

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Katedra Metalurgii i Technologii Metali

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Katarzyna Kubik

**Temat: Kształtowanie właściwości funkcjonalnych walcowanych
kompozytów warstwowych AlMg-Al-Cu**

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Rydz, prof. PCz

Częstochowa 2023

*Składam serdeczne podziękowania
promotorowi dr hab.inż. Dariuszowi Rydzowi prof. PCz.
za okazaną pomoc i cenne uwagi
przekazane w trakcie realizacji pracy*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń oraz stosowanych skrótów i akronimów	5
Streszczenie	7
Abstract	9
1. WPROWADZENIE.....	11
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	13
2.1. Materiały kompozytowe	13
2.1.1. Klasyfikacja kompozytów	15
2.1.2. Charakterystyka i właściwości kompozytów	17
2.1.3. Rodzaje połączeń materiałów kompozytowych	21
2.2. Metody wytwarzania materiałów kompozytowych	23
2.2.1. Metody wytwarzania kompozytów warstwowych	25
2.2.2. Charakterystyka metod wytwarzania kompozytów warstwowych	27
2.3. Analiza teoretyczna asymetrycznego procesu walcowania kompozytów warstwowych	31
2.3.1. Asymetryczny proces walcowania	31
2.3.2. Wpływ asymetrycznego procesu walcowania na nierównomierność odkształcenia komponentów kompozytu warstwowego	37
2.3.3. Wpływ asymetrycznego procesu walcowania na prędkość płynięcia płaskich wyrobów warstwowych w procesie walcowania	43
2.4. Degradacje mechaniczne w metalowych kompozytach warstwowych	45
2.5. Teoretyczna analiza techniczno- ekonomiczna procesu wytwarzania kompozytów warstwowych	47
2.6. Podsumowanie przeglądu literatury	52

3. CZĘŚĆ BADAWCZA	54
3.1. Hipoteza, cel i zakres badań.....	54
3.2. Materiał badawczy.....	57
3.2.1. Charakterystyka materiałów przyjętych do badań	57
3.2.2. Metodyka badań	65
3.3. Badania własne.....	69
3.3.1. Makro i mikrostruktura kompozytów warstwowych po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego.....	69
3.3.2. Asymetryczny proces walcowania kompozytów warstwowych	77
3.3.3. Makro i mikrostruktura kompozytów warstwowych po asymetrycznym procesie walcowania.....	88
3.3.4. Wytrzymałość obszarów połączeń na ścinanie	97
3.3.5. Mikrotwardość.....	100
3.3.6. Analiza wyników badań	106
3.3.7. Ocena możliwości wdrożeniowej asymetrycznego procesu walcowania blach trójwarstwowych do praktyki przemysłowej.....	106
4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	113
Literatura.....	115
Spis rysunków.....	125
Spis tabel.....	129
Załącznik.....	130

Wykaz ważniejszych oznaczeń oraz stosowanych skrótów i akronimów

ASR	- asymetryczne walcowanie,
ASK	- asymetria kinetyczna,
TRC	- proces odlewania i walcowania,
PV	- skrótu nazwy rosyjskiej "prokatka - volochenie",
A	- współczynnik uwzględniający rodzaj łączonych metali,
a	- parametr wariacyjny,
a _v	- współczynnik asymetrii,
a _{vopt}	- optymalna wartość współczynnika asymetrii,
D _d , D _g	- średnice dolnego i górnego walca,
H	- początkowa grubość blach kompozytowych warstwowych,
H ₁ , H ₂ , H ₃	- grubości warstw tworzących kompozyt trójwarstwowy,
B	- początkowa szerokość blach kompozytowych warstwowych,
L ₁ , L ₂ , L ₃	- początkowe długości komponentów blach kompozytowych warstwowych,
b	- szerokość blachy kompozytowej po procesie walcowania,
b _{sr}	- średnia blachy kompozytowej po procesie walcowania,
b ₀	- szerokość blachy kompozytowej przed walcowaniem,
b ₁	- szerokość blachy kompozytowej po pierwszym przepuście walcowniczym,
h	- całkowita grubość blach kompozytowych warstwowych po walcowaniu,
h ₁ , h ₂ , h ₃	- grubości warstw stanowiących kompozyt po procesie walcowania,
H _T /H _M	- stosunek grubości warstw kompozytu dwuwarstwowego przed walcowaniem,
ΔH	- odkształcenie bezwzględne kompozytu warstwowego,
Δh _M , Δh _T	- odkształcenie bezwzględne warstw miękkiej i twardej blachy dwuwarstwowej,
$H_{sr} = \frac{H+h}{2}$	- średnia wysokość strefy odkształcenia,
K, k	- współczynniki empiryczne nierównomierności odkształcenia,
l _d	- długość rzutu łuku styku metalu z walcem,
M _d , M _g	- moment walcowania na dolnym i górnym walcu,
M _w	- moment walcowania,
N	- całkowita moc walcowania,
R	- promień walca roboczego,
R'	- promień krzywizny blach kompozytowych,
1/R'	- krzywizna blach kompozytowych,
T	- temperatura,
T	- takt walcowania,
G	- masa wsadu,
V	- prędkość walcowania,
V _g , V _d	- prędkości obwodowe walca górnego i dolnego,
v _{wy}	- prędkość płynięcia cząstek metalu na wyjściu z kotliny odkształcenia,
v _{sr}	- średnia prędkość płynięcia cząstek kompozytu metalowego,
ε	- gniot względny,
ε ₁ , ε ₂ , ε ₃	- gnioty względne warstw stanowiących kompozyt,
ė	- prędkość odkształcenia,
Δ=H _{sr} /l _d	- współczynnik kształtu kotliny walcowniczej,
X _i	- siły zewnętrzne,
ω	- sposób ułożenia warstw w blachach kompozytowych warstwowych,
D	- średnica walców roboczych
F	- siła naciska metalu na walec,
p	- pionowy nacisk jednostkowy,
p _{sr}	- średni nacisk jednostkowy w strefie odkształcenia,

