politechniki Rzeszowskiej. Badania te dotyczyły możliwości umacniania połączeń klejowych wykonanych ze stali oraz stopu tytanu. Wyniki tych badań zostały opisane głównie w polskich czasopismach (m.in. w *Technologii i Automatyzacji Montażu*). W międzynarodowych bazach bibliograficznych typu Web of Science oraz Scopus, występuje tylko jeden artykuł [59] dotyczący możliwości umacniania połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania strefy zakładki i dotyczy połączeń klejowych wykonanych ze stopu tytanu.

Z związku z powyższym, uzasadnione jest prowadzenie dalszych badań nad możliwością umacniania połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania strefy zakładki. Warto byłoby zbadać skuteczność tej metody w przypadku połączeń klejowych wykonanych z materiałów, których właściwości znacznie różnią się od właściwości stali i stopów tytanu. Przykładem takiego materiału może być stop aluminium. Dodatkowo warto byłoby dokładnie zbadać mechanizm wzrostu wytrzymałości połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania oraz znaleźć metody, które pozwoliłyby na przewidywanie oraz kontrolowanie efektów pneumokulkowania połączeń klejowych. Pozwoliłoby to na zwiększenie użyteczności tej metody w zastosowaniach przemysłowych.

2. Nagniatanie dynamiczne

2.1. Klasyfikacja metod nagniatania

Istotą procesu nagniatania jest odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej metalowych przedmiotów, przebiegające w temperaturze otoczenia, w wyniku wywierania nacisku lub uderzania w powierzchnię przedmiotu elementami nagniatającymi, których twardość jest większa, niż twardość powierzchni obrabianej. W zależności od rodzaju metody obróbki nagniataniem, elementy nagniatające mogą być na stałe związane z układem OUPN (obrabiarka-przedmiot-uchwyt-narzędzie) lub mogą występować w postaci luźnych elementów niezwiązanych z układem OUPN [76, 134].

Obróbkę nagniataniem można klasyfikować ze względu na cel, jaki zamierza się osiągnąć. Wyróżnia się wówczas:

- nagniatanie umacniające,
- nagniatanie gładkościowe,
- nagniatanie wymiarowe.

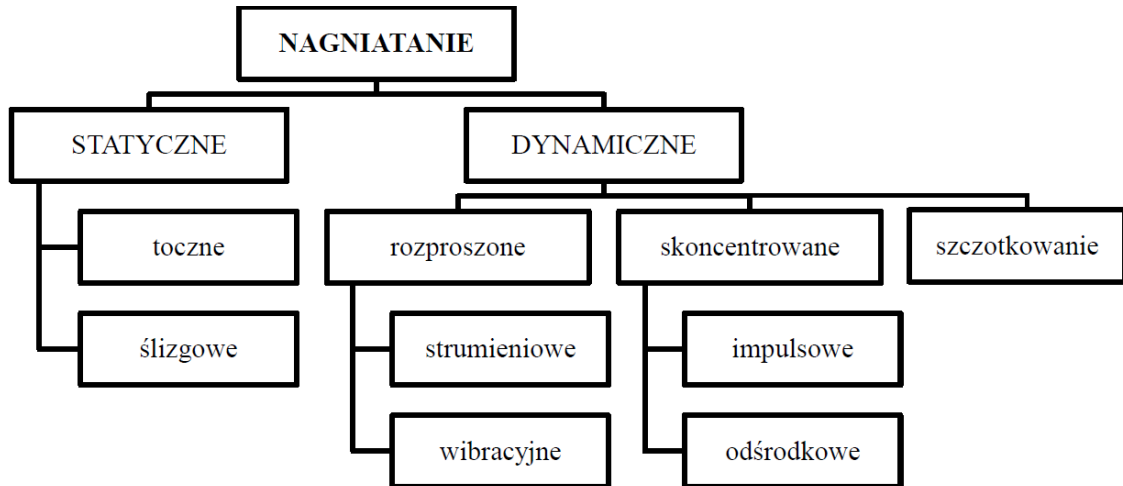
Nagniatanie umacniające jest jednym z najczęstszych zastosowań obróbki nagniataniem. W przypadku nagniatania umacniającego, poprzez odkształcenie plastyczne na zimno, dochodzi do umocnienia warstwy wierzchniej, czego następstwem jest m.in. zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na zużycie tribologiczne. Za miarę umocnienia uznaje się głębokość występowania odkształceń plastycznych oraz stopień zgniotu. Parametry nagniatania umacniającego dobiera się w zależności od właściwości plastycznych przedmiotu obrabianego, a także geometrii kontaktu narzędzia z przedmiotem i kinematyki procesu [61].

Nagniatanie gładkościowe, wykonywane jest w celu wygładzenia (plastycznego odkształcenia i wyrównania) wierzchołków nierówności i w efekcie, uzyskania małej chropowatości powierzchni obrabianej. Nagniatanie gładkościowe przeprowadzane jest z zastosowaniem sprężystego docisku narzędzia, przez co nie może ono służyć do poprawy dokładności wymiarowo-kształtowej. Głębokość umocnienia, czy stopień zgniotu nie mają znaczenia w procesie nagniatania gładkościowego [61].

W przypadku nagniatania wymiarowego, poprzez zastosowanie odpowiedniego zagłębienia narzędzia, kinematyki obróbki i geometrii styku, uzyskuje się założoną dokładność wymiarową i stan (gładkość) powierzchni obrabianej. Nagniatanie

wymiarowe wymaga zastosowania narzędzia ze sztywnym dociskiem. Podobnie jak w nagniataniu gładkościowym, nie ma znaczenia głębokość umocnienia [61].

Innym kryterium klasyfikacji obróbki nagniataniem jest sposób oddziaływania elementów nagniatających na powierzchnię przedmiotu obrabianego. Ze względu na to kryterium wyróżnia się nagniatanie statyczne i dynamiczne (rys. 2.1.) [61, 134].

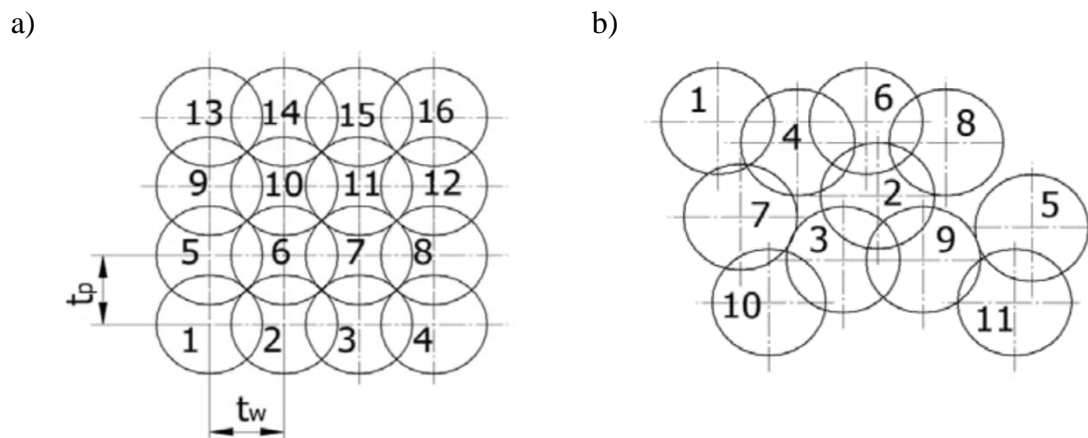


Rys. 2.1. Klasyfikacja metod nagniatania ze względu na sposób oddziaływania elementów nagniatających na powierzchnię przedmiotu obrabianego [opracowanie własne na podstawie 134]

Metody statyczne charakteryzują się w przybliżeniu stałym naciskiem i kontaktem elementu nagniatającego z powierzchnią obrabianą. Służą one głównie do nagniatania powierzchni o regularnych kształtach (powierzchni walcowych, stożkowych lub płaskich). Ze względu na kształt elementu nagniatającego oraz rodzaj tarcia między tym elementem i przedmiotem obrabianym, metody statyczne dzieli się na nagniatanie toczne i ślizgowe. Nagniatanie toczne ma miejsce wtedy, gdy element nagniatający w postaci bryły obrotowej, takiej jak kulka, rolka, czy krążek, toczy się po powierzchni przedmiotu obrabianego, wykonując jednocześnie ruch obrotowy. Nagniatanie ślizgowe, różni się od tocznego głównie tym, że element nagniatający nie obraca się i w efekcie, pomiędzy elementem nagniatającym i przedmiotem obrabianym zachodzi tarcie ślizgowe. Nagniatanie ślizgowe jest obróbką gładkościową. Nagniatanie toczne można stosować natomiast, jako obróbkę umacniającą, gładkościową, czy wymiarowo-gładkościową [134].

Metody dynamiczne polegają na uderzaniu w powierzchnię obrabianą za pomocą elementów nagniatających i są stosowane głównie, jako obróbkę umacniającą. Siły wykorzystywane w nagniataniu dynamicznym są znacznie mniejsze niż siły w nagniataniu statycznym (zwłaszcza tocznym). W związku z tym, nagniataniu

dynamicznemu można poddawać przedmioty o małej sztywności (m.in. elementy cienkościenne szeroko stosowane w lotnictwie). W porównaniu z metodami statycznymi, metody dynamiczne można stosować również do obróbki powierzchni o bardziej złożonych kształtach, charakteryzujących się mniejszymi promieniami krzywizny. W zależności od sposobu nanoszenia odcisków na powierzchnię obrabianą, nagniatanie dynamiczne dzieli się na nagniatanie skoncentrowane (impulsowe i odśrodkowe), rozproszone (strumieniowe i wibracyjne) oraz szczotkowanie (mające cechy nagniatania skoncentrowanego i rozproszonego) [134]. Inne źródła klasyfikują szczotkowanie, jako jedną z odmian nagniatania rozproszonego [92, 93]. Na rysunku 2.2 przedstawiono porównanie układu odcisków powstałych w wyniku nagniatania skoncentrowanego i rozproszonego.



Rys. 2.2. Układ odcisków na powierzchni obrabianej i kolejność ich powstawania:
a) nagniatanie skoncentrowane, b) nagniatanie rozproszone [134]

W przypadku nagniatania dynamicznego skoncentrowanego, elementy nagniatające przemieszczają się zwykle w prowadnicach urządzenia i uderzają kolejno w obrabianą powierzchnię. Odciski są nanoszone na powierzchnię obrabianą w kolejnych rzędach, przy czym odległości między środkami odcisków w rzędzie są jednakowe i określone, jako podziałka wzdłużna t_w , a odległości pomiędzy środkami odcisków w sąsiednich rzędach są jednakowe i określone, jako podziałka poprzeczna t_p . Oprócz odległości między środkami odcisków, w metodach skoncentrowanych znany jest również kierunek ruchu elementów nagniatających [132, 134].

Ze względu na sposób wprawiania w ruch elementów nagniatających, który jest związany z budową urządzeń służących do obróbki, nagniatanie dynamiczne skoncentrowane dzieli się na nagniatanie impulsowe i nagniatanie odśrodkowe. W nagniataniu impulsowym elementy nagniatające są napędzane przez ruch obrotowy

bieżni wbudowanej w głowicę nagniatającą lub przetwornik piezoelektryczny, w wyniku czego wykonują one ruch postępowo-zwrotny. W przypadku nagniatania odśrodkowego elementy nagniatające (kulki) są rozpędzane przez siłę odśrodkową obracającej się tarczy, w której otworach są umieszczane. Energię uderzenia tych elementów nagniatających można zwiększyć stosując ciecze smarująco-chłodzące [132, 134].

Nagniatanie dynamiczne rozproszone charakteryzuje się tym, że elementy nagniatające nie przemieszczają się w prowadnicach urządzenia, tylko swobodnie uderzają w powierzchnię przedmiotu obrabianego. Nieuporządkowany ruch elementów nagniatających sprawia, że trudno jest w tym przypadku określić ich prędkości i kierunek ruchu. Odległości pomiędzy powstającymi odciskami są znacznie większe od ich średnicy. W miarę wydłużania czasu obróbki, pojawiające się w przypadkowych miejscach odciski ulegają zagęszczeniu, czego następstwem jest pokrycie nimi całej powierzchni obrabianej [132, 134].

Ze względu na zasadę działania urządzeń służących do nagniatania dynamicznego rozproszonego, wyróżnia się nagniatanie strumieniowe i nagniatanie wibracyjne. W przypadku nagniatania strumieniowego, powierzchnia przedmiotu obrabianego jest bombardowana strumieniem elementów nagniatających (najczęściej kulek stalowych lub szklanych), wyrzucanych z urządzenia za pomocą łopatek wirnika lub strumienia sprężonego powietrza. Nagniatanie wibracyjne charakteryzuje się natomiast tym, że w zamocowany przedmiot obrabiany uderzają luźne elementy nagniatające, których ruch wynika z drgań komory roboczej [132, 134].

Istotą szczotkowania nagniatającego jest obróbka powierzchni za pomocą włókien metalowej szczotki mogącej przybierać kształt walca, tarczy lub taśmy. Rozmieszczenie włókien w szczotce jest stałe (znane). Duża elastyczność włókien i dość szybkie ich zużywanie powodują jednak, że powstające na powierzchni obrabianej ślady są nieregularne [132, 134].

2.2. Charakterystyka procesu pneumokulkowania

Pneumokulkowanie jest jedną z odmian nagniatania dynamicznego rozproszonego strumieniowego. Podczas procesu pneumokulkowania, elementy nagniatające (zwykle kulki łożyskowe o średnicy do 4 mm) wprowadzane są w ruch przez strumień sprężonego powietrza. Rozpędzone kulki uderzają w przedmiot obrabiany zamocowany w urządzeniu. W wyniku uderzenia elementów nagniatających w powierzchnię

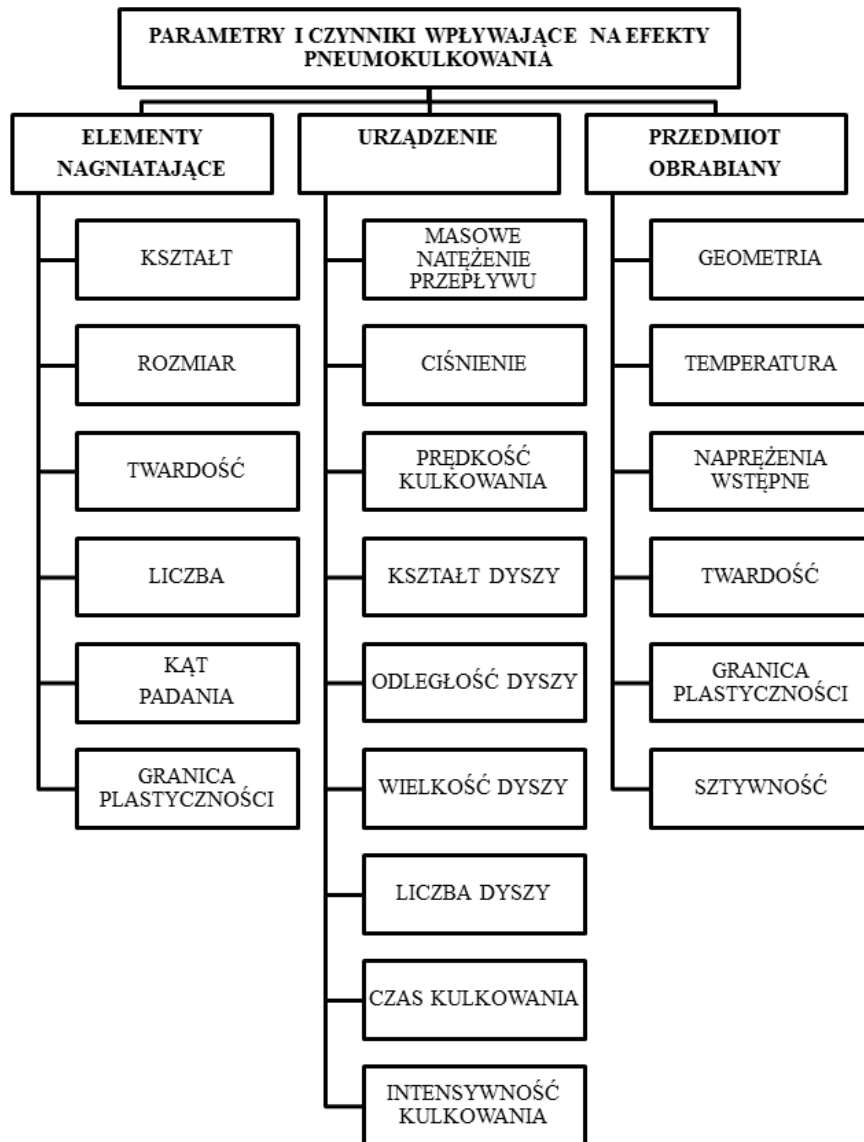
obrabaną, część ich energii kinetycznej jest przekształcana w odkształcenie plastyczne warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Po uderzeniu w powierzchnię obrabaną i odbiciu, kulki opadają samoczynnie w strefę dyszy, skąd są ponownie pobierane do obróbki. Urządzenia do pneumokulkowania działają zwykle w układzie zamkniętym, dzięki czemu możliwe jest wielokrotne użycie czynnika roboczego podczas obróbki [18, 72, 75, 127].

Pneumokulkowanie należy do grupy metod nagniatania umacniającego. W wyniku pneumokulkowania dochodzi do zgniotu warstwy wierzchniej. Pneumokulkowanie wpływa również na strukturę geometryczną powierzchni. Profile powierzchni przedmiotów poddanych pneumokulkowaniu cechują się mikronierównościami o dużych promieniach wgnębień, co ma korzystny wpływ na ich właściwości użytkowe [61, 127]. Szerszą analizę dotyczącą wpływu metod nagniatania dynamicznego, w tym pneumokulkowania, na strukturę geometryczną powierzchni, właściwości fizyczne warstwy wierzchniej oraz właściwości użytkowe obrabianych przedmiotów przedstawiono w podrozdziałach 2.3 i 2.4.

Uzyskanie zadawalających efektów obróbki jest ściśle uzależnione od odpowiedniego doboru parametrów pneumokulkowania. Dobór zbyt intensywnych parametrów obróbki może doprowadzić do pogorszenia właściwości warstwy wierzchniej. Mniej intensywna obróbka może natomiast nie gwarantować uzyskania żądanych wyników umocnienia. Podczas pneumokulkowania, elementy nagniatające wielokrotnie uderzają w powierzchnię przedmiotu obrabianego. Wymiary, kształt, kąt padania i prędkość tych elementów jest często zróżnicowana. Modelowanie matematyczne procesu pneumokulkowania jest w związku z tym złożone i trudne. Parametry procesu często dobiera się więc eksperymentalnie lub na podstawie danych dostępnych w literaturze [75].

Parametry i czynniki wpływające na efekty procesu pneumokulkowania dzieli się na trzy grupy:

- parametry i czynniki związane z elementami nagniatającymi,
- parametry związane z urządzeniem do pneumokulkowania,
- parametry związane z przedmiotem obrabianym (rys. 2.3) [127].



Rys. 2.3. Parametry i czynniki wpływające na efekty pneumokulkowania
[opracowanie własne na podstawie 61, 127]

Do zalet pneumokulkowania, które wyróżniają tę obróbkę od innych metod nagniatania dynamicznego zalicza się m.in.:

- prostą konstrukcję urządzeń do pneumokulkowania,
- wysoką jakość warstwy wierzchniej po obróbce, ze względu na nietworzenie się pyłu i gładkie powierzchnie kulek,
- możliwość umacniania różnego typu powierzchni kształtowych,
- łatwość regulacji intensywności pneumokulkowania w różnych strefach powierzchni obrabianej (na przykład poprzez zastosowanie kilku dyszy posiadających oddzielne sterowanie ciśnieniem i czasem obróbki),
- dużą trwałość kulek pełniących rolę elementów nagniatających, co wpływa między innymi na obniżenie kosztów obróbki,

- stosowanie zasilania grawitacyjnego (kulki po odbiciu od powierzchni obrabianej opadają do zasobnika zasilającego pod wpływem grawitacji ziemskiej), co eliminuje konieczność stosowania dodatkowych układów zasilających oraz obniża koszty obróbki,
- zerwany kontakt narzędzia z przedmiotem obrabianym, zapobiegający występowaniu niekorzystnego stałego wypiętrzenia materiału przed narzędziem,
- lepsze odprowadzanie ciepła ze strefy roboczej,
- mniejsze siły nagniatania.

Do wad pneumokulkowania zalicza się natomiast stosunkowo długi czas obróbki (zależny od gabarytów przedmiotu obrabianego, jego twardości oraz żądanej intensywności), głośną pracą większości narzędzi, stosunkowo małą głębokość umocnienia warstwy wierzchniej oraz małą precyzję wymiarową obrabianych elementów [61, 75, 94].

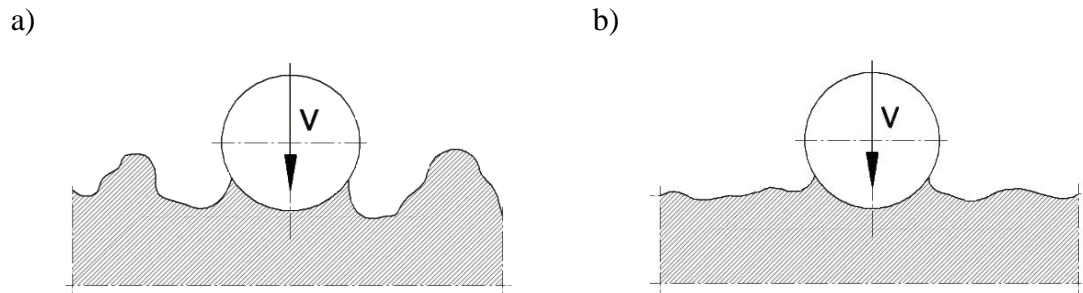
2.3. Wpływ nagniatania dynamicznego na strukturę geometryczną powierzchni oraz właściwości fizyczne warstwy wierzchniej

Nadrzędnym celem nagniatania dynamicznego jest zmiana struktury geometrycznej powierzchni oraz właściwości fizycznych warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Struktura geometryczna powierzchni obejmuje błędy kształtu, falistość, chropowatość i wady powierzchni. Głównymi właściwościami fizycznymi warstwy wierzchniej po nagniataniu są natomiast: mikrostruktura, twardość oraz naprężenia własne [134, 135].

Błędy kształtu, będące niekiedy następstwem nagniatania dynamicznego, powodowane są obecnością naprężeń własnych, ukonstytuowanych w warstwie wierzchniej nagniatanych przedmiotów. Błędy kształtu powstają najczęściej w przypadku nagniatania elementów cienkościennych, charakteryzujących się złożonym kształtem [134].

Nagniatanie dynamiczne powoduje, że zmianie ulega kształt mikronierówności powierzchni, czego następstwem jest zmiana wartości parametrów chropowatości. Zależnie od warunków technologicznych obróbki, chropowatość powierzchni może ulec zwiększeniu albo zmniejszeniu. W przypadku, gdy energia elementu nagniatającego jest mała, a chropowatość powierzchni przed obróbką duża, wówczas w wyniku nagniatania

dochodzi do odkształcenia i zmniejszenia wysokości mikronierówności, a co za tym idzie, zmniejszenia chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego (rys. 2.4 (a)). Duża energia uderzenia powoduje natomiast, że w wyniku nagniatania dochodzi nie tylko do odkształcenia mikronierówności, ale również do „zagłębienia” elementu nagniatającego w materiale. W takim przypadku chropowatość powierzchni może ulec zwiększeniu (rys. 2.4 (b)) [134].



Rys. 2.4. Schemat kształtowania chropowatości powierzchni w wyniku nagniatania dynamicznego: a) „spłaszczanie” mikronierówności, b) powstawanie wgłębień [134]

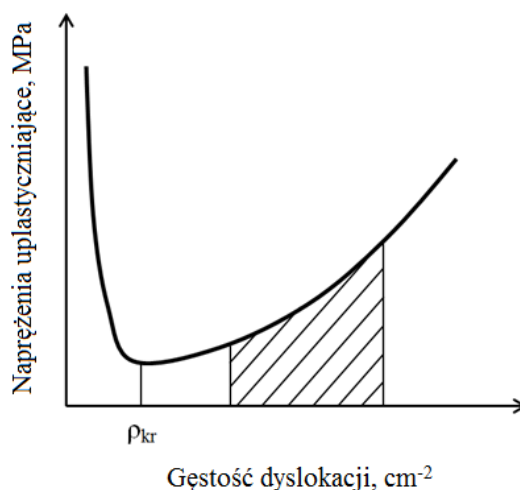
Oprócz energii elementu nagniatającego, na chropowatość powierzchni po nagniataniu dynamicznym wpływa wiele innych czynników. Można wymienić wśród nich: chropowatość powierzchni przed nagniataniem, rodzaj i właściwości obrabianego materiału, chropowatość powierzchni i geometrię elementu nagniatającego, kąt uderzenia elementu nagniatającego w powierzchnię obrabianą, a także liczbę uderzeń elementu nagniatającego na jednostkę powierzchni obrabianej [134].

Parametry technologiczne nagniatania dynamicznego dobiera się zwykle w taki sposób, aby zapewnić odkształcenie plastyczne materiału pod całą powierzchnią nagniataną, a nie wyłącznie odkształcenie wzniesień mikronierówności [134].

Profile powierzchni po nagniataniu cechują się zwykle większym promieniem wgłębień i występów nierówności, mniejszym kątem pochylenia boków nierówności, mniejszymi parametrami wysokościowymi oraz zwiększoną nośnością profilu w porównaniu z powierzchnią nienagniataną [76].

W wyniku odkształcenia plastycznego materiału, będącego następstwem nagniatania, dochodzi nie tylko do zmiany struktury geometrycznej powierzchni, ale i do zgniotu warstwy wierzchniej [134]. Przez zgniot rozumie się zmianę właściwości fizycznych i mechanicznych materiału (metal lub stopu) zachodzącą pod wpływem odkształcenia plastycznego na zimno [95]. W wyniku zgniotu dochodzi do wzrostu twardości i wytrzymałości, przy jednoczesnym spadku własności plastycznych (wydłużenia i przewężenia). Wraz ze zwiększaniem stopnia zgniotu maleje

przenikalność magnetyczna i przewodnictwo elektryczne, zwiększa się natomiast potencjał elektrochemiczny, magnetyzm szczątkowy i siła koercji [131, 134]. Odształcenie plastyczne metalu lub stopu następuje poprzez poślizg lub bliźniakowanie. Poślizg polega na przesuwaniu się części kryształu względem siebie wzdłuż kierunków i płaszczyzn najgęściej obsadzonych atomami (kierunków i płaszczyzn łatwego poślizgu). Odształcenie przez poślizg zachodzi przy udziale ruchu dyslokacji (defektów sieci krystalicznej). Poślizg rozpoczyna się wówczas, gdy naprężenie styczne w płaszczyźnie i kierunku łatwego poślizgu, osiągnie minimalną wartość, nazywaną naprężeniem krytycznym stycznym, które jest cechą charakterystyczną danego metalu [95, 131]. Odształcenie przez bliźniakowanie zachodzi natomiast w wyniku skręcenia (obrotu) jednej części kryształu względem drugiej o określony kąt (stały dla danej struktury) w płaszczyznach i kierunkach gęsto wypełnionych atomami. Naprężenia niezbędne do wywołania bliźniakowania są znacznie większe niż naprężenia konieczne dla zainicjowania poślizgu. Bliźniakowanie nie zachodzi z taką samą łatwością w każdym metalu. Stanowi ono ważny mechanizm odkształcenia w przypadku metali o sieci A3, natomiast metale o sieci A1 prawie nigdy nie odkształcają się w ten sposób [95, 125, 131]. Obecność dyslokacji zwiększa zdolność metali do odkształceń plastycznych, jednakże tylko do pewnej krytycznej gęstości dyslokacji ρ_{kr} . Po przekroczeniu tej granicy, dyslokacje zaczynają wzajemnie blokować swój ruch lub ich ruch jest zakłócany przez wady w budowie krystalicznej (np. obce atomy). W efekcie, wartość naprężeń uplastyczniających zaczyna gwałtownie wzrastać i następuje tzw. umocnienie, czyli zjawisko polegające na wzroście naprężeń uplastyczniających w wyniku zachodzenia trwałych odkształceń (rys. 2.5) [95, 131].



Rys. 2.5. Wpływ gęstości dyslokacji na wartość naprężeń uplastyczniających [125]

Pod wpływem nagniatania dochodzi do wzrostu liczby defektów sieci krystalicznej, co z kolei prowadzi do zmniejszenia gęstości metalu (zwiększenia jego objętości właściwej). Odształcona plastycznie warstwa materiału, która jest położona bezpośrednio pod nagniataną powierzchnią, próbuje zwiększyć swoje wymiary. Zwiększenie tych wymiarów może nastąpić w kierunku prostopadłym do powierzchni. Wymiary te nie mogą natomiast być zwiększone w kierunkach równoległych do powierzchni, ze względu na to, że rdzeń i warstwa odształcona stanowią jednolity materiał. W rezultacie, w warstwie odształconej plastycznie konstituowane są naprężenia ściskające, które głębiej (w rdzeniu) przechodzą w równoważące je naprężenia rozciągające [134]. Powstałe naprężenia ściskające są zwykle największe na pewnej głębokości, a nie tuż przy powierzchni, co jest skutkiem oddziaływania czynników cieplnych towarzyszących nagniataniu [76].

W wyniku nagniatania zachodzą również znaczne zmiany w budowie strukturalnej warstwy wierzchniej. Pod wpływem zgniotu ziarna spłaszczają się i wydłużają w kierunku deformacji. Może dochodzić również do ich rozdrobnienia. W przypadku dużych stopni zgniotu tworzy się tzw. tekstura zgniotu, charakteryzująca się zgodnością kierunku krystalograficznego z kierunkiem deformacji [76, 131, 134]. Co więcej, nagniatanie może prowadzić do zachodzenia przemian fazowych. W przypadku stali mających strukturę matrenzytyczną może nastąpić rozpad austenitu szczątkowego. Pod wpływem nagniatania może dochodzić również do wydzielania węglików [96].

2.4. Wpływ nagniatania dynamicznego na właściwości użytkowe obrabianych przedmiotów

Trwałość i niezawodność elementów w znacznym stopniu uzależniona jest od stanu warstwy wierzchniej. W warstwie wierzchniej rozwijają się różne procesy niszczące, takie jak zmęczenie, ścieranie, korozja, erozja itd. Proces nagniatania dynamicznego, wpływając na stan warstwy wierzchniej, oddziałuje więc na szereg właściwości użytkowych obrabianych przedmiotów [76].

Najczęściej operacja nagniatania dynamicznego przeprowadzana jest w celu zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej. Główną przyczyną wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej przedmiotów poddanych nagniataniu dynamicznemu jest wprowadzenie do ich warstwy wierzchniej ściskających naprężeń własnych, które redukują naprężenia rozciągające pochodzące od obciążenia zewnętrznego. Na wytrzymałość zmęczeniową korzystnie wpływa także wzrost twardości warstwy wierzchniej, następujący w wyniku

nagniatania dynamicznego oraz zmniejszenie chropowatości powierzchni, możliwe przy odpowiednim doborze parametrów technologicznych obróbki nagniataniem [115, 134]. Mikrogeometria powierzchni utworzona w następstwie nagniatania, charakteryzuje się małymi kątami pochylenia boków nierówności i dużymi promieniami wgłębień, co przekłada się na występowanie mniejszego karbu geometrycznego, niż w przypadku powierzchni utworzonej w wyniku obróbki ścierniej bądź wiórowej [76].

Pozytywny wpływ kulkowania na właściwości zmęczeniowe wykazali m.in. autorzy pracy [140]. Zgodnie z wynikami przeprowadzonych przez nich badań, kulkowanie znacznie zwiększa trwałość zmęczeniową stopu GH4169 w temperaturze badania wynoszącej 20°C i 350°C. Skuteczność kulkowania w przypadku, gdy temperatura badania wynosi 650°C jest mniejsza. Autorzy badań zauważają również, że w przypadku próbek poddanych kulkowaniu występuje znacznie mniej źródeł pęknięć niż w przypadku próbek niekulkowanych. W pracy [7] wykazano, że kulkowanie próbek ze stali X80 zwiększa ich odporność na inicjację pęknięć, co z kolei prowadzi do wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na kruchość wodorową. Analizy dotyczące wpływu kulkowania na właściwości zmęczeniowe stopu aluminium 2024-T351, przedstawione w [97] dowodzą, że zwiększanie trwałości tego stopu możliwe jest m.in. poprzez zmniejszenie tempa wzrostu pęknięć w następstwie nagniatania. Autorka pracy [19] udowodniła przydatność pneumokulkowania do zwiększania wytrzymałości na zmęczenie stali 51CrV4, X5CrNi18-10 oraz 30HGSA, które są stosowane na sita przesiewaczy. Proces pneumokulkowania okazał się najefektywniejszy w przypadku stali 30HGSA (3,7% wzrost wytrzymałości zmęczeniowej). W pracy [133] zbadano wpływ kontrolowanego dynamicznego nagniatania rozproszonego oraz kulkowania wibracyjnego na trwałość zmęczeniową elementów ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. Zgodnie z wynikami badań, trwałość zmęczeniowa próbek poddanych nagniataniu dynamicznemu rozproszonemu zwiększyła się w zależności od parametrów nagniatania o 124% do 406%, w stosunku do próbek szlifowanych. Dowiedziono, że w przyjętym w badaniach zakresie parametrów wejściowych, energia zderzenia miała większy wpływ na trwałość zmęczeniową, niż gęstość uderzeń narzędzia nagniatającego. W przypadku próbek poddanych kulkowaniu wibracyjnemu zaobserwowano wzrost trwałości zmęczeniowej o 103% do 283%. W innych badaniach dowiedziono pozytywny wpływ kulkowania m.in. na wytrzymałość zmęczeniową kompozytów SiC_w/Al [47] czy elementów z powłokami chromowymi [31].

Nagniatanie dynamiczne może być stosowane także do zwiększania wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych. Wzrost trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych poddanych pneumokulkowaniu wynika głównie z umocnienia powierzchni przez zgmiot, co przekłada się na poprawę odporności na zarodkowanie pęknięć, a także z wprowadzenia ściskających naprężeń szczątkowych, które mogą opóźnić etap propagacji pęknięć [116].

W pracy [16] wykazano pozytywny wpływ kulkowania na wytrzymałość zmęczeniową połączeń ze stali nierdzewnej 304L, wykonanych w procesie spawania nietopliwą elektrodą wolframową (metoda TIG). Wytrzymałość zmęczeniowa połączeń wzrosła w następstwie kulkowania z 94,5 MPa do 96 MPa (kulkowanie przez 5 min) lub 119 MPa (kulkowanie przez 7 min). Inne badania [116] dowiodły, że kulkowanie może być stosowane do poprawy trwałości zmęczeniowej złączy T wykonanych z płyt ze stopu Al 5083 H11 spawanych elektrodą topliwą (metoda MIG).

Nagniatanie dynamiczne wykorzystuje się również do zwiększania odporności na zużycie tribologiczne. Zużycie tribologiczne jest to zużycie wywołane procesami tarcia (tarcie suchym lub mieszanym, niekiedy tarcie płynnym) i przejawia się ubytkiem masy lub trwałym odkształceniem powierzchni. Umocnienie warstwy wierzchniej i wprowadzenie ściskających naprężeń własnych w procesie nagniatania zwiększa odporność na zużywanie współpracujących ze sobą elementów [134]. Do zwiększenia odporności na ścieranie przyczynia się również ukształtowanie w procesie nagniatania korzystnej mikrogeometrii warstwy wierzchniej, charakteryzującej się łagodnymi kształtami, bez ostrych wgłębień i występów oraz zwiększoną nośnością. Co więcej, w skutek nagniatania, włókna metalu deformowane są w określonym kierunku, a nie przecinane jak w procesie skrawania, co również wpływa na zwiększenie odporności na ścieranie [76].

Korzystny wpływ nagniatania na odporność na zużycie tribologiczne udowodniono w licznych badaniach. Autorzy pracy [9] zbadali wpływ kulkowania na właściwości tribologiczne stopu Ti6Al4V. Parametrami zmiennymi w procesie obróbki był czas kulkowania wynoszący 5 min i 15 min oraz średnica kulek mieszcząca się w przedziałach od 0,09 do 0,14 mm oraz od 0,7 do 1,0 mm. W wyniku obróbki, współczynnik tarcia zmniejszył się o maksymalnie 12%. Polepszenie właściwości tribologicznych na skutek kulkowania badacze wiązali m.in. z 35% wzrostem twardości powierzchni próbek kulkowanych z porównaniu z próbkami niepoddanymi obróbce. W pracy [130] przeanalizowano wpływ różnych stopni pokrycia śladami po kulkowaniu

na właściwości tribologiczne stali 20CrMnTi stosowanej m.in. w przekładniach. Wykazano, że średnia objętość zużycia próbek poddanych kulkowaniu z pokryciem wynoszącym 1000% może zostać zmniejszona o 52,26%, a współczynnik tarcia o 7,69%. Zauważono również, że zwiększenie pokrycia śladami po obróbce może wpływać na mechanizm zużycia (wraz ze zwiększaniem pokrycia mechanizm zużycia zmienia się od adhezyjnego do ściernego). Zwiększenie odporności na zużycie i zmniejszenie współczynnika tarcia w następstwie pneumokulkowania wykazano również m.in. w przypadku stali 17Cr2Ni2MoVNb [137], stali AISI 1020 [25], czy stali S30432 [136].

Nagniatanie dynamiczne wpływa również na odporność na korozję. Korozja, czyli proces stopniowego niszczenia materiału może być wywołany działaniem środowiska chemicznego, przepływem prądu elektrycznego (na skutek zetknięcia się powierzchni metalu lub stopu metalu z roztworami wodnymi), naprężeniami powstałymi wskutek zewnętrznych obciążeń mechanicznych, naprężeniami wywołanymi obciążeniami zmiennymi, czy ścieraniem przez inne ciało cierne. Wpływ nagniatania na odporność na korozję zależy od stanu powierzchni po nagniataniu oraz od zgniotu warstwy wierzchniej przedmiotów obrabianych i może być zarówno pozytywny, jak i negatywny [98]. Niejednoznaczny wpływ kulkowania na odporność na korozję wynika z tego, że o podatności na korozję decyduje m.in. chropowatość powierzchni. Wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni zwiększa się rzeczywista powierzchnia styku korodującego elementu, a tym samym odporność na korozję maleje [42]. Nagniatanie dynamiczne, w zależności od warunków technologicznych może albo zwiększać, albo zmniejszać chropowatość powierzchni. Innym czynnikiem, który wpływa na odporność na korozję są wady powierzchniowe. Nagniatanie dynamiczne pozwala na zmniejszenie lub całkowite usunięcie wad powierzchniowych takich jak mikropęknięcia, czy rysy. Niemniej jednak, nieodpowiednie dobranie parametrów obróbki może spowodować łuszczenie materiału lub powstanie mikropęknięć. Nagniatanie dynamiczne wywołuje także zgniot warstwy wierzchniej, który jest uważany za niekorzystny z punktu widzenia odporności na korozję [134]. Zgniot warstwy wierzchniej zwiększa jej dyfuzyjną przenikalność i poziom energetyczny, co prowadzi do intensyfikacji korozji [76].

Pozytywny wpływ nagniatania dynamicznego na odporność na korozję wykazano w pracy [129]. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wysokoenergetyczne kulkowanie stali nierdzewnej 1Cr18Ni9Ti może prowadzić do

nanokrystalizacji powierzchni i w efekcie do wzrostu odporności na korozję w roztworze zawierającym jony chloru. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w pracy [10] odporność na korozję może zależeć od czasu kulkowania. Obróbka z krótkim czasem kulkowania może przyczynić się do pogorszenia odporności na korozję wżerową stali nierdzewnej 316L. Natomiast wydłużanie czasu kulkowania może poprawiać odporność na wżery.

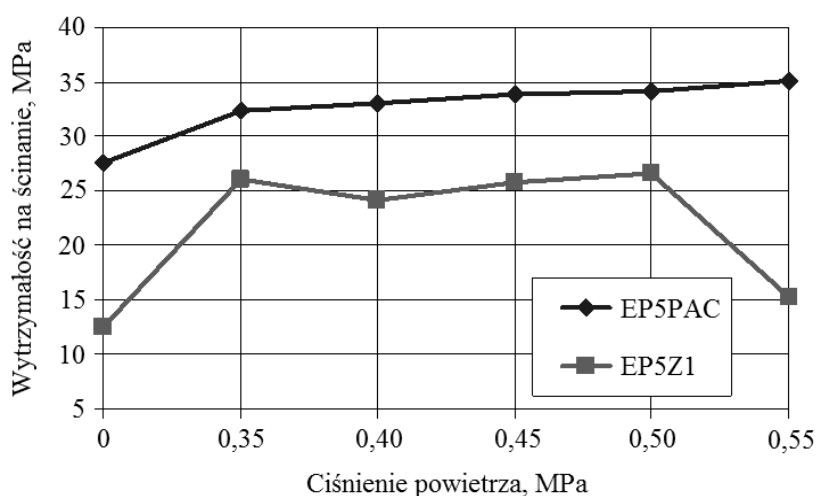
Podsumowując, wyniki analiz prowadzonych przez różne ośrodki badawcze dowodzą, że nagniatanie dynamiczne może być z powodzeniem stosowane do polepszania właściwości użytkowych, takich jak wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa, odporność na zużycie tribologiczne oraz odporność na korozję. Oprócz tego nagniatanie dynamiczne może być stosowane m.in. w celu poprawy właściwości adhezyjnych powierzchni, zapobieganiu mikropęknięciom szlifierskim, polepszeniu sztywności połączeń stykowych, poprawieniu szczelności odlewów, zwiększeniu trwałości ostrzy narzędzi skrawających, czy uzyskaniu efektów dekoracyjnych na powierzchni przedmiotów obrabianych [76, 132, 134,].

2.5. Wpływ pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych

Pneumokulkowanie strefy zakładki jest jednym ze sposobów zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych zakładkowych. Pozytywny wpływ pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych ze stali S235JR oraz stopu tytanu Ti6Al4V został dowiedziony między innymi w pracach [59, 141, 142, 144, 148, 150-153, 155].

W. Zielecki [142] badał wpływ pneumokulkowania na wytrzymałość połączeń klejowych zakładkowych ze stali S235JR (St3S). Połączenia klejowe zostały wykonane z użyciem kompozycji Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (kompozycja EP5Z1 dająca spoinę sztywną) oraz kompozycji Epidian 5 z utwardzaczem PAC (kompozycja EP5PAC dająca spoinę elastyczną). W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych charakteryzujących się spoiną elastyczną zwiększyła się o 17-27% (przed pneumokulkowaniem 27,5 MPa, po pneumokulkowaniu 32,4-35,1 MPa), a zwiększenie wytrzymałości na ścinanie było proporcjonalne do wzrostu ciśnienia sprężonego powietrza. W przypadku połączeń ze spoiną sztywną zaobserwowano natomiast, że w wyniku pneumokulkowania wytrzymałość na ścinanie zwiększyła się o 93-112% (przed pneumokulkowaniem

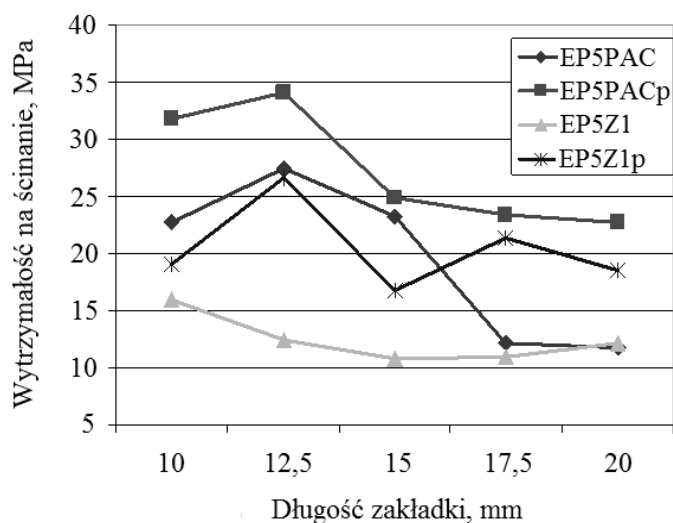
12,5 MPa, po pneumokulkowaniu 24,2-26,6 MPa). Zauważono dodatkowo, że w przypadku połączeń ze spoiną sztywną, zastosowanie ciśnienia sprężonego powietrza rzędu 0,55 MPa, spowodowało, że efektywność nagniatania gwałtownie spadła. Zjawisko to tłumaczono możliwością uszkodzenia więzi kohezyjnych lub adhezyjnych w wyniku odkształcenia zakładek, wywołanego naprężeniami ukonstytuowanymi podczas pneumokulkowania. Wykres przedstawiający wpływ ciśnienia sprężonego powietrza na wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejonych kompozycją klejową Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (EP5Z1) oraz kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (EP5PAC) przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Wpływ ciśnienia sprężonego powietrza na wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejonych kompozycją klejową Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (EP5Z1) oraz kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (EP5PAC) [142]

W ramach badań przeanalizowano również wpływ pneumokulkowania i długości zakładki na wytrzymałość połączeń klejowych. Wyniki analiz wykazały, że największą wytrzymałość uzyskały połączenia z zakładką o długości 12,5 mm. W efekcie zwiększania długości zakładki, wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC, zmniejszyła się o 6-57%, natomiast wytrzymałość połączeń sklejonych kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem Z1 zmniejszyła się o 22–32%. Stwierdzono, że pogorszenie wytrzymałości mogło być spowodowane zmianą sztywności w wyniku zwiększenia długości zakładki. Zauważono również, że największą efektywność pneumokulkowania strefy zakładki uzyskano w przypadku najdłuższych zakładek (zakładek o długości 17,5 mm oraz 20 mm). Wykres przedstawiający wpływ pneumokulkowania i długości zakładki na wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejonych kompozycją klejową Epidian 5

z utwardzaczem Z1 (EP5Z1) oraz kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (EP5PAC) przedstawiono na rysunku 2.7.



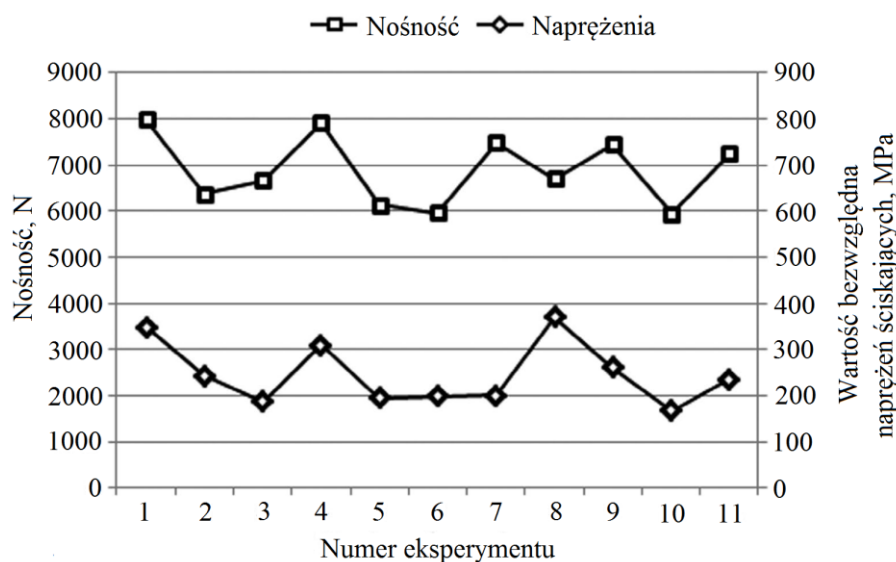
Rys. 2.7. Wpływ długości zakładki oraz pneumokulkowania na wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejenych kompozycją klejową Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (EP5Z1) oraz kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (EP5PAC) [142]

Autorzy pracy [150] zbadali wpływ pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych zakładkowych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Proces pneumokulkowania przeprowadzono z wykorzystaniem kulek stalowych o średnicy 1,5 mm. Ciśnienie sprężonego powietrza wynosiło 0,6 MPa. Czas obróbki zmieniał się w zakresie od 10 do 30 s. Wykazano, że w wyniku pneumokulkowania nośność połączeń zwiększyła się ze 5970 N do 8480-9726 N. Co więcej, zauważono, że nośność połączeń zwiększała się wraz z wydłużaniem czasu obróbki.

Przedmiotem pracy [151] była ocena wpływu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych zakładkowych ze stopu tytanu Ti6Al4V. Zmiennymi parametrami obróbki były: ciśnienie sprężonego powietrza (0,2 MPa do 0,4 MPa), średnica stalowych kulek (od 1,5 mm do 2,5 mm) oraz czas obróbki (od 60 s do 180 s). W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że nośność połączeń klejowych zwiększyła się w następstwie pneumokulkowania o 23,97-51,93%. Największy wzrost nośności zaobserwowano w przypadku połączeń pneumokulkowanych kulkami o średnicy 1,5 mm, z ciśnieniem 0,2 MPa w czasie 180 s. Kontynuację opisanych badań przedstawiono w pracy [152], w której zamieszczono model matematyczny opisujący wpływ wejściowych parametrów obróbki (średnicy kulek, ciśnienia sprężonego powietrza i czasu kulkowania) na czynnik wynikowy, czyli nośność połączeń klejowych. Zgodnie z uzyskanym modelem, zwiększanie nośności połączeń poddanych

pneumokulkowaniu następowało wraz ze zwiększaniem ciśnienia sprężonego powietrza oraz czasu kulkowania.

W pracy [59] przeanalizowano związek pomiędzy nośnością połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu tytanu Ti6Al4V poddanych pneumokulkowaniu i naprężeniami ukonstytuowanymi w wyniku przeprowadzenia tego procesu. Parametrami wejściowymi pneumokulkowania były: ciśnienie sprężonego powietrza (0,2 MPa do 0,4 MPa), średnica stalowych kulek (od 1,5 mm do 2,5 mm) oraz czas obróbki (od 60 s do 180 s). Naprężenia w warstwie wierzchniej przedmiotów obrabianych zmierzono metodą $\sin^2\psi$ za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego. Wykazano, że w wyniku pneumokulkowania nośność połączeń klejowych zwiększyła się o 18-57% i była skorelowana z naprężeniami w warstwie wierzchniej poddanej kulkowaniu (współczynnik korelacji liniowej wyniósł 0,58) (rys. 2.8).



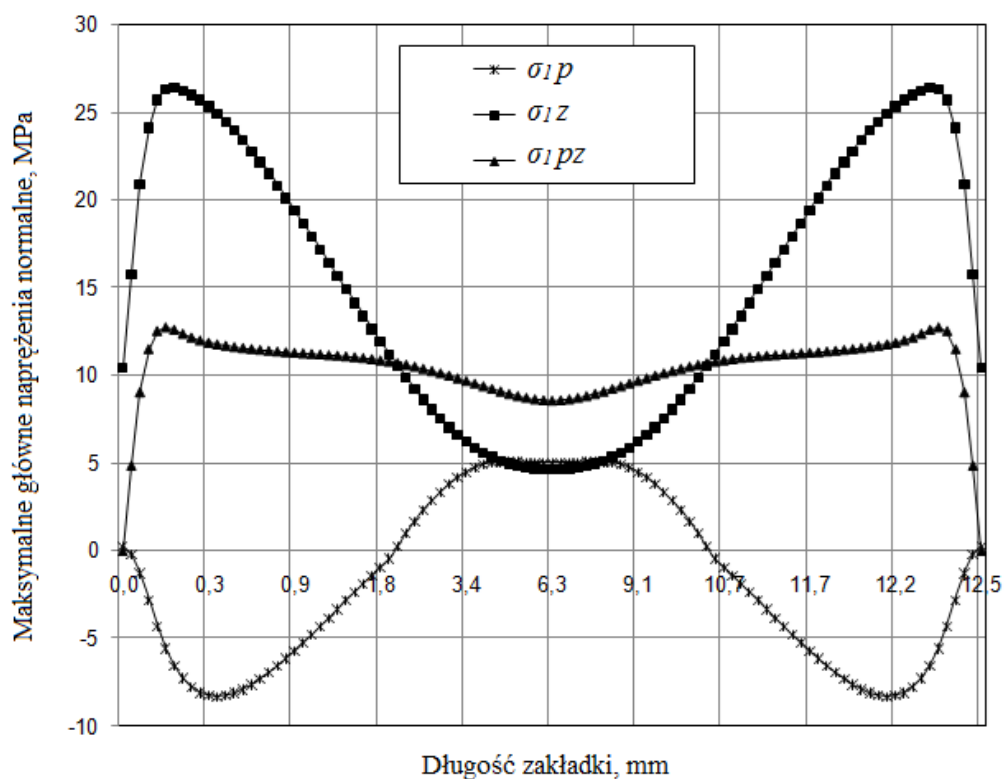
Rys. 2.8. Wartości nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu dla 11 wariantów obróbki oraz odpowiadające tym wariantom wartości bezwzględne naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej po pneumokulkowaniu [59]

Autorzy pracy [144] zbadali wpływ pneumokulkowania na nośność zakładkowych połączeń klejowych ze stopu aluminium 2024. Proces pneumokulkowania przeprowadzono kulkami o średnicy wynoszącej 2 mm lub 2,5 mm, z ciśnieniem sprężonego powietrza rzędu 0,2 MPa, 0,25 MPa lub 0,3 MPa w czasie 60 s, 120 s lub 180 s. Wykazano, że w wyniku pneumokulkowania nośność połączeń klejowych wzrosła o 3,6% do 20,3%.

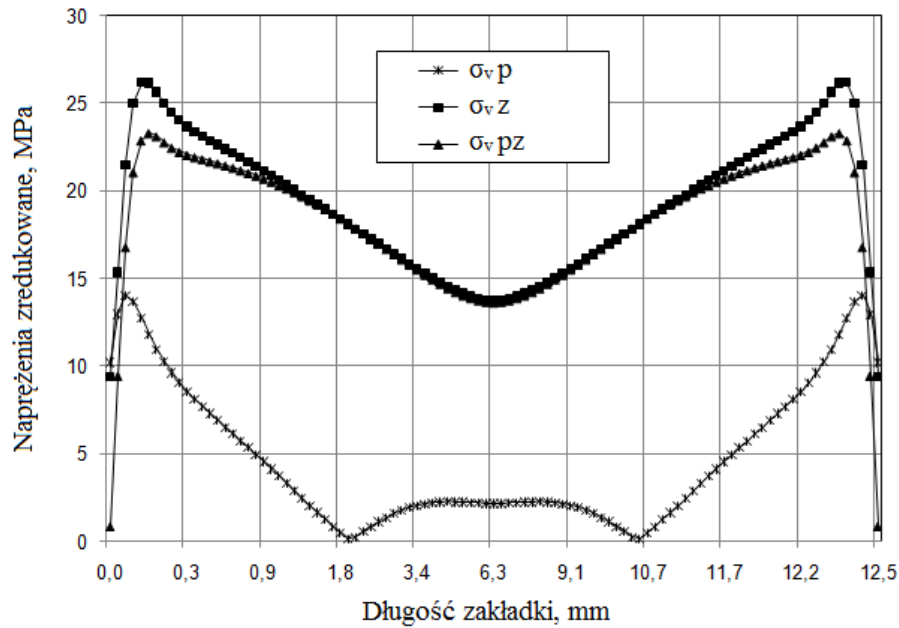
W pracach [142, 148, 153, 154] podjęto próby wyjaśnienia mechanizmu wzrostu wytrzymałości połączeń klejowych w efekcie pneumokulkowania strefy zakładki. W tym celu, za pomocą metody elementów skończonych (MES), przeprowadzono

analizy stanu naprężeń w warstwie środkowej spoiny klejowej w połączeniach klejowych poddanych i niepoddanych pneumokulkowaniu, które pracowały na rozciąganie. W pracy [142] symulacje numeryczne przeprowadzono z użyciem pakietu MSC.Marc + Mentat. W celu zamodelowania efektu rozciągania, połączenia klejowe poddano oddziaływaniu siły rozciągającej wynoszącej 2000 N. Efekt pneumokulkowania zamodelowano natomiast poprzez wprowadzenie ściskających naprężeń własnych o wartości -300 MPa do warstwy wierzchniej na zewnętrznych stronach klejonych elementów. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano rozkłady:

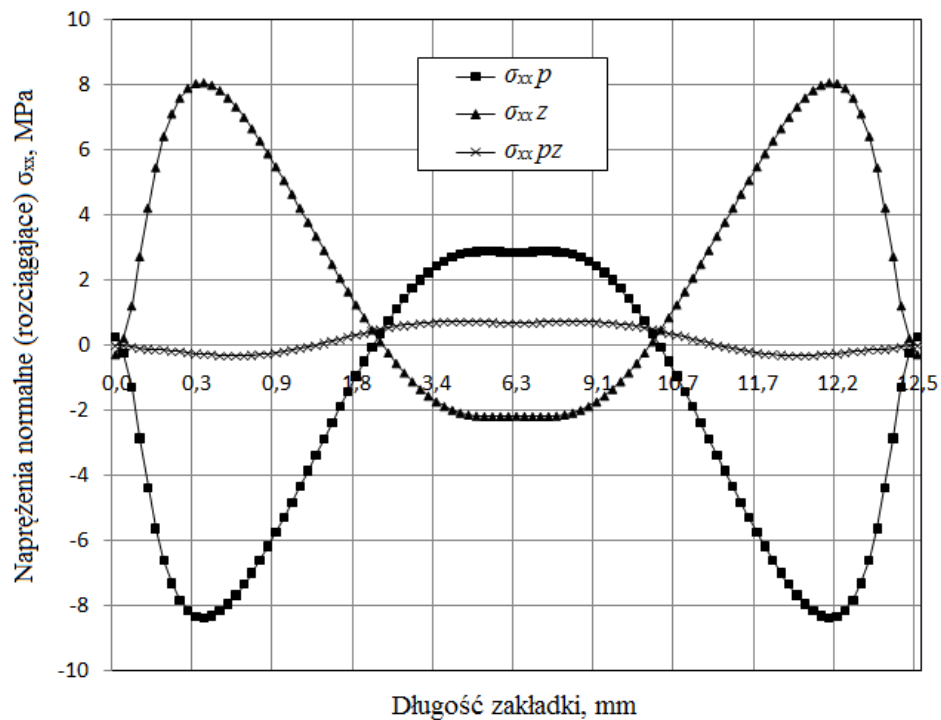
- maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_I (rys. 2.9),
- naprężeń zredukowanych Hubera, von Missesa σ_v (rys. 2.10),
- naprężeń normalnych σ_{xx} w kierunku osi x (naprężeń rozciągających) (rys. 2.11),
- naprężeń normalnych σ_{yy} w kierunku osi y (naprężeń oddzierających) (rys. 2.12),
- naprężeń tnących (stycznych) τ_{xy} (rys. 2.13).



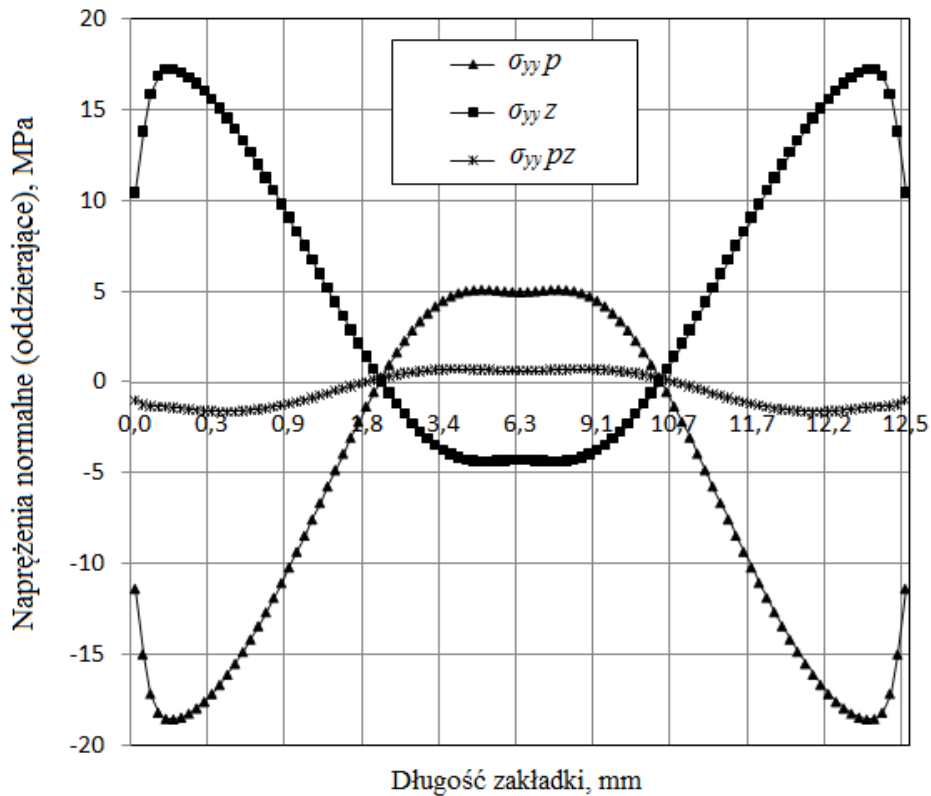
Rys. 2.9. Rozkład maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_I w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: σ_{Ip} – poddanych pneumokulkowaniu, σ_{Iz} – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, σ_{Ipz} – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N [142]



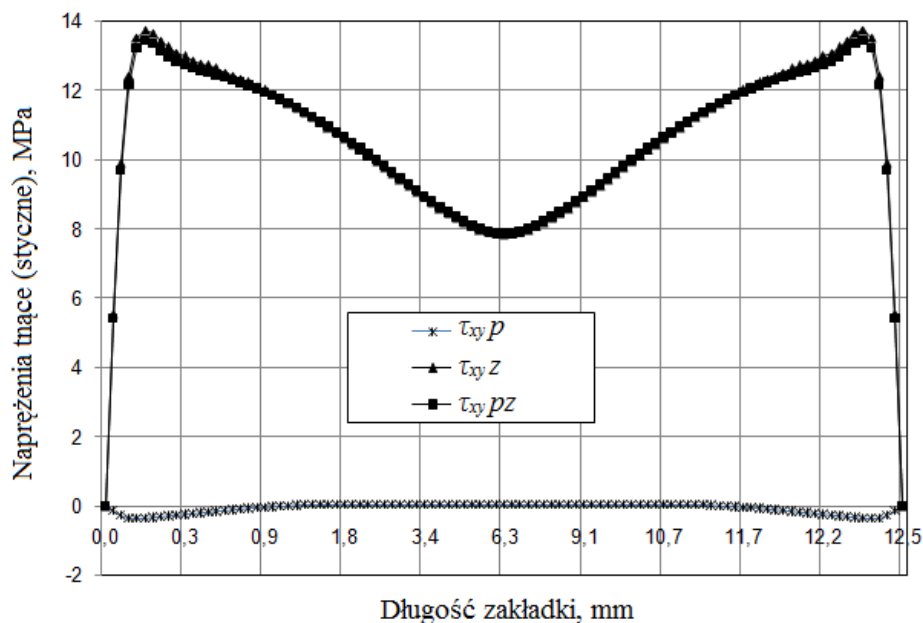
Rys. 2.10. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera, von Missesa σ_v w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_v p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_v z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_v pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N [142]



Rys. 2.11. Rozkład naprężeń normalnych σ_{xx} w kierunku osi x (naprężeń rozciągających) w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_{xx} p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_{xx} z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_{xx} pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N [142]



Rys. 2.12. Rozkład naprężeń normalnych σ_{yy} w kierunku osi y (naprężeń oddzierających) w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_{yy} p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_{yy} z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_{yy} pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N [142]



Rys. 2.13. Rozkład naprężeń tnących (stycznych) τ_{xy} w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\tau_{xy} p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\tau_{xy} z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\tau_{xy} pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N [142]

Rozkłady naprężeń przedstawione na rysunkach 2.9-2.13 wskazują, że przyłożenie obciążenia zewnętrznego w postaci siły rozciągającej sprawia, że naprężenia w strefie

przykrawędziowej spoiny klejowej przyjmują wartości dodatnie. Pneumokulkowanie połączeń klejowych powoduje natomiast, że w strefie przykrawędziowej konstytuowany jest stan naprężeń, w którym maksymalne główne naprężenia normalne σ_I , naprężenia normalne rozciągające σ_{xx} i naprężenia normalne oddzierające σ_{yy} przyjmują wartości ujemne, a naprężenia tnące (styczne) τ_{xy} wartości bliskie zeru na całej długości spoiny. Przyłożenie obciążenia zewnętrznego do pneumokulkowanych połączeń klejowych sprawia, że naprężenia ukonstytuowane w wyniku pneumokulkowania i naprężenia pochodzące od obciążenia zewnętrznego sumują się, co prowadzi do zmniejszenia wartości maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_I , naprężeń normalnych rozciągających σ_{xx} i naprężeń normalnych oddzierających σ_{yy} . W efekcie, wytrzymałość połączeń klejowych na ścinanie zwiększa się.

2.6. Metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu nagniatania dynamicznego

Proces nagniatania dynamicznego jest szeroko stosowany głównie w przemyśle maszynowym, motoryzacyjnym i lotniczym. W celu zapewnienia powtarzalności realizacji procesu nagniatania dynamicznego oraz utrzymania wymaganej jakości obrabianych części, stosuje się różne metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu. Wśród tych metod można wymienić między innymi:

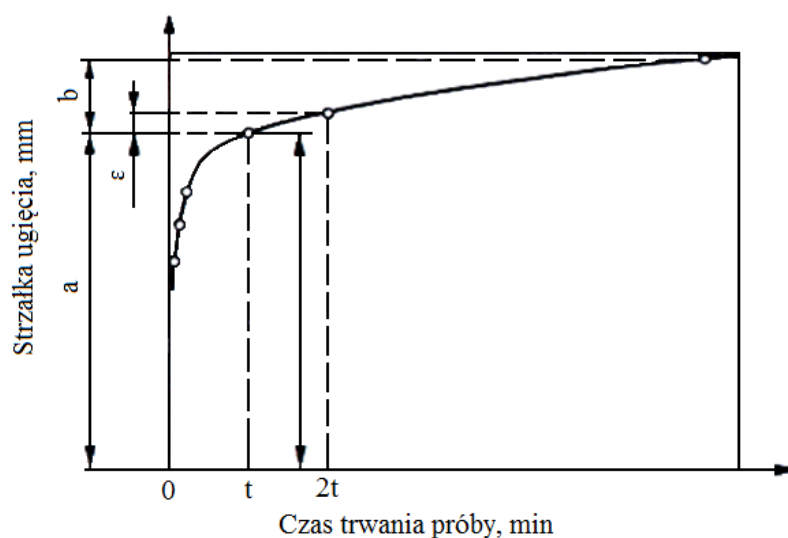
- pomiar intensywności nagniatania dynamicznego,
- ocenę stopnia pokrycia powierzchni śladami powstałymi na skutek uderzeń elementów nagniatających,
- badanie struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu dynamicznym,
- badanie właściwości fizycznych warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych dynamicznie,
- badanie właściwości użytkowych obrabianych przedmiotów [134].

Metodą oceny intensywności nagniatania dynamicznego, w szczególności pneumokulkowania, jest próba Almena. Intensywność nagniatania, wyznaczona za pomocą próby Almena, jest związana z ilością energii kinetycznej przekazywanej ze strumienia elementów nagniatających (w przypadku pneumokulkowania – ze strumienia kulek) do obrabianego przedmiotu [20, 77]. Miarą intensywności nagniatania jest wartość strzałki ugięcia f_A , zmierzona na jednostronnie kulkowanych płytkach kontrolnych, nazywanych płytkami Almena [156]. Płytki Almena wykonane są ze stali sprężynowej. Ich powierzchnie są szlifowane. Długość płytek wynosi 76 mm, natomiast

szerokość 19 mm. Grubość płytek, w zależności od oczekiwanej intensywności nagniatania, może wynosić:

- $0,8 \pm 0,2$ mm – typ N, stosowany dla małej intensywności kulkowania (wartość strzałki ugięcia płytki typu A poniżej 0,15 mm),
- $1,3 \pm 0,2$ mm – typ A, stosowany dla średniej intensywności kulkowania (wartość strzałki ugięcia płytki typu A od 0,15 mm do 0,60 mm),
- $2,4 \pm 0,2$ mm – typ C, stosowany dla wysokiej intensywności kulkowania (wartość strzałki ugięcia płytki typu A powyżej 0,60 mm) [134, 156].

Zgodnie z metodyką próby Almena, płytki kontrolne mocuje się w specjalnym uchwycie i nagniatą jednostronnie razem z przedmiotem obrabianym. Pod wpływem obróbki, w warstwie wierzchniej płytek konstituowane są naprężenia własne, powodujące ich odkształcenie (wyginanie końców płytek w stronę przeciwną do kierunku obróbki). Ugięcie płytek, mierzone jest za pomocą miernika ugięcia płytek Almena. Podając wynik pomiaru intensywności wskazuje się zmierzoną wartość strzałki ugięcia f_A oraz typ zastosowanej płytki [43, 134]. Chcąc ustalić optymalną intensywność kulkowania, należy wyznaczyć zależność między wartością strzałki ugięcia płytki Almena i czasem obróbki (rys. 2.14).

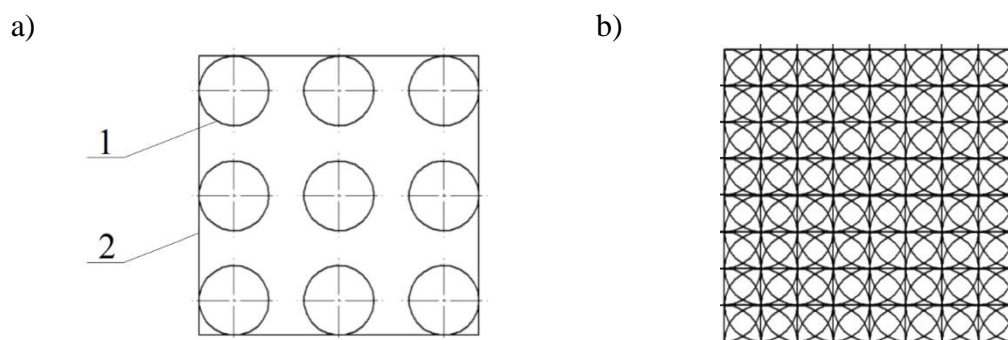


Rys. 2.14. Krzywa intensywności kulkowania: a – strefa, w której następuje szybka zmiana strzałki ugięcia płytki kontrolnej, b - strefa, w której następuje powolna zmiana strzałki ugięcia płytki kontrolnej [156]

Zgodnie z krzywą intensywności kulkowania (rys. 2.14), w początkowej fazie obróbki (strefa a), małym przyrostom czasu odpowiadają duże przyrosty wartości strzałki ugięcia. Późniejsza faza obróbki (strefa b), charakteryzuje się natomiast bardzo małymi

przyrostami wartości strzałki ugięcia. W związku z tym, najlepiej żeby czas kulkowania odpowiadał punktowi A na wykresie [156].

Kolejną metodą kontroli prawidłowości przebiegu procesu nagniatania dynamicznego jest ocena stopnia pokrycia powierzchni obrabianej śladami powstałymi na skutek uderzeń elementów nagniatających [134, 156]. Wymiary i zagęszczenie odcisków jest zależne od warunków technologicznych procesu nagniatania (rys 2.15).



Rys. 2.15. Powierzchnia częściowo pokryta odciskami (a) oraz powierzchnia całkowicie pokryta odciskami (b); 1 – odcisk, 2 – powierzchnia poddana obróbce [134]

W przypadku, gdy odciski są jednakowe, wówczas stopień pokrycia odciskami powierzchni obrabianej można obliczyć ze wzoru (2.1):

$$K_0 = 100Aj, \quad (2.1)$$

gdzie: K_0 – stopień pokrycia odciskami wyrażony w %, A – pole rzutu odcisku na obrabianą powierzchnię, j – liczba odcisków (uderzeń) przypadająca na jednostkę obrabianej powierzchni. Metoda polegająca na ocenie stopnia pokrycia powierzchni obrabianej odciskami sprawdza się w przypadku nagniatania skoncentrowanego, ponieważ na podstawie parametrów takiej obróbki można wyznaczyć liczbę uderzeń przypadającą na jednostkę powierzchni, natomiast pole rzutu odcisku na powierzchnię można zmierzyć. W przypadku nagniatania rozproszonego (w tym pneumokulkowania), zastosowanie tej metody staje się bardziej problematyczne, ze względu na nierównomierne rozmieszczenie odcisków na powierzchni obrabianej oraz różne pola rzutu odcisków [134].

Inną metodą kontroli prawidłowości przebiegu procesu nagniatania jest analiza struktury geometrycznej powierzchni po obróbce. Do pomiarów struktury geometrycznej po nagniataniu dynamicznym stosowane są metody stykowe i bezstykowe. Metody stykowe mogą powodować powstawanie odkształceń sprężystych i plastycznych materiału na skutek nacisku wywieranego przez końcówkę pomiarową

oraz zarysowań powierzchni przez przesuwające się ostrze odwzorowujące. Niemniej jednak, wspomniane wady metody stykowej nie mają znaczenia w przypadku powierzchni po obróbce dynamicznej, ponieważ obróbce takiej poddawane są zwykle materiały charakteryzujące się niemałą twardością, która dodatkowo jest zwiększana pod wpływem nagniatania, powodującego umocnienie warstwy wierzchniej. Do oceny stanu powierzchni po nagniataniu dynamicznym najczęściej stosuje się parametr Rz (największa wysokość profilu chropowatości) oraz Ra (średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości). Spłaszczenie wierzchołków mikronierówności nagniatanej powierzchni można ocenić za pomocą parametru Rsk (współczynnik asymetrii profilu chropowatości). Ujemne wartości parametru Rsk świadczą o płaskich wierzchołkach mikronierówności i wąskich wgłębieniach, co jest korzystne w przypadku elementów narażonych na obciążenia stykowe. Do oceny zmiany kształtu mikronierówności na skutek nagniatania, można wykorzystywać również parametr RAq (średni kwadratowy wznios profilu chropowatości). W przypadku badań przestrzennych, do oceny parametrów chropowatości powierzchni po nagniataniu wykorzystuje się najczęściej parametry: Sq (średnie kwadratowe odchylenie powierzchni), Ssk (współczynnik skośności powierzchni), Sku (współczynnik nachylenia powierzchni) oraz SAq (średnie kwadratowe pochylenie powierzchni) [134].

Prawidłowość przebiegu procesu nagniatania dynamicznego można kontrolować również badając właściwości fizyczne warstwy wierzchniej takie jak: struktura metalograficzna, mikrotwardość oraz rozkład naprężeń własnych. Strukturę metalograficzną warstwy wierzchniej po nagniataniu bada się najczęściej z wykorzystaniem mikroskopów elektronowych i optycznych. Do pomiarów twardości po nagniataniu stosuje się zwykle metodę Vickersa. Pomiar naprężeń własnych przeprowadza się za pomocą metod niszczących i nieniszczących. Najczęściej stosowaną metodą niszczącą jest metoda mechaniczna. Metoda mechaniczna polega na wyznaczeniu rozkładu naprężeń na podstawie pomiarów odkształceń cienkościennych próbki, z której stopniowo usuwane są kolejne warstewki z warstwy wierzchniej, w której ukonstytuowane zostały naprężenia własne. Najczęściej stosowaną metodą nieniszczącą jest natomiast metoda rentgenowska [134]. Pomiar naprężeń własnych z wykorzystaniem metody rentgenowskiej sprowadza się do precyzyjnego pomiaru dyfraktometrycznych odkształceń sieci krystalograficznej i opiera się o prawo Bragga (2.2):

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta, \quad (2.2)$$

gdzie: n – rząd ugięcia, λ – długość fali padającego promieniowania, d_{hkl} – odległość międzypłaszczyznowa dla płaszczyzn o wskaźnikach Millera hkl , θ – kąt dyfrakcji. Zgodnie z prawem Bregga ugięcie promieni rentgenowskich następuje dla ściśle określonych kątów θ , które są uzależnione od długości fali promieniowania i odległości poszczególnych płaszczyzn. Na skutek zmiany odległości płaszczyzn, spowodowanej naprężeniami mechanicznymi, następuje zmiana kątów dyfrakcji stosowanego promieniowania. Jedną z najczęściej stosowanych metod dyfrakcji rentgenowskiej jest metoda $\sin^2\psi$, która polega na pomiarze kąta pomiędzy normalną do płaszczyzny dyfrakcji i normalną do próbki [134, 135].

Efektywność nagniatania dynamicznego można oceniać również w aspekcie właściwości użytkowych obrabianych elementów. Najczęściej ocenianymi właściwościami użytkowymi przedmiotów poddanych nagniataniu dynamicznemu są: wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa, odporność na zużycie tribologiczne oraz odporność na korozję [134].

3. Ocena stanu zagadnienia i wnioski

W ramach przeglądu literatury przeanalizowano prace autorów polskich i zagranicznych. Wśród tych prac znalazły się książki, artykuły naukowe, artykuły pokonferencyjne oraz normy. Analizowane prace dotyczyły obszarów związanych z mechanizmem konstituowania połączeń klejowych, metodyką wykonywania połączeń klejowych, wytrzymałością połączeń klejowych, metodami zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych, metodami nagniatania, wpływem nagniatania dynamicznego na właściwości fizyczne i użytkowe obrabianych elementów oraz metodami kontrolowania prawidłowości przebiegu procesu nagniatania dynamicznego. Analiza prac umożliwiła zapoznanie się z problematyką klejenia i nagniatania dynamicznego, wykazała istnienie luk badawczych i pozwoliła na sformułowanie celu pracy, hipotezy badawczej oraz przyjęcie założeń do badań.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury sformułowano następujące wnioski:

- połączenia klejowe są zdolne do przenoszenia największych obciążeń wówczas, są obciążone na ścinanie,
- rozkład naprężeń stycznych w spoinach klejowych połączeń zakładkowych obciążonych na ścinanie nie jest równomierny (maksymalne naprężenia występują na końcach zakładek),
- zerwanie połączenia klejowego zaczyna się w punkcie, w którym naprężenia są największe, co oznacza, że zmniejszanie koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej jest jednym ze sposobów zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych,
- stopień koncentracji naprężeń w strefie przykrawędziowej zakładkowych połączeń klejowych można zmniejszać między innymi poprzez odpowiedni dobór rodzaju kleju, grubości spoiny i długości zakładki, nieusuwanie wypływkę kleju, wykonanie promienia w strefie przykrawędziowej zakładki, zwężanie końców zakładki, tworzenie stopni w obszarze zakładki, wykonanie podcięcia wzdłuż krawędzi spoiny klejowej, wykonanie otworów w końcowej części zakładki, piaskowanie strefy zakładki oraz pneumokulkowanie strefy zakładki,
- pneumokulkowanie strefy zakładki ma pozytywny wpływ na wytrzymałość połączeń klejowych wykonanych ze stali S235JR oraz stopu tytanu Ti6Al4V,

- na skutek pneumokulkowania strefy zakładki dochodzi do odkształcenia klejonych elementów i dociśnięcia krawędzi zakładki do klejonego materiału, w wyniku czego w spoinie klejowej generowane są ściskające naprężenia własne, które obniżają stopień koncentracji naprężeń pochodzących od obciążenia zewnętrznego, co z kolei prowadzi do wzrostu wytrzymałości połączeń klejowych,
- do zalet pneumokulkowania zalicza się m.in. niskie koszty, brak odpadów w postaci wióra, możliwość zastosowania zarówno w przypadku połączeń klejowych o małych, jak i dużych wymiarach, prostą konstrukcję urządzeń do pneumokulkowania, łatwość regulacji intensywności pneumokulkowania, dużą trwałość kulek pełniących rolę elementów nagniatających, stosowanie zasilania grawitacyjnego (kulki po odbiciu od powierzchni obrabianej opadają do zasobnika zasilającego pod wpływem grawitacji ziemskiej),
- w celu zapewnienia powtarzalności realizacji procesu nagniatania dynamicznego oraz utrzymania wymaganej jakości obrabianych części, stosuje się różne metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu, wśród których można wymienić między innymi pomiar intensywności nagniatania dynamicznego (próba Almena), ocenę stopnia pokrycia powierzchni śladami powstałymi na skutek uderzeń elementów nagniatających, badanie struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu dynamicznym, badanie właściwości fizycznych warstwy wierzchniej przedmiotów nagniatanych dynamicznie oraz badanie właściwości użytkowych obrabianych przedmiotów.

W wyniku analizy literatury wykazano istnienie pewnych luk badawczych.

Stwierdzono, że:

- problem poszukiwania metod umożliwiających zwiększanie nośności połączeń klejowych zakładkowych jest ważny i aktualny,
- metoda zwiększania nośności połączeń klejowych, polegająca na pneumokulkowaniu strefy zakładki, ma duży potencjał i liczne zalety, jednak wciąż jest słabo poznana,
- publikacje, w których udowodniono pozytywny wpływ pneumokulkowania na nośność zakładkowych połączeń klejowych, są fragmentaryczne i dotyczą wyłącznie połączeń klejowych wykonanych ze stali S235JR i stopu tytanu Ti6Al4V,

- opublikowane badania wstępne do niniejszej pracy, dowodzą, że przy odpowiednim doborze parametrów obróbki, pneumokulkowanie strefy zakładki może być stosowane do zwiększania nośności połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,
- dowiedziono związek pomiędzy wytrzymałością na ścinanie i stanem naprężeń w warstwie wierzchniej strefy zakładki połączeń klejowych wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V poddanych pneumokulkowaniu,
- nie zbadano dotychczas, czy istnieje związek między nośnością połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu i intensywnością procesu pneumokulkowania oraz strukturą geometryczną powierzchni po pneumokulkowaniu,
- nie zaproponowano dotychczas metod, które mogłyby posłużyć do przewidywania nośności połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 po pneumokulkowaniu oraz do oceny poprawności obróbki umacniającej, co ułatwiłoby realizację tego procesu w przemyśle.

Wykazane luki badawcze posłużyły do sformułowania celu pracy, hipotezy badawczej oraz przyjęcia założeń do badań.

4. Temat, cel i program badań

Ocena stanu zagadnienia, przeprowadzona w obszarze obejmującym tematykę rozprawy doktorskiej oraz ustalone na jej podstawie wnioski doprowadziły do sformułowania problemu naukowego, jakim jest weryfikacja możliwości zwiększania nośności zakładkowych połączeń klejowych ze stopów aluminium oraz określenie sposobu przewidywania oraz kontroli efektów obróbki umacniającej.

W celu rozwiązania zidentyfikowanego problemu naukowego postawiono następującą hipotezę badawczą:

Obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, realizowana metodą pneumokulowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność.

Na podstawie sformułowanej hipotezy badawczej wyznaczono następujące cele rozprawy doktorskiej:

- 1) zbadanie wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu pneumokulowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,
- 2) wyjaśnienie mechanizmu wzrostu nośności połączeń klejowych w wyniku pneumokulowania,
- 3) sprawdzenie możliwości wykorzystania różnych metod kontroli procesu pneumokulowania takich jak próba Almena, pomiar chropowatości powierzchni, czy pomiar stanu naprężeń własnych do przewidywania nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulowaniu i oceny poprawności obróbki umacniającej.

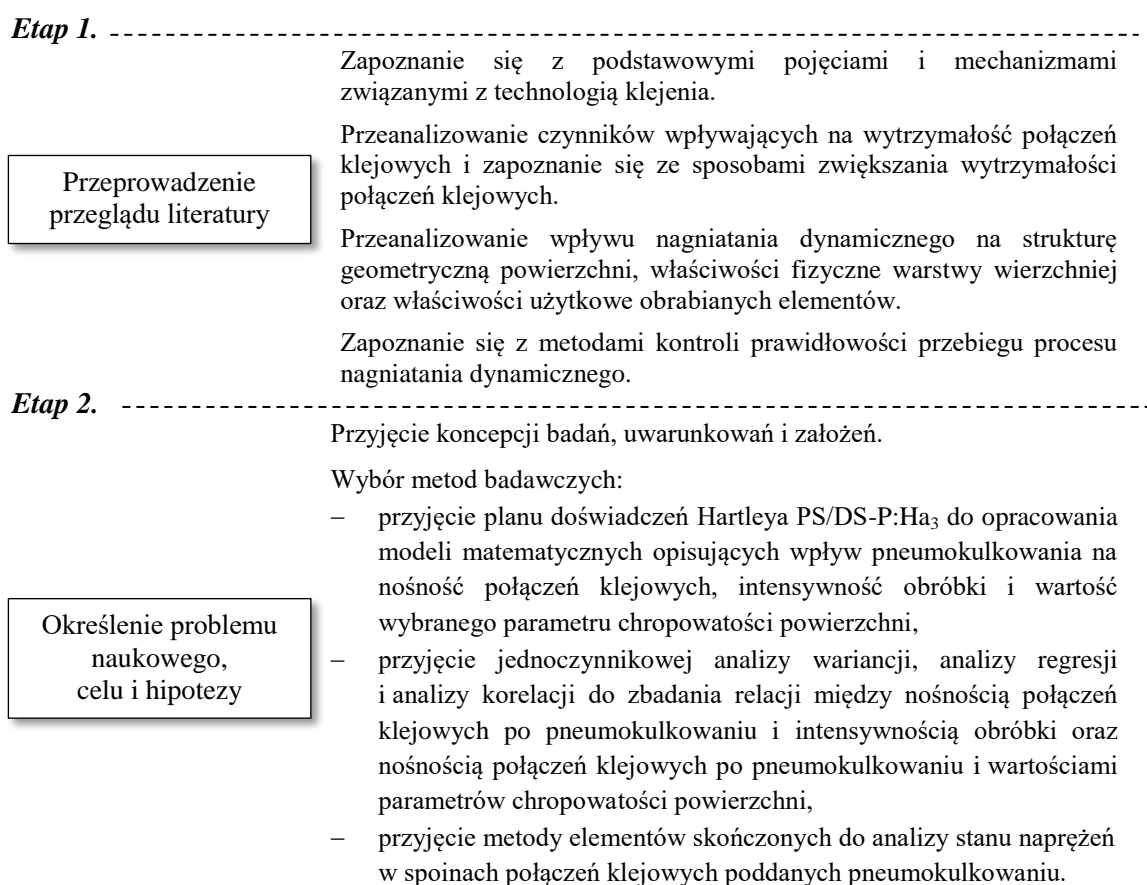
Aby zrealizować wyznaczone cele przyjęto następujący zakres prac:

- 1) doświadczalne zbadanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, chropowatość powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena,
- 2) zbudowanie modeli matematycznych opisujących wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulowania (czasu obróbki, średnicy kulek

i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz wartość naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3,

- 3) zbadanie zależności pomiędzy nośnością połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu, a wartością strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, chropowatością powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu oraz stanem naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu,
- 4) porównanie metodami numerycznymi stanu naprężeń w spoinie klejowej połączeń obciążonych na rozciąganie, które były lub nie były poddane pneumokulkowaniu.