R_m	- wytrzymałość na rozciąganie obszarów połączeń kompozytu warstwowego,
R_s	- wytrzymałość na ścinanie,
S_0	- powierzchnia przekroju poprzecznego blachy kompozytowej przed procesem walcowania ($S_0 = h_0 b_0$),
S_1	- powierzchnia przekroju poprzecznego blachy kompozytowej po pierwszym przepuszczeniu walcowniczym ($S_1 = h_1 b_1$),
S_d	- pole powierzchni styku metalu z walcem,
α	- kąt chwytu,
β	- kąt zgrzewania,
Δh	- gniot bezwzględny,
ΔL	- zmiana (przyrost) długości,
λ	- współczynnik wydłużenia pasma,
ρ	- kąt tarcia,
τ_{max}	- maksymalne naprężenia ścinające,
ω	- prędkość kątowna w strefie odkształcenia.
R_{eA}, R_{eB}, R_{en}	- granice plastyczności składników kompozytu A, B...n,
$g_A, g_B \dots g_n$	- udziały objętościowe składników kompozytu A, B...n
ρ_k, ρ_w, ρ_o	- gęstość kompozytu, włókien oraz osnowy,
g_w, g_o	- udziały objętościowe włókien i osnowy,
E_k, E_w, E_o	- moduły Younga, odpowiednio kompozytu, włókien i osnowy
E_f	- efektywność ekonomiczna,
P	- określona produkcja w czasie (efekt),
I	- nakłady inwestycyjne,
K	- nakłady eksploatacyjne,
K_{MH}	- koszty maszynogodziny (zł/h),
K_A	- koszty odpisów amortyzacyjnych (zł/rok),
K_Z	- koszty odsetek kalkulacyjnych (zł/rok),
K_R	- koszty lokalowe (zł/rok),
K_E	- koszty energii (zł/rok),
K_I	- koszty utrzymania maszyny w ruchu (zł/rok),
T_N	- roczny fundusz czasu pracy, czas użytkowania (h/rok),
K_{MH}	- koszt maszynogodziny (zł/h),
K_N	- koszty narzędziowe (zł/rok),
K_{PB}	- koszty personelu bezpośredniego (zł/rok),
K_{CP}	- koszt całkowity procesu (zł/h),
K_{MH}	- koszt maszynogodziny (zł/h),
K_P	- koszt płacy godzinowej personelu obsługującego (zł/h).

Streszczenie

W przedstawionej dysertacji omówiono problemy związane z kształtowaniem optymalnych właściwości funkcjonalnych kompozytów warstwowych w procesie wytwarzania. Badania były prowadzone dla wytworzonych metodą zgrzewania wybuchowego kompozytów trójwarstwowych AlMg5-Al-M1E. Uzyskane obszary połączeń komponentów kompozytu warstwowego pomimo wspólnej metody ich wytworzenia były zgoła odmienne. W obszarze połączenia warstw Al-M1E zaobserwowano występowanie faz międzymetalicznych. Natomiast w przypadku obszaru połączenia warstw Al i AlMg5 nie stwierdzono występowania faz międzymetalicznych. Przeprowadzone w pracy badania pozwoliły na kompleksową analizę zachowania różnego rodzaju połączeń podczas plastycznego kształtowania blach kompozytowych warstwowych. Rozprawa doktorska została przedstawiona w dwóch częściach: teoretycznej oraz eksperymentalnej.

Część teoretyczna pracy omawia zagadnienia dotyczące podstaw teoretyczno-doświadczalnych procesu wytwarzania kompozytów warstwowych. Wykazano w tej części pracy, że obserwowany wzrost zastosowań kompozytów metalowych w tak wielu branżach, implikuje potrzebę rozwoju nowoczesnych metod ich plastycznego kształtowania. Natomiast metody tradycyjne i powszechnie stosowane wymagają udoskonalenia zwłaszcza w aspekcie poprawy jakości jak i efektywności ekonomicznej wytwarzania wyrobów. W części literaturowej omówiono procesy łączenia oraz kształtowania plastycznego kompozytów warstwowych metalowych. Zawarto opis metod łączenia metali i ich stopów ze szczególnym uwzględnieniem metody zgrzewania wybuchowego. Przedstawiono charakterystykę procesu walcowania asymetrycznego kompozytów metalowych z uwzględnieniem aspektu kształtowania własności funkcjonalnych oraz trwałości obszarów połączeń warstw.

Część badawcza obejmuje hipotezę naukową, cel pracy, reprezentatywne wyniki badań doświadczalnych oraz ich analizę. W pracy doktorskiej zaproponowano kontrolowaną asymetrię walcowania blach kompozytowych warstwowych jako parametr sterujący właściwościami funkcjonalnymi gotowych wyrobów oraz przyczyniający się do poprawy efektywności ich wytwarzania. Przeprowadzone w ramach pracy badania podzielono na dwie grupy parametrów tj.: związane z kształtem i geometrią wyrobu oraz funkcjonalne w kolejnych etapach procesu wytwórczego. Pierwszym etapem prowadzonych rozważań było przeprowadzenie badań makroskopowych i mikroskopowych połączonych metodą zgrzewania wybuchowego komponentów kompozytów warstwowych. Dokonano oceny jakości i trwałości

obszarów połączeń. Następnie przeprowadzono proces plastycznego kształtowania płaskich wyrobów kompozytowych mający na celu zmniejszenie grubości warstw stanowiących kompozyt. Przeprowadzone badania eksperymentalne uwidoczniły wpływ nierównomiernego rozkładu gniotu na poszczególne warstwy kompozytu, a w ich efekcie na jego niekontrolowane wygięcie po procesie walcowania. Zjawisko to skutkowało koniecznością wprowadzenia do części badawczej operacji prostowania walcowanych pasm kompozytowych. Następnie dokonano oceny wpływu parametrów procesu plastycznego kształtowania na jakość i trwałość obszarów złączy blach kompozytowych. W tym celu przeprowadzono badania makro- i mikrostruktury, wytrzymałość na ścinanie oraz mikrotwardości na wysokości badanych blach kompozytowych. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych określono zakres optymalnych warunków prowadzenia procesu walcowania wyrobów kompozytowych. W efekcie finalnym określono warunki prowadzenia procesu walcowania zapewniające uzyskanie prostych blach kompozytowych o wysokiej jakości połączeń warstw oraz optymalnych własnościach funkcjonalnych.

Przeprowadzone w pracy doktorskiej rozważania wskazują, że proces wytwarzania kompozytowych blach warstwowych posiada potencjał wdrożeniowy. Wprowadzenie opracowanego rozważania do warunków przemysłowych jest w pełni zasadne zarówno w aspekcie technologicznym jak i ekonomicznym.

Rozprawa doktorska zakończona została podsumowaniem oraz wnioskami wynikającymi z przeprowadzonych rozważań.

Abstract

The presented dissertation discusses problems related to the shaping of optimal functional properties of layered composites in the manufacturing process. The tests were carried out for three-layer AlMg5-Al-M1E composites produced by explosive welding. The obtained areas of connection of the components of the layered composite, despite the common method of their production, were quite different. Intermetallic phases were observed in the area of the Al-M1E layer junction. However, in the case of the junction of the Al and AlMg5 layers, no intermetallic phases were found. The research carried out in the work allowed for a comprehensive analysis of the behavior of various types of connections during the plastic shaping of sandwich composite sheets. The doctoral dissertation was presented in two parts: theoretical and experimental.

The theoretical part of the thesis discusses the issue of the theoretical and experimental basis of the process of manufacturing layered composites. It has been shown in this part of the work that the observed increase in the use of metal composites in so many industries implies the need for the development of modern methods of their shaping. On the other hand, traditional and commonly used methods require improvement, especially in terms of improving the quality and economic efficiency of manufacturing products. The literature part discusses the processes of joining and plastic shaping of layered metal composites. A description of the methods of joining metals and their alloys is included, with particular emphasis on the explosive welding method. The characteristics of the asymmetric rolling process of metal composites are presented, taking into account the aspect of shaping the functional properties and the durability of the layer connection areas.

The research part includes the scientific hypothesis, the purpose of the work, representative results of experimental research and their analysis. The paper proposes a controlled asymmetry of rolling of composite sandwich sheets as a parameter controlling the functional properties of finished products and contributing to the improvement of their production efficiency. The tests carried out as part of the work were divided into two groups of parameters, i.e. parameters related to the shape and geometry of the product and functional in the subsequent stages of the manufacturing process. The first stage of the conducted considerations was to carry out macroscopic and microscopic examinations of the components of the layered composites joined by explosive welding. The quality and durability of the connection areas was assessed. Then, the process of plastic shaping of flat composite products was carried out in order to reduce the

thickness of the layers constituting the composite. Experimental studies have shown the impact of uneven distribution of deformation on individual layers of the composite, and as a result, its uncontrolled bending after the rolling process. This phenomenon resulted in the need to introduce the straightening operation of rolled composite strands to the research part. Then, the impact of the parameters of the plastic forming process on the quality and durability of the joint areas of the composite sheets was assessed. For this purpose, tests of macro- and microstructure, shear strength and microhardness at the height of the tested composite sheets were carried out. On the basis of the conducted experimental studies, the range of optimal conditions for the process of rolling composite products was determined. As a final result, conditions for the rolling process were determined to ensure that simple composite sheets with high-quality layer connections and optimal functional properties were obtained.

The considerations carried out in the doctoral thesis indicate that the process of manufacturing composite sandwich sheets has a high potential for implementation. The introduction of the developed consideration to industrial conditions is fully justified both in the technological and economic aspect.

The doctoral dissertation ended with a summary and conclusions from the considerations.