Ogólną koncepcję badań zobrazowano na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Ogólna koncepcja badań [opracowanie własne]

Etap 3. -----

<p>Opracowanie modelu matematycznego opisującego wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3</p>	<p>Wykonanie połączeń klejowych.</p> <p>Poddanie połączeń klejowych procesowi pneumokulkowania z parametrami procesu wynikającymi z matrycy planu Hartleya.</p> <p>Poddanie połączeń klejowych badaniom wytrzymałościowym (próbie jednoosiowego rozciągania).</p> <p>Analiza złomów połączeń klejowych.</p> <p>Przeprowadzenie obliczeń i opracowanie modelu matematycznego zgodnie z metodyką planu Hartleya.</p>
---	--

Etap 4. -----

<p>Opracowanie modelu matematycznego opisującego wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na intensywność obróbki oraz zbadanie relacji między intensywnością obróbki i nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu</p>	<p>Poddanie płytek Almena procesowi pneumokulkowania z parametrami procesu wynikającymi z matrycy planu Hartleya.</p> <p>Pomiar strzałki ugięcia płytek Almena podanych pneumokulkowaniu.</p> <p>Przeprowadzenie obliczeń i opracowanie modelu matematycznego zgodnie z metodyką planu Hartleya.</p> <p>Zbadanie relacji między intensywnością obróbki i nośnością połączeń klejowych zgodnie z metodyką jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), analizy regresji i analizy korelacji.</p>
--	--

Etap 5. -----

<p>Zbadanie relacji między parametrami chropowatości powierzchni i nośnością połączeń klejowych oraz opracowanie modelu matematycznego opisującego wpływ parametrów pneumokulkowania na wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni</p>	<p>Poddanie próbek procesowi pneumokulkowania z parametrami procesu wynikającymi z matrycy planu Hartleya.</p> <p>Pomiar wartości parametrów chropowatości powierzchni w układzie 2D i 3D.</p> <p>Zbadanie relacji między wartościami parametrów chropowatości powierzchni i nośnością połączeń klejowych zgodnie z metodyką jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), analizy regresji i analizy korelacji.</p> <p>Przeprowadzenie obliczeń i opracowanie modeli matematycznych zgodnie z metodyką planu Hartleya.</p>
---	---

Rys. 4.1. Ogólna koncepcja badań (cd.) [opracowanie własne]

Etap 6. -----

<p>Zbadanie relacji między wybranymi parametrami pneumokulkowania i stanem naprężeń własnych oraz relacji między nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu i naprężeniami własnymi w warstwie wierzchniej próbek poddanych pneumokulkowaniu</p>	<p>Poddanie próbek procesowi pneumokulkowania z parametrami procesu wynikającymi z matrycy planu Hartleya.</p> <p>Pomiar stanu naprężeń własnych w próbkach poddanych pneumokulkowaniu z zastosowaniem metody dyfrakcji rentgenowskiej $\sin^2\psi$.</p> <p>Przeprowadzenie obliczeń i opracowanie modelu matematycznego zgodnie z metodyką planu Hartleya.</p> <p>Porównanie wartości nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu z wartościami naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek poddanych pneumokulkowaniu.</p>
---	--

Etap 7. -----

<p>Określenie wpływu pneumokulkowania, długości zakładki oraz długości strefy pneumokulkowania na stan naprężeń w spoinie klejowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych</p>	<p>Zbudowanie modelu w oprogramowaniu Ansys 16.2.</p> <p>Przeprowadzenie obliczeń numerycznych.</p> <p>Sformułowanie spostrzeżeń i wniosków dotyczących mechanizmu umocnienia połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania.</p>
--	---

Etap 8. -----

<p>Sformułowanie wniosków</p>	<p>Sformułowanie wniosków użytkowych i naukowych.</p> <p>Sformułowanie propozycji rozwoju problematyki badawczej.</p>
-------------------------------	---

Rys. 4.1. Ogólna koncepcja badań (cd.) [opracowanie własne]

Nowatorstwem jest opracowanie modelu matematycznego przedstawiającego wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz zaproponowanie metody umożliwiającej przewidywanie oraz kontrolę efektów obróbki umacniającej.

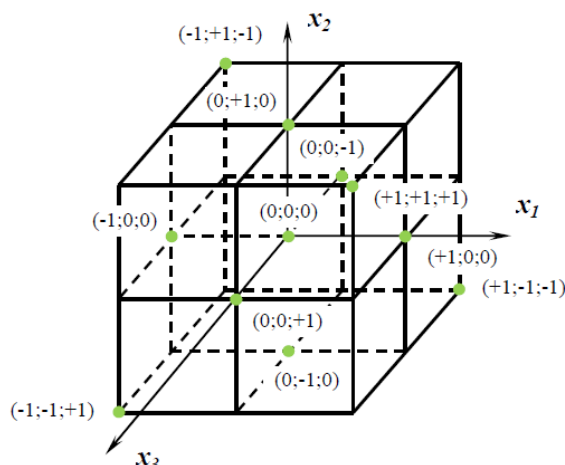
5. Metodyka badań

5.1. Metodyka planu doświadczeń Hartleya

W niniejszej pracy, dążono do uzyskania modeli matematycznych opisujących wpływ czynników wejściowych (parametrów pneumokulkowania) na czynnik wynikowy (m.in. nośność połączeń klejowych). Modele matematyczne uzyskano metodą eksperymentu czynnego (planowanego), polegającego na prowadzeniu badań dla założonej zmienności czynników wejściowych. Ocenę istotności wpływu parametrów procesu na jego efekty oraz opracowanie modeli matematycznych zrealizowano zgodnie z planem Hartleya PS/DS-P:Ha_k (plan statyczny, zdeterminowany, sekwencyjny, poliselekcyjny, dla k czynników wejściowych). Badania przeprowadzono dla trzech czynników wejściowych ($k=3$).

Plan Hartleya PS/DS-P:Ha_k charakteryzuje się dużą efektywnością i prostotą, przez co jest szeroko stosowany w dziedzinie technologii maszyn. W praktyce najczęściej wykorzystuje się go przy czterech lub pięciu czynnikach wejściowych, ale nadaje się on również do prowadzenia doświadczeń dla trzech czynników wejściowych. W porównaniu z planem kompletnym trójpoziomowym, charakteryzuje się on mniejszą pracochłonnością oraz liczbą punktów pomiarowych i wariantów. Metodyka prowadzenia doświadczeń według planu Hartleya jest szczegółowo opisana w [62].

Zgodnie z planem Hartleya PS/DS-P:Ha_k, czynniki wejściowe przyjmują wartości na trzech równo odległych od siebie poziomach zmienności: wyższym (+1), średnim (0) i niższym (-1). W skład planu wchodzi trzy bloki doświadczeń: powtórzenie ułamkowe typu PS/DK 2 n (plan statyczny, zdeterminowany, kompletny, typu dwa do n -tej, gdzie n oznacza liczbę czynników wejściowych), doświadczenia w punktach gwiazdnych oraz doświadczenie w punkcie centralnym. Graficzną interpretację planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ dla trzech czynników wejściowych: x_1 , x_2 , x_3 przedstawiono na rysunku 5.1, natomiast matrycę planu w tabeli 5.1.



Rys. 5.1. Schemat realizacji doświadczeń prowadzonych zgodnie z planem Hartleya PS/DS-P:Ha₃ [60]

Tabela 5.1. Matryca planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ [62]

Lp.	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	-1	0	0	+1	0	0	0	0	0
6	+1	0	0	+1	0	0	0	0	0
7	0	-1	0	0	+1	0	0	0	0
8	0	+1	0	0	+1	0	0	0	0
9	0	0	-1	0	0	+1	0	0	0
10	0	0	+1	0	0	+1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zgodnie z metodyką planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃, czynniki wejściowe przyjęte w doświadczeniu podlegają wstępnemu zakodowaniu. W tym celu, najpierw obliczane są wartości centralne (wartości czynników wejściowych na poziomie 0) według wzoru (5.1):

$$\hat{x}_{k0} = \frac{\hat{x}_{k \text{ maks}} + \hat{x}_{k \text{ min}}}{2}, \quad (5.1)$$

gdzie: \hat{x}_{k0} – wartość centralna k -tego czynnika wejściowego, $\hat{x}_{k \text{ maks}}$ – wartość maksymalna k -tego czynnika wejściowego, $\hat{x}_{k \text{ min}}$ – wartość minimalna k -tego czynnika wejściowego.

Następnie określone są jednostki zmienności według wzoru (5.2):

$$\Delta \hat{x}_k = \frac{\hat{x}_{k \text{ maks}} - \hat{x}_{k \text{ min}}}{2}, \quad (5.2)$$

gdzie: $\Delta \hat{x}_k$ – jednostka zmienności k -tego czynnika wejściowego.

Na podstawie obliczonych jednostek centralnych i jednostek zmienności, czynniki wejściowe są kodowane zgodnie ze wzorem (5.3):

$$x_k = \frac{\hat{x}_k - \hat{x}_{k0}}{\Delta \hat{x}_k}, \quad (5.3)$$

gdzie: x_k – zakodowana wartość k -tego czynnika wejściowego, \hat{x}_k – przyjmowana w doświadczeniu wartość k -tego czynnika wejściowego (na poziomie górnym (+), średnim (0) lub dolnym (-)).

Ocenę powtarzalności (stabilności) warunków realizacji doświadczeń przeprowadza się przez porównanie wariancji wyników pomiarów. W tym celu wykorzystuje się kryterium Cochra, którym weryfikuje się hipotezę o powtarzalności wariancji wyników, obliczając empiryczną wartość współczynnika G , a następnie porównując ją z wartością krytyczną G_{kr} . Wartość empiryczną współczynnika G określa się ze wzoru (5.4):

$$G = \frac{S^2(y)_{i maks}}{\sum_{i=1}^N S^2(y)_i}, \quad (5.4)$$

gdzie: $S^2(y)_{i maks}$ – wartość maksymalna wariancji błędów pomiaru w i -tym doświadczeniu, N – całkowita liczba doświadczeń w planie, $S^2(y)_i$ – wartość wariancji błędów pomiaru w i -tym doświadczeniu, obliczana ze wzoru (5.5):

$$S^2(y)_i = \frac{\sum_{u=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{r - 1}, \quad (5.5)$$

gdzie: y_{ui} – wynik u -tego powtórzenia w i -tym doświadczeniu, \bar{y}_i – średnia wyników pomiarów równoległych w i -tym doświadczeniu, r – liczba pomiarów równoległych (powtórzeń).

Wartość krytyczną współczynnika G_{kr} , określa się na podstawie tablicy wartości krytycznych współczynnika G_{kr} statystyki Cochra dostępnej w [62] dla założonego poziomu istotności α ($\alpha = 0,05$) oraz dla określonej liczby stopni swobody f_1 oraz f_2 , którą wyznacza się ze wzorów (5.6-5.7):

$$f_1 = N, \quad (5.6)$$

$$f_2 = r - 1. \quad (5.7)$$

Warunki wykonywania doświadczeń uznaje się za powtarzalne, jeżeli spełniony jest warunek (5.8):

$$G < G_{kr} = G_{(\alpha; f_1; f_2)}. \quad (5.8)$$

W wyniku realizacji doświadczeń zgodnie z planem Hartleya PS/DS-P:Ha₃, uzyskuje się model matematyczny analizowanego procesu, przyjmujący postać wielomianu drugiego stopnia (5.9):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (5.9)$$

gdzie: y – czynnik wynikowy (wielkość mierzona), x_1, x_2, x_3 – zakodowane wartości czynników wejściowych, b_0 – wyraz wolny, b_1, b_2, b_3 – współczynniki regresji, b_{12}, b_{13}, b_{23} – współczynniki regresji obrazujące skutki interakcji czynników wejściowych.

Wartości współczynników regresji wyznacza się z następujących wzorów (5.10-5.13):

$$b_0 = \frac{a}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i - \frac{b}{N} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 \bar{y}_i, \quad (5.10)$$

$$b_k = \frac{1}{(\lambda_2 N)} \sum_{i=1}^N x_{ki} \bar{y}_i, \quad (5.11)$$

$$b_{kk} = \frac{c}{N} \sum_{i=1}^N x_{ki}^2 \bar{y}_i - \frac{b}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i - \frac{d}{N} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 \bar{y}_i, \quad (5.12)$$

$$b_{kj} = \frac{1}{(\lambda_3 N)} \sum_{i=1}^N x_{ki} x_{kj} \bar{y}_i, \quad (5.13)$$

gdzie: $a, b, c, d, \lambda_2 N, \lambda_3 N$ – współczynniki, których wartości określone są w zależności od liczby czynników wejściowych (tab. 5.2), N – całkowita liczba doświadczeń w planie, k – liczba czynników wejściowych.

Tabela 5.2. Wartości współczynników pomocniczych do obliczeń dla planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ [62]

k	$\lambda_2 N$	$\lambda_3 N$	a	b	c	d
3	6	4	3,3481	1,4344	5,5005	0,9568

Wartości wyznaczonych współczynników regresji ocenia się pod względem istotności za pomocą testu t-Studenta. W tym celu oblicza się wariancję błędów pomiaru (5.14):

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^r S^2(y)_i \quad (5.14)$$

oraz liczbę stopni swobody f (5.15):

$$f = N(r - 1). \quad (5.15)$$

Następnie określa się wartość krytyczną współczynnika t (5.16), korzystając z tablic wartości krytycznych współczynnika t_{kr} rozkładu t-Studenta dostępnych w [62]:

$$t_{kr} = t_{(\alpha;f)}, \quad (5.16)$$

Wartość krytyczną współczynnika t wykorzystuje się do obliczenia wartości krytycznej współczynników b_0, b_k, b_{kk} oraz b_{kj} (5.17-5.20):

$$b_{0kr} = t_{kr} \sqrt{\frac{a}{rN} S^2(y)}, \quad (5.17)$$

$$b_{kkkr} = t_{kr} \sqrt{\frac{S^2(y)}{r(\lambda_2 N)}}, \quad (5.18)$$

$$b_{kkkkkr} = t_{kr} \sqrt{\frac{c-d}{rN} S^2(y)}, \quad (5.19)$$

$$b_{kjkkr} = t_{kr} \sqrt{\frac{S^2(y)}{r(\lambda_3 N)}}. \quad (5.20)$$

Współczynnik regresji uznaje się za istotny, jeżeli jego wartość bezwzględna jest większa niż odpowiadająca mu wartość krytyczna. W przeciwnym przypadku współczynnik regresji uznaje się za nieistotny i odrzuca z równania regresji.

Po odrzuceniu z równania regresji współczynników uznanych za nieistotne, równanie podlega odkodowaniu. W tym celu, do równania (5.9) podstawiane są parametry zakodowane według wzoru (5.3). W wyniku podstawienia zakodowanych

parametrów, przeprowadzenia obliczeń i uporządkowania równania, uzyskuje się zależność w postaci rzeczywistej, która ukazuje wpływ czynników wejściowych na czynnik wynikowy.

Opisana metodyka planu doświadczeń Hartleya PS/DS-P:Ha₃ została wykorzystana w ramach prowadzonych badań do wyznaczenia modeli matematycznych opisujących:

- wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3
- wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na intensywność obróbki,
- wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wybrany parametr chropowatości powierzchni stopu aluminium EN AW-2024-T3,
- wpływ wybranych parametrów obróbki na stan naprężeń własnych w warstwie wierzchniej próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3.

Zgodność wartości eksperymentalnych z wartościami teoretycznymi (obliczonymi na podstawie uzyskanych modeli matematycznych) oceniono na podstawie wartości współczynników korelacji liniowej Pearsona, obliczonych ze wzoru (5.21) [62]:

$$r_{y/r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5.21)$$

gdzie: \bar{x} , \bar{y} – odpowiednie średnie arytmetyczne, x_i – kolejne wartości zmiennej wejściowej (niezależnej), y_i – kolejne wartości zmiennej zależnej (wyjściowej). W przypadku, gdy wartości bezwzględne współczynników korelacji liniowej były zbliżone do 1, wówczas uznawano, że istnieje mocna zależność liniowa między wynikami eksperymentalnymi i wynikami uzyskiwanymi z modelu.

5.2. Charakterystyka materiałów

Przedmiotem badań były połączenia klejowe jednozakładkowe. Elementy klejone zostały wycięte z arkuszy blachy walcowanej o grubości 2 mm, wykonanej ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Do badań zastosowano stop aluminium AW-2024 w stanie T3, czyli przesyconym, odkształconym na zimno i starzonym naturalnie [27].

Stop aluminium EN AW-2024-T3 stosowany jest w m.in. w przemyśle lotniczym, samochodowym, maszynowym, obronnym i budowlanym. Z wytwarzanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 półproduktów płaskich (płyt, taśm, blach), prętów, rur ciągnionych, kształtowników oraz półproduktów do wytwarzania urządzeń ciśnieniowych produkuje się elementy charakteryzujące się dużą wytrzymałością

i odpornością na podwyższoną temperaturę (do około 120°C) [27]. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW-2024-T3 przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW-2024-T3 [85]

Skład chemiczny, stężenie masowe pierwiastka, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Inne*	Al
≤ 0,50	≤ 0,50	3,8	0,30	1,2	≤ 0,10	≤ 0,25	≤ 0,15	≤ 0,05	reszta
		-	-	-					
		4,9	0,90	1,8					

*Pozostałe pierwiastki oddzielnie, łącznie ≤ 0,15%; po uzgodnieniu Zr + Ti ≤ 0,20%

Własności mechaniczne i fizyczne stopu aluminium EN AW-2024-T3 różnią się w zależności od rodzaju i wymiarów produktu. W tabeli 5.4 przedstawiono własności mechaniczne blach o grubości od 1,5 do 3 mm wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 natomiast tabela 5.5 prezentuje wybrane orientacyjne właściwości fizyczne stopu aluminium EN AW-2024 [27].

Tabela 5.4. Własności mechaniczne blach o grubości od 1,5 do 3 mm wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 [27]

Własności mechaniczne*		
Własność	Wymiar	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	≥ 435
Umowna granica plastyczności	MPa	≥ 290
Wydłużenie	%	≥ 14
Twardość	HBW	123
Moduł sprężystości wzdłużnej	GPa	72,8-73,3

* Wartość orientacyjna (zależna od rodzaju, wymiarów, stanu umocnienia i/lub stanu obróbki cieplnej)

Tabela 5.5. Wybrane własności fizyczne stopu aluminium EN AW-2024 [27]

Własności fizyczne*		
Własność	Wymiar	Wartość
Gęstość	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2,79
Temperatura topnienia	°C	500-640
Współczynnik rozszerzalności liniowej	K^{-1}	$23,1 \cdot 10^{-6}$
Przewodność cieplna	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	121-193

* Wartości orientacyjne (zależne od rodzaju, wymiarów, stanu umocnienia i/lub stanu obróbki cieplnej)

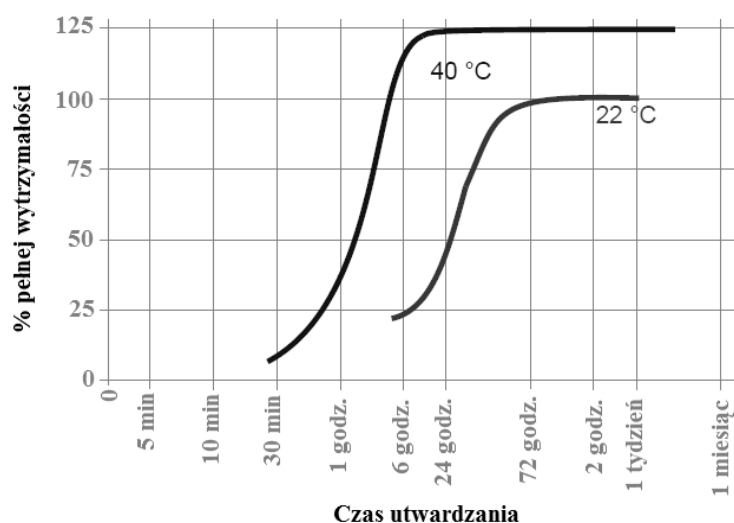
Elementy ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 sklejono za pomocą dwuskładnikowego kleju epoksydowego Loctite EA 3430 (Loctite, Düsseldorf, Niemcy). Loctite EA 3430 jest klejem ogólnego przeznaczenia. Dzięki temu, że dobrze wypełnia szczeliny, może być stosowany w przypadku klejenia źle przylegających lub chropowatych powierzchni metalowych, drewnianych, ceramicznych lub sztywnych

tworzyw. Nie zaleca się stosowania tego kleju w urządzeniach z czystym tlenem lub bogatych w tlen oraz instalacjach z chlorem lub innymi silnie utleniającymi materiałami. W tabeli 5.6 przedstawiono typowe własności fizyczne kleju Loctite EA 3430 [45].

Tabela 5.6. Typowe własności fizyczne kleju Loctite EA 3430 (próbki o grubości 1,2 mm utwardzane przez 7 dni w temperaturze 22°C) [45]

Własności fizyczne		
Własność	Wymiar	Wartość
Współczynnik przewodności cieplnej	W/(m·K)	0,3
Wytrzymałość na rozciąganie	N/mm ²	36
Moduł sprężystości	N/mm ²	3 210
Wytrzymałość na ściskanie	N/mm ²	65
Wydłużenie	%	2
Twardość Shore'a, (twardościomierz D)		70
Temperatura zeszklenia	°C	58

Szybkość utwardzania spoiny klejowej zależy od temperatury otoczenia. Na rys. 5.2 przedstawiono zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie połączenia ze stali, a czasem utwardzania i temperaturą otoczenia.

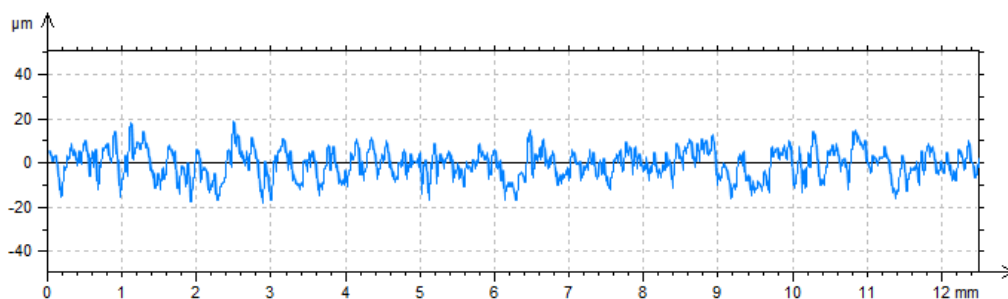


Rys. 5.2. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie, a czasem utwardzania i temperaturą otoczenia (połączenia klejowe ze stali utworzone za pomocą kleju Loctite EA 3430) [45]

Zgodnie z zaleceniami producenta, przed użyciem produktu, należy wymieszać żywicę epoksydową z utwardzaczem w stosunku 1:1. Produkty można mieszać ze sobą ręcznie lub za pomocą końcówki mieszającej. W przypadku mieszania ręcznego, czas mieszania powinien wynosić około 15 sekund, a ilość produktu nie powinna przekraczać 20 g. Po zmieszaniu, klej nadaje się do użycia przez maksymalnie 4 minuty [45].

5.3. Proces klejenia

Pierwszym etapem procesu klejenia było przygotowanie powierzchni płytek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 do klejenia. W celu odpowiedniego rozwinięcia struktury geometrycznej, powierzchnie klejone poddano obróbce strumieniowo-ścierniej elektrokorundem 95A o ziarnistości 0,27 mm z wykorzystaniem piaskarki kabinowej New-Tech (New-Tech, Wrocław, Polska). Obróbkę strumieniowo-ścierną prowadzono w czasie 30 s z ciśnieniem 0,7 MPa. Odległość dyszy od powierzchni obrabianej wynosiła około 70 mm. Wartości średnie wybranych parametrów chropowatości powierzchni klejonej po obróbce strumieniowo-ścierniej, obliczone na podstawie pomiarów przeprowadzonych na 6 próbkach, wynosiły odpowiednio: $Ra = 4,53 \mu\text{m}$, $Rz = 25,95 \mu\text{m}$, $Rq = 5,67 \mu\text{m}$, $Rku = 2,99$, $RSm = 0,141 \text{ mm}$. Pomiary chropowatości powierzchni po obróbce strumieniowo-ścierniej przeprowadzono za pomocą profilometru stykowego Taylor Hobson SURTRONIC 25 (Taylor Hobson Ltd, Leicester, England) oraz oprogramowania TalyProfile Lite. Długość odcinka pomiarowego wynosiła 12,5 mm. Pomiary przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 21920-2:2022-06 [89]. Na rys. 5.3 przedstawiono wybrany profilogram struktury geometrycznej powierzchni klejonej po obróbce strumieniowo-ścierniej.



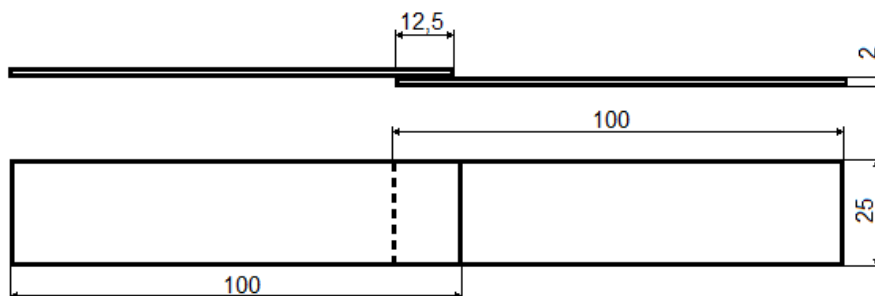
Rys. 5.3. Profilogram struktury geometrycznej powierzchni klejonej po obróbce strumieniowo-ścierniej [opracowanie własne]

Obrobione mechanicznie powierzchnie klejone poddano odtłuszczeniu, w celu usunięcia pozostałości kurzu, pyłów i zanieczyszczeń tłuszczowych. Odtłuszczenie przeprowadzono ręcznie z wykorzystaniem acetonu.

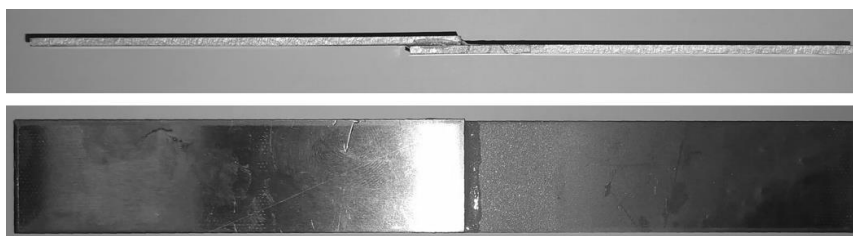
Kolejnym krokiem było utworzenie połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 za pomocą kleju Loctite EA 3430. Klej mieszano ręcznie. Stosunek żywicy epoksydowej do utwardzacza wynosił 1:1. Zgodnie z zaleceniami producenta, czas mieszania wynosił około 15 sekund, a ilość produktu nie przekraczała 20 g. Klej nanoszono na obie powierzchnie klejone za pomocą przyrządu

grzebykowego. Długość zakładki utworzonych połączeń klejowych jednozakładkowych wynosiła 12,5 mm (rys. 5.4).

a)

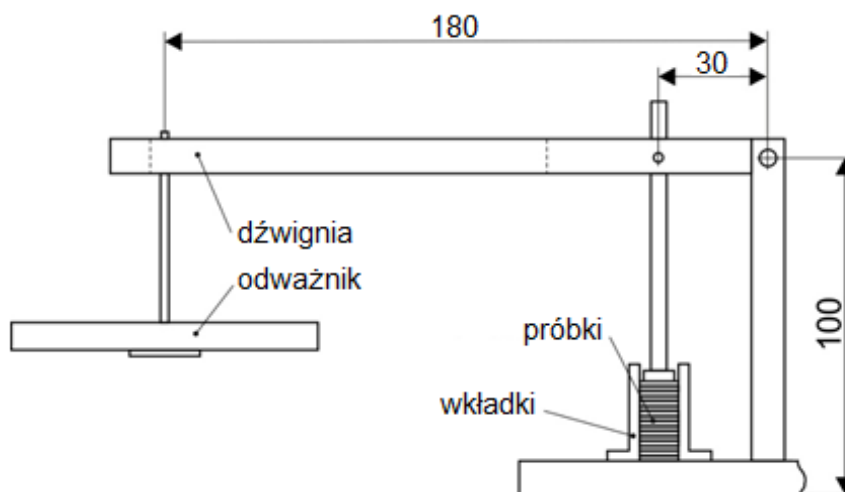


b)

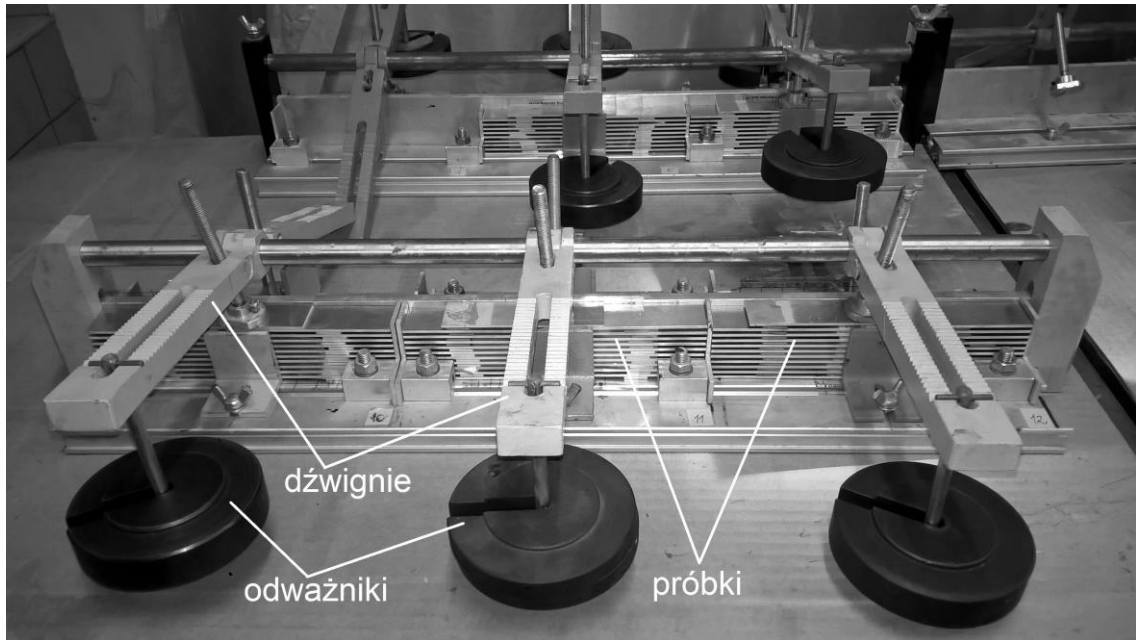


Rys. 5.4. Schemat (a) i zdjęcie (b) połączenia klejowego jednozakładkowego [opracowanie własne]

Utworzone połączenia klejowe umieszczano w przyrządzie ustalającym, który zapobiegał przemieszczaniu się elementów klejonych względem siebie oraz umożliwiał obciążenie próbek siłą stałą za pomocą odważników jednokilogramowych. Zasada działania przyrządu ustalającego została przedstawiona na rysunku 5.5, a zdjęcie próbek umieszczonych w przyrządzie ustalającym zamieszczono na rysunku 5.6.



Rys. 5.5. Zasada działania przyrządu ustalającego [opracowanie własne]



Rys. 5.6. Próbkki umieszczone w przyrządzie ustalającym [opracowanie własne]

Próbkki przechowywano w przyrządzie ustalającym przez 3 dni. Były one w tym czasie obciążone siłą stałą. Sieciowanie kleju przebiegało w temperaturze $22\pm 1^{\circ}\text{C}$. Na próbkach pozostawiono powstałe wypływki kleju.

Stosowanie przyrządu grzebykowego do nanoszenia kleju oraz umieszczanie wkładek pomiędzy próbkami znajdującymi się w przyrządzie ustalającym zapewniło dobrą powtarzalność grubości spoiny klejowej. Grubość spoiny, wyznaczona jako średnia z 10 pomiarów, wyniosła 0,09 mm (odchylenie standardowe 0,012 mm). Wartość grubości spoiny określano odejmując grubość płytek od grubości całego złącza klejowego. Pomiary wykonano za pomocą suwmiarki elektronicznej o dokładności 0,01 mm.

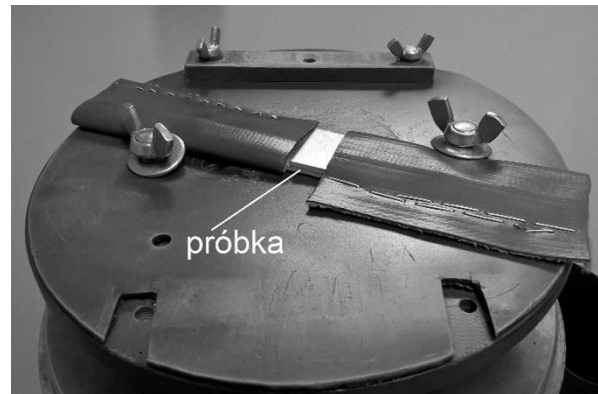
5.4. Proces pneumokulkowania

Zakładki utworzonych połączeń klejowych oraz płytki kontrolne Almena poddano procesowi pneumokulkowania. Obróbkę przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia do pneumokulkowania, które zostało opracowane w Katedrze Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Urządzenie do pneumokulkowania wraz z próbką zamocowaną do pokrywy urządzenia przedstawiono na rysunku 5.7.

a)



b)

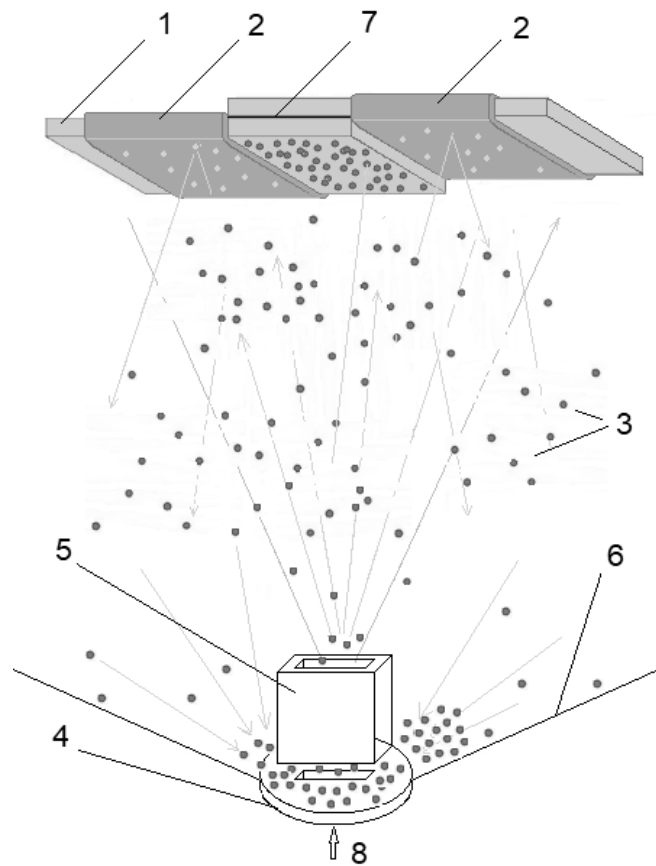


c)



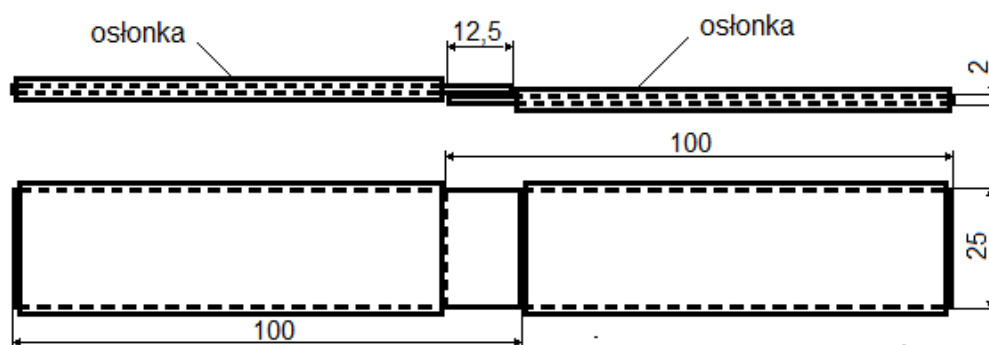
Rys. 5.7. Urządzenie do pneumokulkowania: widok ogólny (a), próbka zamocowana do pokrywy (b), wnętrze komory roboczej (c) [opracowanie własne]

Zastosowane urządzenie do pneumokulkowania składało się z komory roboczej domykanej pokrywą. Na dnie komory roboczej, wypełnionej 500 dm^3 stalowych kulek o średnicy 0,5, 1,0 lub 1,5 mm, zamontowany był zespół dysz (dolnej i górnej). Dysza dolna (dysza de Laval) zasilana była sprężonym powietrzem o ciśnieniu 0,3, 0,4 lub 0,5 MPa. Strumień powietrza wydobywający się z dyszy dolnej porywał z dna komory roboczej stalowe kulki i następnie kierował je przez dyszę górną na obrabianą próbkę, przymocowaną do wewnętrznej strony pokrywy. Odległość między powierzchnią obrabianą i dyszą górną była stała i wynosiła 100 mm. Stalowe kulki uderzały w powierzchnię obrabianą, odbijały się od niej i opadały na dno komory, skąd były ponownie zasysane przez dysze. Schemat procesu pneumokulkowania przedstawiono na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Schemat procesu pneumokulkowania: 1 – obrabiana zakładka połączenia klejowego, 2 – osłonka zabezpieczająca próbkę przed pneumokulkowaniem, 3 – stalowe kulki, 4 – dysza górna, 5 – dysza dolna (de Laval), 6 – dno komory roboczej, 7 – spoina klejowa, 8 – dopływ sprężonego powietrza [60]

Pneumokulkowaniu poddawano obie strony zakładki połączenia klejowego. Czas obróbki jednej strony zakładki wynosił 60, 120 lub 180 s. Obróbce poddawano wyłącznie powierzchnie zakładki. W celu uniknięcia oddziaływania stalowych kulek na powierzchnię niestanowiącą zakładki, stosowano osłony wykonane z tworzywa sztucznego. Na rys. 5.9 przedstawiono schemat próbki przygotowanej do obróbki.



Rys. 5.9. Próbkę przygotowana do zamocowania na pokrywie urządzenia [opracowanie własne]

Badania przeprowadzono dla 11 wariantów procesu pneumokulkowania. Każdy z wariantów liczył 8 próbek. Poszczególne warianty różniły się parametrami obróbki. Parametry obróbki zostały dobrane zgodnie z matrycą planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃. Badania przeprowadzono dla trzech poziomów zmienności czynników wejściowych: czasu pneumokulkowania, średnicy stalowych kulek i ciśnienia sprężonego powietrza. Wartości parametrów pneumokulkowania dla poszczególnych wariantów przedstawiono w tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Parametry pneumokulkowania [opracowanie własne]

Wariant	Parametry pneumokulkowania		
	Czas x_t , s	Średnica kulek x_{d_k} , mm	Ciśnienie x_p , MPa
1	60	0,5	0,5
2	180	0,5	0,3
3	60	1,5	0,3
4	180	1,5	0,5
5	60	1,0	0,4
6	180	1,0	0,4
7	120	0,5	0,4
8	120	1,5	0,4
9	120	1,0	0,3
10	120	1,0	0,5
11	120	1,0	0,4

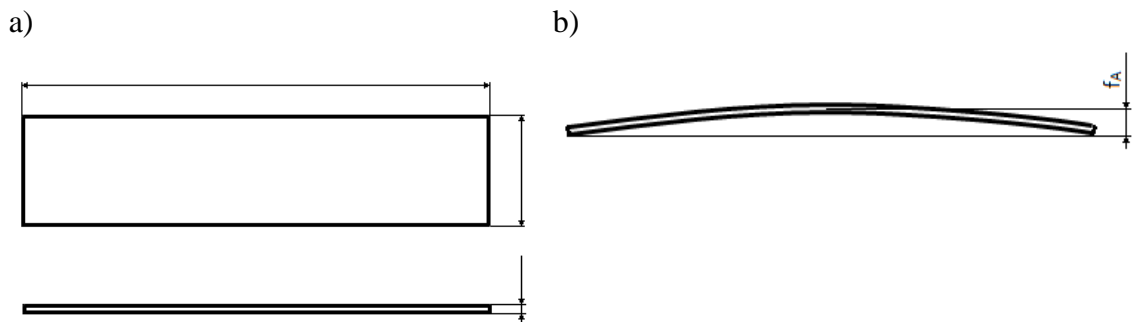
Przyjęty zakres zmienności parametrów wejściowych został dobrany na podstawie danych literaturowych i wyników badań wstępnych [144], biorąc pod uwagę możliwości techniczne stanowiska do pneumokulkowania.

5.5. Kontrola intensywności procesu pneumokulkowania

Intensywność procesu pneumokulkowania oceniono za pomocą wartości strzałki ugięcia f_A płytek kontrolnych Almena. Do badań zastosowano płytki typu A2 (Electronics Inc., Mishikawa, IN, USA), przeznaczone do pneumokulkowania o średniej intensywności. Płytki typu A2 charakteryzują się grubością 1,32 mm, płaskością $\pm 0,038$ mm oraz twardością 44-50 HRC.

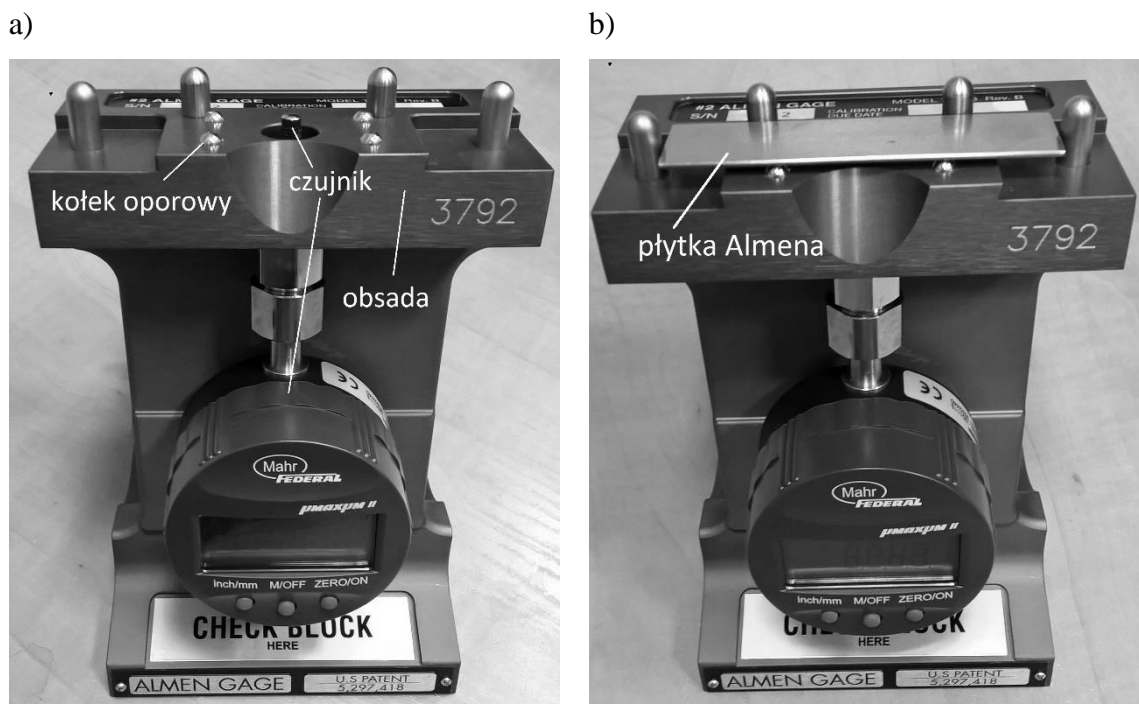
Do obróbki płytek Almena wykorzystano urządzenie do pneumokulkowania opisane w podrozdziale 5.4. Procesowi pneumokulkowania poddawano wyłącznie jedną stronę płytek Almena. Parametry pneumokulkowania, dobrane zgodnie z matrycą planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃, przedstawiono w tabeli 5.7 (podrozdział 5.4).

Pod wpływem procesu pneumokulkowania, w warstwie wierzchniej płytek Almena ukonstytuowały się naprężenia ściskające, powodujące wygięcie płytek (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Płytki Almena: a) przed pneumokulkowaniem, b) po pneumokulkowaniu [opracowanie własne]

Wartość strzałki ugięcia zmierzono za pomocą miernika ugięcia płytek Almena TSP-3B (Electronics Inc., Mishikawa, IN, USA) (rys. 5.11) dostępnego w Laboratorium Katedry Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Miernik ugięcia płytek Almena TSP-3B jest wyposażony w cyfrowy wskaźnik pomiarowy i sprężynę zwrotną o niewielkim nacisku, co zapewnia powtarzalne i dokładne pomiary. Dokładność pomiarowa przyrządu jest większa niż 0,005 mm (w zakresie pomiarowym 0-0,600 mm).

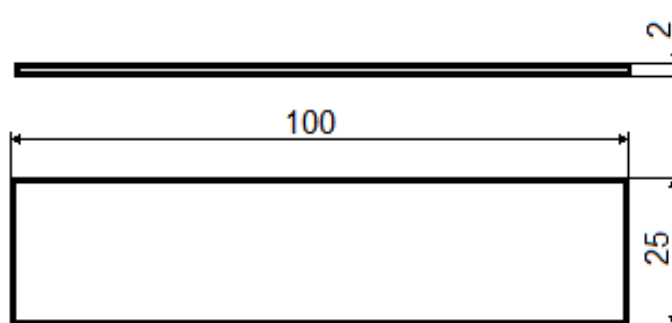


Rys. 5.11. Miernik ugięcia płytek Almena TSP-3B: a) bez płytki kontrolnej Almena, b) z płytką Almena [opracowanie własne]

Pomiary wartości strzałki ugięcia przeprowadzono zgodnie ze standardem SAE J443_201708 [123]. Dla każdego wariantu pneumokulkowania wykonano po trzy pomiary wartości strzałki ugięcia płytek Almena.

5.6. Badanie struktury geometrycznej powierzchni

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni poddanej i niepoddanej procesowi pneumokulkowania przeprowadzono dla płytek wyciętych z arkuszy blachy walcowanej o grubości 2 mm, wykonanej ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Schemat płytki przedstawiono na rysunku 5.12.

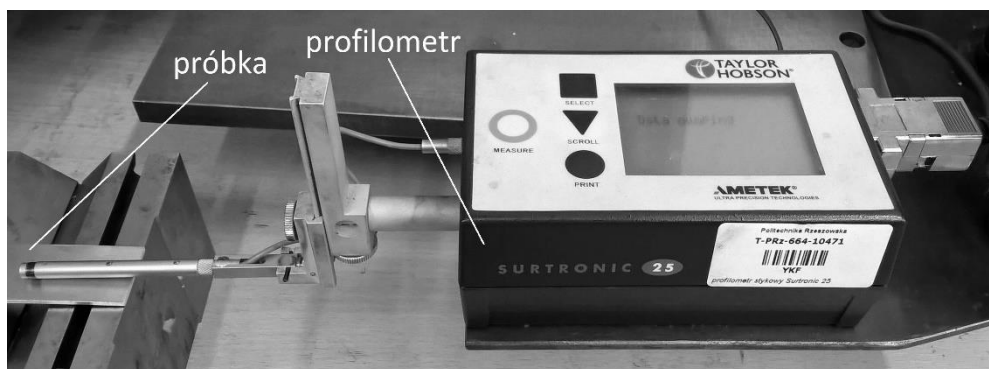


Rys. 5.12. Wymiary płytki poddanej analizom chropowatości powierzchni [opracowanie własne]

Płytki poddano procesowi pneumokulkowania zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.4. Pomiary struktury geometrycznej powierzchni płytek poddanych i niepoddanych pneumokulkowaniu przeprowadzono w Laboratorium Badań Warstwy Wierzchniej Katedry Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

W ramach badań przeprowadzono pomiary w układzie dwuwymiarowym i przestrzennym. Prostota i niższe koszty wykonywania pomiarów w układzie dwuwymiarowym sprawiają, że są one częściej wykonywane w przedsiębiorstwach, niż pomiary w układzie przestrzennym. Prowadzenie pomiarów w układzie przestrzennym pozwala jednak na zdefiniowanie większej liczby parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni.

Pomiary w układzie dwuwymiarowym przeprowadzono z wykorzystaniem profilometru stykowego Taylor Hobson SURTRONIC 25 (Taylor Hobson Ltd, Leicester, England), przedstawionego na rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Profilometr stykowy Taylor Hobson SURTRONIC 25 [opracowanie własne]

Pomiary przeprowadzono zgodnie ze standardem PN-EN ISO 21920-2:2022-06 [89]. Po wstępnej ocenie wartości parametru Ra , przyjęto odcinek pomiarowy o długości 12,5 mm. Podczas analiz korzystano z oprogramowania Taly Profile Lite. Analizy przeprowadzono dla następujących parametrów [6, 89]:

- pionowych (wysokości wzniesień i głębokości wgłębień):
 - Rp – wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości, μm ,
 - Rv – głębokość najniższego wgłębienia profilu chropowatości, μm ,
 - Rc – średnia wysokość elementów profilu chropowatości, μm ,
 - Rt – całkowita wysokość profilu chropowatości, μm ,
 - Rz – największa wysokość profilu chropowatości, μm ,
- pionowych (średnie wartości rzędnych):
 - Ra – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości, μm ,
 - Rq – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości, μm ,
 - Rsk – współczynnik asymetrii profilu chropowatości,
 - Rku – współczynnik nachylenia profilu chropowatości,
- mieszanych:
 - Rdq – średni kwadratowy wznios profilu chropowatości, $^\circ$,
- poziomych (odległościowych):
 - RSm – średnia szerokość rowków elementów profilu chropowatości, mm,
 - Rda – średnie arytmetyczne nachylenie profilu chropowatości.

Pomiary w układzie przestrzennym przeprowadzono za pomocą profilometru optycznego Taylor Hobson Talysurf CCI Lite (Taylor Hobson Ltd, Leicester, England). Analiza przeprowadzona w układzie przestrzennym obejmowała następujące parametry [90]:

- parametry wysokościowe:
 - Sq – średnia kwadratowa wysokość powierzchni o ograniczonej skali, μm ,

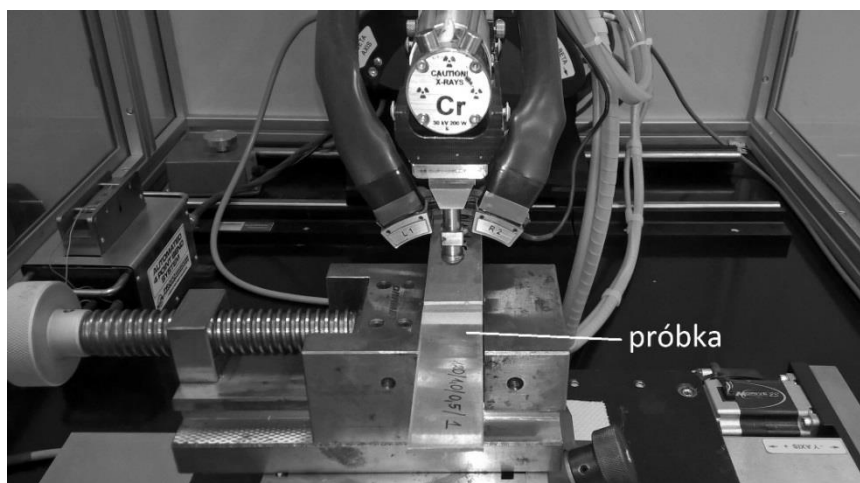
- Ssk – współczynnik asymetrii powierzchni o ograniczonej skali,
- Sku – współczynnik nachylenia powierzchni o ograniczonej skali,
- Sp – wysokość najwyższego wierzchołka powierzchni o ograniczonej skali, μm ,
- Sv – głębokość najgłębszego dołu powierzchni o ograniczonej skali, μm ,
- Sz – największa wysokość powierzchni o ograniczonej skali, μm ,
- Sa – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni o ograniczonej skali, μm ,
- parametry przestrzenne:
 - Sal – długość autokorelacji, mm,
 - Str – współczynnik kształtu struktury geometrycznej powierzchni,
- parametry hybrydowe:
 - Sdq – średniokwadratowe nachylenie powierzchni o ograniczonej skali,
 - Sdr – współczynnik rozwinięcia obszaru powierzchni o ograniczonej skali, %,
- parametry związane z cechami:
 - Spd – gęstość wierzchołków, $1/\text{mm}^2$,
 - Spc – średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołka, $1/\text{mm}$,
 - $SIOz$ – dziesięciopunktowa wysokość powierzchni, μm .

Pomiary w układzie przestrzennym wykonano zgodnie ze standardem PN-EN ISO 25178-2:2022-06 [90].

5.7. Badanie stanu naprężeń własnych

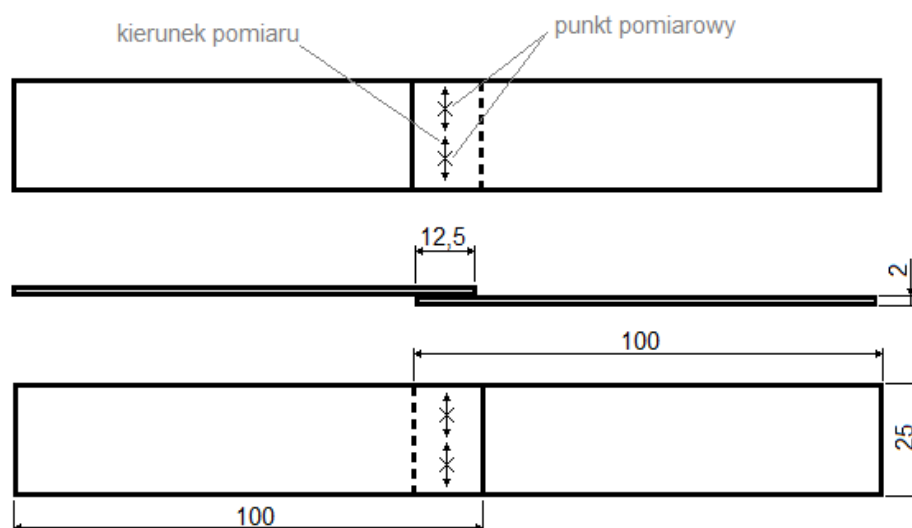
Pomiary naprężeń własnych w połączeniach klejowych wykonano w celu sprawdzenia, czy w wyniku pneumokulkowania zewnętrznych powierzchni zakładek doszło do ukonstytuowania w ich warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych.

Badania naprężeń własnych przeprowadzono w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego w Katedrze Nauki o Materiałach Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Naprężenia własne wyznaczono metodą dyfrakcji rentgenowskiej $\sin^2\psi$, polegającej na pomiarze kąta pomiędzy normalną do próbki a normalną do płaszczyzny dyfrakcji. Pomiary wykonano za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego PROTO iXRD COMBO (Proto Manufacturing Inc., Michigan, USA). Zdjęcie zastosowanego dyfraktometru rentgenowskiego wraz z połączeniem klejowym przedstawionego na rysunku 5.14.



Rys. 5.14. Dyfraktometr rentgenowski PROTO iXRD COMBO [opracowanie własne]

Badania przeprowadzono dla połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu z parametrami przedstawionymi w tabeli 5.7 (podrozdział 5.4), dla połączeń klejowych niepoddanych pneumokulkowaniu oraz dla płytki ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, poddanej obróbce strumieniowo-ścierniej elektrokorundem 95A o ziarnistości 0,27 mm, przeprowadzonej w czasie 30 s z ciśnieniem 0,7 MPa (odległość dyszy od powierzchni – około 70 mm). Badaniom poddano powierzchnie zewnętrzne po obu stronach zakładki połączenia klejowego. Na każdej powierzchni wyznaczono po 2 punkty pomiarowe. Kierunek pomiaru i położenie punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 5.15.



Rys. 5.15. Połączenie klejowe z zaznaczonym kierunkiem pomiaru i położeniem punktów pomiarowych [opracowanie własne]

W tabeli 5.8 przedstawiono parametry materiałowe i aparaturowe zastosowane w pomiarach naprężeń wewnętrznych.

Tabela 5.8. Parametry zastosowane w pomiarach naprężeń [opracowanie własne]

Parametr	Wielkość
Napięcie	25 kV
Prąd lampy	5 mA
Zastosowana lampa rtg.	Cr
Długość promieniowania λ_{Cr}	2,291 Å
Mierzony zakres kątowy	od 25° do -25°
Wielkość padającej wiązki na próbce	0,2x2 mm
Rentgenowskie stałe materiałowe	$(1/2)S2 = 5,92 \text{ E-6 [1/MPa]}$
	$S1 = 1,28 \text{ E-6 [1/MPa]}$

Pomiary wykonano w oparciu o standardy ASTM E2860 [4], ASTM E915 [5] oraz ASTM E1426 [3].

5.8. Badanie właściwości wytrzymałościowych

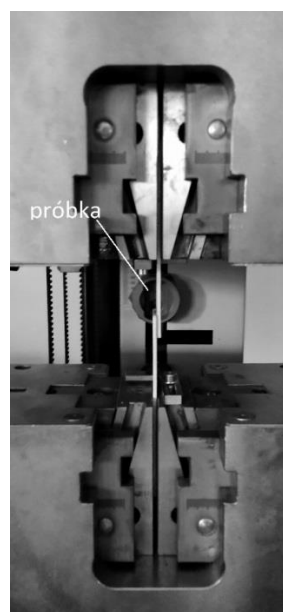
Celem badań właściwości wytrzymałościowych było określenie wpływu procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych opisanych w podrozdziale 5.3.

Badania wytrzymałościowe obejmowały przeprowadzenie próby jednoosiowego rozciągania. Próba ta została wykonana w Laboratorium Przeróbki Plastycznej Katedry Przeróbki Plastycznej na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-EN 1465:2009 [84]. Badania zrealizowano z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej ZWICK/ROELL Z100 (Zwick/Roell, Ulm, Germany) (rys. 5.16).

a)



b)



Rys. 5.16. Maszyna wytrzymałościowa ZWICK/ROELL Z100 (a) oraz próbka umieszczona w szczękach maszyny (b) [opracowanie własne]

Próbki były obciążane siłą osiową z prędkością wynoszącą 5 mm/min do momentu zerwania połączenia klejowego. Siła, przy której następowało zerwanie uznawana była za nośność połączenia klejowego P_t . W celu zmniejszenia niepożądanego wpływu odrywania na wyniki badań, szczęki urządzenia przesunięto względem siebie.

5.9. Badanie charakteru zniszczenia połączeń klejowych

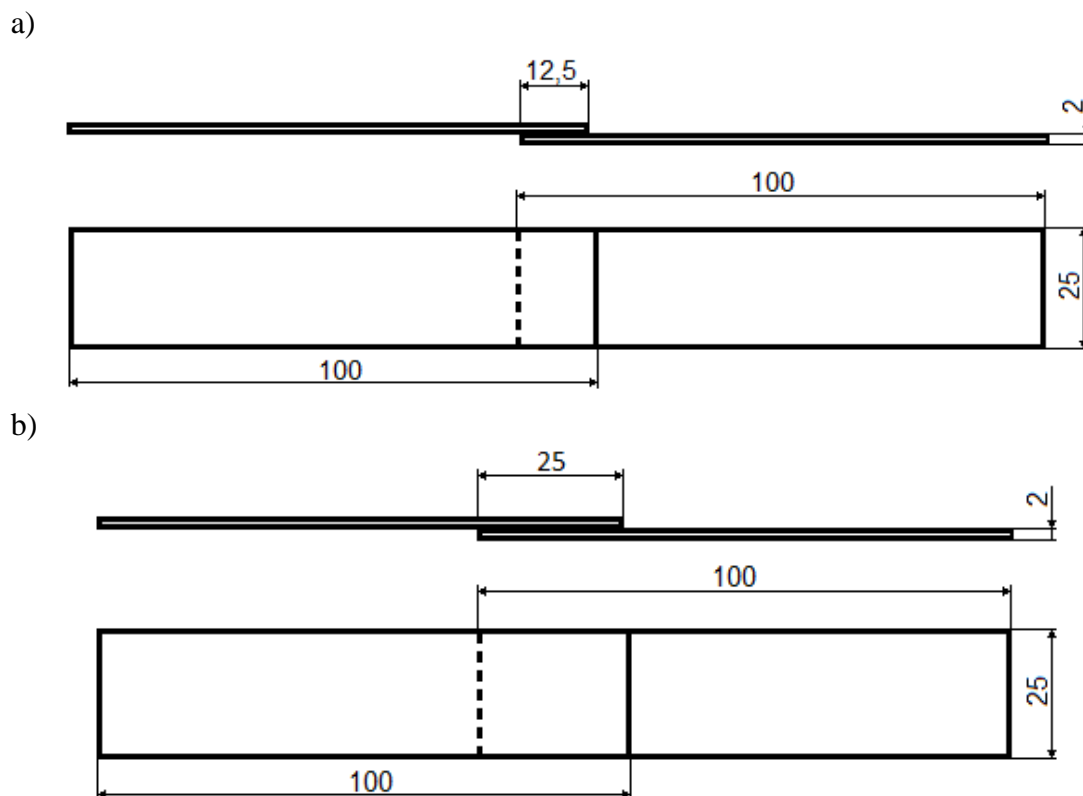
Powierzchnie przełomów, powstałych wskutek obciążenia połączeń klejowych na ścinanie przy rozciąganiu, poddano analizie w oparciu o normę PN-EN ISO 10365:2022-07 [91]. Celem analizy przełomów było zbadanie wpływu parametrów pneumokulkowania na charakter zniszczenia połączeń klejowych. Klasyfikacji charakteru zniszczenia dokonano na podstawie inspekcji wizualnej. Zgodnie z normą charakter zniszczenia oznaczano, jako: zniszczenie kohezyjne, zniszczenie adhezyjne, zniszczenie adhezyjne i kohezyjne z oddarciem.

5.10. Analiza MES połączeń klejowych

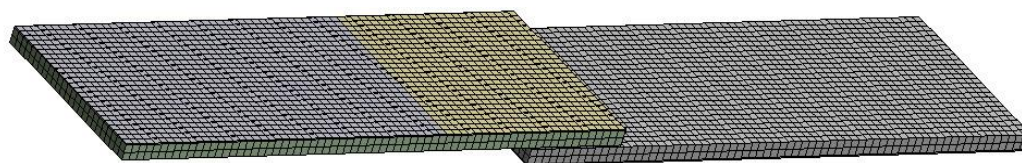
Głównym celem przeprowadzonych analiz MES, było określenie wpływu pneumokulkowania na stan naprężeń własnych w spoinie klejowej, a w efekcie wyjaśnienie mechanizmu wzrostu nośności połączeń klejowych pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki. Oprócz tego przeanalizowano wpływ długości zakładki oraz długości strefy pneumokulkowania na stan naprężeń w spoinie klejowej połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu. Analizy MES przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Ansys 16.2.

W celu porównania wpływu długości zakładki na stan naprężeń w spoinie połączenia klejowego poddanego pneumokulkowaniu, analizy przeprowadzono dla połączeń z zakładką o długości 12,5 oraz 25 mm. Z kolei, aby porównać wpływ długości strefy pneumokulkowania na stan naprężeń w spoinie, analizy wykonano dla połączeń z zakładką wynoszącą 12,5 mm, które kulkowano na długości 12,5 mm lub 25 mm.

Schemat połączeń klejowych z zakładką o długości 12,5 oraz 25 mm zamieszczono na rysunku 5.17, natomiast model połączenia klejowego z zakładką 12,5 mm, które poddano procesowi pneumokulkowania na długości 25 mm przedstawiono na rysunku 5.18.



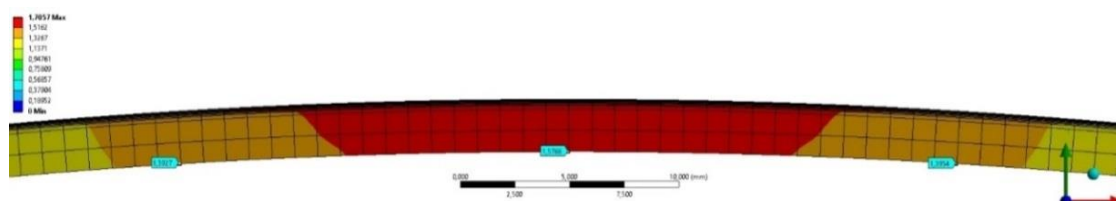
Rys. 5.17. Wymiary modelu połączenia klejowego: a) długość zakładki 12,5 mm, b) długość zakładki 25 mm [opracowanie własne]



Rys. 5.18. Model połączenia klejowego z zakładką 12,5 mm, które poddano pneumokulkowaniu na długości 25 mm [opracowanie własne]

Jak wspomniano w podrozdziale 2.5 pneumokulkowanie cienkich blach wprowadza do ich warstwy wierzchniej naprężenia ściskające i sprawia, że blachy odkształcają się plastycznie. Odkształcenie to można opisać poprzez wartość strzałki ugięcia f_A . W systemie Ansys 16.2 brak jest modułów umożliwiających modelowanie odkształceń wywołanych nagniataniem dynamicznym. Występują natomiast moduły umożliwiające modelowanie odkształceń termicznych. Na potrzeby modelowania MES połączeń klejowych założono, że odkształceniem cieplnym, powodującym odkształcenie o odpowiedniej wielkości, można zastąpić odkształcenie wywołane procesem pneumokulkowania. W związku z tym, aby zamodelować efekt pneumokulkowania połączeń klejowych w programie Ansys, najpierw wyznaczono eksperymentalnie wartość strzałki ugięcia dla pneumokulkowanej blachy ze stopu aluminium EN AW-

2024-T3. Blachę poddano pneumokulkowaniu kulkami o średnicy 1 mm, w czasie 120 s, z ciśnieniem 0,5 MPa. Obróbce poddano wyłącznie jedną stronę blachy. Wartość strzałki ugięcia, zmierzona za pomocą miernika ugięcia płytek Almena TSP-3B (Electronics Inc., Mishikawa, IN, USA), wynosiła 0,183 mm. Znając wartość strzałki ugięcia pneumokulkowanej blachy, przystąpiono do tworzenia modelu numerycznego połączenia klejowego jednozakładkowego poddanego pneumokulkowaniu. W modelu przyjęto, że blacha składa się z dwóch warstw różniących się rozszerzalnością cieplną. Założono, że warstwa pierwsza (kulkowana, z widocznymi efektami pneumokulkowania) miała grubość 0,15 mm, a jej współczynnik rozszerzalności liniowej wynosił $7 \cdot 10^{-5}$ 1/K. Druga warstwa (niekulkowana, bez wpływu pneumokulkowania) miała grubość 1,85 mm i współczynnik rozszerzalności liniowej wynoszący $5 \cdot 10^{-5}$ 1/K. Grubości poszczególnych warstw przyjęto na podstawie wcześniejszych doświadczeń i literatury [35]. W celu zamodelowania efektu pneumokulkowania, model blachy poddano oddziaływaniu temperatury rzędu 325°C, w wyniku czego blacha uległa odkształceniu. Strzałka ugięcia odkształconej blachy wynosiła 0,183 mm (rys. 5.19).



Rys. 5.19. Model blachy odkształconej w wyniku pneumokulkowania [opracowanie własne]

W związku z powyższym, w celu określenia wpływu pneumokulkowania na stan naprężeń w spoinie klejowej, analizy numeryczne przeprowadzono dla modeli połączeń klejowych, obciążonych siłą rozciągającą wynoszącą 4000 N (połączenia klejowe niepoddane pneumokulkowaniu) oraz połączeń klejowych, obciążonych siłą rozciągającą wynoszącą 4000 N i poddanych oddziaływaniu temperatury rzędu 325°C (połączenie klejowe poddane pneumokulkowaniu).

Analizy MES przeprowadzono w sumie dla 5 wariantów modeli różniących się długością zakładki i długością strefy poddanej pneumokulkowaniu. Opisy poszczególnych wariantów modeli wraz z symbolami wariantów przedstawiono w tabeli 5.9.

Tabela 5.9. Warianty modeli w analizie MES [opracowanie własne]

Symbol wariantu	Połączenie klejowe niepoddane kulkowaniu (obciążone siłą rozciągającą wynoszącą 4000 N)	Połączenie klejowe poddane kulkowaniu (obciążone siłą rozciągającą wynoszącą 4000 N i oddziaływaniu temperatury 325°C)	Długość zakładki, mm	Długość strefy poddanej kulkowaniu, mm
NP12,5	TAK	-	12,5	-
P12,5/12,5	-	TAK	12,5	12,5
P12,5/25	-	TAK	12,5	25
NP25	TAK	-	25	-
P25/25	-	TAK	25	25

Aby pominąć wpływ temperatury, klejowi nadano współczynnik rozszerzalności liniowej taki, jak warstwie drugiej ($5 \cdot 10^{-5} 1/K$). Przyjęto, że moduł sprężystości kleju wynosił 2000 MPa. Założono liniowe właściwości kleju oraz klejonych elementów.

6. Wyniki badań i ich analiza

6.1. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych

Badania mające na celu określenie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych przeprowadzono według planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃. Matematyczne opracowanie wyników badań sporządzono zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.1. Połączenia klejowe przygotowano według opisu zamieszczonego w podrozdziale 5.3. Następnie poddano je procesowi pneumokulkowania, który omówiono w podrozdziale 5.4. Tak przygotowane próbki, poddano próbie jednoosiowego rozciągania, zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.8.

Badania przeprowadzono dla trzech czynników wejściowych: czasu obróbki, średnicy kulek oraz ciśnienia sprężonego powietrza. Czynnikiem wyjściowym była nośność połączeń klejowych. Zgodnie z metodyką planu Hartleya czynniki wejściowe wstępnie zakodowano. Wartości czynników wejściowych na poziomie górnym i dolnym, wartości centralne, przedziały zmienności oraz sposób kodowania przedstawiono w tabeli 6.1., maczycę planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ wraz z wynikami pomiarów nośności połączeń klejowych oraz wynikami wybranych obliczeń pomocniczych zamieszczono w tabeli 6.2, krzywe rozciągania dla próbek poddanych pneumokulkowaniu oraz dla próbek niekulkowanych zamieszczono na rys. 6.1-6.3

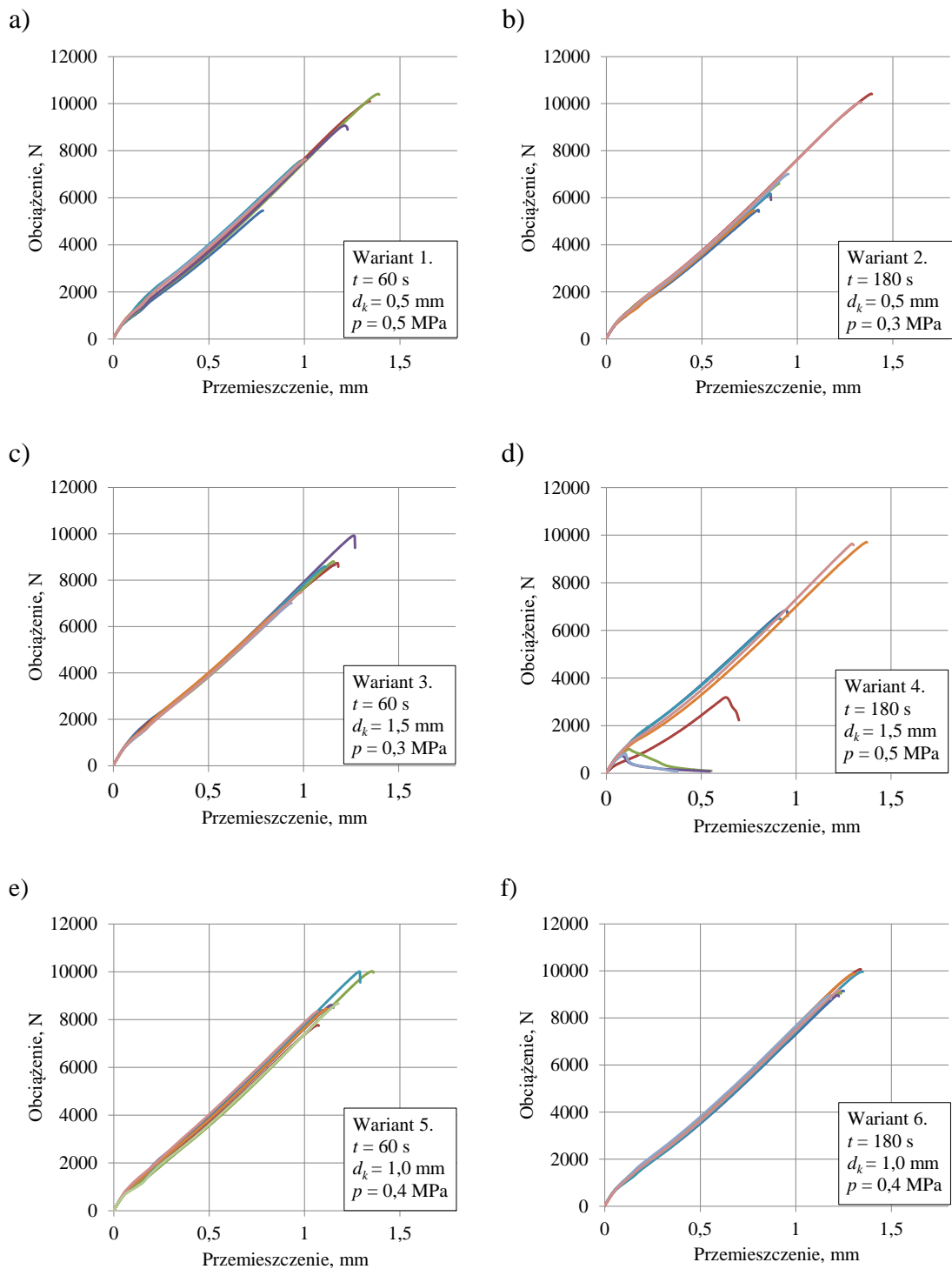
Tabela 6.1. Wartości na poziomie górnym i dolnym, wartości centralne, przedziały zmienności oraz sposób kodowania czynników wejściowych [opracowanie własne]

Czynnik	Poziom górny i dolny	Wartość centralna czynnika	Przedział zmienności czynnika	Sposób kodowania czynnika
Czas x_t , s	(+) 180 (-) 60	$x_{10} = \frac{x_{t maks} + x_{t min}}{2}$ $x_{10} = \frac{180 + 60}{2} = 120$	$\Delta x_1 = \frac{x_{t maks} - x_{t min}}{2}$ $\Delta x_1 = \frac{180 - 60}{2} = 60$	$x_1 = \frac{x_t - x_{10}}{\Delta x_1}$ $x_1 = \frac{x_t - 120}{60}$
Średnica kulek x_{d_k} , mm	(+) 1,5 (-) 0,5	$x_{20} = \frac{x_{d_k maks} + x_{d_k min}}{2}$ $x_{20} = \frac{1,5 + 0,5}{2} = 1$	$\Delta x_2 = \frac{x_{d_k maks} - x_{d_k min}}{2}$ $\Delta x_2 = \frac{1,5 - 0,5}{2} = 0,5$	$x_2 = \frac{x_{d_k} - x_{20}}{\Delta x_2}$ $x_2 = \frac{x_{d_k} - 1}{0,5}$
Ciśnienie x_p , MPa	(+) 0,5 (-) 0,3	$x_{30} = \frac{x_{p maks} + x_{p min}}{2}$ $x_{30} = \frac{0,5 + 0,3}{2} = 0,4$	$\Delta x_3 = \frac{x_{p maks} - x_{p min}}{2}$ $\Delta x_3 = \frac{0,5 - 0,3}{2} = 0,1$	$x_3 = \frac{x_p - x_{30}}{\Delta x_3}$ $x_3 = \frac{x_p - 0,4}{0,1}$

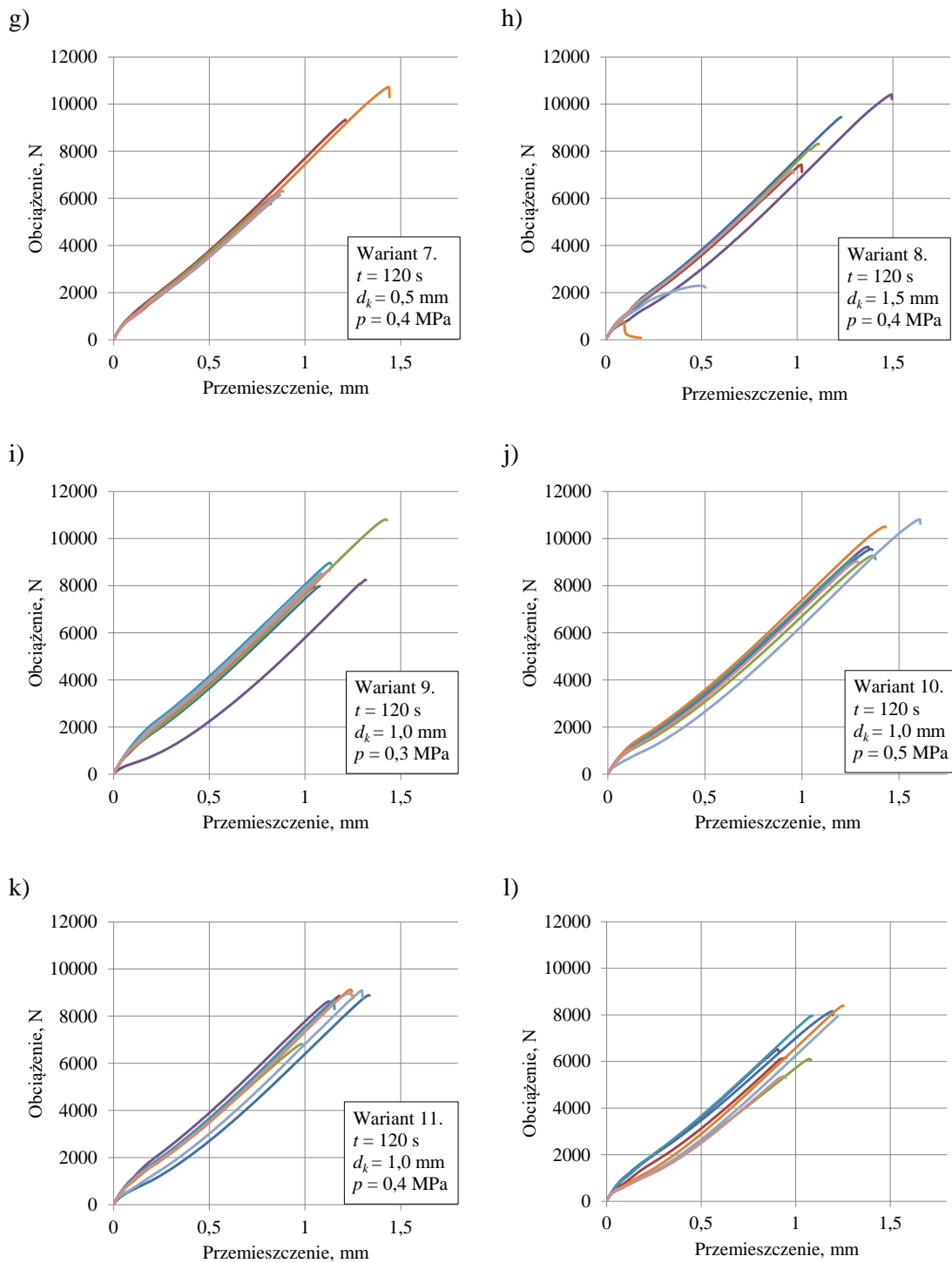
Tabela 6.2. Wyniki pomiarów nośności połączeń klejowych oraz wyniki wybranych obliczeń pomocniczych [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			Wyniki pomiarów nośności połączeń klejowych P_i, N								Wyniki wybranych obliczeń*				
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	\bar{y}_i, N	$S^2(y)_i, N^2$	\hat{y}_i, N	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, N^2$	Zwiększenie/ zmniejszenie nośności, %
1	-	-	+	5457	10109	10409	9065	7578	7570	7503	7635	8166	2624925	8716	303158	15,3
2	+	-	-	5487	10413	6597	6162	6163	5448	7007	10066	7168	3869761	5255	3659865	1,2
3	-	+	-	8658	8737	8807	9922	8589	6616	7011	7470	8226	1204818	8716	239997	16,2
4	+	+	+	6846	3190	1010	833	6501	9707	825	9638	4819	14721906	5255	190158	-31,9
5	-	0	0	8387	7766	10018	8609	10008	8445	8340	8676	8781	652703	9565	615280	24,0
6	+	0	0	9154	10071	9080	8964	9967	9884	9195	8967	9410	226796	8307	1217506	32,9
7	0	-	0	6133	9332	5661	5774	5971	10722	6135	6310	7005	3660284	6985	369	-1,1
8	0	+	0	9446	7428	8315	10404	6112	5599	2290	7186	7097	6338701	6985	12535	0,3
9	0	0	-	7976	7952	10808	8249	8966	8390	8513	8647	8688	847982	8936	61722	22,7
10	0	0	+	9553	7483	9273	9653	9237	10507	10815	9024	9443	1022434	8936	257127	33,4
11	0	0	0	8887	8863	6819	8624	8689	9132	9093	8957	8633	568118	8936	91787	21,9
Σ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	87435	35738428	-	6649505	-
Niekulkowane				8163	6164	6110	6535	7959	8396	7938	5372	7080	1343971	-	-	-

* \bar{y}_i – średnia arytmetyczna nośności połączeń klejowych w i -tym doświadczeniu, obliczona na podstawie wyników ośmiu pomiarów, $S^2(y)_i$ – wariancja błędów pomiaru w i -tym doświadczeniu obliczona ze wzoru (wzór nr 5.14, podrozdział 5.1), \hat{y}_i – wartość nośności połączeń klejowych dla i -tego wariantu, obliczona na podstawie równania regresji (wzór nr 6.3)



Rys. 6.1. Krzywe rozciągania dla połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu:
 a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, d) wariant 4, e) wariant 5, f) wariant 6
 [opracowanie własne]



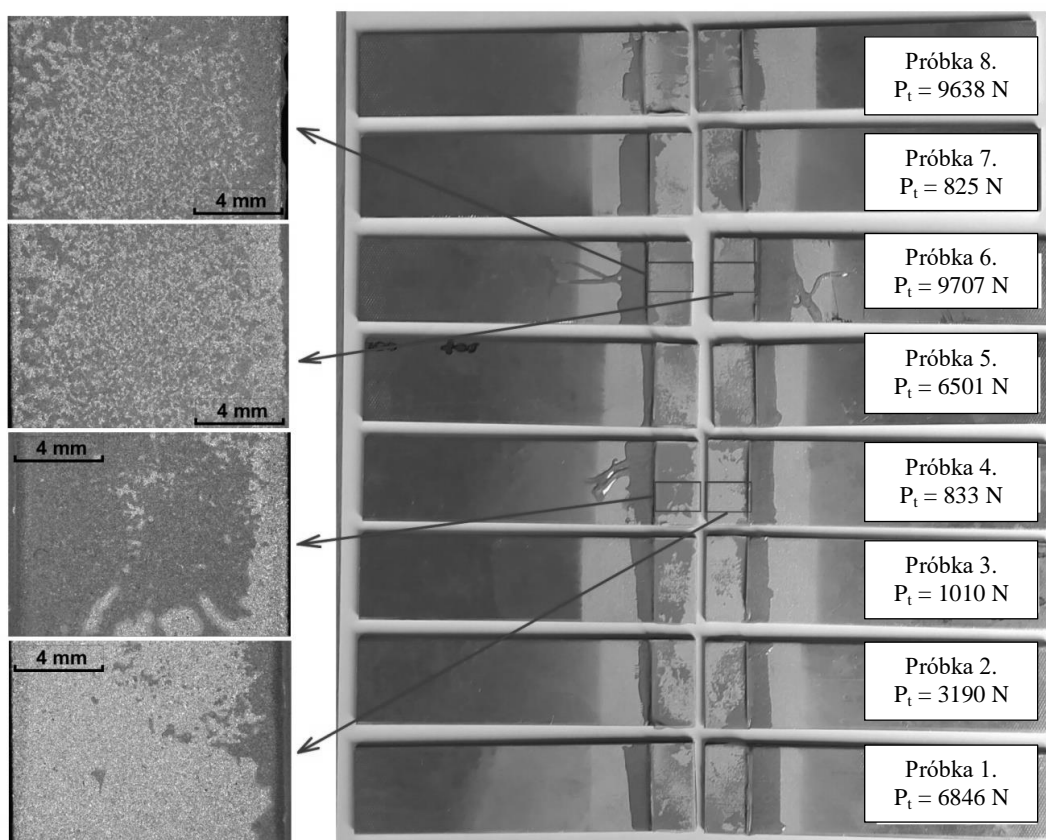
Rys. 6.2. Krzywe rozciągania dla połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu: g) wariant 7, h) wariant 8, i) wariant 9, j) wariant 10, k) wariant 11, l) połączenia klejowe niepoddawane pneumokulkowaniu [opracowanie własne]

Na podstawie wyników pomiarów, zestawionych w tabeli 6.2, można stwierdzić, że w większości przypadków pneumokulkowanie przyczyniło się do zwiększenia nośności połączeń klejowych. Największą wartość nośności połączeń klejowych uzyskano dla wariantu nr 10 (średni czas i średnia średnica kulek, najwyższe ciśnienie). Zwiększenie nośności

względem próbek niepoddawanych pneumokulkowaniu wynosiło w tym przypadku 33,4%. Z kolei, najmniejszą wartość nośności uzyskano dla wariantu 4, który charakteryzuje się największymi wartościami parametrów pneumokulkowania. W przypadku wariantu nr 4 pneumokulkowanie spowodowało zmniejszenie nośności połączeń względem złączy niekulkowanych o 31,9%.