1. Wprowadzenie

Historia procesu wytwórczego materiałów kompozytowych sięga 10 000 lat przed naszą erą. Kompozyty definiowane są jako materiały składające się z dwóch lub więcej komponentów [1]. Dokonując obserwacji przyrody zgodnie z podaną definicją kompozytem można nazwać również łodygi roślin, pnie drzew czy też kości i mięśnie ludzi i zwierząt [1]. Jednym z pierwszych odnotowanych zastosowań materiałów kompozytowych było mieszanie przez ludzi gliny ze słomą, w celu zwiększenia trwałości i wytrzymałości budowli. Początki świadomej stosowalności kompozytów w rozwiązaniach technicznych sięgają jednak dopiero początku XX wieku naszej ery. Pierwszą odnotowaną praktyczną metodą było nanoszenie warstwy poprzez zanurzenie stalowego rdzenia w roztopionej miedzi. Metoda ta opracowana i stosowana była przez firmę Duplex Metal Co (USA) [2]. Następnie w roku 1931 otrzymano włókna szklane, które 10 lat później udało się połączyć polimerem w materiał kompozytowy. Pierwszą praktyczną próbą zastosowania materiałów kompozytowych będących połączeniem włókna szklanego z polimerem była budowa kadłuba dla samolotów Spitfire przeprowadzona w roku 1943 [1].

Kolejne prace badawcze dotyczące procesów wytwarzania materiałów kompozytowych warstwowych pojawiły się w latach 80 XX wieku [1, 2, 3]. W głównej mierze badania dotyczyły kompozytów o osnowie metali lekkich takich jak aluminium, stop aluminium z magnezem itp. [1]. Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia można stwierdzić, że pomimo intensywnie prowadzonych badań w dalszym ciągu brakuje kompleksowych rozwiązań plastycznego kształtowania kompozytowych wyrobów metalowych. Głównym problemem występującym podczas plastycznego kształtowania jest częste rozwarstwianie się połączonych kompozytów wynikające z kruchości faz międzymetalicznych, występowania płaszczyzn ścinania podczas konwencjonalnego walcowania kompozytów, czy też brak możliwości uzyskania bezpośredniego połączenia metali i ich stopów. Obecnie krajowa produkcja kompozytów metalowych na osnowie metali lekkich sprowadza się do ich bezpośredniego połączenia oraz pojedynczych operacji ich kształtowania. Pomimo wielu rozwiązań teoretycznych w dalszym ciągu brakuje rozwiązań pozwalających na plastyczne kształtowanie kompozytów warstwowych metalowych w przemysłowych liniach produkcyjnych [1, 2, 3].

W okresie dużej konkurencji na rynku krajowym i światowym, niezbędne jest wytwarzanie wyrobów o wymaganych właściwościach, przy jak najmniejszych kosztach produkcji.

Stosowane konwencjonalne i powszechnie używane materiały jednorodne są coraz częściej wypierane przez materiały kompozytowe, w tym warstwowe. Dość powszechne stało się stosowanie kompozytów złożonych z warstw różnych metali lub ich stopów [1, 2, 4÷15]. Rosnące zapotrzebowanie na materiały kompozytowe warstwowe są siłą napędową intensywnie prowadzonych prac badawczych związanych z opracowywaniem technologii wytwarzania nowych materiałów. Należy podkreślić, że do najliczniej stosowanej grupy materiałów kompozytowych warstwowych należą wyroby płaskie, do których zalicza się blachy oraz taśmy [3].

Przedstawiona poniżej dysertacja dotyczy opracowania optymalnego procesu wytwarzania kompozytowych warstwowych wyrobów płaskich na osnowie metali lekkich przy zachowaniu wysokiej jakości obszarów połączenia. W dalszym ciągu obserwuje się wzrost zapotrzebowania na tego rodzaju wyroby ze względu na połączenie różnych właściwości komponentów stanowiących jeden wyrób. Dlatego wyroby z materiałów kompozytowych warstwowych metalowych są powszechnie stosowane m.in.: w przemyśle energetycznym, elektronicznym, chemicznym, petrochemicznym oraz okrętowym. Wyroby wielowarstwowe będące połączeniem np. dwóch różnych stali, wykorzystuje się np. do wytwarzania pojemników na wodę, odpady nuklearne, zbiorniki na ścieki miejskie zawierające znaczne ilości chloru, płyty przeciwpancerne itp. Powszechnie stosowane są wyroby bimetalowe będące połączeniem Al i Cu, z których wytwarza się między innymi: podkładki cupalowe Al-Cu, bimetalowe końcówki typu HMA szyny prądowe, łączniki przewodów napowietrznych itp. W ostatnim czasie obserwuje się duże zainteresowanie wyrobami z aluminium i jego stopów, a w szczególności stopów aluminium zawierających magnez. Stopy te charakteryzują się znacznie wyższą wytrzymałością na rozciąganie w porównaniu do czystego aluminium oraz mniejszą gęstością. Dlatego stopy aluminium z magnezem cieszą się dużym zainteresowaniem jako materiał stanowiący komponenty warstwowych kompozytów metalowych.

Pomimo licznych prac naukowych [3, 16-72] w zakresie wytwarzania kompozytów warstwowych metalowych, dotychczas w praktyce przemysłowej istnieje stosunkowo niewiele przedsiębiorstw zajmujących się ich produkcją. Głównie sprowadza się to do uzyskania połączenia komponentów wchodzących w skład kompozytu oraz pojedyncze operacje kształtujące połączony półwyrób. Natomiast istnieje niewiele prac opisujących kompleksowo procesy wytwarzania wyrobów wielowarstwowych, co było podstawą do opracowania poniższej dysertacji. Współczesny przemysł przed podjęciem decyzji o wdrożeniu konkretnego rozwiązania technologicznego dokonuje obiektywnej oceny przedsięwzięcia pod kątem możliwości technologicznych firmy, a przede wszystkim ekonomicznym.