W wyniku analizy wykresów (rys. 6.1-6.2) można stwierdzić, że w przypadku wariantów obróbki 1-11 większość krzywych ma podobne nachylenie. Przy przemieszczeniu 0,8 mm siła rozciągająca przyjmuje wartość około 6000 N. Nachylenie większości krzywych dla próbek niepoddawanych pneumokulkowaniu (rysunek 6.2 (I)) jest mniejsze niż w przypadku próbek pneumokulkowanych (warianty 1-11). Oznacza to, że pneumokulkowanie przyczyniło się do zwiększenia nośności połączeń klejowych (z wyjątkiem wariantu nr 4 i 7).

W przypadku wariantu 4, próbki nr 4 i 7 charakteryzują się znacznie mniejszą nośnością niż pozostałe próbki. W celu znalezienia możliwych przyczyn zmniejszonej nośności tych próbek, przeprowadzono analizę charakteru zniszczenia sklein dla wariantu 4, zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.9. Na rysunku 6.3 przedstawiono zdjęcia powierzchni złomów wariantu 4.



Rys. 6.3. Powierzchnie złomów połączeń klejowych w przypadku wariantu 4 [opracowanie własne]

Z analizy złomów wynika, że zniszczenia sklein w przypadku poszczególnych próbek wariantu 4 mają charakter adhezyjny lub adhezyjno-kohezyjny. Próbki różnią się proporcjami między strefą adhezyjną i mieszaną.

W przypadku próbki nr 6 (próbka o największej nośności w przypadku wariantu nr 4) dominujący udział ma strefa o kohezyjno-adhezyjnym charakterze zniszczenia złącza. Mechanizm zniszczenia kohezyjnego wynika z utraty nośności materiału klejącego. Występuje wtedy, gdy stan naprężeń wywołany obciążeniem zewnętrznym prowadzi do zniszczenia warstwy kleju. Mechanizm zniszczenia kohezyjnego jest pożądany w konstrukcyjnych połączeniach klejowych. Obecność tego mechanizmu zniszczenia gwarantuje, że adhezja jest większa niż kohezja, co oznacza, że właściwości wytrzymałościowe kleju są w pełni wykorzystane [26].

W przypadku próbek nr 4 i 7, a więc próbek o najmniejszej nośności, dominująca jest strefa o adhezyjnym charakterze zniszczeń. Mechanizm zniszczenia adhezyjnego polega na utracie przyczepności kleju do łączonych elementów. Połączenie klejowe uszkodzone w wyniku działania mechanizmu adhezyjnego charakteryzuje się na ogół stosunkowo niską wartością nośności. Nie mniej jednak, zniszczenie o charakterze adhezyjnym, może wystąpić również w przypadku połączeń klejowych o odpowiednio przygotowanych powierzchniach, na przykład wtedy, gdy wytrzymałość materiału klejącego jest bardzo duża w stosunku do siły adhezyjnej. Do uszkodzenia wiązań adhezyjnych w analizowanych próbkach mogło przyczynić się również zastosowanie zbyt intensywnych parametrów pneumokulkowania [60, 147].

Podsumowując, analiza złomów dla poszczególnych wariantów pneumokulkowania wskazuje, że spoiny klejowe uległy uszkodzeniu w wyniku oddziaływania połączonego mechanizmu niszczenia adhezyjnego i kohezyjnego. W związku z tym, nie można ustalić wyraźnej zależności między parametrami kulkowania a mechanizmem uszkodzenia.

Zgodnie z metodyką planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃, wyznaczenie równania regresji mającego postać wielomianu drugiego stopnia, opisującego wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych, rozpoczęto od obliczenia wartości współczynników równania regresji b_0, b_k, b_{kk} oraz b_{kj} . Wartości współczynników równania regresji obliczono korzystając ze wzorów (5.10-5.13).

Następnie, za pomocą testu t-Studenta, przeprowadzono ocenę istotności tych współczynników. Po obliczeniu wariancji ze wzoru (5.14), określeniu liczby stopni swobody (5.15) oraz wartości krytycznej współczynnika t (5.16), wyznaczono wartości krytyczne

współczynników $b_{0kr}, b_{kkr}, b_{kkkr}$ oraz b_{kjkkr} (5.17-5.20). Obliczone wartości współczynników równania regresji porównano z wartościami krytycznymi. Jeżeli wartość bezwzględna danego współczynnika równania regresji była wyższa niż odpowiadająca mu wartość krytyczna, wówczas współczynnik ten uznawano za istotny. W przeciwnym wypadku stwierdzano, że współczynnik jest nieistotny i odrzucano go z równania regresji.

W tabeli 6.3 przedstawiono wartości współczynników równania regresji, odpowiadające im wartości krytyczne oraz wyniki oceny istotności współczynników równania.

Tabela 6.3. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji [opracowanie własne]

Współczynnik równania regresji	Obliczona wartość współczynnika	Krytyczna wartość współczynnika	Ocena istotności	
b_0	8936,0	701,2	$ b_0 > b_{0kr}$	istotny
b_1	-629,4	518,8	$ b_1 > b_{1kr}$	istotny
b_2	-365,9	518,8	$ b_2 < b_{2kr}$	nieistotny
b_3	-275,7	518,8	$ b_3 < b_{3kr}$	nieistotny
b_{11}	94,1	816,8	$ b_{11} < b_{11kr}$	nieistotny
b_{22}	-1950,5	816,8	$ b_{22} > b_{22kr}$	istotny
b_{33}	63,9	816,8	$ b_{33} < b_{33kr}$	nieistotny
b_{12}	-602,5	635,5	$ b_{12} < b_{12kr}$	nieistotny
b_{13}	-572,1	635,5	$ b_{13} < b_{13kr}$	nieistotny
b_{23}	-1101,3	635,5	$ b_{23} > b_{23kr}$	istotny

Po przeprowadzeniu oceny istotności i odrzuceniu współczynników nieistotnych, równanie regresji przyjęło następującą postać (6.1):

$$y_{P_t} = 8936 - 629,4x_1 - 1950,5x_2^2 - 1101,3x_2x_3. \quad (6.1)$$

Kolejnym krokiem było odkodowanie równania regresji (6.1). W tym celu, zakodowane wartości czynników wejściowych zastąpiono odpowiednimi wartościami z tabeli 6.1 otrzymując równanie (6.2):

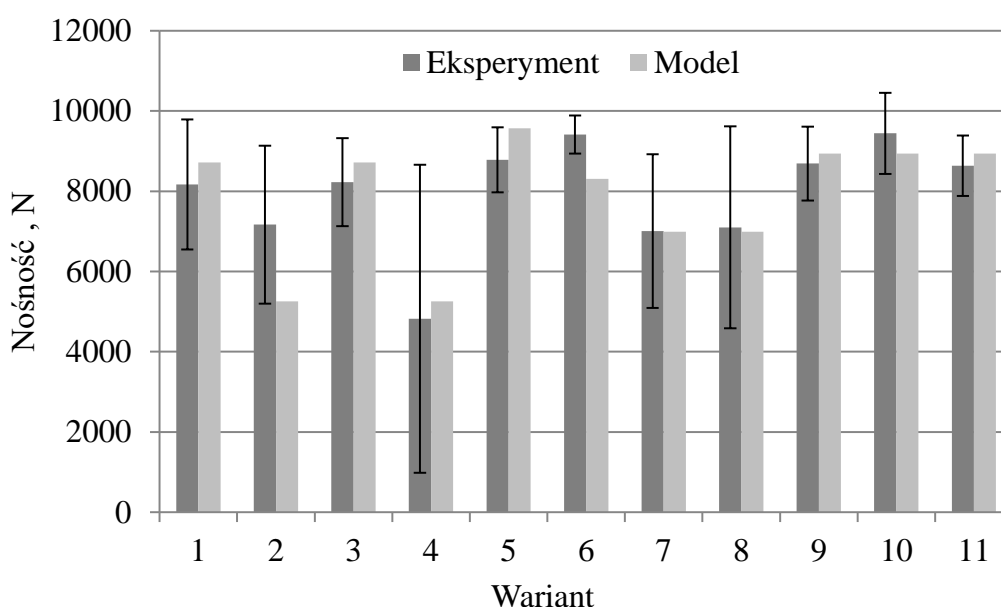
$$y_{P_t} = 8936 - 629,4 \left(\frac{x_t - 120}{60} \right) - 1950,5 \left(\frac{x_{d_k} - 1}{0,5} \right)^2 - 1101,3 \left(\frac{x_{d_k} - 1}{0,5} \right) \left(\frac{x_p - 0,4}{0,1} \right). \quad (6.2)$$

Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń i uporządkowaniu równania (6.2) otrzymano zależność w postaci wielomianu drugiego stopnia (6.3):

$$y_{P_t} = -6417,6 - 10,49x_t + 24414,4x_{d_k} + 22026x_p - 7802x_{d_k}^2 - 22026x_{d_k}x_p, \quad (6.3)$$

gdzie y_{p_t} oznacza nośność połączenia klejowego, x_t jest zmienną czasu kulkowania, x_{d_k} jest zmienną średnicy kulek, x_p jest zmienną ciśnienia sprężonego powietrza. Otrzymane równanie regresji (6.3) jest matematycznym modelem opisującym wpływ czasu kulkowania, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza na nośność połączeń klejowych wykonanych ze stopu aluminium AW-2024-T3 poddanych pneumokulkowaniu (w założonym obszarze zmienności czynników wejściowych).

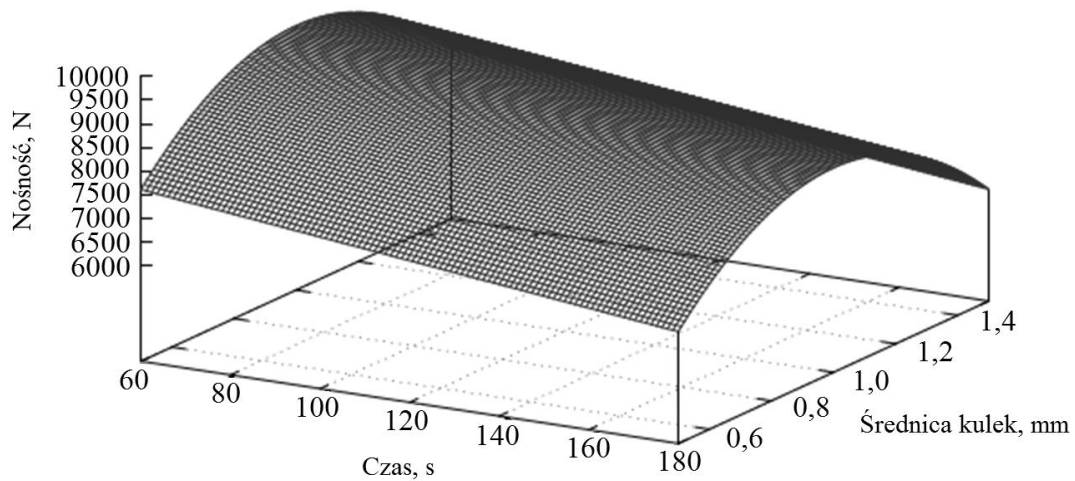
Wartości nośności połączeń klejowych otrzymane doświadczalnie oraz obliczone na podstawie modelu (6.3) zamieszczono w tabeli 6.2 oraz przedstawiono na rysunku 6.4.



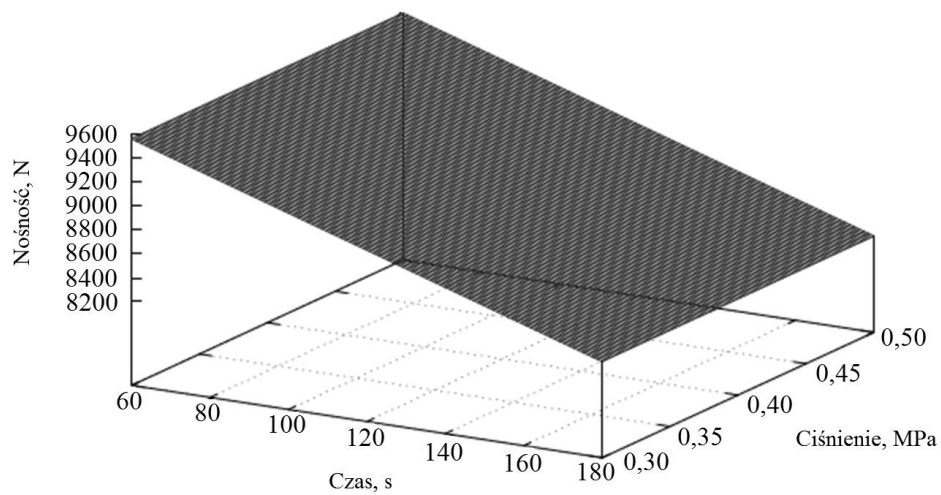
Rys. 6.4. Porównanie wartości nośności uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie modelu wraz z odchyleniem standardowym [opracowanie własne]

Wartości nośności połączeń klejowych obliczone na podstawie równania regresji (6.3) wykazują silną korelację z wynikami doświadczalnymi. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona między wynikami doświadczalnymi i obliczonymi wynosi 0,85.

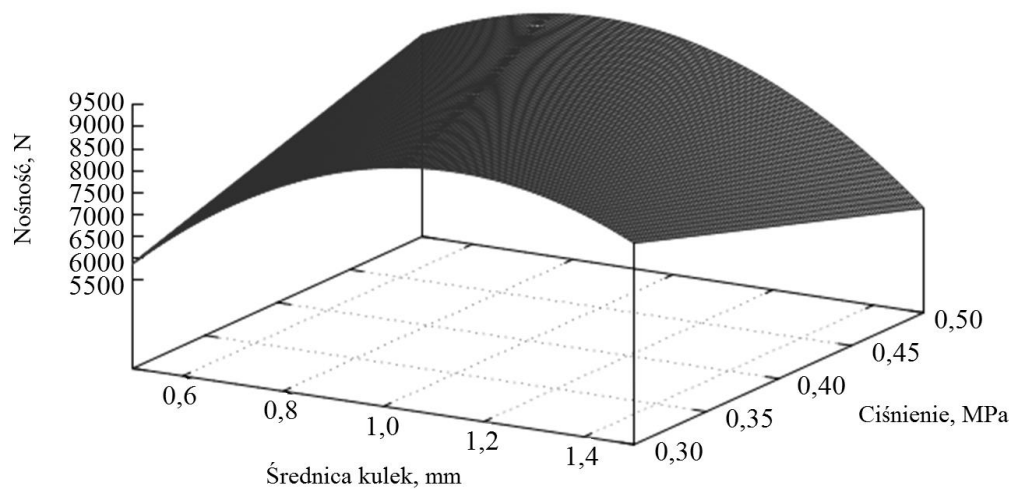
Na podstawie równania regresji (6.3) sporządzono wykresy, które dla przyjętego w badaniach zakresu zmienności czynników wejściowych, obrazują wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania (czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu. Wykresy przedstawiono na rysunkach 6.5-6.7.



Rys. 6.5. Wykres obrazujący wpływ czasu i średnicy kulek na nośność połączeń klejowych (ciśnienie 0,4 MPa) [opracowanie własne]



Rys. 6.6. Wykres obrazujący wpływ czasu i ciśnienia na nośność połączeń klejowych (średnica kulek 1 mm) [opracowanie własne]



Rys. 6.7. Wykres obrazujący wpływ średnicy kulek i ciśnienia na nośność połączeń klejowych (czas 60 s) [opracowanie własne]

Na podstawie równania regresji (6.3) oraz wykresów przedstawionych na rysunkach 6.5-6.7 można stwierdzić, że dla przyjętego zakresu zmienności czynników wejściowych wpływ średnicy kulek na nośność połączeń klejowych jest nieliniowy. Największą wartość nośności obserwuje się w przypadku pneumokulkowania kulkami o średnicy około 1 mm. Wydłużanie czasu trwania obróbki przyczynia się do zmniejszenia nośności. Wpływ ciśnienia na nośność połączeń jest zależny od średnicy kulek. W przypadku małych średnic nośność zwiększa się wraz ze zwiększaniem ciśnienia, a w przypadku dużych średnic nośność zmniejsza się wraz ze zwiększaniem ciśnienia.

Zależność pomiędzy nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu a poszczególnymi parametrami pneumokulkowania zbadano również z wykorzystaniem jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA, analizy regresji i korelacji. Analizy przeprowadzono przy pomocy oprogramowania Minitab. Do analiz przyjęto istotność statystyczną $\alpha = 0,05$. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami pneumokulkowania i nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu oraz wyniki oceny istotności* [opracowanie własne]

Parametr	Zmienna niezależna	$Pv1$	Równanie regresji	$Pv2$	Współ. korelacji liniowej Pearsona r	$Pv3$
y_{Pt}	x_t	0,508	$y_{Pt} = 9207 - 10,5x_t$	0,275	-0,361	0,275
y_{Pt}	x_{dk}	0,028	$y_{Pt} = 8681 - 732x_{dk}$	0,535	-0,210	0,535
y_{Pt}	x_p	0,804	$y_{Pt} = 9051 - 2757x_p$	0,642	-0,158	0,642

* $Pv1$ – poziom prawdopodobieństwa w jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA), $Pv2$ – poziom prawdopodobieństwa dla zmiennej niezależnej w analizie regresji, $Pv3$ – poziom prawdopodobieństwa w analizie współczynnika korelacji liniowej

Na podstawie wyników jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA (tabela 6.4) można stwierdzić, że w przyjętym zakresie zmienności parametrów wejściowych jedynie średnica kulek ma istotny wpływ na nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu. Wskazuje na to wartość prawdopodobieństwa $Pv1$, która jedynie w przypadku średnicy kulek jest mniejsza niż 0,05.

W wyniku przeprowadzonej analizy regresji utworzono liniowe równania regresji opisujące wpływ zmiennych niezależnych (czasu pneumokulkowania, średnicy kulek lub ciśnienia sprężonego powietrza) na nośność połączeń klejowych. Na podstawie utworzonych równań można stwierdzić, że w przyjętym zakresie zmienności czynników wejściowych wraz

ze zwiększaniem wartości parametrów niezależnych następuje spadek wartości nośności połączeń klejowych.

Poziom prawdopodobieństwa $Pv2$ dla zmiennych niezależnych w równaniach regresji w każdym przypadku jest większy niż 0,05. W związku z tym, można stwierdzić, że relacja między zmiennymi niezależnymi i nośnością połączeń nie jest istotna statystycznie. Utworzone liniowe równania regresji nie mogą więc służyć do przewidywania nośności połączeń klejowych na podstawie wartości zmiennych niezależnych.

W badaniach założono, że silna korelacja między zmiennymi występuje wtedy, gdy wartości bezwzględne współczynników korelacji liniowej Pearsona są zbliżone do 1. Obliczone wartości bezwzględne współczynników korelacji liniowej Pearsona, przedstawione w tabeli 6.4 wynoszą 0,361, 0,210 oraz 0,158. Można więc stwierdzić, że w przyjętym zakresie zmienności parametrów wejściowych, zmienne niezależne nie są silnie skorelowane z nośnością połączeń klejowych.

6.2. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na intensywność obróbki

Badania mające na celu określenie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na intensywność obróbki przeprowadzono według planu doświadczeń Hartleya PS/DS-P:Ha₃, zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.1. W celu sprawdzenia, czy na podstawie intensywności obróbki można przewidywać nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu przeprowadzono analizę regresji i korelacji między wartością strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena i nośnością połączeń klejowych. Opis procesu pneumokulkowania zamieszczono w podrozdziale 5.4. Intensywność pneumokulkowania oceniono za pomocą próby Almena. Metodykę próby Almena opisano w podrozdziale 5.5.

Badania według planu doświadczeń Hartleya PS/DS-P:Ha₃ przeprowadzono dla trzech czynników wejściowych: czasu pneumokulkowania, średnicy kulek oraz ciśnienia sprężonego powietrza. Przyjęte wartości oraz sposób kodowania czynników wejściowych zamieszczono w tabeli 6.1. Czynnikiem wynikowym była intensywność procesu pneumokulkowania, wyrażona za pomocą wartości strzałki ugięcia f_A płytek kontrolnych Almena.

W tabeli 6.5 zamieszczono macrycę planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ wraz z wynikami pomiarów strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wynikami wybranych obliczeń pomocniczych.

Tabela 6.5. Wyniki pomiarów strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wyniki wybranych obliczeń pomocniczych [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			Wyniki pomiarów strzałki ugięcia f_A , mm			Wyniki wybranych obliczeń*			
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_i , mm	$S^2(y)_i$, mm ²	\hat{y}_i , mm	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)$, mm ²
1	-	-	+	0,070	0,070	0,072	0,071	0,000001	0,028	0,001790
2	+	-	-	0,050	0,052	0,052	0,051	0,000001	0,003	0,002902
3	-	+	-	0,042	0,042	0,044	0,043	0,000001	0,011	0,000973
4	+	+	+	0,242	0,242	0,242	0,242	0,000000	0,363	0,014700
5	-	0	0	0,048	0,050	0,048	0,049	0,000001	0,033	0,000261
6	+	0	0	0,080	0,080	0,080	0,080	0,000000	0,103	0,000527
7	0	-	0	0,034	0,036	0,036	0,035	0,000001	0,051	0,000230
8	0	+	0	0,152	0,152	0,152	0,152	0,000000	0,144	0,000070
9	0	0	-	0,028	0,026	0,026	0,027	0,000001	0,003	0,000573
10	0	0	+	0,052	0,054	0,056	0,054	0,000004	0,085	0,000944
11	0	0	0	0,070	0,066	0,066	0,067	0,000005	0,054	0,000173
Σ	-	-	-	-	-	-	0,87	0,000017	-	0,023144

* \bar{y}_i – średnia arytmetyczna wartości strzałki ugięcia płytek Almena w i -tym doświadczeniu, obliczona na podstawie wyników trzech pomiarów, $S^2(y)_i$ – wariancja błędów pomiaru w i -tym doświadczeniu obliczona ze wzoru (wzór nr 5.14), \hat{y}_i – wartość strzałki ugięcia płytek Almena dla i -tego wariantu, obliczona na podstawie równania regresji (wzór nr 6.6)

Na podstawie wyników pomiarów strzałki ugięcia płytek Almena, zamieszczonych w tabeli 6.6 można stwierdzić, że największe wartości strzałki ugięcia uzyskano dla próbek kulkowanych w czasie 180 s, kulkami o średnicy 1,5 mm przy zastosowaniu ciśnienia 0,5 MPa, a więc przy największych przyjętych wartościach parametrów wejściowych (wariant nr 4). Najmniejsze wartości strzałki ugięcia zaobserwowano dla czasu 120 s, średnicy kulek 1 mm i ciśnienia 0,3 MPa (wariant nr 9). Bardzo zbliżone wartości strzałki ugięcia osiągnięto dla parametrów technologicznych rzędu 180 s, 0,5 mm, 0,3 MPa (wariant nr 2) oraz 60 s, 1,0 mm, 0,4 MPa (wariant nr 5), co może sugerować, że możliwe jest skracanie czasu trwania procesu przez odpowiedni dobór średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza (wspominano o takim zjawisku w [156]).

Warunki realizacji doświadczeń zostały ocenione pod względem ich powtarzalności. W wyniku przeprowadzonej oceny stwierdzono, że wartość współczynnika G wynosi $G = 0,3077$ i jest niższa od wartości krytycznej G_{kr} ($G < G_{kr} = G_{(0,05;11;2)} = 0,4187$). W związku z tym, powtarzalność warunków realizacji doświadczeń można uznać za zadawalającą.

Kolejnym etapem było wyznaczenie wartości współczynników równania regresji b_0 , b_k , b_{kk} oraz b_{kj} . Następnie przeprowadzono ocenę ich istotności, poprzez porównanie wartości

współczynników z wartościami krytycznymi b_{0kr} , b_{kkr} , b_{kkkr} oraz b_{k_jkr} . Obliczone wartości współczynników regresji oraz wyniki oceny ich istotności przedstawiono w tabeli 6.6.

Tabela 6.6. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji [opracowanie własne]

Współczynnik równania regresji	Obliczona wartość współczynnika	Krytyczna wartość współczynnika	Ocena istotności	
b_0	0,054194	0,000829	$ b_0 > b_{0kr}$	istotny
b_1	0,035222	0,000614	$ b_1 > b_{1kr}$	istotny
b_2	0,046556	0,000614	$ b_2 > b_{2kr}$	istotny
b_3	0,041000	0,000614	$ b_3 > b_{3kr}$	istotny
b_{11}	0,013535	0,000966	$ b_{11} > b_{11kr}$	istotny
b_{22}	0,042871	0,000966	$ b_{22} > b_{22kr}$	istotny
b_{33}	-0,010467	0,000966	$ b_{33} > b_{33kr}$	istotny
b_{12}	0,054667	0,000752	$ b_{12} > b_{12kr}$	istotny
b_{13}	0,040667	0,000752	$ b_{13} > b_{13kr}$	istotny
b_{23}	0,045000	0,000752	$ b_{23} > b_{23kr}$	istotny

Zgodnie z przeprowadzoną oceną istotności, wszystkie współczynniki równania regresji zostały uznane za istotne. W efekcie, równanie regresji przyjęło postać (6.4):

$$y_{f_A} = 0,054194 + 0,035222x_1 + 0,046556x_2 + 0,041x_3 + 0,013535x_1^2 + 0,042871x_2^2 - 0,010467x_3^2 + 0,054667x_1x_2 + 0,040667x_1x_3 + 0,045x_2x_3. \quad (6.4)$$

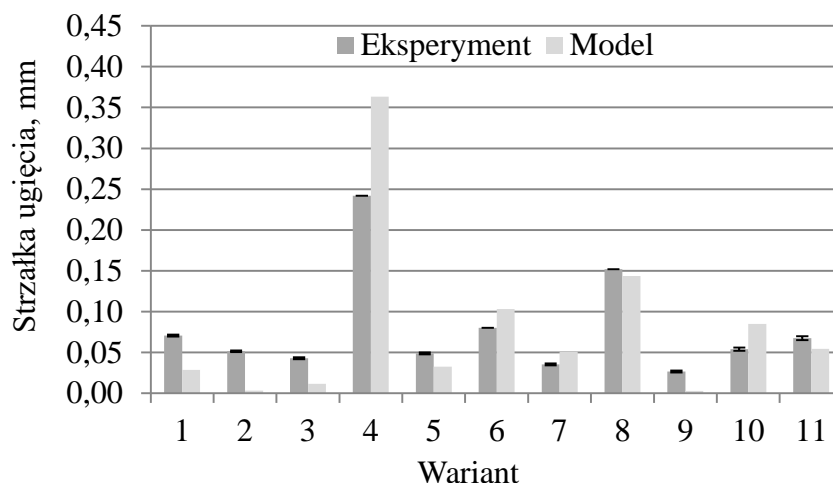
Następnie, równanie regresji odkodowano, poprzez podstawienie do wzoru (6.4) zależności z tabeli 6.1 (podrozdział 6.1) otrzymując zależność (6.5):

$$y_{f_A} = 0,054194 + 0,035222 \left(\frac{x_t - 120}{60} \right) + 0,046556 \left(\frac{x_{d_k} - 1}{0,5} \right) + 0,041 \left(\frac{x_p - 0,4}{0,1} \right) + 0,013535 \left(\frac{x_t - 120}{60} \right)^2 + 0,042871 \left(\frac{x_{d_k} - 1}{0,5} \right)^2 - 0,010467 \left(\frac{x_p - 0,4}{0,1} \right)^2 + 0,054667 \left(\frac{x_t - 120}{60} \right) \left(\frac{x_{d_k} - 1}{0,5} \right) + 0,040667 \left(\frac{x_t - 120}{60} \right) \left(\frac{x_p - 0,4}{0,1} \right) + 0,045 \left(\frac{x_{d_k} - 1}{0,5} \right) \left(\frac{x_p - 0,4}{0,1} \right). \quad (6.5)$$

Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń i uporządkowaniu równania (6.5) otrzymano zależność w postaci wielomianu drugiego stopnia (6.6):

$$y_{f_A} = 0,692238 - 0,004906x_t - 0,828496x_{d_k} - 0,466000x_p + 0,000004x_t^2 + 0,171480x_{d_k}^2 - 1,046700x_p^2 + 0,001822x_tx_{d_k} + 0,006778x_tx_p + 0,900000x_{d_k}x_p. \quad (6.6)$$

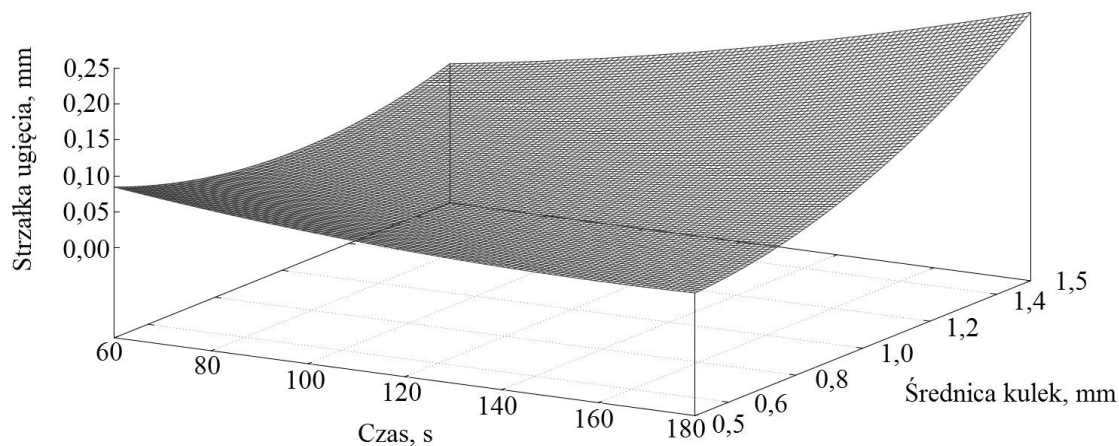
Zależność (6.6) opisuje wpływ czasu kulkowania, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza na wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena. Wartości strzałki ugięcia obliczone na podstawie otrzymanego modelu (6.6) zamieszczono w tabeli 6.6, natomiast porównanie wartości uzyskanych eksperymentalnie i obliczonych z modelu przedstawiono na rys. 6.8.



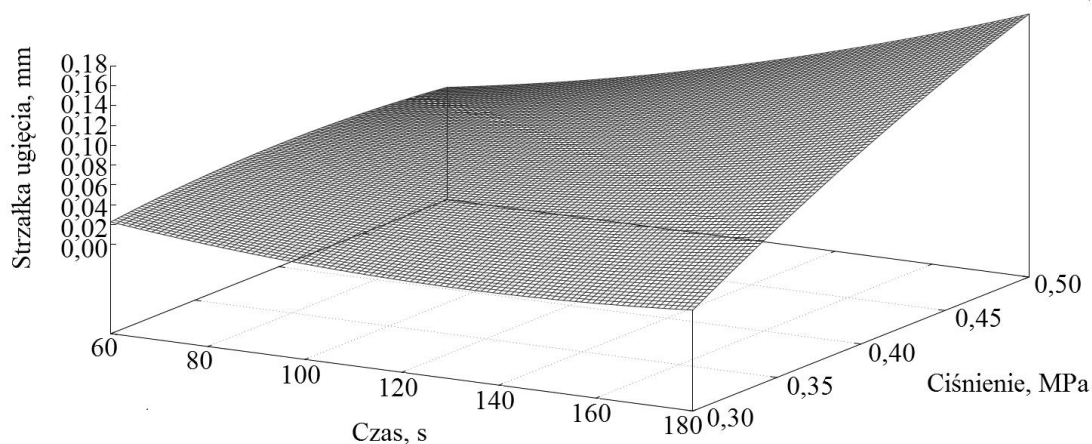
Rys. 6.8. Porównanie wartości strzałki ugięcia uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie modelu wraz z odchyleniem standardowym [opracowanie własne]

Wartości strzałki ugięcia obliczone ze wzoru (6.6) wykazują silną korelację z wynikami doświadczalnymi. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona między wartościami obliczonymi i wartościami uzyskanymi doświadczalnie wynosi 0,95.

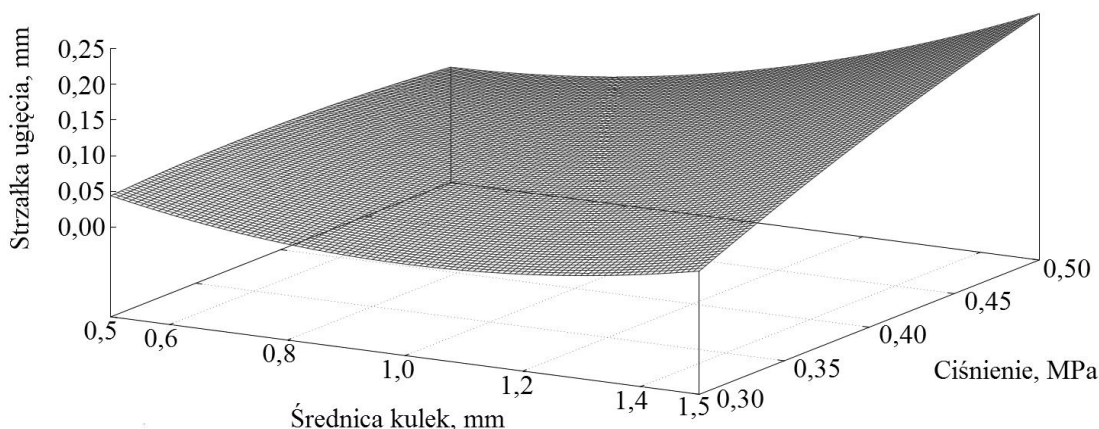
Na rys. 6.9-6.11 przedstawiono graficzne interpretacje uzyskanego równania regresji (6.6).



Rys. 6.9. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i średnicy kulek na strzałkę ugięcia płytek kontrolnych Almena (ciśnienie 0,4 MPa) [opracowanie własne]



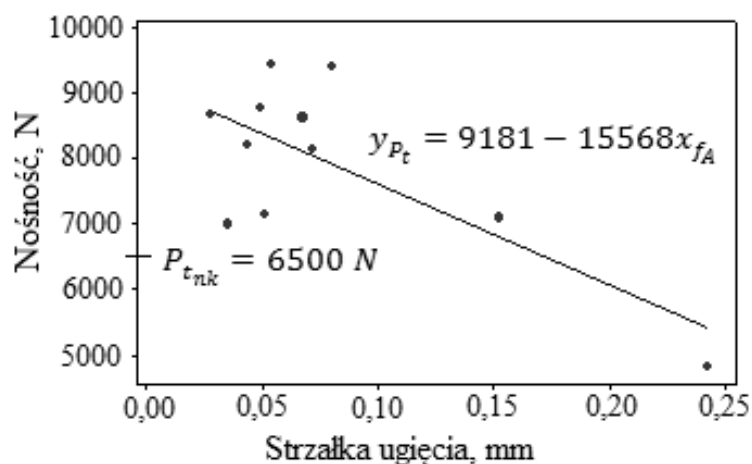
Rys. 6.10. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i ciśnienia na strzałkę ugięcia płytek kontrolnych Almena (średnica kulek 1 mm) [opracowanie własne]



Rys. 6.11. Wykres przedstawiający wpływ średnicy kulek i ciśnienia na strzałkę ugięcia płytek kontrolnych Almena (czas 60 s) [opracowanie własne]

Na podstawie równania regresji (6.6) oraz rys. 6.9-6.11 można stwierdzić, że w przyjętym zakresie zmienności czynników wejściowych, poszczególne parametry obróbki oddziałują na strzałkę ugięcia samodzielnie oraz w interakcji z innymi parametrami. Największe wartości strzałki ugięcia można zaobserwować przy najdłuższym czasie kulkowania i największej średnicy kulek, najdłuższym czasie kulkowania i największym ciśnieniu oraz największej średnicy kulek i największym ciśnieniu.

W celu sprawdzenia, czy możliwe jest wykorzystanie wartości strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena do przewidywania oraz kontrolowania efektów obróbki umacniającej, przeprowadzono analizę regresji i korelacji pomiędzy intensywnością procesu pneumokulkowania i nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu (tabela 6.2 i tabela 6.6). Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem programu Minitab. Na rys. 6.12. przedstawiono równanie regresji opisujące wpływ strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena na nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu.



Rys. 6.12. Równanie regresji opisujące wpływ strzałki ugięcia płytek Almena na nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu wraz z wartością nośności połączeń klejowych niepoddawanych pneumokulkowaniu $P_{t_{nk}} = 6500 \text{ N}$ [opracowanie własne]

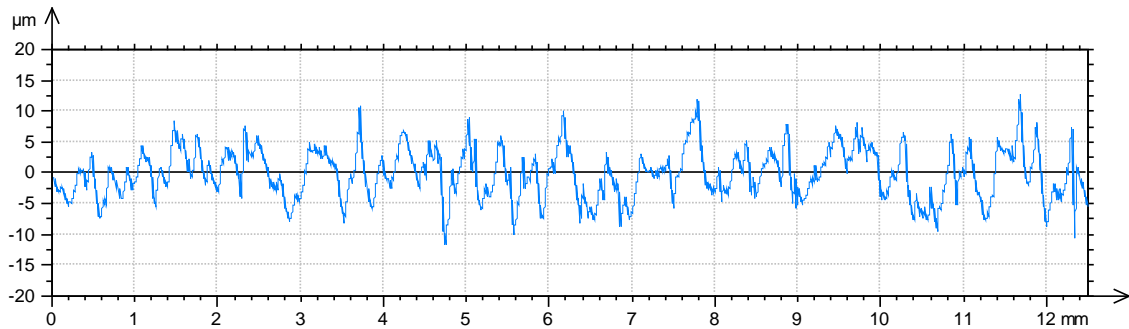
Ocena istotności współczynników równania regresji zamieszczonych na rysunku 6.12 wykazała, że oba współczynniki są istotne. Wartości prawdopodobieństwa dla obu współczynników są mniejsze niż 0,05. W przypadku członu stałego prawdopodobieństwo wynosi 0, natomiast w przypadku członu przy zmiennej x_{f_A} wartość prawdopodobieństwa wynosi 0,01. Zgodnie z równaniem regresji, w założonym obszarze zmienności czynników wejściowych, nośność połączeń klejowych maleje wraz ze wzrostem strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena. Potwierdza to wartość współczynnika korelacji Pearsona, który wynosi -0,733. Współczynnik determinacji wskazuje, że 54% wyników nośności można opisać równaniem regresji przedstawionym na wykresie (rys. 6.12). Oznacza to, że w założonym obszarze zmienności czynników wejściowych, wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena mogą być stosowane do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu i oceny poprawności obróbki umacniającej.

6.3. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na strukturę geometryczną powierzchni

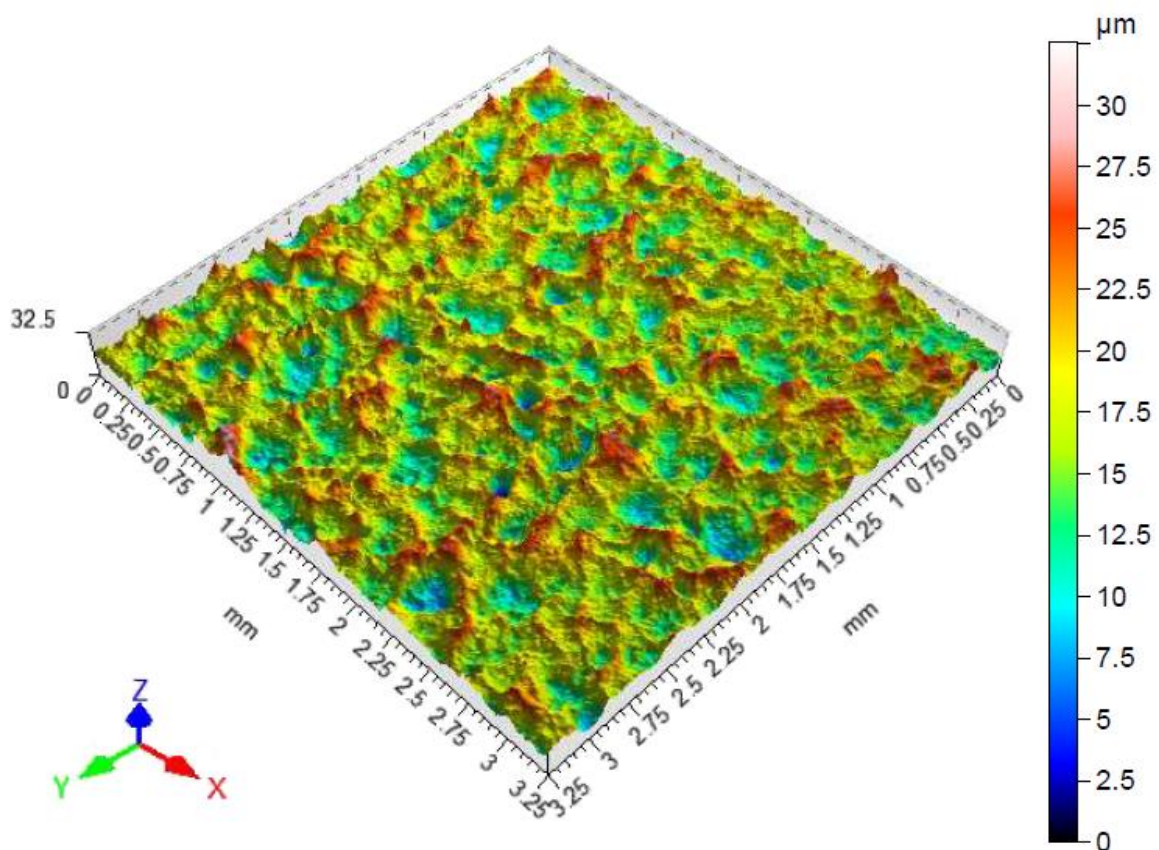
Badania mające na celu określenie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na strukturę geometryczną powierzchni przeprowadzono według planu doświadczeń Hartleya PS/DS-P:Ha₃. Matematyczne opracowanie wyników badań sporządzono zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.1. Sposób przygotowania próbek do badań i metodykę pomiaru chropowatości opisano w podrozdziale 5.6. W celu sprawdzenia, czy możliwe jest wykorzystanie wartości wybranych parametrów chropowatości do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu oraz do oceny

poprawności obróbki umacniającej przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA, analizę regresji i korelacji między nośnością połączeń klejowych i parametrami chropowatości powierzchni.

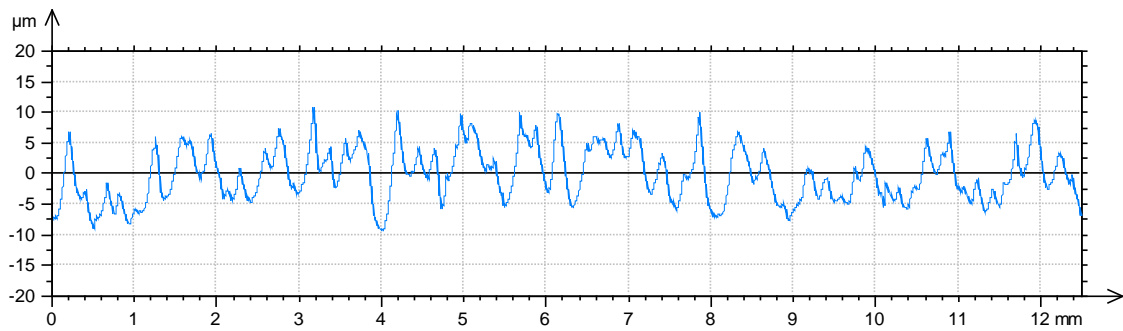
Wybrane profile chropowatości oraz obrazy izometryczne powierzchni po pneumokulkowaniu przedstawiono na rysunkach 6.13-6.18.