2. Analiza stanu zagadnienia

Obecnie obserwuje się ciągły wzrost zainteresowania materiałami, które mogą zostać wykorzystane do opracowania technologii przyjaznych dla środowiska. Do takich materiałów należą kompozyty w tym również warstwowe. Wymagania dużej trwałości materiałów przy stosunkowo niskich kosztach ich wytwarzania, wymuszają na technologach stosowanie materiałów kompozytowych na osnowie metali lekkich (stopów magnezu, aluminium i jego stopów, cyrkon itp.) łączonych z warstwami miedzi, tytanu czy też stali. W inżynierii procesowej kompozyty metalowe często stosowane są np.: w elektronice, przemyśle spożywczym, chemicznym, okrętowym itp. W przypadku braku możliwości bezpośredniego połączenia komponentów metalowych konieczne jest zastosowanie tzw. międzywarstwy technologicznej. Większość wyrobów wielowarstwowych powstaje w postaci półwyrobów, które następnie często są poddawane procesom kształtowania plastycznego. Na podstawie analizy literatury [3, 4, 5] proces wytwarzania płaskich wyrobów kompozytowych obejmuje następujące etapy:

- otrzymanie półwyrobu w postaci kompozytu warstwowego (wsadu do walcowania),
- walcowanie połączonego półwyrobu kompozytowego warstwowego,
- obróbkę cieplną blach lub taśm kompozytowych warstwowych.

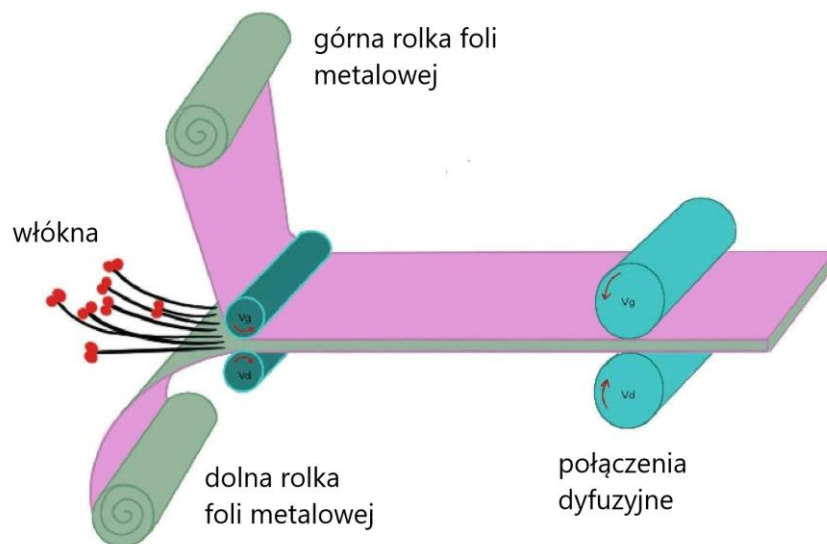
2.1. Materiały kompozytowe

Materiały kompozytowe kojarzą się z wyrobami stosunkowo nowoczesnymi. Jak już wspomniano powyżej pierwsze wzmianki dotyczące zastosowania materiałów kompozytowych sięgają kilku tysięcy lat przed naszą erą. Na kompozytach opierały się całe cywilizacje. Tysiące lat temu z cegieł złożonych z gliny i siana stawiano konstrukcje, które nie rozpyływały się po deszczu. Na kartach historii można odnaleźć jeszcze wiele innych kompozytów wykorzystywanych setki lat temu np.: stal damasceńska, z której powstawały średniowieczne egzemplarze broni białej [1]. Natomiast na przestrzeni ostatniej dekady można zauważyć, że spośród szerokiej gamy surowców dostępnych na światowym rynku, kompozyty są najszybciej rozwijającą się grupą materiałów.

W niniejszej dysertacji prowadzono rozważania dotyczące kompozytów na osnowie metali lekkich. Dużą i ważną grupę materiałów konstrukcyjnych w wielu gałęziach przemysłowych

stanowią kompozyty o osnowie aluminium i jego stopów. Stopy aluminium charakteryzują się małą gęstością, wysoką wytrzymałością właściwą oraz stosunkowo niską cenę [1, 6, 7]. Innym często stosowanym komponentem kompozytów warstwowych są stopy magnezu, które charakteryzują się wyższymi własnościami wytrzymałościowymi w porównaniu do stopów aluminium, ale o niższej od nich odporności korozyjnej. Natomiast kompozyty o osnowie miedzianej cechują się wysoką przewodnością elektryczną o stosunkowo wysokich własnościach wytrzymałościowych.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat wytwarzania taśmy kompozytowej złożonej z dwóch folii metalowych wzmocnionych włóknami [1, 8].



Rys. 1. Schemat wytwarzania taśmy kompozytowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1, 8]

Włókna stanowiące wzmocnienie w kompozytach o osnowie metalowej mogą występować w postaci pojedynczych włókien o średnicy $100 \div 150 \mu\text{m}$ lub jak przedstawiono na rysunku 1 w postaci wiązek włókien o średnicach $6 \div 20 \mu\text{m}$ [1].

Do łączenia materiałów kompozytowych stosowanych jest wiele metod. W przypadku kompozytów warstwowych metalowych na szczególne wyróżnienie zasługuje metoda zgrzewania wybuchowego, która umożliwia łączenie materiałów metalowych o odmiennych właściwościach fizykochemicznych. Do dalszego wytwarzania kompozytów metalowych stosowane są obecnie metody polegające na wzmocnieniu uzyskanym mechanicznie. Powszechnie stosowane są procesy przeróbki plastycznej, procesy odlewnicze oraz procesy napyłania czy też strącania [7, 8].

2.1.1. Klasyfikacja kompozytów

Klasyfikację kompozytów można przeprowadzić w zależności od przyjętego kryterium. Na podstawie literatury przedmiotu [1, 2, 8÷17], do najczęściej stosowanych kryteriów podziału materiałów kompozytowych należą:

- ich przeznaczenie,
- rodzaj oraz postać zastosowanego wzmocnienia,
- rodzaj osnowy.

Inną klasyfikacją stosowaną w literaturze [1] jest podział kompozytów ze względu na ich pochodzenie:

- kompozyty naturalne,
- kompozyty zaprojektowane i wytworzone przez człowieka.

Nawiązując do wspomnianego wcześniej podziału kompozytów ze względu na przeznaczenie [1] możemy wyróżnić kompozyty:

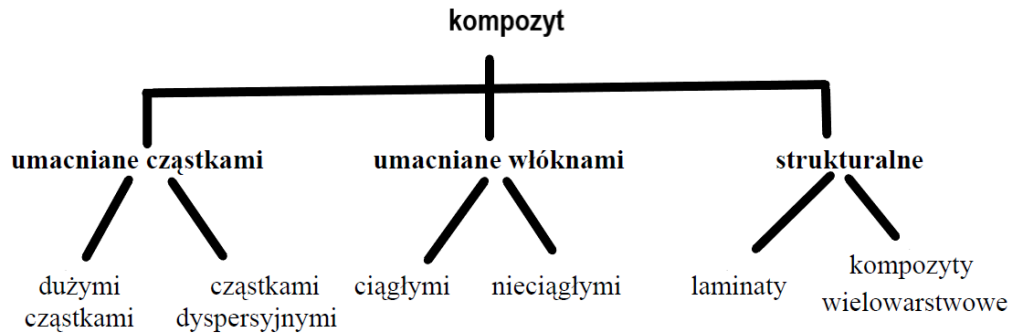
- konstrukcyjne,
- funkcjonalne.

Natomiast, ze względu na wspomniany rodzaj osnowy [1] występują kompozyty:

- o osnowie metalicznej,
- o osnowie polimerowej,
- o osnowie ceramicznej.

Podziału kompozytów, można też dokonać uwzględniając wspomniany już wcześniej rodzaj wzmocnienia, co przedstawiono na rysunku 2. Ze względu na wzmocnienie wyróżniamy kompozyty [1]:

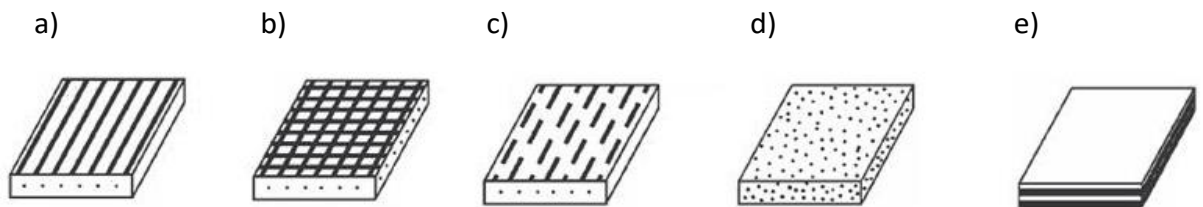
- włókniste (z włóknem ciętym, ciągłym, lub wyrobami z włókien np. maty lub tkaniny),
- hybrydowe,
- warstwowe,
- umocnione cząstkami.



Rys. 2. Schemat klasyfikacji kompozytów

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Na rysunku 3 przedstawiono podział kompozytów ze względu na rodzaj wzmocnienia [9].

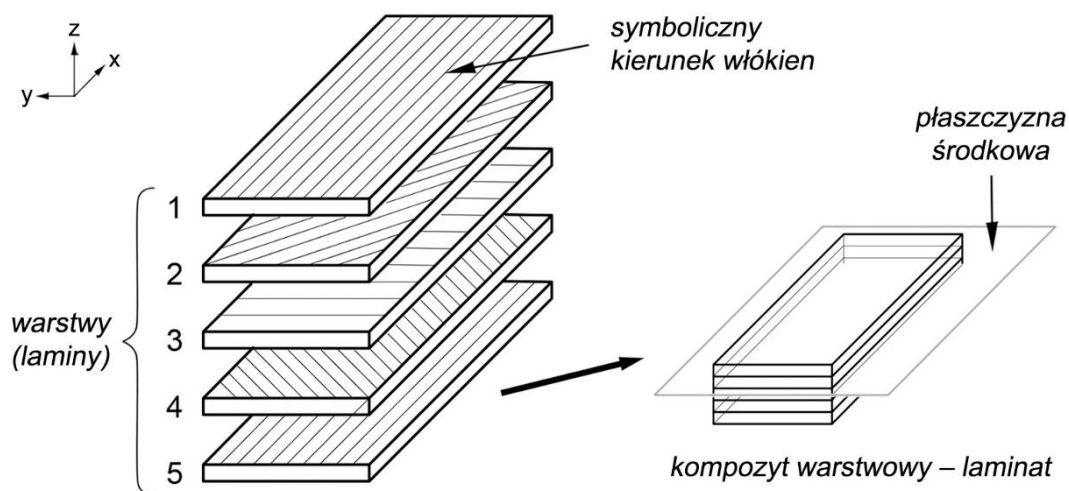


Rys. 3. Podział kompozytów uzależniony od postaci wzmocnienia: a-c) włókniste, d) wzmocnianie cząstkami, e) warstwowe