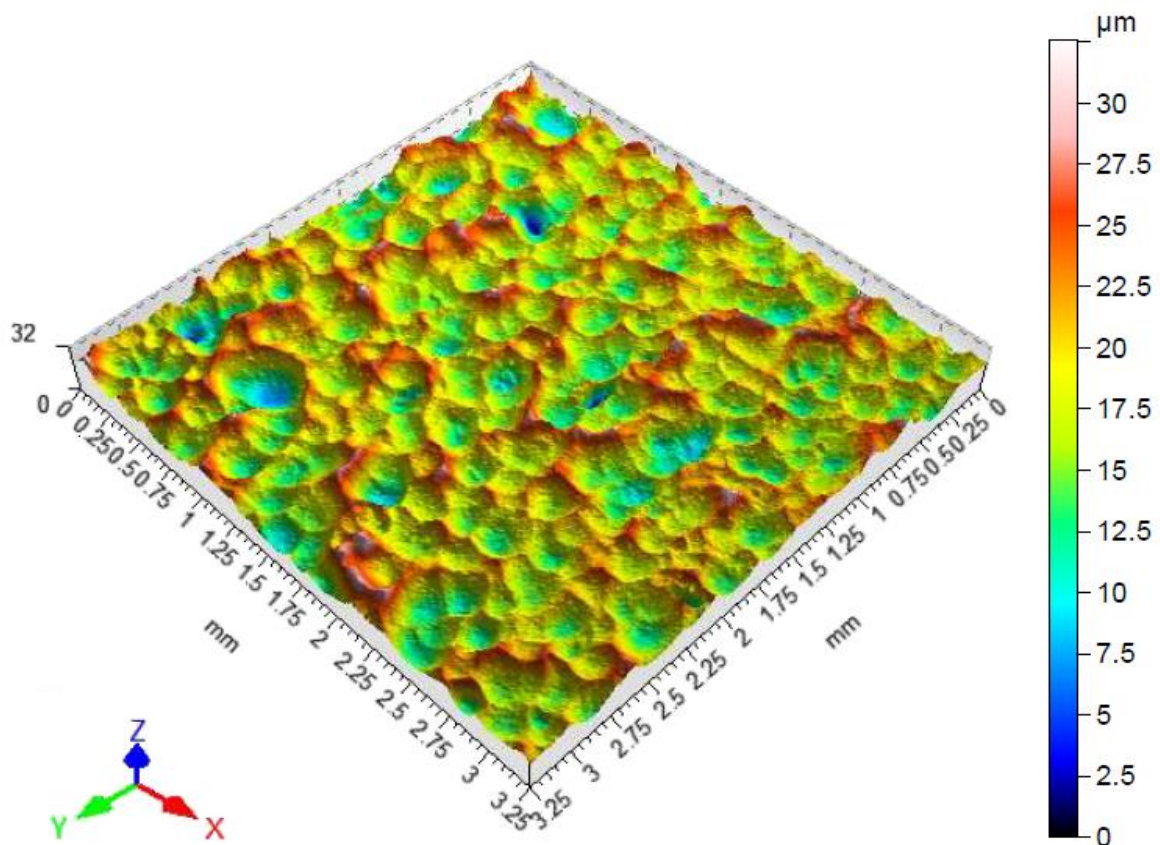
Rys. 6.13. Profil chropowatości powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 10 (czas 120 s, średnica kulek 1,0 mm, ciśnienie 0,5 MPa) [opracowanie własne]



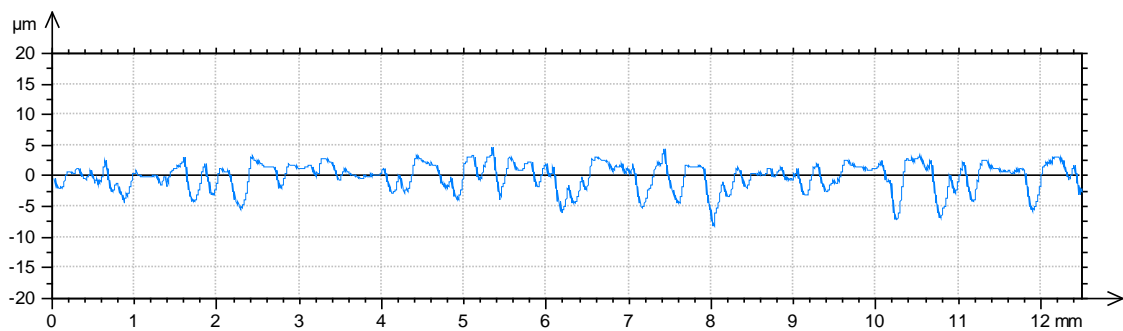
Rys. 6.14. Obraz izometryczny powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 10 (czas 120 s, średnica kulek 1,0 mm, ciśnienie 0,5 MPa) [opracowanie własne]



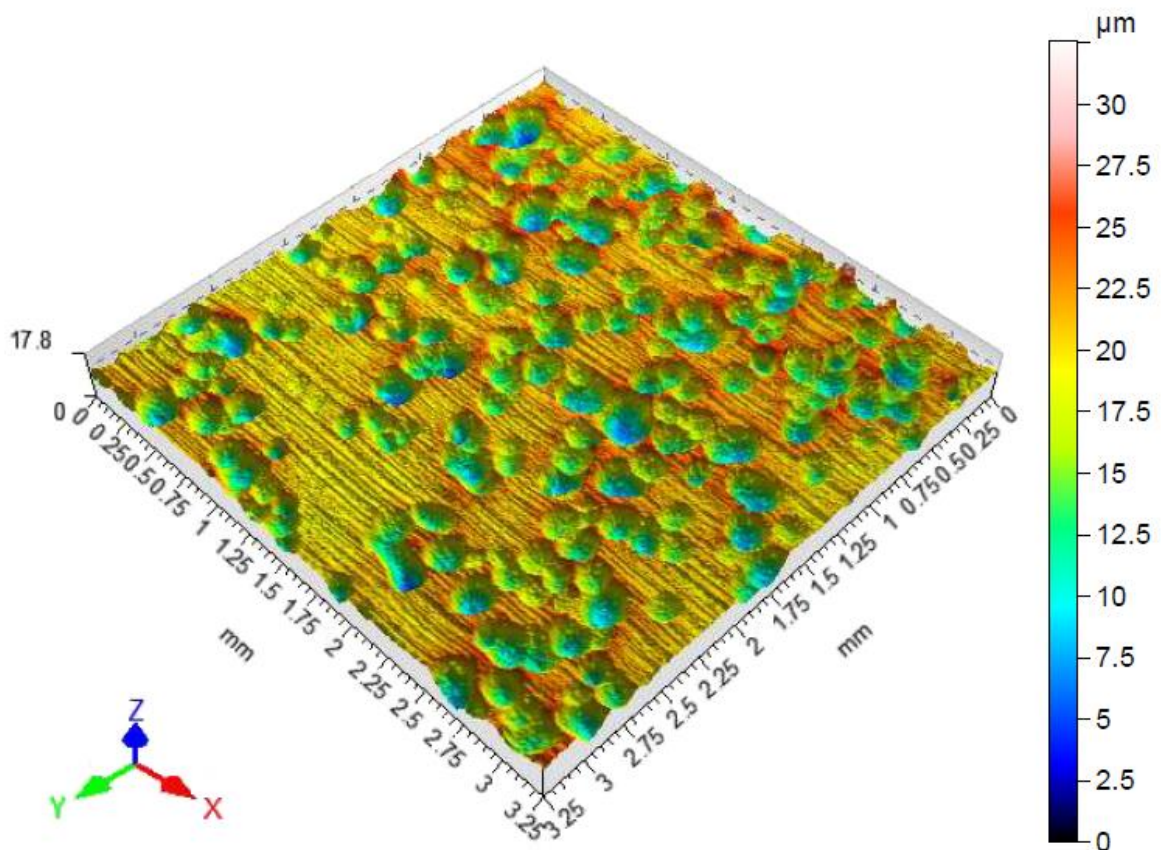
Rys. 6.15. Profil chropowości powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 4 (czas 180 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,5 MPa) [opracowanie własne]



Rys. 6.16. Obraz izometryczny powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 4 (czas 180 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,5 MPa) [opracowanie własne]



Rys. 6.17. Profil chropowości powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 3 (czas 60 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,3 MPa) [opracowanie własne]



Rys. 6.18. Obraz izometryczny powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 3 (czas 60 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,3 MPa) [opracowanie własne]

Na podstawie rys. 6.13-6.18 można stwierdzić, że w wyniku pneumokulkowania na obrabianych powierzchniach powstały liczne sferyczne wgłębienia. W zależności od przyjętych parametrów pneumokulkowania obrabiane powierzchnie różnią się między sobą stopniem pokrycia śladami po pneumokulkowaniu oraz wartościami parametrów chropowatości. Zarówno powierzchnię przedstawioną na rys. 6.14 jak i powierzchnię ukazaną na rys. 6.16 charakteryzuje pełne pokrycie śladami po pneumokulkowaniu. Powierzchnie te różnią się jednak wartością parametrów chropowatości, między innymi gęstością wierzchołków (parametr Spd). Na rys. 6.18 można zaobserwować natomiast niepełne pokrycie powierzchni śladami po obróbce.

Zmierzone wartości parametrów chropowatości powierzchni po pneumokulkowaniu wraz z matrycą planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ zamieszczono w tabeli 6.7 (parametry chropowatości zmierzone w układzie dwuwymiarowym) oraz w tabeli 6.8 (parametry chropowatości zmierzone w układzie przestrzennym).

Tabela 6.7. Wartości parametrów chropowatości po pneumokulkowaniu w układzie 2D (średnia arytmetyczna z 5 pomiarów) [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			<i>Rp</i> , μm	<i>Rv</i> , μm	<i>Rz</i> , μm	<i>Rc</i> , μm	<i>Rt</i> , μm	<i>Ra</i> , μm	<i>Rq</i> , μm	<i>Rsk</i>	<i>Rku</i>	<i>RSm</i> , mm	<i>Rdq</i> , μm	<i>Rda</i> , μm
	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃												
1	-	-	+	5,67	5,49	11,16	6,06	18,88	1,90	2,37	0,0823	3,04	0,171	8,662	5,444
2	+	-	-	3,47	3,61	7,08	3,40	12,00	1,13	1,43	-0,0371	3,07	0,129	7,228	4,454
3	-	+	-	2,59	3,16	5,75	3,94	9,49	1,15	1,42	-0,3792	2,82	0,335	4,236	2,154
4	+	+	+	5,92	4,91	10,82	7,36	19,46	2,22	2,72	0,1356	2,50	0,310	5,952	3,546
5	-	0	0	5,10	5,84	10,94	6,49	18,74	1,96	2,45	-0,2156	3,03	0,234	7,350	4,466
6	+	0	0	5,75	5,90	11,64	6,54	19,48	2,09	2,61	0,0043	2,95	0,206	8,086	5,140
7	0	-	0	4,02	3,82	7,83	4,07	12,92	1,33	1,65	0,1009	2,90	0,144	7,152	4,480
8	0	+	0	5,19	4,48	9,68	6,81	16,16	2,03	2,45	0,1688	2,50	0,311	5,432	3,260
9	0	0	-	5,04	5,90	10,94	6,28	19,48	1,94	2,40	-0,1862	2,99	0,211	8,034	4,838
10	0	0	+	6,45	6,55	12,98	7,29	26,20	2,27	2,87	0,0294	2,89	0,222	8,564	5,414
11	0	0	0	5,67	6,50	12,16	7,16	21,02	2,11	2,65	-0,1134	3,11	0,215	8,628	5,306

Tabela 6.8. Wartości parametrów chropowatości po pneumokulkowaniu w układzie 3D (średnia arytmetyczna z 3 pomiarów) [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			<i>Sq</i> , μm	<i>Ssk</i>	<i>Sku</i>	<i>Sp</i> , μm	<i>Sv</i> , μm	<i>Sz</i> , μm	<i>Sa</i> , μm	<i>Sal</i> , mm	<i>Str</i>	<i>Sdq</i>	<i>Sdr</i> , %	<i>Spd</i> , 1/mm ²	<i>Spc</i> , 1/mm	<i>S10z</i> , μm
	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃														
1	-	-	+	2,56	0,0262	3,62	12,35	14,58	26,9	2,00	0,0629	0,920	0,213	2,180	79,3	103,7	20,3
2	+	-	-	1,58	-0,0699	3,69	8,91	10,00	18,9	1,23	0,0519	0,905	0,169	1,401	114,8	91,4	14,1
3	-	+	-	2,09	-1,0420	3,77	6,53	11,34	17,9	1,68	0,0957	0,926	0,107	0,566	28,2	82,0	13,3
4	+	+	+	3,91	0,0849	3,11	14,75	15,70	30,5	3,10	0,1426	0,856	0,138	0,938	15,6	80,2	19,5
5	-	0	0	3,35	-0,5400	3,97	13,68	23,70	37,4	2,68	0,0871	0,927	0,200	1,928	21,8	85,6	25,6
6	+	0	0	3,42	-0,1653	4,07	14,15	21,63	35,8	2,65	0,0959	0,906	0,202	1,972	31,7	88,1	26,4
7	0	-	0	1,90	-0,0966	3,61	9,67	11,50	21,2	1,49	0,0626	0,889	0,176	1,517	93,1	102,1	15,3
8	0	+	0	3,21	-0,0329	2,64	10,46	14,14	24,6	2,61	0,1144	0,910	0,132	0,860	19,4	99,5	16,3
9	0	0	-	2,93	-0,4494	4,06	10,72	21,20	31,9	2,32	0,0755	0,907	0,209	2,085	33,7	95,4	24,6
10	0	0	+	3,67	-0,0460	3,57	15,36	22,21	37,5	2,88	0,0965	0,899	0,215	2,214	30,5	95,6	27,1
11	0	0	0	3,43	-0,2201	3,93	16,09	22,68	38,8	2,68	0,0856	0,925	0,207	2,062	25,6	73,2	26,3

Pierwszym etapem analizy uzyskanych wyników było określenie zależności pomiędzy wartościami parametrów chropowatości powierzchni po pneumokulkowaniu (tabela 6.7 i tab. 6.8) i nośnością połączeń klejowych po pneumokulkowaniu (tab. 6.2) oraz wytypowanie parametrów chropowatości, które mogłyby służyć do oceny poprawności obróbki umacniającej (pneumokulkowania). W tym celu, przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA, analizę regresji i korelacji. Obliczenia wykonano przy pomocy oprogramowania Minitab.

W tabeli 6.9 przedstawiono wyniki analiz statystycznych (poziom prawdopodobieństwa w jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA), równania regresji, poziom prawdopodobieństwa dla zmiennej niezależnej w analizie regresji oraz poziom prawdopodobieństwa w analizie współczynnika korelacji liniowej) wykonanych dla parametrów chropowatości zmierzonych w układzie dwuwymiarowym, natomiast w tabeli 6.10 dla parametrów zmierzonych w układzie przestrzennym.

Tabela 6.9. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami chropowatości powierzchni w układzie 2D i nośnością połączeń klejowych (po pneumokulkowaniu), wyniki oceny istotności* [opracowanie własne]

Parametr	Zmienna niezależna	<i>Pv1</i>	Równanie regresji	<i>Pv2</i>	Współ. korelacji liniowej Pearsona <i>r</i>	<i>Pv3</i>
y_{Pt}	x_{Rp}	0,179	$y_{Pt} = 7070 + 176x_{Rp}$	0,656	0,152	0,656
y_{Pt}	x_{Rv}	0,274	$y_{Pt} = 4852 + 606x_{Rv}$	0,091	0,533	0,091
y_{Pt}	x_{Rz}	0,036	$y_{Pt} = 5804 + 213x_{Rz}$	0,281	0,357	0,281
y_{Pt}	x_{Rc}	0,240	$y_{Pt} = 7243 + 119x_{Rc}$	0,710	0,127	0,710
y_{Pt}	x_{Rt}	0,274	$y_{Pt} = 6148 + 102x_{Rt}$	0,284	0,355	0,284
y_{Pt}	x_{Ra}	0,394	$y_{Pt} = 7046 + 494x_{Ra}$	0,652	0,154	0,652
y_{Pt}	x_{Rq}	0,594	$y_{Pt} = 6810 + 501x_{Rq}$	0,568	0,194	0,568
y_{Pt}	x_{Rsk}	0,566	$y_{Pt} = 7811 - 3694x_{Rsk}$	0,150	-0,465	0,150
y_{Pt}	x_{Rku}	0,485	$y_{Pt} = -4016 + 4139x_{Rku}$	0,031	0,647	0,031
y_{Pt}	x_{Rsm}	0,036	$y_{Pt} = 8983 - 4574x_{Rsm}$	0,496	-0,230	0,496
y_{Pt}	x_{Rdq}	0,306	$y_{Pt} = 4523 + 475x_{Rdq}$	0,109	0,510	0,109
y_{Pt}	x_{Rda}	0,179	$y_{Pt} = 5194 + 625x_{Rda}$	0,135	0,480	0,135

* *Pv1* – poziom prawdopodobieństwa w jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA), *Pv2* – poziom prawdopodobieństwa dla zmiennej niezależnej w analizie regresji, *Pv3* – poziom prawdopodobieństwa w analizie współczynnika korelacji liniowej

Tabela 6.10. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami chropowatości powierzchni w układzie 3D i nośnością połączeń klejowych (po pneumokulkowaniu), wyniki oceny istotności współczynników [opracowanie własne]

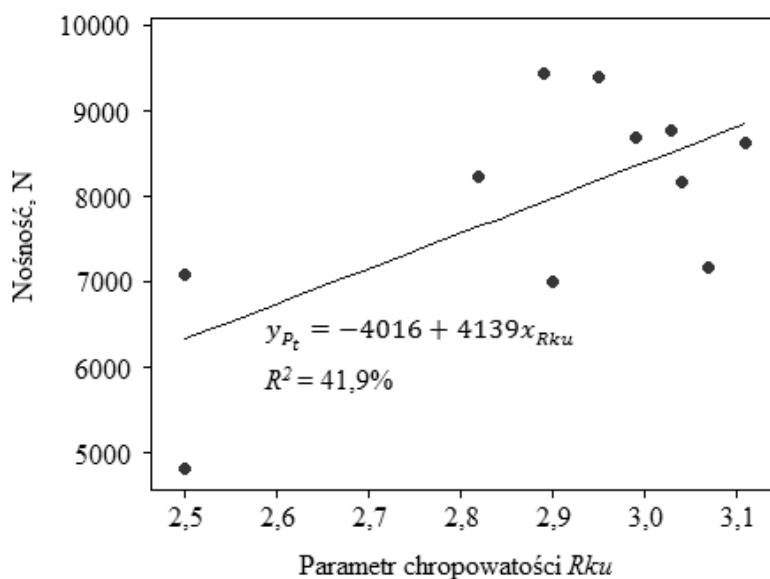
Parametr	Zmienna niezależna	$Pv1$	Równanie regresji	$Pv2$	Współ. korelacji liniowej Pearsona r	$Pv3$
y_{Pt}	x_{Sq}	0,160	$y_{Pt} = 7500 + 154x_{Sq}$	0,623	0,089	0,623
y_{Pt}	x_{Ssk}	0,001	$y_{Pt} = 7623 - 1405x_{Ssk}$	0,044	-0,353	0,044
y_{Pt}	x_{Sku}	0,036	$y_{Pt} = 1905 + 1660x_{Sku}$	0,000	0,593	0,000
y_{Pt}	x_{Sp}	0,296	$y_{Pt} = 7157 + 65,6x_{Sp}$	0,370	0,161	0,370
y_{Pt}	x_{Sv}	0,000	$y_{Pt} = 5766 + 127x_{Sv}$	0,001	0,542	0,001
y_{Pt}	x_{Sz}	0,143	$y_{Pt} = 5885 + 70,6x_{Sz}$	0,011	0,437	0,011
y_{Pt}	x_{Sa}	0,261	$y_{Pt} = 7615 + 145x_{Sa}$	0,715	0,066	0,715
y_{Pt}	x_{Sal}	0,403	$y_{Pt} = 9652 - 19286x_{Sal}$	0,032	-0,375	0,032
y_{Pt}	x_{Str}	0,042	$y_{Pt} = -15553 + 25920x_{Str}$	0,001	0,534	0,001
y_{Pt}	x_{Sdq}	0,019	$y_{Pt} = 4174 + 21089x_{Sdq}$	0,000	0,603	0,000
y_{Pt}	x_{Sdr}	0,087	$y_{Pt} = 5666 + 1415x_{Sdr}$	0,000	0,635	0,000
y_{Pt}	x_{Spd}	0,001	$y_{Pt} = 8190 - 5,37x_{Spd}$	0,441	-0,139	0,441
y_{Pt}	x_{Spc}	0,450	$y_{Pt} = 7792 + 1,7x_{Spc}$	0,902	0,022	0,902
y_{Pt}	x_{S10z}	0,077	$y_{Pt} = 5221 + 131x_{S10z}$	0,001	0,564	0,001

* $Pv1$ – poziom prawdopodobieństwa w jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA), $Pv2$ – poziom prawdopodobieństwa dla zmiennej niezależnej w analizie regresji, $Pv3$ – poziom prawdopodobieństwa w analizie współczynnika korelacji liniowej

Zgodnie z wynikami jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA (tab. 6.9-6.10) w przyjętym zakresie zmienności parametrów wejściowych jedynie zmienne niezależne Rz , RSm , Ssk , Sku , Sv , Str , Sdq , Spd w istotny sposób wpływają na zmienną zależną P_t . Potwierdzają to wartości $Pv1$, które tylko w tych sześciu przypadkach są mniejsze niż 5%.

Opracowane równania regresji (tab. 6.9-6.10) opisują wpływ poszczególnych parametrów chropowatości na nośność połączeń klejowych. Na ich podstawie można stwierdzić, że dla przyjętego zakresu zmienności parametrów wejściowych, wraz ze zwiększaniem wartości parametrów chropowatości następuje zwiększanie nośności połączeń klejowych (wyjątkiem są parametry Rsk , RSm , Ssk , Sal , Spd). Ocena istotności współczynników równań regresji wskazuje jednak, że tylko w przypadku parametrów Rku , Ssk , Sku , Sv , Sz , Sal , Str , Sdq , Sdr oraz $S10z$ wpływ zmiennej niezależnej na wynik równania jest istotny statystycznie ($Pv2 < 0,05$). W związku z tym, tylko te równania mogłyby posłużyć do przewidywania nośności na podstawie wartości parametrów chropowatości. Wartość współczynnika determinancji R^2 wskazuje dodatkowo, że utworzone modele regresji pozwalają na opisanie

41,9% zmienności wyników nośności w przypadku parametru Rku (rys. 6.19) i 38,5% w przypadku parametru Sdr .



Rys. 6.19. Wykres przedstawiający zależność między nośnością połączeń klejowych a parametrem chropowatości Rku wraz z równaniem regresji oraz wartością współczynnika determinacji [opracowanie własne]

W badaniach założono, że silna korelacja między zmiennymi występuje wtedy, gdy wartości bezwzględne współczynników korelacji liniowej są zbliżone do 1. Zgodnie z wynikami analizy korelacji (tab. 6.9), w przyjętym zakresie zmienności parametrów wejściowych, najsilniejsza zależność występuje pomiędzy nośnością połączeń klejowych, a parametrem chropowatości Rku . Współczynnik korelacji liniowej wynosi w tym przypadku 0,647. W związku z tym, nie jest to silna korelacja. Nieco niższe wartości współczynnika korelacji uzyskano dla parametrów Rv i Rdq (dla Rv $r = 0,53$, dla Rdq $r = 0,51$). Najsłabsza korelacja występuje natomiast w przypadku parametrów Ra , Rp i Rc .

Wartości parametrów korelacji liniowej Pearsona wyznaczone dla parametrów chropowatości w układzie 3D (tab. 6.10) wskazują, że nośność połączeń klejowych jest najsilniej skorelowana z parametrem chropowatości Sdr . Wartość parametru korelacji wynosi w tym przypadku 0,635 i świadczy o tym, że wraz ze wzrostem wartości parametru Sdr nośność połączeń klejowych również powinna wzrastać. Podobnie jak w przypadku parametru Rku , również nie jest to silna korelacja.

Przeprowadzone analizy pokazują, że parametrem chropowatości najsilniej skorelowanym z nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu jest parametr

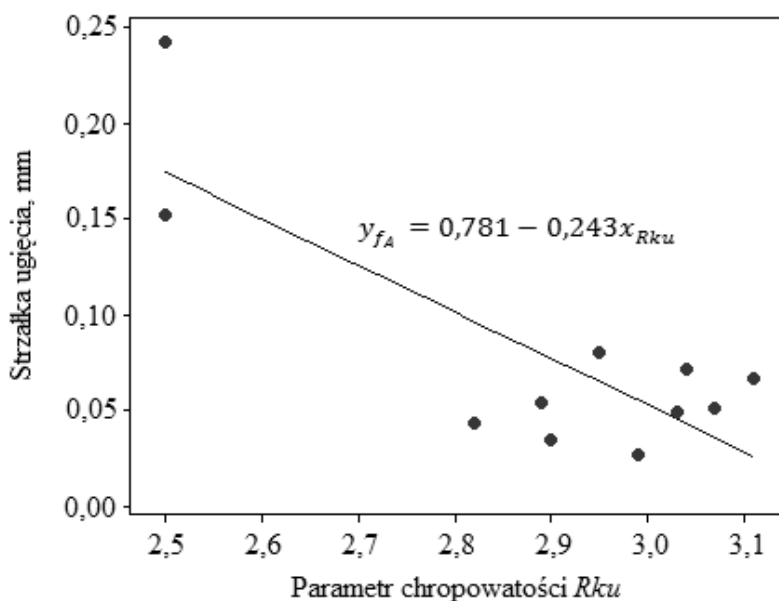
Rku. W związku z tym, parametr *Rku* może być pomocny do przewidywania nośności połączeń klejowych oraz do oceny poprawności obróbki umacniającej.

W następnym kroku sprawdzono, czy strzałka ugięcia płytek kontrolnych Almena (wartości przedstawione w tabeli 6.5 w podrozdziale 6.2) jest skorelowana z parametrem chropowatości *Rku*. W tym celu, przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA, analizę regresji i korelacji. Obliczenia wykonano przy pomocy oprogramowania Minitab. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.11 i na rysunku 6.20.

Tabela 6.11. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami chropowatości powierzchni w układzie 2D i nośnością połączeń klejowych (po pneumokulkowaniu), wyniki oceny istotności* [opracowanie własne]

Parametr	Zmienna niezależna	<i>Pv1</i>	Równanie regresji	<i>Pv2</i>	Współ. korelacji liniowej Pearsona <i>r</i>	<i>Pv3</i>
y_{fA}	x_{Rku}	0,362	$y_{fA} = 0,781 - 0,243x_{Rku}$	0,003	-0,807	0,003

* *Pv1* – poziom prawdopodobieństwa w jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA), *Pv2* – poziom prawdopodobieństwa dla zmiennej niezależnej w analizie regresji, *Pv3* – poziom prawdopodobieństwa w analizie współczynnika korelacji liniowej



Rys. 6.20. Wykres przedstawiający zależność między strzałką ugięcia płytek kontrolnych Almena a parametrem chropowatości *Rku* wraz z równaniem regresji [opracowanie własne]

Zgodnie z wynikami jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA, w przyjętym zakresie zmienności parametrów wejściowych, zmienna niezależna *Rku* nie ma istotnego wpływu na wartość strzałki ugięcia, o czym świadczy wartość prawdopodobieństwa *Pv1*, która jest większa niż 0,05. Na podstawie uzyskanego równania regresji można stwierdzić, że wraz ze

wzrostem parametru Rku następuje zmniejszanie wartości strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena. Ocena istotności współczynników równania regresji wskazuje, że zmienna niezależna Rku w istotny statystycznie sposób wpływa na wynik równania regresji. Wartość prawdopodobieństwa $Pv2$ jest w tym przypadku mniejsza niż 0,05. Obliczona wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona wynosi -0,807 i świadczy o silnej zależności między zmienną Rku i strzałką ugięcia płytek kontrolnych Almena.

Wartość parametru Rku , czyli współczynnika nachylenia profilu (kurtozy), obliczana jest z następującego wzoru (6.7):

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right], \quad (6.7)$$

gdzie: Rq – średnia kwadratowa rzędnych profilu, $Z(x)$ – wartość rzędnej, lr – odcinek elementarny profilu chropowatości. We wzorze na parametr Rku rzędne występują w czwartej potęgze. W związku z tym wartości parametru Rku w dużej mierze zależą od głębokości wgłębień i wysokości wzniesień profilu. W przypadku profilu z bardzo smukłymi wzniesieniami wartość parametru Rku może przekraczać 20. Jeżeli rozkład rzędnych jest rozkładem normalnym wówczas parametr Rku wynosi 3. Wartości parametru Rku mogą posłużyć do wnioskowania o wadach powierzchniowych [1, 135].

Po wykazaniu, że w przyjętym zakresie zmienności czynników wejściowych, parametr Rku jest najsilniej związany z nośnością połączeń klejowych po pneumokulkowaniu oraz ze strzałką ugięcia płytek kontrolnych Almena uznano, że może on służyć do przewidywania nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu oraz do oceny obróbki umacniającej. W związku z tym, przystąpiono do wyznaczania równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia, opisującego wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na wartość parametru Rku . Równanie regresji wyznaczono zgodnie z metodyką zaproponowaną w planie Hartleya PS/DS-P:Ha₃. Czynnikiem wejściowym były parametry procesu pneumokulkowania: czas kulkowania, średnica kulek oraz ciśnienie sprężonego powietrza. Przyjęte wartości oraz sposób kodowania czynników wejściowych zamieszczono w tabeli 6.1. Czynnikiem wynikowym była wartość parametru Rku .

W tabeli 6.12 zamieszczono macierz planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃ wraz z wynikami pomiarów wartości parametru Rku oraz wynikami wybranych obliczeń pomocniczych.

Tabela 6.12. Wyniki pomiarów wartości parametru chropowatości Rku oraz wyniki wybranych obliczeń pomocniczych [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			Wyniki pomiarów parametru chropowatości Rku					Wyniki wybranych obliczeń*			
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	\bar{y}_i , mm	$S^2(y)_i$, mm ²	\hat{y}_i , mm	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)$, mm ²
1	-	-	+	3,06	2,88	3,24	3,31	2,70	3,04	0,06	3,14	0,01
2	+	-	-	3,32	3,06	3,05	2,95	2,97	3,07	0,02	3,14	0,00
3	-	+	-	2,50	3,55	2,70	2,83	2,50	2,82	0,19	2,34	0,22
4	+	+	+	2,50	2,41	2,68	2,45	2,47	2,50	0,01	2,34	0,02
5	-	0	0	3,26	2,63	3,03	2,92	3,32	3,03	0,08	2,96	0,01
6	+	0	0	2,66	2,88	2,69	2,97	3,57	2,95	0,14	2,96	0,00
7	0	-	0	2,85	3,18	2,83	2,86	2,77	2,90	0,03	2,94	0,00
8	0	+	0	2,25	2,40	2,68	2,54	2,62	2,50	0,03	2,54	0,00
9	0	0	-	3,15	3,11	3,09	2,57	3,04	2,99	0,06	2,96	0,00
10	0	0	+	2,97	2,70	2,99	3,19	2,59	2,89	0,06	2,96	0,00
11	0	0	0	2,63	2,88	2,90	3,28	3,86	3,11	0,23	2,96	0,02
Σ	-	-	-	-	-	-	-	-	31,80	0,90	-	0,30

* \bar{y}_i – średnia arytmetyczna parametru Rku w i -tym doświadczeniu, $S^2(y)_i$ – wariancja błędów pomiaru w i -tym doświadczeniu obliczona ze wzoru (5.14), \hat{y}_i – wartość parametru chropowatości Rku dla i -tego wariantu, obliczona na podstawie równania regresji (6.10)

Warunki realizacji doświadczeń zostały ocenione pod względem powtarzalności. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że wartość współczynnika G wynosi 0,2557 i jest niższa od wartości krytycznej G_{kr} ($G < G_{kr} = G_{(0,05;11;4)} = 0,3096$). W związku z tym, powtarzalność warunków realizacji doświadczeń uznano za zadawalającą.

Kolejnym etapem było wyznaczenie wartości współczynników równania regresji b_0 , b_k , b_{kk} oraz b_{kj} . Następnie przeprowadzono ocenę ich istotności, poprzez porównanie wartości współczynników z wartościami krytycznymi b_{0kr} , b_{kkkr} , b_{kkkr} oraz b_{k_jkr} (tab. 6.13)

Tabela 6.13. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji [opracowanie własne]

Współczynnik równania regresji	Obliczona wartość współczynnika	Krytyczna wartość współczynnika	Ocena istotności	
			Wzrost	Składowanie
b_0	2,9576	0,1422	$ b_0 > b_{0kr}$	istotny
b_1	-0,0600	0,1052	$ b_1 < b_{1kr}$	nieistotny
b_2	-0,1983	0,1052	$ b_2 > b_{2kr}$	istotny
b_3	-0,0750	0,1052	$ b_3 < b_{3kr}$	nieistotny
b_{11}	0,0773	0,1657	$ b_{11} < b_{11kr}$	nieistotny
b_{22}	-0,2177	0,1657	$ b_{22} > b_{22kr}$	istotny
b_{33}	0,0243	0,1657	$ b_{33} < b_{33kr}$	nieistotny
b_{12}	-0,0865	0,1289	$ b_{12} < b_{12kr}$	nieistotny
b_{13}	-0,1975	0,1289	$ b_{13} > b_{13kr}$	istotny
b_{23}	-0,0705	0,1289	$ b_{23} < b_{23kr}$	nieistotny

Po wyeliminowaniu współczynników nieistotnych z równania regresji, przyjęło ono następującą postać (6.8):

$$y_{Rku} = 2,9576 - 0,1983x_2 - 0,2177x_2^2 - 0,1975x_1x_3. \quad (6.8)$$

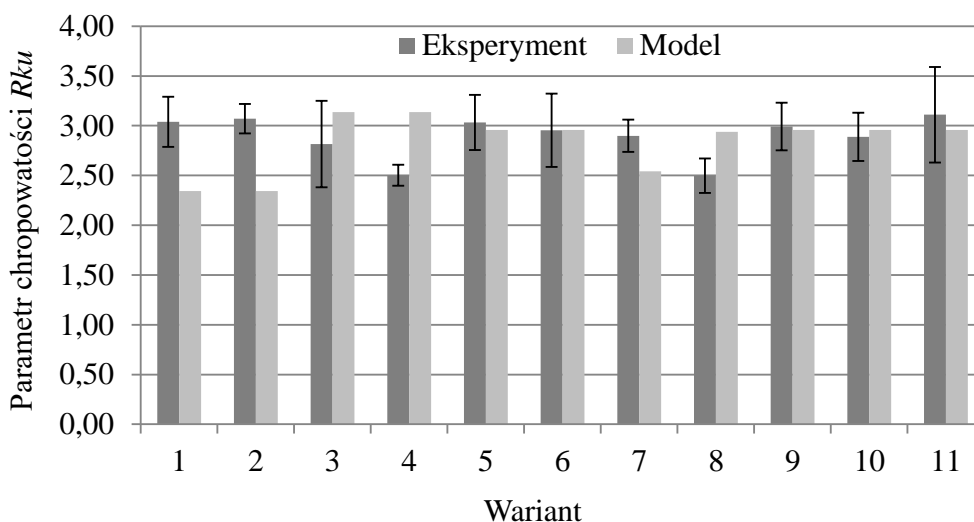
Następnie, równanie regresji odkodowano, poprzez podstawienie do wzoru (6.8) zależności z tabeli 6.1 (podrozdział 6.1) otrzymując zależność (6.9):

$$y_{Rku} = 2,9576 - 0,1983 \left(\frac{x_{dk} - 1}{0,5} \right) - 0,2177 \left(\frac{x_{dk} - 120}{60} \right)^2 - 0,1975 \left(\frac{x_t - 120}{60} \right) \left(\frac{x_p - 0,4}{0,1} \right). \quad (6.9)$$

Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń i uporządkowaniu równania (6.9) otrzymano zależność w postaci wielomianu drugiego stopnia (6.10):

$$y_{Rku} = 0,9042 + 0,01316x_t + 1,345x_{dk} + 3,948x_p - 0,8708x_{dk}^2 - 0,0329x_tx_p. \quad (6.10)$$

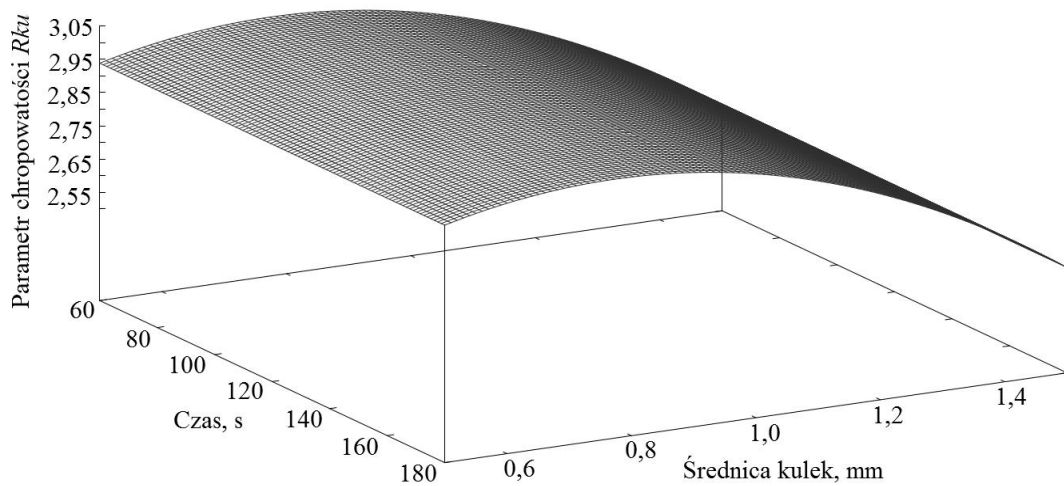
Zależność (6.10) opisuje wpływ czasu kulkowania, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza na wartość parametru chropowatości Rku . Wartości parametru Rku obliczone na podstawie otrzymanego modelu (6.10) zamieszczono w tabeli 6.12, natomiast porównanie wartości uzyskanych eksperymentalnie i obliczonych z modelu przedstawiono na rys. 6.21.



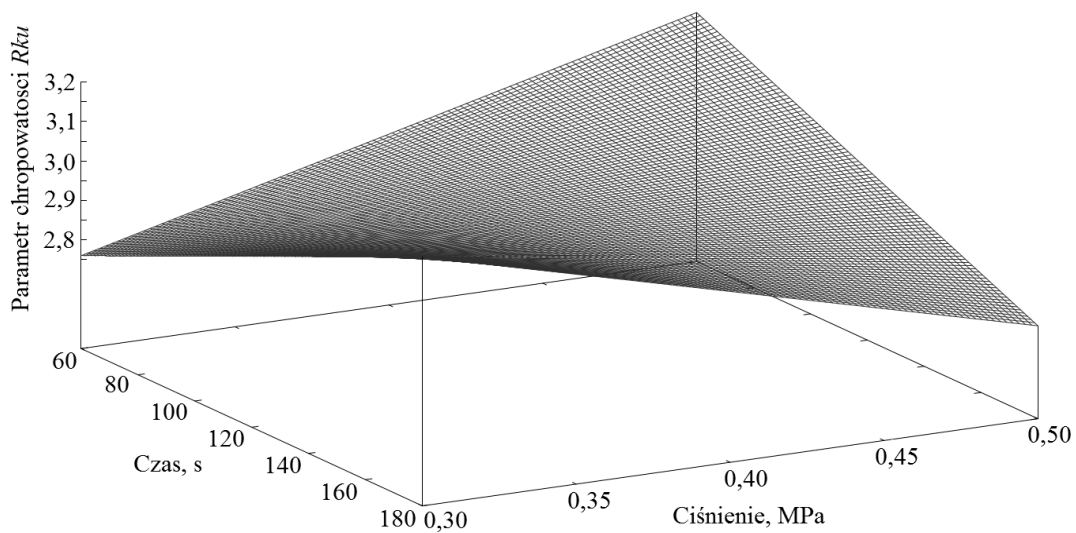
Rys. 6.21. Porównanie wartości parametru Rku uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie modelu wraz z odchyleniem standardowym [opracowanie własne]

Wartości parametru Rku obliczone ze wzoru (6.10) wykazują silną korelację z wynikami doświadczalnymi. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona wynosi 0,83.

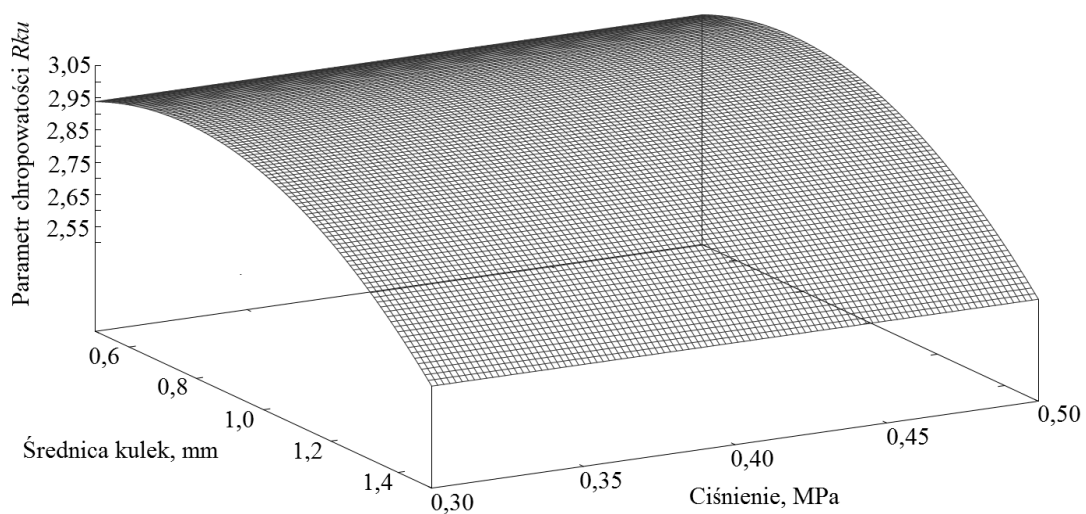
Na rys. 6.22-6.24 przedstawiono graficzne interpretacje uzyskanego równania regresji (6.10).



Rys. 6.22. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i średnicy kulek na wartość parametru R_{ku} (ciśnienie 0,4 MPa) [opracowanie własne]



Rys. 6.23. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i ciśnienia na wartość parametru R_{ku} (średnica kulek 1 mm) [opracowanie własne]



Rys. 6.24. Wykres przedstawiający wpływ średnicy kulek i ciśnienia na wartość parametru R_{ku} (czas 60 s) [opracowanie własne]

Na podstawie równania regresji (6.10) oraz rys. 6.22-6.24 można stwierdzić, że w przyjętym zakresie zmienności czynników wejściowych, średnica kulek oddziałuje na wartość parametru Rku samodzielnie. Największą wartość parametru Rku można zaobserwować dla średnicy kulek wynoszącej około 1 mm. Wpływ czasu kulkowania jest zależny od ciśnienia. W przypadku małego ciśnienia wartość parametru Rku zwiększa się wraz z wydłużaniem czasu obróbki, a w przypadku największego ciśnienia wartość parametru Rku zmniejsza się wraz z wydłużaniem czasu kulkowania.