Źródło: opracowanie własne na podstawie [9]

Przedstawione na rysunkach 2 i 3 klasyfikacje kompozytów obejmują najczęściej spotykane i omawiane w literaturze ich podziały. Na podstawie przeglądu literatury [1, 8÷18] można zaobserwować, że wyroby kompozytowe są silnie rozwijającą grupą materiałów, dla której z pewnością będą powstawać, coraz to nowsze klasyfikacje wynikające między innymi z ich charakterystyk, budowy jak również zastosowania. Przemysłowe zastosowania kompozytów wymagają od technologów opracowywania coraz to nowszych i doskonalszych metod ich wytwarzania. Metody te muszą zapewniać uzyskanie wyrobów kompozytowych o oczekiwanych właściwościach funkcjonalnych.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat wytwarzania kompozytu metalowego warstwowego (laminatu) [1].



Rys. 4. Schemat powstawania kompozytu warstwowego (laminatu)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Kompozyty warstwowe, do powstania których zastosowano komponenty z różnych metali lub ich stopów, łączą w sobie właściwości tych materiałów. W obszarach ich połączenia często powstają tzw. warstwy pośrednie, które złożone są z mieszanin łączonych metali, i które nazywane są w literaturze przedmiotu „*intermetalikami*” [19÷22]. Warstwy pośrednie występujące w obszarach połączenia warstw bardzo często decydują o właściwościach funkcjonalnych kompozytowych materiałów warstwowych. Dlatego bardzo istotne jest uzyskanie jak najtrwalszego połączenia, które zarówno podczas procesu wytwórczego jak i w gotowym wyrobie zachowa wysoką jakość i trwałość. Głównymi parametrami decydującymi o jakości gotowych wyrobów kompozytowych jest uzyskanie wyrobu o odpowiedniej geometrii i trwałości połączenia komponentów stanowiących kompozyt warstwowy.

2.1.2. Charakterystyka i właściwości kompozytów

W okresie dużej konkurencji na rynku krajowym i światowym, niezbędne jest wytwarzanie wyrobów o ściśle określonych właściwościach, przy jak najniższych kosztach produkcji. Wspomniany wcześniej dynamiczny rozwój sprawił, że odbiorcy oczekują materiałów o zwiększonej odporności na działanie korozji, zmniejszonym ciężarze gotowych wyrobów oraz większej żywotności wyrobu. Stosowane konwencjonalne i powszechnie używane materiały są coraz częściej wypierane przez materiały kompozytowe warstwowe. Wprowadzanie na rynek nowych materiałów jest siłą napędową intensywnie prowadzonych

prac badawczych związanych z opracowywaniem nowych technologii związanych z ich otrzymywaniem, a następnie kształtowaniem plastycznym.

Na podstawie prac [1, 8, 13] można stwierdzić, że materiały kompozytowe cieszą się coraz większym zainteresowaniem. Ze względu na własności materiały kompozytowe stosowane są między innymi do wzmacniania i zbrojenia betonu. Innym dość zauważalnym i związanym z poprawą trwałości konstrukcji jest zastosowanie włókien przewodzących dla ochrony katodowej [13]. Kolejną charakterystyczną grupę wyrobów kompozytowych, stanowią materiały stosowane na rury wykorzystywane w transporcie rurociągowym. Obecnie do rur kompozytowych zalicza się między innymi rury stalowe z zewnętrzną powłoką wzmacnianą materiałami kompozytowymi [14, 15].

Wiele problemów inżynierskich i konstrukcyjnych udało się rozwiązać dzięki wprowadzeniu na rynek materiałowy - kompozytów metalicznych. Charakteryzują się one lepszymi wskaźnikami konstrukcyjnymi, wytrzymałościowymi i eksploatacyjnymi. Spowodowało to, że stały się one istotnym materiałem funkcjonalnym dla przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego. Stosowanie kompozytów o osnowie metalicznej daje korzyści wynikające z wysokich właściwości użytkowych. Cechą charakterystyczną ich zastosowań jest na przykład możliwość zmniejszenia masy elementu dla często zwiększonej jego żywotności. Kolejnymi cechami charakterystycznymi kompozytów warstwowych metalowych, które należy podkreślić to: wyższy stosunek wytrzymałości do masy, większa odporność na zmęczenie cykliczne, większa stabilność wymiarów, wyższa wytrzymałość na pełzanie w podwyższonych temperaturach, wysoka odporność na korozję w temperaturze podwyższonej i otoczenia [1]. Kompozyty warstwowe metalowe są również odporne na działanie cieczy organicznych np. paliw. Dlatego kompozyty metaliczne ze względu na swoje właściwości są atrakcyjną alternatywą dla materiałów jednorodnych stosowanych w dzisiejszej technice. Oprócz wspomnianych już wielu zastosowań, należy wspomnieć, że kompozyty metaliczne znalazły również swoje miejsce w przemyśle budowy maszyn czy też kosmicznym

Na podstawie prac [16, 17] przyjmuje się, że materiały kompozytowe powinny spełniać następujące warunki:

- powinny zostać wytworzone sztucznie,
- powinny składać się, z co najmniej dwóch różnych materiałów,
- komponenty wytworzonego kompozytu posiadają wyraźną granicę rozdziału, będącą obszarem połączenia,

- osnowa powinna zapewniać spajanie wzmocnienia oraz przekazywania zewnętrznych obciążeń na wzmocnienie,
- wzmocnienia odpowiadają za przenoszenie obciążeń zewnętrznych.