6.4. Badanie wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na stan naprężeń własnych

Badania mające na celu sprawdzenie, czy w wyniku pneumokulkowania zewnętrznych powierzchni zakładek doszło do ukonstytuowania w ich warstwie wierzchniej ściskających naprężeń własnych oraz czy przyjęte wartości parametrów obróbki mają istotny wpływ na stan naprężeń własnych przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.7.

Wartości naprężeń, zmierzone w warstwie wierzchniej zewnętrznych powierzchni zakładek połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu oraz w warstwie wierzchniej próbki poddanej obróbce strumieniowo-ściernej, przedstawiono w tabeli 6.14.

Tabela 6.14. Wartości naprężeń w warstwie wierzchniej zewnętrznych powierzchni zakładek połączeń klejowych oraz w warstwie wierzchniej płytki poddanej obróbce strumieniowo-ściernej [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			Zmierzone wartości naprężeń, MPa						Wyniki obliczeń*	
	x_1	x_2	x_3	y_1	Błąd±	y_2	Błąd±	y_3	Błąd±	\bar{y}_i , MPa	$S^2(y)_i$, MPa ²
1	-	-	+	-217,65	23,68	-295,15	22,27	-290,78	19,57	-267,86	1896
2	+	-	-	-279,99	30,23	-313,62	31,85	-264,70	27,89	-286,10	626
3	-	+	-	-284,85	77,90	-279,89	55,33	-115,21	49,33	-226,65	9320
4	+	+	+	-277,32	10,80	-289,20	19,63	-274,53	25,65	-280,35	61
5	-	0	0	-289,14	28,12	-254,05	45,21	-291,90	39,98	-278,36	445
6	+	0	0	-288,56	25,46	-284,76	21,83	-274,03	30,47	-282,45	57
7	0	-	0	-239,23	28,45	-233,24	23,12	-251,39	27,18	-241,29	86
8	0	+	0	-288,48	25,25	-287,78	29,73	-284,86	35,76	-287,04	4
9	0	0	-	-263,34	27,97	-269,89	20,29	-252,80	29,34	-262,01	74
10	0	0	+	-301,95	28,12	-285,63	19,24	-289,97	25,65	-292,52	71
11	0	0	0	-282,09	27,64	-277,85	20,66	-263,98	29,11	-274,64	90
Strumieniowo-ścierna				-105,2	8,21	-99,24	10,33	-108,26	10,4	-104,23	21

* \bar{y}_i – średnia arytmetyczna wartości naprężeń ściskających w i -tym doświadczeniu, $S^2(y)_i$ – wariancja błędów pomiaru w i -tym doświadczeniu obliczona ze wzoru (wzór nr 5.14, podrozdział 5.1)

Na podstawie wartości naprężeń przedstawionych w tabeli 6.14 można stwierdzić, że w wyniku pneumokulkowania w warstwie wierzchniej zewnętrznych powierzchni zakładek ukonstytuowane zostały naprężenia ściskające wynoszące średnio od -226,65 MPa do -292,52 MPa. Największą wartość bezwzględną naprężeń ściskających uzyskano w przypadku połączeń klejowych pneumokulkowanych w czasie 120 s, kulkami o średnicy 1 mm z ciśnieniem wynoszącym 0,5 MPa (wariant 10), natomiast najmniejszą wartość bezwzględną naprężeń zaobserwowano w przypadku próbek pneumokulkowanych w czasie 60 s, kulkami o średnicy 1,5 mm z ciśnieniem wynoszącym 0,3 MPa (wariant 3).

W przypadku wariantu nr 3 wyniki pomiarów są bardzo zróżnicowane. Duże różnice w wynikach pomiaru naprężeń mogą w tym przypadku wynikać z niepełnego pokrycia powierzchni zakładki śladami obróbki (rys. 6.18). Naprężenia ściskające zmierzone w punkcie, w którym brak jest śladów po pneumokulkowaniu będą niższe niż naprężenia w punkcie, w którym obserwuje się liczne odciski.

W tabeli 6.13 przedstawiono również wyniki pomiarów naprężeń w warstwie wierzchniej próbki poddanej obróbce strumieniowo-ścierniej. Wartości bezwzględne zmierzonych naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej próbki poddanej obróbce-strumieniowo-ścierniej są znacznie mniejsze niż wartości bezwzględne naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej próbek poddanych pneumokulkowaniu.

Zgodnie z metodyką planu Hartleya PS/DS.-P:Ha₃ przeprowadzono ocenę istotności współczynników równania regresji. W tym celu, najpierw wyznaczono wartości krytyczne współczynników b_{0kr} , b_{kkr} , b_{kkkr} oraz b_{kjkkr} , a następnie porównano je z wartościami obliczonymi b_0 , b_k , b_{kk} oraz b_{kj} . Wartości krytyczne i wartości obliczone współczynników równania wraz z wynikami oceny istotności współczynników przedstawiono w tabeli 6.15.

Tabela 6.15. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji [opracowanie własne]

Współczynnik równania regresji	Obliczona wartość współczynnika	Krytyczna wartość współczynnika	Ocena istotności	
b_0	277,4	22,5	$ b_0 > b_{0kr}$	istotny
b_1	12,7	16,6	$ b_1 < b_{1kr}$	nieistotny
b_2	-0,2	16,6	$ b_2 < b_{2kr}$	nieistotny
b_3	11,0	16,6	$ b_3 < b_{3kr}$	nieistotny
b_{11}	2,6	26,2	$ b_{11} < b_{11kr}$	nieistotny
b_{22}	-13,6	26,2	$ b_{22} < b_{22kr}$	nieistotny
b_{33}	-0,5	26,2	$ b_{33} < b_{33kr}$	nieistotny
b_{12}	8,9	20,4	$ b_{12} < b_{12kr}$	nieistotny
b_{13}	-11,7	20,4	$ b_{13} < b_{13kr}$	nieistotny
b_{23}	18,0	20,4	$ b_{23} < b_{23kr}$	nieistotny

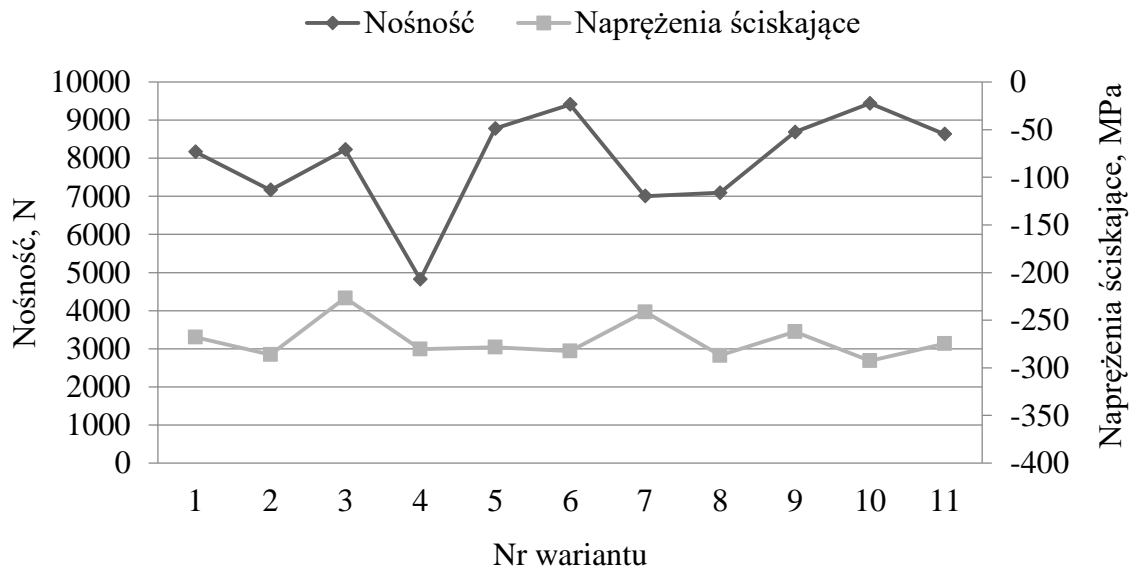
Zgodnie z przeprowadzoną oceną istotności jedynie w przypadku współczynnika przy wyrazie wolnym wartość obliczona jest większa od wartości krytycznej. W związku z tym, tylko współczynnik przy wyrazie wolnym może być uznany za istotny. W pozostałych przypadkach wartości obliczone współczynników są mniejsze od wartości krytycznych. Oznacza to, że w przyjętym zakresie zmienności czynników wejściowych, parametry pneumokulkowania nie mają istotnego wpływu na wartość naprężeń ściskających. Brak istotnego wpływu parametrów pneumokulkowania na wartość naprężeń ściskających może wynikać ze zbyt małych różnic między wartościami parametrów obróbki, co z kolei przełożyło się na małe różnice w zmierzonych wartościach naprężeń.

W związku z powyższym, dla przyjętego zakresu zmienności parametrów wejściowych nie można wyznaczyć równania regresji w postaci wielomianu drugiego stopnia opisującego wpływ czasu kulkowania, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza na wartość naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładki połączeń klejowych.

W ramach analizy wyników, sprawdzono również zależność liniową Pearsona pomiędzy naprężeniami ściskającymi, ukonstytuowanymi w warstwie wierzchniej zakładki połączeń klejowych oraz nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu. W tabeli 6.16 i na rysunku 6.25 przedstawiono wartości nośności połączeń klejowych, uzyskane dla poszczególnych wariantów obróbki oraz odpowiadające tym wariantom zmierzone wartości naprężeń ściskających.

Tabela 6.16. Porównanie nośności połączeń klejowych i stanu naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładki połączeń poddanych pneumokulkowaniu [opracowanie własne]

Lp.	Wariant			Nośność, N	Naprężenia ściskające, MPa
	x_1	x_2	x_3		
1	-	-	+	8166	-267,86
2	+	-	-	7168	-286,10
3	-	+	-	8226	-226,65
4	+	+	+	4819	-280,35
5	-	0	0	8781	-278,36
6	+	0	0	9410	-282,45
7	0	-	0	7005	-241,29
8	0	+	0	7097	-287,04
9	0	0	-	8688	-262,01
10	0	0	+	9443	-292,52
11	0	0	0	8633	-274,64



Rys. 6.25. Zestawienie wyników pomiarów nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu i naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładki [opracowanie własne]

Dla wartości przedstawionych w tabeli 6.16 obliczono wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona pomiędzy nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu oraz wprowadzonymi w wyniku pneumokulkowania naprężeniami ściskającymi. Wartość obliczonego współczynnika korelacji Pearsona wynosi $-0,04$. W związku z tym, zależność pomiędzy nośnością połączeń i wprowadzonymi naprężeniami jest bardzo słaba.

Podsumowując, w przyjętym zakresie zmienności parametrów wejściowych, pneumokulkowanie strefy zakładki doprowadziło do ukonstytuowania naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładki. Nie wykazano jednak istotnej statystycznie zależności pomiędzy parametrami kulkowania i wartościami naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładki oraz między wartościami tych naprężeń, a nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu.

6.5. Wyniki analizy MES połączeń klejowych

Analizę MES przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 5.10. Warianty połączeń klejowych poddanych analizie MES przedstawiono w tabeli 6.17. W tabelach 6.18-6.20 zamieszczono uzyskane w wyniku analizy numerycznej rozkłady naprężeń w spoinach połączeń klejowych obciążonych siłą rozciągającą 4000 N, które nie były poddane pneumokulkowaniu oraz rozkłady naprężeń w spoinach połączeń klejowych obciążonych siłą rozciągającą 4000 N, które były poddane pneumokulkowaniu kulkami o średnicy 1 mm, w czasie 120 s, z ciśnieniem 0,5 MPa (długość strefy pneumokulkowania 12,5 lub 25 mm).

Tabela 6.17. Warianty połączeń klejowych poddanych analizie MES [opracowanie własne]

Numer wariantu	Symbol wariantu	Opis wariantu
1	NP25	Połączenie klejowe z zakładką o długości 25 mm niepoddane pneumokulkowaniu
2	P25/25	Połączenie klejowe z zakładką o długości 25 mm poddane pneumokulkowaniu na długości strefy zakładki i wynoszącej 25 mm
3	NP12,5	Połączenie klejowe z zakładką o długości 12,5 mm niepoddane pneumokulkowaniu
4	P12,5/12,5	Połączenie klejowe z zakładką o długości 12,5 mm poddane pneumokulkowaniu na długości strefy zakładki i wynoszącej 12,5 mm
5	P12,5/25	Połączenie klejowe z zakładką o długości 12,5 mm poddane pneumokulkowaniu na długości przekraczającej strefę zakładki i wynoszącej 25 mm

Tabela 6.18. Rozkład naprężeń w spoinach połączeń niepoddanych i poddanych pneumokulkowaniu (zakładka 25 mm, długość strefy pneumokulkowania 25 mm) [opracowanie własne]

Rodzaj naprężeń	Wariant NP25 - niepoddane pneumokulkowaniu (długość zakładki 25 mm)	Wariant P25/25 - poddane pneumokulkowaniu (długość zakładki 25 mm, długość strefy pneumokulkowania 25 mm)
Naprężenia von Missesa		
Naprężenia maksymalne główne		
Naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny		
Naprężenia styczne		

Tabela 6.19. Rozkład naprężeń w spoinach połączeń niepoddanych i poddanych pneumokulkowaniu (zakładka 12,5 mm, długość strefy pneumokulkowania 12,5 mm) [opracowanie własne]

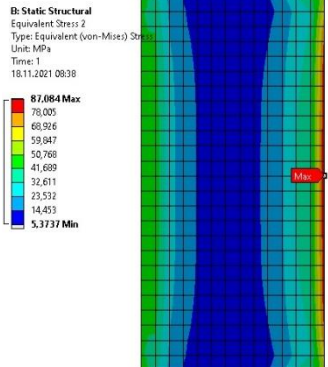
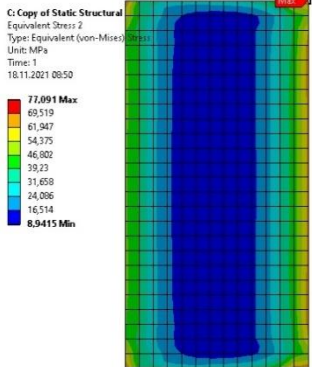
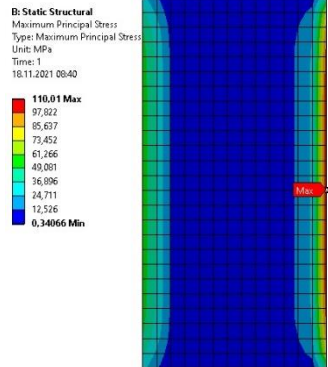

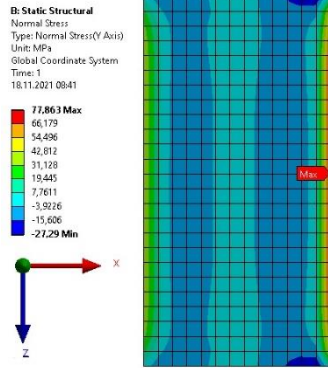
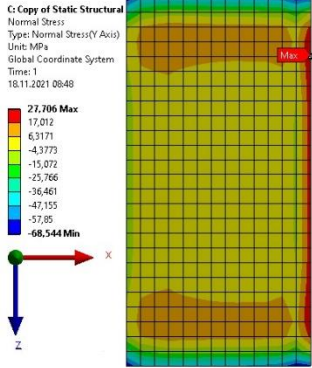
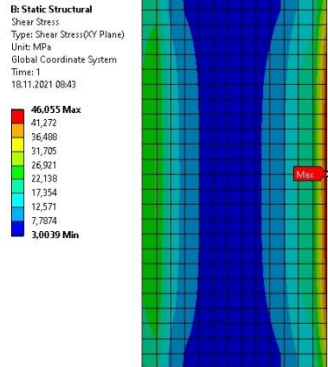
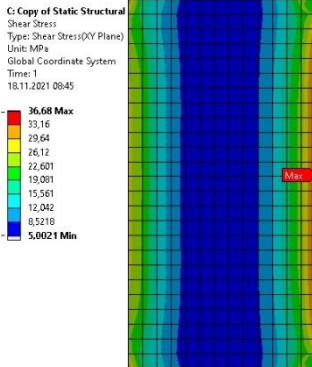
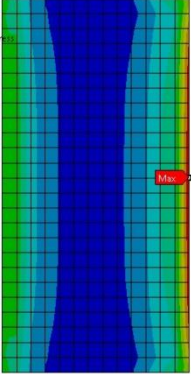
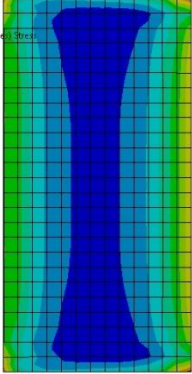
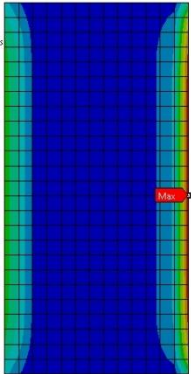
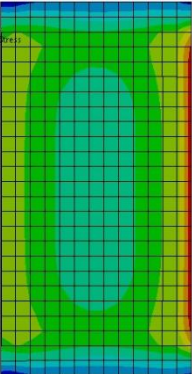
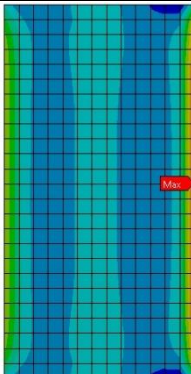
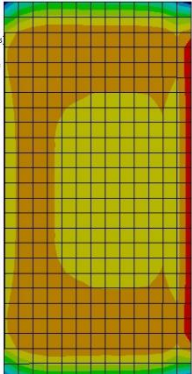
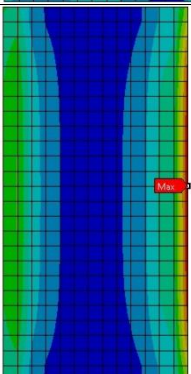
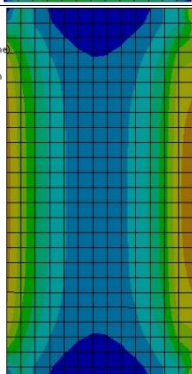
Rodzaj naprężeń	Wariant NP12,5 - niepoddane pneumokulkowaniu (długość zakładki 12,5 mm)	Wariant P12,5/12,5 - poddane pneumokulkowaniu (długość zakładki 12,5 mm, długość strefy pneumokulkowania 12,5 mm)
Naprężenia von Missesa	<p>B: Static Structural Equivalent Stress 2 Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 18.11.2021 08:38</p> 	<p>C: Copy of Static Structural Equivalent Stress 2 Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 18.11.2021 08:50</p> 
Naprężenia maksymalne główne	<p>B: Static Structural Maximum Principal Stress Type: Maximum Principal Stress Unit: MPa Time: 1 18.11.2021 08:40</p> 	<p>C: Copy of Static Structural Maximum Principal Stress Type: Maximum Principal Stress Unit: MPa Time: 1 18.11.2021 08:47</p> 
Naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny	<p>B: Static Structural Normal Stress Type: Normal Stress(Y Axis) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 18.11.2021 08:41</p> 	<p>C: Copy of Static Structural Normal Stress Type: Normal Stress(Y Axis) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 18.11.2021 08:48</p> 
Naprężenia styczne	<p>B: Static Structural Shear Stress Type: Shear Stress(OY Plane) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 18.11.2021 08:43</p> 	<p>C: Copy of Static Structural Shear Stress Type: Shear Stress(OY Plane) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 18.11.2021 08:45</p> 

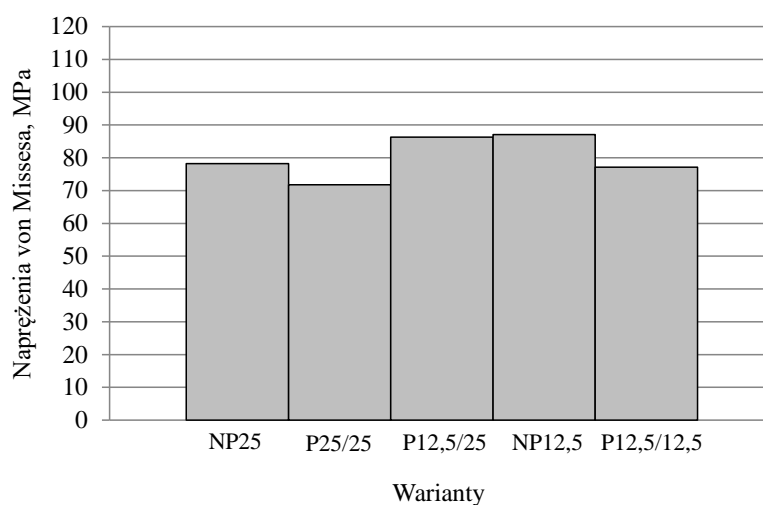
Tabela 6.20. Rozkład naprężeń w spoinach połączeń niepoddanych i poddanych pneumokulkowaniu (zakładka 12,5 mm, długość strefy pneumokulkowania 25 mm) [opracowanie własne]

Rodzaj naprężeń	Wariant NP12,5 - niepoddane pneumokulkowaniu (długość zakładki 12,5 mm)	Wariant P12,5/25 - poddane pneumokulkowaniu (długość zakładki 12,5 mm, długość strefy pneumokulkowania 25 mm)
Naprężenia von Missesa	<p>B: Static Structural Equivalent Stress 2 Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 18.11.2021 08:39</p> 	<p>M: Static Structural Equivalent Stress 2 Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 27.06.2022 10:40</p> 
Naprężenia maksymalne główne	<p>B: Static Structural Maximum Principal Stress Type: Maximum Principal Stress Unit: MPa Time: 1 18.11.2021 08:40</p> 	<p>M: Static Structural Maximum Principal Stress Type: Maximum Principal Stress Unit: MPa Time: 1 27.06.2022 10:42</p> 
Naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny	<p>B: Static Structural Normal Stress Type: Normal Stress(Y Axis) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 18.11.2021 08:41</p> 	<p>M: Static Structural Normal Stress Type: Normal Stress(Y Axis) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 27.06.2022 10:43</p> 
Naprężenia styczne	<p>B: Static Structural Shear Stress Type: Shear Stress(XY Plane) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 18.11.2021 08:43</p> 	<p>M: Static Structural Shear Stress Type: Shear Stress(XY Plane) Unit: MPa Global Coordinate System Time: 1 27.06.2022 10:44</p> 

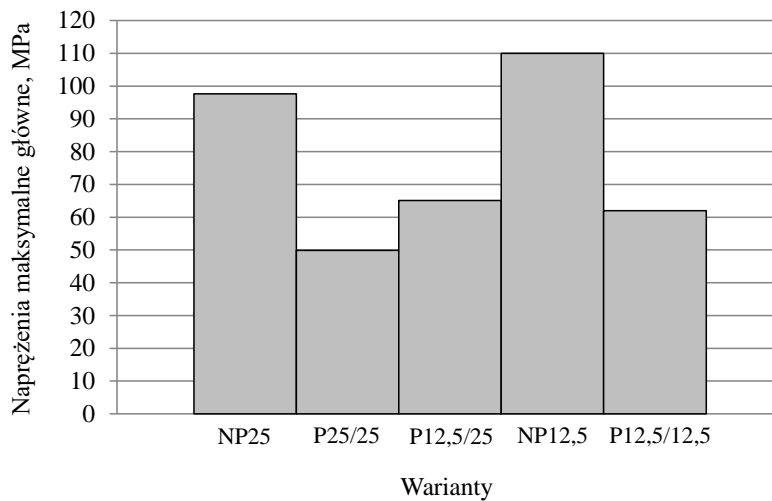
Na podstawie rozkładów naprężeń w spoinach klejowych przedstawionych w tabelach 6.18-6.20 można stwierdzić, że naprężenia maksymalne występują na końcach spoiny. Z kolei naprężenia minimalne są zlokalizowane w części środkowej spoiny.

Wyniki analiz numerycznych, przedstawionych w tabelach 6.18-6.20 wskazują, że w każdym z analizowanych przypadków, pneumokulkowanie przyczynia się do zmniejszenia maksymalnych wartości naprężeń występujących na końcach zakładki. W wyniku pneumokulkowania zmniejszają się wartości naprężeń von Missesa, naprężeń maksymalnych głównych, normalnych prostopadłych i stycznych w spoinach klejowych połączeń obciążonych na rozciąganie.

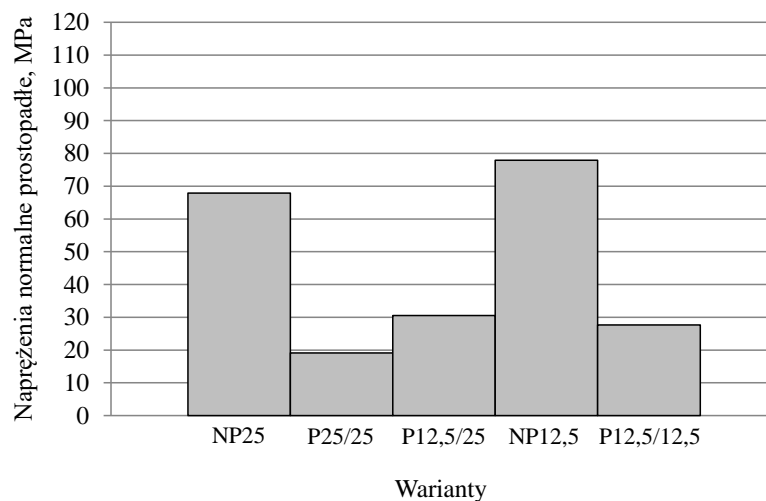
Na rysunkach 6.26-6.29 przedstawiono zestawienie maksymalnych wartości naprężeń w spoinach dla 5 wariantów modeli (rozwinięcia dla nazw wariantów zastosowanych na wykresie znajdują się w tabeli 6.17), natomiast w tabelach 6.21-6.22 zamieszczono maksymalne wartości naprężeń wraz z wartościami procentowymi zmniejszenia naprężeń w spoinie względem połączeń niekulkowanych.



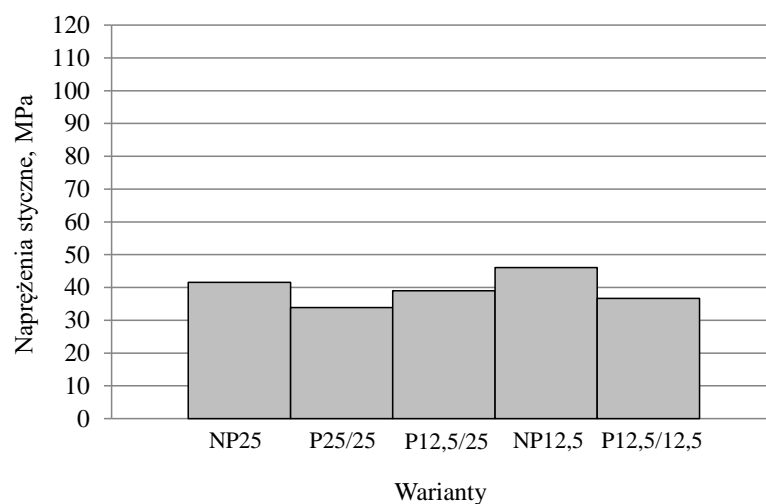
Rys. 6.26. Porównanie wartości naprężeń von Missesa w spoinach klejowych modeli 1-5 połączeń klejowych [opracowanie własne]



Rys. 6.27. Porównanie wartości naprężeń maksymalnych głównych w spoinach klejowych modeli 1-5 połączeń klejowych [opracowanie własne]



Rys. 6.28. Porównanie wartości naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej dla modeli 1-5 połączeń klejowych [opracowanie własne]



Rys. 6.29. Porównanie wartości naprężeń stycznych w spoinach klejowych modeli 1-5 połączeń klejowych [opracowanie własne]

Tabela 6.21. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach połączeń z zakładką 25 mm oraz wartości spadku naprężeń względem połączeń niekulkowanych z zakładką 25 mm [opracowanie własne]

Wariant	NP25	P25/25	
Rodzaj naprężeń	Wartość naprężeń, MPa	Wartość naprężeń, MPa	Zmniejszenie naprężeń, %
von Missesa	78,2	71,8	8,2
Maksymalne główne	97,5	49,9	48,9
Normalne prostopadłe	67,9	19,1	71,9
Styczne	41,6	33,9	18,5

Tabela 6.22. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach połączeń z zakładką 12,5 mm oraz wartości spadku naprężeń względem połączeń niekulkowanych z zakładką 12,5 mm [opracowanie własne]

Wariant	NP12,5	P12,5/12,5		P12,5/25	
Rodzaj naprężeń	Wartość naprężeń, MPa	Wartość naprężeń, MPa	Zmniejszenie naprężeń, %	Wartość naprężeń, MPa	Zmniejszenie naprężeń, %
von Missesa	87,1	77,1	11,5	86,3	0,9
Maksymalne główne	110,0	62,0	43,6	65,1	40,8
Normalne prostopadłe	77,9	27,7	64,4	30,5	60,8
Styczne	46,1	36,7	20,4	39,00	15,4

Wartości maksymalnych naprężeń w spoinach klejowych połączeń obciążonych na rozciąganie, które zostały przedstawione na rysunkach 6.26-6.29 i zestawione w tabelach 6.21-6.22 wskazują, że największy spadek wartości naprężeń występuje w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej. W przypadku połączeń z zakładką 12,5 mm, które były pneumokulkowane na długości 12,5 mm naprężenia normalne prostopadłe zmniejszyły się o 64,4 %, w przypadku połączeń z zakładką 12,5 mm, które były pneumokulkowane na długości 25 mm naprężenia te zmniejszyły się o 60,8%, natomiast w przypadku połączeń z zakładką 25 mm, kulkowanych na długości 25 mm, spadek wartości naprężeń normalnych prostopadłych wynosił 71,9%. Dość duży spadek wartości naprężeń jest zauważalny również w przypadku naprężeń maksymalnych głównych. Pneumokulkowanie strefy zakładki miało natomiast najmniejszy wpływ na wartości naprężeń von Missesa, które w wyniku obróbki zmniejszyły się o 11, 5% (wariant P12,5/12,5), 0,9% (wariant P12,5/25), lub 8,2% (wariant P25/25).

Na podstawie wyznaczonych numerycznie wartości naprężeń w spoinie można stwierdzić, że kulkowanie połączeń klejowych z zakładką 12,5 mm na długości 25 mm daje gorszy efekt niż kulkowanie takich samych połączeń na długości 12,5 mm. Obserwowany jest mniejszy spadek wartości naprężeń w spoinie klejowej. Niemniej jednak, zakres zmian

naprężeń między tymi wariantami jest zbyt mały, aby można było potwierdzić to eksperymentalnie.

Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych pozwalają również na stwierdzenie, że połączenia klejowe z zakładką 25 mm poddane rozciąganiu, charakteryzują się mniejszymi wartościami naprężeń w spoinie klejowej w porównaniu do połączeń klejowych z zakładką 12,5 mm. Niższe wartości naprężeń w spoinie klejowej połączeń z zakładką 25 mm są zauważalne zarówno w przypadku połączeń klejowych poddanych, jak i niepoddanych pneumokulkowaniu. W związku z tym zasadne byłoby przeprowadzenie w przyszłości analiz eksperymentalnych wpływu pneumokulkowania na nośność takich połączeń klejowych.

Podsumowując, wyniki analiz numerycznych wskazują, że pneumokulkowanie zewnętrznej powierzchni zakładki prowadzi do redukcji naprężeń w spoinie klejowej. Największy spadek wartości naprężeń jest zauważalny w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej. Zmniejszenie wartości naprężeń normalnych prostopadłych prowadzi do zmniejszenia wyężenia spoiny (naprężeń zredukowanych w spoinie) i skutkuje wzrostem wytrzymałości połączeń klejowych. Mechanizm wzrostu wytrzymałości połączeń klejowych pod wpływem pneumokulkowania można tłumaczyć w następujący sposób. Pod wpływem pneumokulkowania zewnętrznej powierzchni zakładki połączenia klejowego, dochodzi do odkształcenia klejonych elementów (krawędź zakładki jest dociskana do materiału klejonego). Powstałe odkształcenie generuje naprężenia ściskające w spoinie klejowej. Sumowanie naprężeń pochodzących od odkształcenia i od obciążenia zewnętrznego powoduje, że naprężenia w spoinie połączenia klejowego poddanego pneumokulkowaniu są znacznie mniejsze niż naprężenia w spoinie połączenia niepoddanego obróbce.

Analizując wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych, należy mieć na uwadze, że mają one znaczenie jakościowe, a nie ilościowe (nie uwzględniają, między innymi, nieliniowych właściwości klejów). Ich celem było jedynie wyjaśnienie przyczyn wzrostu wytrzymałości połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu.

Podsumowanie i wnioski

Analizę wpływu procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 przeprowadzono trój etapowo.

Etap pierwszy miał na celu udowodnienie, że pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki może dojść do zwiększenia nośności połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Drugim celem etapu pierwszego było zbudowanie modelu matematycznego opisującego wpływ czasu obróbki, średnicy kulek i ciśnienia sprężonego powietrza na nośność analizowanych połączeń klejowych. W ramach etapu pierwszego wykonano połączenia klejowe, poddano je pneumokulkowaniu, zbadano ich nośność w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania oraz opracowano model matematyczny opisujący wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych. Model matematyczny zbudowano zgodnie z metodyką planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃.

Etap drugi przeprowadzono w celu wyłonienia metody, która mogłaby posłużyć do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu oraz do oceny poprawności obróbki umacniającej. Badaniom poddano trzy metody kontroli prawidłowości przebiegu procesu pneumokulkowania: próbę Almena, analizę struktury geometrycznej powierzchni oraz analizę naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Zbadano związek pomiędzy wartościami strzałki ugięcia, wartościami parametrów chropowatości oraz wartościami naprężeń własnych, a nośnością połączeń klejowych. Wyznaczono również modele matematyczne opisujące wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wartość wybranego parametru chropowatości powierzchni stopu aluminium EN AW-2024-T3. Modele matematyczne zbudowano zgodnie z metodyką planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃.

Celem etapu trzeciego było wyjaśnienie mechanizmu wzrostu nośności połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki w oparciu o stan naprężeń własnych w spoinie klejowej. Analizę wpływu pneumokulkowania na stan naprężeń własnych w spoinie klejowej przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania Ansys 16.2.

Analiza uzyskanych wyników badań, pozwoliła na udowodnienie poprawności hipotezy postawionej w pracy, zgodnie z którą obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, realizowana metodą pneumokulkowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność.

Dla przyjętego w badaniach zakresu zmienności czynników wejściowych (wybranych parametrów pneumokulkowania) sformułowano wnioski poznawcze i utylitarne.

1. Pneumokulkowanie strefy zakładki połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 zwiększyło ich nośność o 33,4% względem połączeń niepoddanych pneumokulkowaniu, w związku z czym może być stosowane w celu umacniania analizowanych połączeń klejowych.
2. Efekt umocnienia połączeń klejowych pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki uzyskiwany jest przy odpowiednim doborze wartości parametrów pneumokulkowania. Zbyt intensywna obróbka może przyczynić się do uszkodzenia więzi adhezyjnych i zmniejszenia nośności połączeń klejowych.
3. Największą wartość nośności obserwuje się w przypadku pneumokulkowania kulkami o średnicy około 1 mm. Wydłużanie czasu trwania obróbki przyczynia się do zmniejszenia nośności. Wpływ ciśnienia na nośność połączeń jest zależny od średnicy kulek. W przypadku małych średnic kulek nośność zwiększa się wraz ze zwiększaniem ciśnienia, a w przypadku dużych średnic nośność zmniejsza się wraz ze zwiększaniem ciśnienia.
4. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona między nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu, a strzałką ugięcia płytek kontrolnych Almena wynosi $-0,733$, w związku z czym nośność połączeń maleje wraz ze wzrostem strzałki ugięcia.
5. Na podstawie modelu matematycznego, opisującego wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wartość strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena, można stwierdzić, że poszczególne parametry obróbki oddziałują na strzałkę ugięcia samodzielnie oraz w interakcji z innymi parametrami. Największe wartości strzałki ugięcia można zaobserwować dla najdłuższego czasu kulkowania i największej średnicy kulek, najdłuższym czasie kulkowania i największym ciśnieniu oraz największej średnicy kulek i największym ciśnieniu.
6. Najsilniejsza korelacja liniowa, między nośnością połączeń klejowych i wartościami parametrów chropowatości zamierzonymi w układzie 2D, występuje w przypadku parametru Rku i wynosi $0,647$.
7. Najsilniejsza korelacja liniowa, między nośnością połączeń klejowych i wartościami parametrów chropowatości zamierzonymi w układzie 3D, występuje w przypadku parametru Sdr i wynosi $0,635$.
8. Na podstawie modelu matematycznego, opisującego wpływ wybranych parametrów pneumokulkowania na wartość parametru chropowatości Rku , można stwierdzić, że

największą wartość parametru Rku można zaobserwować dla średnicy kulek wynoszącej około 1 mm. Wpływ czasu kulkowania jest zależny od ciśnienia. W przypadku małego ciśnienia wartość parametru Rku zwiększa się wraz z wydłużaniem czasu obróbki, a w przypadku dużego ciśnienia wartość parametru Rku zmniejsza się wraz z wydłużaniem czasu kulkowania.

9. Pod wpływem pneumokulkowania, w warstwie wierzchniej zakładki połączenia klejowego konstytuowane są naprężenia ściskające. Nie wykazano jednak istotnej statystycznie zależności pomiędzy wartościami tych naprężeń a nośnością połączeń klejowych. Mogło to wynikać ze zbyt małych różnic między wartościami parametrów obróbki, co z kolei przełożyło się na małe różnice w zmierzonych wartościach naprężeń.
10. Ze względu na najwyższą wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona z nośnością połączeń klejowych, próba Almena może być uznana za najlepszy sposób przewidywania oraz kontroli efektów obróbki umacniającej.
11. Wyniki analiz numerycznych wskazują, że pneumokulkowanie zewnętrznej powierzchni zakładki prowadzi do redukcji naprężeń w spoinie klejowej, przy czym największy spadek wartości naprężeń jest zauważalny w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej i wynosi 71,9%.
12. Na podstawie analiz numerycznych można stwierdzić dodatkowo, że kulkowanie połączeń klejowych z zakładką 12,5 mm na długości 25 mm daje gorszy efekt niż kulkowanie takich samych połączeń na długości 12,5 mm (spadek wartości naprężeń w spoinie klejowej jest mniejszy).
13. Wyniki analiz numerycznych pozwalają na stwierdzenie, że połączenia klejowe z zakładką 25 mm poddane rozciąganiu, charakteryzują się mniejszymi wartościami naprężeń w spoinie klejowej w porównaniu do połączeń klejowych z zakładką 12,5 mm, co wskazuje na zasadność prowadzenia w przyszłości analiz eksperymentalnych dotyczących wpływu pneumokulkowania strefy zakładki na nośność połączeń klejowych z zakładką o długości 25 mm.
14. Mechanizm umocnienia połączeń klejowych pod wpływem pneumokulkowania strefy zakładki można tłumaczyć w następujący sposób:
 - pod wpływem pneumokulkowania zewnętrznej powierzchni zakładki połączenia klejowego, dochodzi do odkształcenia klejonych elementów (krawędź zakładki jest dociskana do materiału klejonego),
 - powstałe odkształcenie generuje naprężenia ściskające w spoinie klejowej,

- sumowanie naprężeń pochodzących od odkształcenia i od obciążenia zewnętrznego (ścinającego) powoduje, że naprężenia von Misesa, naprężenia maksymalne główne, naprężenia normalne prostopadłe i naprężenia styczne w spoinie połączenia klejowego poddanego pneumokulkowaniu są odpowiednio o 8,2%, 48,9%, 71,9% i 18,5% mniejsze, niż naprężenia w spoinie połączenia niepoddanego obróbce.

Podsumowując, pozytywny wpływ pneumokulkowania strefy zakładki na nośność połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3 oraz liczne zalety tej metody przemawiają za słuszością jej przemysłowego zastosowania. Co więcej, wykazanie możliwości przewidywania oraz kontrolowania efektów obróbki umacniającej za pomocą próby Almena dodatkowo zwiększa jej atrakcyjność wśród potencjalnych zainteresowanych.

Wnioski uzyskane z przeprowadzonych badań wskazują, że uzasadnione jest ich kontynuowanie. Jednym z obszarów rozwoju mogłoby być sprawdzenie, jaki wpływ na nośność połączeń klejowych umacnianych przez pneumokulkowanie, miałyby szoki termiczne lub dobowe i roczne wahania temperatury.

Literatura

- [1] Adamczak, S. (2008). *Pomiary geometryczne powierzchni: zarysu kształtów, falistość i chropowatość*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [2] Aimmanee, S., Hongpimolmas, P. (2016). Stress analysis of adhesive-bonded tubular-coupler joints with optimum variable-stiffness composite adherend under torsion. *Composite Structures*, 164(1), 76-89.
- [3] American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Method for Determining the X-Ray Elastic Constants for Use in the Measurement of Residual Stress Using X-Ray Diffraction Techniques* (ASTM E1426).
- [4] American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels* (ASTM-E2860).
- [5] American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement* (ASTM E915).
- [6] American Society of Mechanical Engineers. (2019). *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)* (ASME B46.1 - 2019).
- [7] An, T., Li, S., Qu, J., Shi, J., Zhang, S., Chen, L., Zheng, S., Yang, F. (2019). Effects of shot peening on tensile properties and fatigue behavior of X80 pipeline steel in hydrogen environment. *International Journal of Fatigue*, 129(10), 105235.
- [8] Ashcroft, I. A., Mubashar, A. (2018). Numerical Approach: Finite Element Analysis. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 701-739). Springer.
- [9] Avcu, Y. Y., Yetik, O., Guney, M., Iakovakis, E., Sınmazçelik T., Avcu, E. (2020). Surface, Subsurface and Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy Shot Peened under Different Parameters. *Materials*, 13(19), 4363.
- [10] Azar, V., Hashemi, B., Rezaee Yazdi, M. (2010). The effect of shot peening on fatigue and corrosion behavior of 316L stainless steel in Ringer's solution. *Surface and Coatings Technology*, 204(21), 3546-3551.
- [11] Bahrami, B., Ayatollahi, M. R., Beigrezaee, M. J., da Silva, L. F. M. (2019). Strength improvement in single lap adhesive joints by notching the adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102401.
- [12] Banea, M. D., da Silva, L. F. M., Campilho, R. D. S. G. (2014). Effect of temperature

- on the shear strength of aluminium single lap bonded joints for high temperature applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(14-15), 1367-1381.
- [13] Banea, M. D., da Silva, L. F. M., Campilho, R. D. S. G., de Jesus, A. M. P. (2012). Characterization of Aluminium Single-Lap Joints for High Temperature Applications. *Advanced Materials Forum*, 730-732, 721-726.
- [14] Bąk, Ł., Guźła, E., Łyko, M. (2020). Analysis of the impact of surface roughness on the capacity of adhesive joints from aluminum alloy 2024. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 2, 27-33.
- [15] Belingardi, G., Goglio, L., Tarditi, A. (2002). Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(4), 273-282.
- [16] Benchouia, S., Merakeb, N., Adjel, S., Ehlers, S., Baccouche, M., Kaddour, A. (2019). Fatigue life enhancement of TIG-welded 304L stainless steels by shot peening. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-2), 2885-2893.
- [17] Biruk-Urban, K., Kuczmaszewski, J. (2013). Modyfikacja klejów epoksydowych w aspekcie ich właściwości cieplnych. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 2, 31-34.
- [18] Bławucki, S., Zaleski, K. (2015). Nagniatanie dynamiczne kompozytów o osnowie metalowej. *Mechanik*, 3, 163-169.
- [19] Bucior, M. (2016). *Wpływ nagniatania dynamicznego na wytrzymałość zmęczeniową stali stosowanych na sita przesiewaczy*. [Rozprawa doktorska]. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza.
- [20] Bucior, M., Gałda, L., Stachowicz, F., Zielecki, W. (2016). The effect of technological parameters on intensity of shoot peening process of 51CrV4 steel. *Acta Mechanica et Automatica*, 10(3), 213-217.
- [21] Bürenhaus, F., Moritzer, E., Hirsch, A. (2019). Adhesive bonding of FDM-manufactured parts made of ULTEM 9085 considering surface treatment, surface structure, and joint design. *Welding in the World*, 63(4), 1819-1832.
- [22] Çalık, A. (2016). Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint. *Engineering Review*, 36(1), 29-34.
- [23] Chen, X., Li, Y. (2010). An Experimental Technique on the Dynamic Strength of Adhesively Bonded Single Lap Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(2), 291-304.

- [24] Comyn, J. (2018). Thermal Properties of Adhesives. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 459-487). Springer.
- [25] Das, T., Erdoğan, A., Kurşuncu, B., Maleki, E., Unal, O. (2020). Effect of severe vibratory peening on microstructural and tribological properties of hot rolled AISI 1020 mild steel. *Surface and Coatings Technology*, 403, 126383.
- [26] Dilger, K., Burchardt, B., Frauenhofer, M. (2018). Automotive Industry. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 1333-1366). Springer.
- [27] Dobrzański, L. A. (2010). *Leksykon Materiałoznawstwa. Praktyczne zestawienie norm polskich, zagranicznych i międzynarodowych. Cz. 4, rozdział 1: Metale nieżelazne i ich stopy*. Wydawnictwo Verlag Dashofer.
- [28] Domińczuk, J. (2011). Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych. *Postępy Nauki i Techniki*, 10, 14-26.
- [29] Domińczuk, J. (2013). Model numeryczny pozwalający na ocenę wpływu długości zakładki na wytrzymałość połączeń klejowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3, 50-54.
- [30] Durmuş, M., Akpınar, S. (2019). The Experimental and Numerical Analysis of the Adhesively Bonded Three-step-Lap Joints with Different Step Lengths. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 105, 102427.
- [31] Dzierwa, A. (2008). Kulowanie jako metoda poprawy wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów z powłokami chromowymi. W W. Przybylski (red.), *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie. Tom 2* (s. 241-248). Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej.
- [32] Feng, Z., Zhao, H., Tan, C., Chen, J., Wang, Y., Chen, B., Song, X. (2019). Modification of surface treatment on the strength of 30CrMnSiA steel adhesively bonded joints. *Materials Research Express*, 6(11), 116521.
- [33] Godzimirski, J. (2002). *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [34] Godzimirski, J. (2009). Problemy klejenia konstrukcyjnego. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 1, 25-31.
- [35] Godzimirski, J., Jagiełło, A. (2018). Effect of surface treatment cold-work hardening

- after adhesive curing on strength of adhesive lap joints. *Technologia i Automatyizacja Montażu*, 4, 43-49.
- [36] Godzimirski, J., Komorek, A. (2007). Wpływ czynników konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową połączeń klejowych. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 56(2), 167-177.
- [37] Godzimirski, J., Komorek, A. (2008). Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych. *Przegląd Spawalnictwa* 80(8), 38-43.
- [38] Godzimirski, J., Komorek, A., Komorek, Z. (2009). Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych obciążonych na ścinanie. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 58(3), 17-27.
- [39] Godzimirski, J., Rośkowicz, M. (2001). Wytrzymałość czasowa Epidianu 57. *Technologia i Automatyizacja Montażu*, 2, 53-55.
- [40] Godzimirski, J., Rośkowicz, M. (2002). Wytrzymałość doraźna i długotrwała oraz pełzanie kleju "Epidian 57". *Polimery*, 47(10), 721-726.
- [41] Godzimirski, J., Kozakiewicz, J., Łunarski, J., Zielecki, W. (1997). *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [42] Grzesik, W. (2015). Effect of the machine parts surface topography features on the machine service. *Mechanik*, 8-9, 587-593.
- [43] Guagliano, M. (2001). Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 110(3), 277-286.
- [44] Hart-Smith, L. J. (2018). Adhesively Bonded Joints in Aircraft Structures. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 1235-1284). Springer..
- [45] Henkel Polska Sp.z o.o (30.10.2023). *Technical Data Sheet Loctite EA 3430*. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://datasheets.tdx.henkel.com/LOCTITE-EA-3430-pl_PL.pdf
- [46] Her, S. C., Chan, C. F. (2019). Interfacial Stress Analysis of Adhesively Bonded Lap Joint. *Materials*, 12(15), 2403.
- [47] Huang, J., Wang, Z., Gan, J., Yang, Y., Wu, G., Meng, Q. (2017). Investigation of fatigue performance improvement in SiCw/Al composites with different modified shot peening treatments by considering surface mechanical properties. *Journal of*

- Alloys and Compounds*, 728, 169-178.
- [48] Kanani, A. Y., Hou, X., Ye, J. (2020). The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints. *Composite Structures*, 241, 112136.
- [49] Kavdir, E. Ç., Aydin, M. D. (2020). The experimental and numerical study on the mechanical behaviours of adhesively bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 184(14), 107725.
- [50] Kłonica, M. (2016). Comparative analysis of effect of thermal shock on adhesive joint strength. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32), 263-268.
- [51] Kłonica, M. (2017). Wpływ zmiennych obciążeń cieplnych na bezpieczeństwo klejonych konstrukcji lotniczych. W R. Bielawski, B. Grenda (red.), *Bezpieczeństwo lotnicze w aspekcie rozwoju technologicznego* (s. 194-208). Wydawnictwo Akademii Sztuki Wojennej.
- [52] Kłonica, M., Kuczmaszewski, J. (2011). Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych po oczyszczaniu mechanicznym i ozonowaniu. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 4, 45-48.
- [53] Kłonica, M., Kuczmaszewski, J. (2011). Ozonowanie jako metoda aktywowania warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych w operacjach klejenia. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 2, 38-46.
- [54] Kłonica, M., Kuczmaszewski, J. (2014). Ozonowanie stali 316L na potrzeby klejenia. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 2, 51-56.
- [55] Kłonica, M., Kuczmaszewski, J. (2015). Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie klejowych połączeń zakładkowych stali 316L po "szokach termicznych". *Przetwórstwo Tworzyw Sztucznych*, 2(164), 125-130.
- [56] Kłonica, M., Kuczmaszewski, J. (2018). *Badania stanu energetycznego warstwy wierzchniej wybranych materiałów konstrukcyjnych po ozonowaniu*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [57] Komorek, A., Przybyłek, P. (2015). Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych na ścinanie. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 3, 43-47.
- [58] Komorek, A., Przybyłek, P. (2016). Badanie udarowe połączeń klejowych z wykorzystaniem dedykowanego młota wahadłowego. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 3, 56-60.

- [59] Korzyńska, K., Zielecki, W., Korzyński, M. (2018). Relationship between residual stress and strength of single lap joints made of Ti6Al4V alloy, adhesively bonded and treated using pneumatic ball peening. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(1), 1-12.
- [60] Korzyńska, K. (2019). *Badania wpływu procesu pneumokulowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych*. [Rozprawa doktorska]. Politechnika Lubelska.
- [61] Korzyński, M. (2007). Technologia pneumokulkowania, obrabiarka do pneumokulkowania wałków, przyrządy do pneumokulkowania. W M. Korzyński (red.), *Technologie, urządzenia, metody* (37-41). Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, .
- [62] Korzyński, M. (2013). *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [63] Krawczuk, A., Domińczuk, J. (2015). Analiza możliwości wykorzystania krzywych zwilżania do optymalizacji procesów adhezyjnych. *Technologia i Automatyzaacja Montażu*, 4, 43-47.
- [64] Kubit, A., Bucior, M., Kluz, R. (2020). Effect of temperature on the shear strength of GFRP-aluminium alloy 2024-T3 single lap joint. *Technologia i Automatyzaacja Montażu*, 1, 30-33.
- [65] Kuczmaszewski, J. (1995). *Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [66] Kuczmaszewski, J. (2006). *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. Lublin University of Technology.
- [67] Kuczmaszewski, J., Anasiewicz, K. (2017). Wpływ grubości warstwy kleju na sztywność spoiny w połączeniu doczołowym metal-metal. *Technologia i Automatyzaacja Montażu*, 3, 46-48.
- [68] Kumazawa, H. , Kasahara, T. (2019). Analytical investigation of thermal and mechanical load effects on stress distribution in adhesive layer of double-lap metal-composite bonded joints. *Advanced Composite Materials*, 28(4), 425-444.
- [69] Leena, K., Athira, K. K., Bhuvanewari, S., Suraj, S., Lakshmana Rao, V. (2016). Effect of surface pre-treatment on surface characteristics and adhesive bond strength of aluminium alloy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, 265-270.

- [70] Liao, L., Huang, C. (2016). Numerical analysis of effects of adhesive type and geometry on mixed-mode failure of adhesive joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 389-396.
- [71] Liao, L., Huang, Ch., Sawa, T. (2013). Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints. *International Journal of Solids and Structures*, 50(25-26), 4333-4340.
- [72] Liu, J., Yue, Z., Geng, X., Wen, S., Yan, W. (2018). *Long-Life Design and Test Technology of Typical Aircraft Structures*. Springer.
- [73] Loureiro, A. L., da Silva, L. F. M, Sato, C., de Figueiredo, M. A. V. (2010). Comparison of the Mechanical Behaviour Between Stiff and Flexible Adhesive Joints for the Automotive Industry. *Journal of Adhesion*, 86(7), 765-787.
- [74] Loutas, T. H. , Kliafa, P. M., Sotiriadis, G., Kostopoulos, V. (2019). Investigation of the effect of green laser pre-treatment of aluminum alloys through a design-of-experiments approach. *Surface and Coatings Technology*, 375, 370-382.
- [75] Łunarski, J. (1987). Nagniatanie powierzchni kształtowych metodą pneumokulkowania. W J. Łunarski (red.), *Nowe technologie nagniatania i ich zastosowanie w przemyśle elektromaszynowym* (s. 95-124). Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza.
- [76] Łunarski, J. (1987). Przegląd metod nagniatania i ich wpływ na właściwości użytkowe elementów maszyn. W J. Łunarski (red.), *Nowe technologie nagniatania i ich zastosowanie w przemyśle elektromaszynowym* (s. 9-36). Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza.
- [77] Miao, H. Y., Larose, S., Perron, C., Lévesque, M. (2010). An analytical approach to relate shot peening parameters to Almen intensity. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2055–2066.
- [78] Mirski, Z., Wróblewski, R., Gołembiewski, A. (2015). Odporność połączeń klejowych na oddziaływanie wysokiej temperatury. *Przegląd Spawalnictwa*, 10, 108-114.
- [79] Mitruska-Barańska, I., Rudawska, A. (2022). Influence of Adhesive Compound Viscosity on the Strength Properties of 1.0503 Steel Sheets Adhesive Joints. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(2), 196-205.
- [80] Packham, D. E. (2018). Theories of Fundamenral Adhesion. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 11-42). Springer.

- [81] Petrie, E. M. (2006). *Epoxy Adhesive Formulation*. McGRAW-HILL.
- [82] Piekarczyk, M. (2013). *Zastosowanie technologii klejenia w metalowych konstrukcjach budowlanych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [83] Pires, I., Quintino, L., Durodola, J. F., Beevers, A. (2003). Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(3), 215-223.
- [84] Polski Komitet Normalizacyjny. (2009). *Kleje - Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę* (PN-EN 1465:2009).
- [85] Polski Komitet Normalizacyjny. (2010). *Aluminium i stopy aluminium - Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie - Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów* (PN-EN 573-3:2010).
- [86] Polski Komitet Normalizacyjny. (2011). *Kleje - Metoda badania wytrzymałości na ścinanie udarowe połączeń klejowych* (PN-EN ISO 9653:2011).
- [87] Polski Komitet Normalizacyjny. (2016). *Kleje – Terminy i definicje* (PN-EN 923:2016-02).
- [88] Polski Komitet Normalizacyjny. (2019). *Kleje - Oznaczanie wytrzymałości dynamicznej wysokowytrzymałych połączeń klejowych na rozszczepianie pod wpływem warunków udarowych - Metoda uderzenia klinem* (PN-EN ISO 11343:2019-08).
- [89] Polski Komitet Normalizacyjny. (2022). *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Profil – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni* (PN-EN ISO 21920-2:2022-06).
- [90] Polski Komitet Normalizacyjny. (2022). *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni* (PN-EN ISO 25178-2:2022-06).
- [91] Polski Komitet Normalizacyjny. 2022. *Kleje - Oznaczenie głównych wzorców zniszczenia połączeń klejowych* (PN-EN ISO 10365:2022-07).
- [92] Przybylski, W. (1979). *Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [93] Przybylski, W. (1987). *Technologia obróbki nagniataniem*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [94] Przybylski, W. (2019). *Low plasticity burnishing processes. Fundamentals, tools and machine tools*. Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute in

Radom.

- [95] Przybyłowicz, K. (1999). *Metaloznawstwo*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [96] Radziejewska, J. (2011). *Laserowa modyfikacja właściwości warstwy wierzchniej wspomagana nagniataniem*. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.
- [97] Rodopoulos, C. A., Curtis, S., de los Rios, E. R., Solis-Romero J. (2004). Optimisation of the fatigue resistance of 2024-T351 aluminium alloys by controlled shot peening - methodology, results and analysis. *International Journal of Fatigue*, 26(8), 849-856.
- [98] Rojek, M. (2011). Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej. *Open Access Library*, 2.
- [99] Rośkowicz, M. (2006). Wybrane problemy długotrwałej eksploatacji połączeń klejowych. *Problemy Eksploatacji*, 3, 91-106.
- [100] Rośkowicz, M. (2008). Statyczna trwałość czasowa połączeń klejowych. *Przegląd Spawalnictwa*, 8, 31-37.
- [101] Rośkowicz, M., Godzimirski, J., Komorek, A., Jaształ, M. (2021). The Effect of Adhesive Layer Thickness on Joint Static Strength. *Materials*, 14(6), 1499. <https://doi.org/10.3390/ma14061499>
- [102] Rośkowicz, M., Smal, T. (2006). Wpływ modyfikacji spoiny na statyczną trwałość połączenia klejowego. *Technologia i Automatyzaacja Montażu*, 2, 51-54.
- [103] Rudawska, A. (2010). Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję. *Technologia i Automatyzaacja Montażu*, 3, 36-39.
- [104] Rudawska, A. (2013). *Wybrane zagadnienia konstituowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [105] Rudawska, A. (2014). Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 50, 235-243.
- [106] Rudawska, A. (2016). *Oprzyrządowanie w technologii klejenia*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [107] Rudawska, A. (2017). *Przygotowanie powierzchni do klejenia wybranych materiałów konstrukcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [108] Rudawska, A., Bronisz, K. (2013). Wpływ wybranych parametrów obróbki

- mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 2, 27-30.
- [109] Rudawska, A., Chruściel, M. (2011). Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach lotniczego stopu aluminium. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 2, 42-46.
- [110] Rudawska, A., Danczak, I., Müller, M., Valasek, P. (2016). The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, 176-190.
- [111] Rudawska, A., Dunia, Ł. (2008). Wytrzymałość statyczna i długotrwała połączeń klejowych blach ocynkowanych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3, 31-34.
- [112] Rudawska, A., Kuczmaszewski, J. (2005). *Klejenie blach ocynkowanych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [113] Rudawska, A., Nalepa, J., Müller, M. (2017). The effect of degreasing on adhesive joint strength. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11(1), 75-81.
- [114] Samborski, T., Zbrowski, A. (2016). Metoda i urządzenie do badania udarności połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny*, 6, 37-49.
- [115] Sherafatnia, K., Farrahi, G. H., Mahmoudi, A. H., Ghasemi, A. (2016). Experimental measurement and analytical determination of shot peening residual stresses considering friction and real unloading behavior. *Materials Science and Engineering: A*, 657, 309-321.
- [116] Sidhom, N., Laamouri, A., Fathallah, R., Braham, C., Lieurade, H. P. (2005). Fatigue strength improvement of 5083 H11 Al-alloy T-welded joints by shot peening: experimental characterization and predictive approach. *International Journal of Fatigue*, 27(7), 729-745.
- [117] Da Silva, L. F. M., Adams R. D. (2007). Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(3), 216-226.
- [118] Da Silva, L. F. M., Adams, R. D. (2007). Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(5), 362-379.
- [119] Da Silva, L. F. M., Carbas, R. J. C., Banea, M. D. (2018). Failure Strength Tests. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 489-522). Springer.

- [120] Da Silva, L. F. M., Marques, E. A. S., Campilho, R. D. S. G. (2018). Design Rules and Methods to Improve Joint Strength. W L. F. M. da Silva, A. Öchsner, R., D. Adams (red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s. 773-810). Springer.
- [121] Da Silva, L. F. M., Öchsner, A., Adams, R. D. (2018). Introduction to Adhesive Bonding Technology. W da Silva, L. F. M., Öchsner, A., Adams, R., D. (Red.), *Handbook of Adhesion Technology* (s.1-7). Springer.
- [122] Da Silva, L. F. M., Rodrigues, T. N. S. S., de Figueiredo, M. A. V., de Moura, M. F. S. F., Chousal, J. A. G. (2006). Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. *The Journal of Adhesion*, 82(11), 1091-1115.
- [123] Society of Automotive Engineers. (2017). *Procedures for Using Standard Shot Peening Almen Test Strip* (J443_201708).
- [124] Spadaro, C., Sunseria, C., Dispenza, C. (2007). Laser surface treatments for adhesion improvement of aluminium alloys structural joints. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(8), 1441-1446.
- [125] Stachowicz, F. (2002). *Przeróbka plastyczna*. Laboratorium. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [126] Szabelski, J., Domińczuk, J., Kuczmaszewski, J. (2019). *Wpływ ciepła na właściwości połączeń klejowych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [127] Świetlicki, A., Szala, M., Walczak, M. (2022). Effects of Shot Peening and Cavitation Peening on Properties of Surface Layer of Metallic Materials—A Short Review. *Materials*, 15(7), 2476.
- [128] Tong, L., Spelt, J. K., Fernlund, G. (2003). Strength Determination of Adhesive Bonded Joints. W L. Tong, C. Soutis (red.), *Recent Advances in Structural Joints and Repairs for Composite Materials* (s. 27-66). Springer.
- [129] Wang, T., Yu, J., Dong, B. (2006). Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(16-17), 4777-4781.
- [130] Yan, H., Zhu, P., Chen, Z., Zhang, H., Zhang, Y., Zhang, Y. (2022). Effect of shot peening on the surface properties and wear behavior of heavy-duty-axle gear steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 22-32.
- [131] Zaczek, Z. (1996). Odształcenie i rekrytalizacja metali. W M. Głowacka (red.), *Metaloznawstwo* (s. 52-65). Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [132] Zaleski, K. (2008). *Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej*

- elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego.* Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [133] Zaleski, K. (2009). Wpływ dynamicznego nagniatania rozproszonego na trwałość zmęczeniową elementów ze stopu tytanu Ti-6Al-4V. *Eksploatacja i Niezawodność*, 4, 65-71.
- [134] Zaleski, K. (2018). *Technologia nagniatania dynamicznego.* Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [135] Zaleski, K., Matuszak, J., Zaleski, R. (2018). *Metrologia warstwy wierzchniej.* Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [136] Zhan, K., Zhang, Y., Zhao, S., Yang, Z., Zhao, B., Ji, V. (2022). Tribological Behavior and Corrosion Resistance of S30432 Steel after Different Shot Peening Processes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(3), 1250-1258.
- [137] Zhang, Y., Lai, F., Qu, S., Ji, V., Liu, H., Ji, X. (2020). Effect of shot peening on residual stress distribution and tribological behaviors of 17Cr2Ni2MoVNb steel. *Surface and Coatings Technology*, 386, 125497.
- [138] Zhao, X., Adams, R. D., da Silva L. F. M. (2011). Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(8), 837-856.
- [139] Zhao, X., Adams, R. D., da Silva, L. F. M. (2011). Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(8), 819-836.
- [140] Zhao, X., Zhou, H., Liu, Y. (2018). Effect of shot peening on the fatigue properties of nickel-based superalloy GH4169 at high temperature. *Results in Physics*, 11, 452-460.
- [141] Zielecki, W. (1998). Wytrzymałość połączeń klejowych po nagniataniu dynamicznym. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 4, 25-28.
- [142] Zielecki, W. (2008). *Determinants determining the strength properties of adhesive joint.* [Rozprawa habilitacyjna]. Uniwersytet Techniczny w Koszycach.
- [143] Zielecki, W., Bąk, Ł., Guźła, E. (2021). The influence of the directivity of the geometric structure on the load capacity of single-lap adhesive joints. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 2, 36-43.
- [144] Zielecki, W., Bąk, Ł., Guźła, E., Bucior, M. (2019). Analiza statystyczna wpływu parametrów pneumokulowania na nośność połączeń klejowych stopu aluminium 2024. *Technologia i Automatykacja Montażu*, 1, 30-34.

- [145] Zielecki, W., Bielenda, P., Ozga, E. (2021). The influence of thermal shock on the load capacity of cylindrical adhesive joints made of EN AC-ALSI7-Mg0.3 aluminum alloy and glass-epoxy composite EP405-GE. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 4, 34-42.
- [146] Zielecki, W., Burnat, K., Kubit, A., Katrňák, T. (2021). Effect of Holes in Overlap on the Load Capacity of the Single-Lap Adhesive Joints Made of EN AW-2024-T3 Aluminium Alloy. *Advances in Materials Science*, 21(4), 112-124.
- [147] Zielecki, W., Dierwa, A., Guźła, E. (2020). Analysis of the impact of surface roughness on the bearing capacity of lap adhesive joints from aluminum alloy 2024. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, (109)3, 15-21.
- [148] Zielecki, W., Godzimirski, J., Ozga, E. (2022). The influence of shot peening on the stress state in the adhesive layer and the load capacity of adhesive joints. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, (116)2, 32-40.
- [149] Zielecki, W., Guźła, E., Bielenda, P. (2021). The influence of natural seasoning on the load capacity of cylindrical adhesive joints. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 3, 15-24.
- [150] Zielecki, W., Korzyńska, K. (2016). Umacnianie zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V metodą pneumokulowania. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 1, 44-47.
- [151] Zielecki, W., Korzyńska, K. (2017). Analiza wpływu wybranych parametrów procesu pneumokulowania na nośność zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 1, 55-59.
- [152] Zielecki, W., Korzyńska, K. (2018). Analiza wpływu parametrów pneumokulkowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 1, 33-37.
- [153] Zielecki, W., Perłowski, R., Trzpieciński, T. (2007). Analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego umocnionego metodą pneumokulowania. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 1, 31-33.
- [154] Zielecki, W., Perłowski, R., Trzpieciński, T. (2007). Analiza stanu naprężeń w spoinie zakładkowego połączenia klejowego umocnionego metoda pneumokulowania. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 1, 31-33.
- [155] Zielecki, W., Trzpieciński, T., Bąk, Ł., Ozga, E. (2022). Load capacity of single-lap adhesive joints made of 2024-T3 aluminium alloy sheets after shot peening. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119, 3013-3028.

- [156] Zyzak, P. (2015). Ocena parametrów strumienia śrutu wskaźnikami próby z użyciem płytek kontrolnych. *Mechanik*, 8-9, 374-381.

Spis rysunków

Rysunek 1.1. Schemat obrazujący mechaniczną teorię adhezji	9
Rysunek 1.2. Przykłady kątów zwilżania: $\theta \sim 180^\circ$ brak zwilżalności, $\theta \sim 90^\circ$ zwilżalność niezadowalająca, $\theta \sim 30^\circ$ zwilżalność dobra, $\theta \sim 0^\circ$ zwilżalność bardzo dobra.....	10
Rysunek 1.3. Przykłady obciążenia spoin w połączeniach klejowych	17
Rysunek 1.4. Schemat połączenia tytanowo-kompozytowego przedstawiający zjawisko niedopasowania termicznego	20
Rysunek 1.5. Porównanie rozkładu naprężeń wzdłuż spoiny klejowej w przypadku kleju sztywnego i elastycznego	24
Rysunek 1.6. Schemat połączeń klejowych, w których zwężono końce zakładki	26
Rysunek 1.7. Schemat połączenia klejowego z podcięciem przy krawędzi zakładki: 1, 3 – elementy klejone, 2 – spoina klejowa, 4 – podcięcie	26
Rysunek 1.8. Porównanie rozkładu naprężeń zredukowanych w spoinach połączeń klejowych z podcięciem (2) i bez podcięcia (1)	27
Rysunek 1.9. Schemat połączeń klejowych z otworami w końcowej części zakładki	27
Rysunek 2.1. Klasyfikacja metod nagniatania ze względu na sposób oddziaływania elementów nagniatających na powierzchnię przedmiotu obrabianego	30
Rysunek 2.2. Układ odcisków na powierzchni obrabianej i kolejność ich powstawania: a) nagniatanie skoncentrowane, b) nagniatanie rozproszone	31
Rysunek 2.3. Parametry i czynniki wpływające na efekty pneumokulkowania	34
Rysunek 2.4. Schemat kształtowania chropowatości powierzchni w wyniku nagniatania dynamicznego: a) „spłaszczanie” mikronierówności, b) powstawanie wgłębień.....	36
Rysunek 2.5. Wpływ gęstości dyslokacji na wartość naprężeń uplastyczniających.....	37
Rysunek 2.6. Wpływ ciśnienia sprężonego powietrza na wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejonych kompozycją klejową Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (EP5Z1) oraz kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (EP5PAC).....	43

Rysunek 2.7. Wpływ długości zakładki oraz pneumokulkowania na wytrzymałość na ścinanie połączeń sklejonych kompozycją klejową Epidian 5 z utwardzaczem Z1 (EP5Z1) oraz kompozycją Epidian 5 z utwardzaczem PAC (EP5PAC)	44
Rysunek 2.8. Wartości nośności połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu dla 11 wariantów obróbki oraz odpowiadające tym wariantom wartości bezwzględne naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej po pneumokulkowaniu	45
Rysunek 2.9. Rozkład maksymalnych głównych naprężeń normalnych σ_I w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_I p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_I z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_I pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N	46
Rysunek 2.10. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera, von Missesa σ_v w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_v p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_v z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_v pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N	47
Rysunek 2.11. Rozkład naprężeń normalnych σ_{xx} w kierunku osi x (naprężeń rozciągających) w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_{xx} p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_{xx} z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_{xx} pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N	47
Rysunek 2.12. Rozkład naprężeń normalnych σ_{yy} w kierunku osi y (naprężeń oddzierających) w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\sigma_{yy} p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\sigma_{yy} z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\sigma_{yy} pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N	48
Rysunek 2.13. Rozkład naprężeń tnących (stycznych) τ_{xy} w warstwie środkowej spoiny klejowej dla połączeń: $\tau_{xy} p$ – poddanych pneumokulkowaniu, $\tau_{xy} z$ – obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N, $\tau_{xy} pz$ – poddanych pneumokulkowaniu i obciążonych siłą zewnętrzną 2000 N	48
Rysunek 2.14. Krzywa intensywności kulkowania: a – strefa, w której następuje szybka zmiana strzałki ugięcia płytki kontrolnej, b - strefa, w której następuje powolna zmiana strzałki ugięcia płytki kontrolnej	50

Rysunek 2.15. Powierzchnia częściowo pokryta odciskami (a) oraz powierzchnia całkowicie pokryta odciskami (b); 1 – odcisk, 2 – powierzchnia poddana obróbce	51
Rysunek 4.1. Ogólna koncepcja badań	58
Rysunek 5.1. Schemat realizacji doświadczeń prowadzonych zgodnie z planem Hartleya PS/DS-P:Ha ₃	62
Rysunek. 5.2. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie, a czasem utwardzania i temperaturą otoczenia (połączenia klejowe ze stali utworzone za pomocą kleju Loctite EA 3430).....	68
Rysunek 5.3. Profilogram struktury geometrycznej powierzchni klejonej po obróbce strumieniowo-ściernej	69
Rysunek 5.4. Schemat (a) i zdjęcie (b) połączenia klejowego jednozakładkowego	70
Rysunek 5.5. Zasada działania przyrządu ustalającego	70
Rysunek 5.6. Próbkki umieszczone w przyrządzie ustalającym	71
Rysunek 5.7. Urządzenie do pneumokulkowania: widok ogólny (a), próbka zamocowana do pokrywy (b), wewnątrz komory roboczej (c).....	72
Rysunek 5.8. Schemat procesu pneumokulkowania: 1 – obrabiana zakładka połączenia klejowego, 2 – osłonka zabezpieczająca próbkę przed pneumokulkowaniem, 3 – stalowe kulki, 4 – dysza górna, 5 – dysza dolna (de Laval), 6 – dno komory roboczej, 7 – spoina klejowa, 8 – dopływ sprężonego powietrza	73
Rysunek 5.9. Próbka przygotowana do zamocowania na pokrywie urządzenia.....	73
Rysunek 5.10. Płytki Almena: a) przed pneumokulkowaniem, b) po pneumokulkowaniu	75
Rysunek 5.11. Miernik ugięcia płytek Almena TSP-3B: a) bez płytki kontrolnej Almena, b) z płytką Almena	75
Rysunek 5.12. Wymiary płytki poddanej analizom chropowatości powierzchni	76
Rysunek 5.13. Profilometr stykowy Taylor Hobson SURTRONIC 25	77
Rysunek 5.14. Dyfraktometr rentgenowski PROTO iXRD COMBO	79

Rysunek 5.15. Połączenie klejowe z zaznaczonym kierunkiem pomiaru i położeniem punktów pomiarowych.....	79
Rysunek 5.16. Maszyna wytrzymałościowa ZWICK/ROELL Z100 (a) oraz próbka umieszczona w szczękach maszyny (b)	80
Rysunek 5.17. Wymiary modelu połączenia klejowego: a) długość zakładki 12,5 mm, b) długość zakładki 25 mm.....	82
Rysunek 5.18. Model połączenia klejowego z zakładką 12,5 mm, które poddano pneumokulkowaniu na długości 25 mm.....	82
Rysunek 5.19. Model blachy odkształconej w wyniku pneumokulkowania	83
Rysunek 6.1. Krzywe rozciągania dla połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, d) wariant 4, e) wariant 5, f) wariant 6	87
Rysunek 6.2. Krzywe rozciągania dla połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu: g) wariant 7, h) wariant 8, i) wariant 9, j) wariant 10, k) wariant 11, l) połączenia klejowe niepoddawane pneumokulkowaniu	88
Rysunek 6.3. Powierzchnie złomów połączeń klejowych w przypadku wariantu 4.....	89
Rysunek 6.4. Porównanie wartości nośności uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie modelu wraz z odchyleniem standardowym	92
Rysunek 6.5. Wykres obrazujący wpływ czasu i średnicy kulek na nośność połączeń klejowych (ciśnienie 0,4 MPa).....	93
Rysunek 6.6. Wykres obrazujący wpływ czasu i ciśnienia na nośność połączeń klejowych (średnica kulek 1 mm).....	93
Rysunek 6.7. Wykres obrazujący wpływ średnicy kulek i ciśnienia na nośność połączeń klejowych (czas 60 s)	93
Rysunek 6.8. Porównanie wartości strzałki ugięcia uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie modelu wraz z odchyleniem standardowym	98
Rysunek 6.9. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i średnicy kulek na strzałkę ugięcia płytek kontrolnych Almena (ciśnienie 0,4 MPa).....	98

Rysunek 6.10. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i ciśnienia na strzałkę ugięcia płytek kontrolnych Almena (średnica kulek 1 mm)	99
Rysunek 6.11. Wykres przedstawiający wpływ średnicy kulek i ciśnienia na strzałkę ugięcia płytek kontrolnych Almena (czas 60 s)	99
Rysunek 6.12. Równanie regresji opisujące wpływ strzałki ugięcia płytek Almena na nośność połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu wraz z wartością nośności połączeń klejowych niepoddawanych pneumokulkowaniu $P_{t_{nk}} = 6500 N$	100
Rysunek 6.13. Profil chropowatości powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 10 (czas 120 s, średnica kulek 1,0 mm, ciśnienie 0,5 MPa)	101
Rysunek 6.14. Obraz izometryczny powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 10 (czas 120 s, średnica kulek 1,0 mm, ciśnienie 0,5 MPa)	101
Rysunek 6.15. Profil chropowatości powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 4 (czas 180 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,5 MPa)	102
Rysunek 6.16. Obraz izometryczny powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 4 (czas 180 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,5 MPa)	102
Rysunek 6.17. Profil chropowatości powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 3 (czas 60 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,3 MPa)	102
Rysunek 6.18. Obraz izometryczny powierzchni po pneumokulkowaniu - wariant nr 3 (czas 60 s, średnica kulek 1,5 mm, ciśnienie 0,3 MPa)	103
Rysunek 6.19. Wykres przedstawiający zależność między nośnością połączeń klejowych a parametrem chropowatości Rku wraz z równaniem regresji oraz wartością współczynnika determinacji	107
Rysunek 6.20. Wykres przedstawiający zależność między strzałką ugięcia płytek kontrolnych Almena a parametrem chropowatości Rku wraz z równaniem regresji	108
Rysunek 6.21. Porównanie wartości parametru Rku uzyskanych doświadczalnie i obliczonych na podstawie modelu wraz z odchyleniem standardowym	111
Rysunek 6.22. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i średnicy kulek na wartość parametru Rku (ciśnienie 0,4 MPa)	112

Rysunek 6.23. Wykres przedstawiający wpływ czasu kulkowania i ciśnienia na wartość parametru Rku (średnica kulek 1 mm)	112
Rysunek 6.24. Wykres przedstawiający wpływ średnicy kulek i ciśnienia na wartość parametru Rku (czas 60 s)	112
Rysunek 6.25. Zestawienie wyników pomiarów nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu i naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładki	116
Rysunek 6.26. Porównanie wartości naprężeń von Missesa w spoinach klejowych modeli 1-5 połączeń klejowych	120
Rysunek 6.27. Porównanie wartości naprężeń maksymalnych głównych w spoinach klejowych modeli 1-5 połączeń klejowych	121
Rysunek 6.28. Porównanie wartości naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej dla modeli 1-5 połączeń klejowych	121
Rysunek 6.29. Porównanie wartości naprężeń stycznych w spoinach klejowych modeli 1-5 połączeń klejowych	121

Spis tabel

Tabela 5.1. Matryca planu Hartleya PS/DS-P:Ha ₃	62
Tabela 5.2. Wartości współczynników pomocniczych do obliczeń dla planu Hartleya PS/DS-P:Ha ₃	64
Tabela 5.3. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW-2024-T3	67
Tabela 5.4. Własności mechaniczne blach o grubości od 1,5 do 3 mm wykonanych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3	67
Tabela 5.5. Wybrane własności fizyczne stopu aluminium EN AW-2024.....	67
Tabela 5.6. Typowe własności fizyczne kleju Loctite EA 3430 (próbki o grubości 1,2 mm utwardzane przez 7 dni w temperaturze 22°C).....	68
Tabela 5.7. Parametry pneumokulkowania	74
Tabela 5.8. Parametry zastosowane w pomiarach naprężeń	80
Tabela 5.9. Warianty modeli w analizie MES	84
Tabela 6.1. Wartości na poziomie górnym i dolnym, wartości centralne, przedziały zmienności oraz sposób kodowania czynników wejściowych.....	85
Tabela 6.2. Wyniki pomiarów nośności połączeń klejowych oraz wyniki wybranych obliczeń pomocniczych.....	86
Tabela 6.3. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji.....	91
Tabela 6.4. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami pneumokulkowania i nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu oraz wyniki oceny istotności.....	94
Tabela 6.5. Wyniki pomiarów strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena oraz wyniki wybranych obliczeń pomocniczych	96
Tabela 6.6. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji.....	97

Tabela 6.7. Wartości parametrów chropowatości po pneumokulkowaniu w układzie 2D (średnia arytmetyczna z 5 pomiarów)	104
Tabela 6.8. Wartości parametrów chropowatości po pneumokulkowaniu w układzie 3D (średnia arytmetyczna z 3 pomiarów)	104
Tabela 6.9. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami chropowatości powierzchni w układzie 2D i nośnością połączeń klejowych (po pneumokulkowaniu), wyniki oceny istotności	105
Tabela 6.10. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami chropowatości powierzchni w układzie 3D i nośnością połączeń klejowych (po pneumokulkowaniu), wyniki oceny istotności współczynników	106
Tabela 6.11. Równania regresji, współczynniki korelacji liniowej między parametrami chropowatości powierzchni w układzie 2D i nośnością połączeń klejowych (po pneumokulkowaniu), wyniki oceny istotności	108
Tabela 6.12. Wyniki pomiarów wartości parametru chropowatości Rku oraz wyniki wybranych obliczeń pomocniczych	110
Tabela 6.13. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji	110
Tabela 6.14. Wartości naprężeń w warstwie wierzchniej zewnętrznych powierzchni zakładek połączeń klejowych oraz w warstwie wierzchniej płytki poddanej obróbce strumieniowości	113
Tabela 6.15. Wartości obliczone i krytyczne oraz ocena istotności współczynników równania regresji	115
Tabela 6.16. Porównanie nośności połączeń klejowych i stanu naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej zakładek połączeń poddanych pneumokulkowaniu	116
Tabela 6.17. Warianty połączeń klejowych poddanych analizie MES	117
Tabela 6.18. Rozkład naprężeń w spoinach połączeń niepoddanych i poddanych pneumokulkowaniu (zakładka 25 mm, długość strefy pneumokulkowania 25 mm)	117

Tabela 6.19. Rozkład naprężeń w spoinach połączeń niepoddanych i poddanych pneumokulkowaniu (zakładka 12,5 mm, długość strefy pneumokulkowania 12,5 mm)..... 118

Tabela 6.20. Rozkład naprężeń w spoinach połączeń niepoddanych i poddanych pneumokulkowaniu (zakładka 12,5 mm, długość strefy pneumokulkowania 25 mm)..... 119

Tabela 6.21. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach połączeń z zakładką 25 mm oraz wartości spadku naprężeń względem połączeń niekulkowanych z zakładką 25 mm 122

Tabela 6.22. Maksymalne wartości naprężeń w spoinach połączeń z zakładką 12,5 mm oraz wartości spadku naprężeń względem połączeń niekulkowanych z zakładką 12,5 mm 123

Streszczenie

Rozprawa doktorska podjęła zagadnienie wpływu procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Tematyka rozprawy została przyjęta w odpowiedzi na potrzebę opracowania wydajnej, łatwej i skutecznej metody umacniania połączeń klejowych zakładkowych.

W ramach pracy zbadano doświadczalnie wpływ wybranych parametrów procesu pneumokulkowania na nośność połączeń klejowych jednozakładkowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. Ponadto, sprawdzono możliwość wykorzystania wybranych metod kontroli procesu pneumokulkowania do przewidywania nośności połączeń klejowych po pneumokulkowaniu i do oceny poprawności obróbki umacniającej. Doświadczenia przeprowadzono zgodnie z metodyką planu Hartleya PS/DS-P:Ha₃. Korzystając z metod statystycznych (jednoczynnikowej analizy wariancji, analizy regresji i korelacji), przeanalizowano zależności między nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu, a strzałką ugięcia płytek Almena, parametrami chropowatości powierzchni i stanem naprężeń własnych próbek ze stopu aluminium EN AW-2024-T3. W celu wyjaśnienia mechanizmu zwiększenia nośności połączeń klejowych w wyniku pneumokulkowania, porównano stan naprężeń własnych w spoinie klejowej połączeń poddanych i niepoddanych obróbce. Porównanie stanu naprężeń przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania Ansys 16.2.

Uzyskane wyniki badań, pozwoliły na udowodnienie poprawności hipotezy postawionej w pracy, zgodnie z którą obróbka umacniająca strefy zakładki połączeń klejowych ze stopu aluminium EN AW-2024-T3, realizowana metodą pneumokulkowania z odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi, pozwala zwiększyć ich nośność. Dla przyjętego w badaniach zakresu zmienności czynników wejściowych, nośność połączeń poddanych pneumokulkowaniu była nawet o 33,4% większa niż nośność połączeń niekulkowanych. Wykazano, że nośność połączeń poddanych obróbce malała wraz ze zwiększaniem wartości strzałki ugięcia płytek kontrolnych Almena. Parametrami chropowatości powierzchni, najsilniej związanymi z nośnością połączeń klejowych poddanych pneumokulkowaniu, były parametry *Rku* i *Sdr*. Nośność połączeń klejowych zwiększała się wraz ze zwiększaniem wartości parametrów *Rku* i *Sdr*. Wyniki analiz numerycznych udowodniły, że pneumokulkowanie zewnętrznej powierzchni zakładki doprowadziło do redukcji naprężeń w spoinie klejowej, przy czym największy spadek wartości naprężeń był zauważalny w przypadku naprężeń normalnych prostopadłych do powierzchni spoiny klejowej.

Summary

The doctoral dissertation discusses the issue of the impact of the shot peening process on the load capacity of adhesive joints made of aluminum alloy EN AW-2024-T3. The topic of the dissertation was adopted in response to the need to develop an efficient, easy, and effective method of strengthening adhesive lap joints.

As part of the work, the influence of selected parameters of the shot peening process on the load capacity of single-lap adhesive joints made of aluminum alloy EN AW-2024-T3 was experimentally examined. Furthermore, the possibility of using selected methods to control the shot peening process to predict the load capacity of the adhesive joints after the shot peening and to assess the correctness of the strengthening treatment was checked. The experiments were carried out according to the Hartley PS/DS-P:Ha₃ plan methodology. Using statistical methods (one-way analysis of variance, regression, and correlation analysis), the relationships between the load capacity of adhesive joints subjected to shot peening and the Almen strip deflection, surface roughness parameters and the state of residual stress of samples made of aluminum alloy EN AW-2024-T3 were analysed. In order to explain the mechanism of increasing the load capacity of adhesive joints as a result of shot peening, the state of residual stresses in the bond-line of treated and untreated joints was compared. Comparison of the stress state was performed using the finite element method using Ansys 16.2 software.

The test results allowed to prove the correctness of the hypothesis presented in the work, according to which the treatment of strengthening the overlap zones of adhesive joints made of aluminum alloy EN AW-2024-T3, carried out by shot peening with appropriately selected technological parameters, allows to increase their load capacity. For the range of variability of the input factors assumed in the research, the load capacity of the shot peened connections was up to 33.4% higher than the load capacity of the non-peened connections. The load capacity of the treated joints was shown to decrease with increasing value of the Almen strip deflection. The surface roughness parameters most closely related to the load capacity of adhesive joints subjected to shot peening were the *Rku* and *Sdr* parameters. The load capacity of adhesive joints increased with increasing values of the *Rku* and *Sdr* parameters. The results of numerical analyses proved that shot peening of the outer surface of the overlap led to a reduction in stresses in the bond-line, with the greatest decrease in stress values being noticeable in the case of normal stresses perpendicular to the surface of the bond-line.