Właściwości kompozytu są ściśle uzależnione od właściwości ich osnowy. To osnowa decyduje między innymi [8]: o odporności cieplnej kompozytu, ciągliwości czy też ich właściwościach izolacyjnych. Na osnowy kompozytów metalowych najczęściej stosuje się [8]:

- stopy metali lekkich aluminium, magnez i tytan,
- stopy srebra i miedzi,
- stopy niklu,
- stopy ołowiu i cynku.

Wzmocnienia w przypadku kompozytów metalowych mają głównie postać włókien. Sposób ułożenia włókien może być różny np. [8]:

- ciągłe jednokierunkowe,
- różnego rodzaju siatki (np.: przestrzenne, płócienne),
- nieciągłe w ustalonym kierunku,
- nieciągłe, które rozmieszczono chaotycznie.

Jedną z przyczyn stosowania metalowych kompozytów warstwowych jest zwiększenie właściwości wytrzymałościowych na rozciąganie i ściskanie. Przy czym wytrzymałość na rozciąganie kompozytów warstwowych uzależniona jest od: grubości warstw, struktury oraz występowania pęknięć i mikropęknięć w obszarach połączeń różnych materiałów. Ze względu na tak dużą liczbę zmiennych nie można jednoznacznie określić liniową zależność występującą pomiędzy grubościami warstw a wytrzymałością na rozciąganie [18]. Dlatego w tym przypadku można zastosować regułę średnich ważonych, która pozwoli na określenie granicy plastyczności kompozytów według zależności [19, 20]:

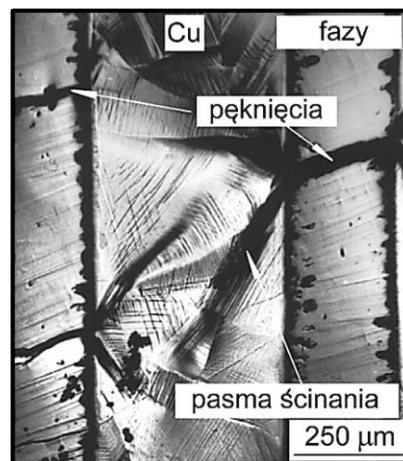
$$R_{ekomp} = R_{eA} g_A + R_{eB} g_B + \dots + R_{en} g_n \quad (1)$$

gdzie:

$R_{eA}, R_{eB} \dots R_{en}$ - granice plastyczności składników kompozytu A, B...n,
 $g_A, g_B \dots g_n$ - udziały objętościowe składników kompozytu A, B...n.

Na podstawie prac [19, 20] można zauważyć, że reguła ta dobrze sprawdza się w przypadku kompozytów metal-metal. Natomiast w przypadku kompozytów warstwowych tylko o osnowie metalowej nie można jej stosować, ponieważ mogą pojawiać się zarówno wartości znacznie większe jak i ekstremalnie małe w odniesieniu do materiałów wyjściowych [20]. Wynika to mianowicie z wielu czynników np.: skłonności do pęknięcia komponentu o mniejszej plastyczności, występowanie faz międzymetalicznych będących mało plastycznymi, czy też blokowania możliwości wystąpienia poślizgu w ziarnach. Dla przykładu na rysunek 5 [20] przedstawiono topografię kompozytu warstwowego złożonego z miedzi oraz faz międzymetalicznych, który poddano próbie rozciągania. Rysunek 5 uwidacznia [20]:

- wyraźne pęknięcia występujące w warstwach faz międzymetalicznych,
- pasma ścinania usytuowane w wąskich obszarach warstw miedzi.



Rys. 5. Widok kompozytu Cu-fazy międzymetaliczne po próbie rozciągania
Źródło [20]

Na podstawie przedstawionej w pracy [20] analizy wyników badań stwierdzono, że wydłużenie komponentów kompozytu rośnie wraz ze zwiększeniem udziału (grubości) plastycznych warstw miedzi. Występowanie pęknięć należy uważać za dyskwalifikujące materiał kompozytowy. Proces wytwarzania kompozytów jak widać jest skomplikowany tym bardziej, im większe występują rozbieżności w ich właściwościach, które często uniemożliwiają ich bezpośrednie połączenie. Dlatego niektórych materiałów nie można bezpośrednio ze sobą łączyć konkretną metodą. Bardzo często sama zmiana metody łączenia lub też technologii wytwarzania polegającej np. na zastosowaniu tzw. międzywarstwy, są wystarczające do wytworzenia kompozytu z interesujących nas komponentów. Natomiast wybór niewłaściwej technologii wytwarzania, nieprawidłowe ustalenie parametrów

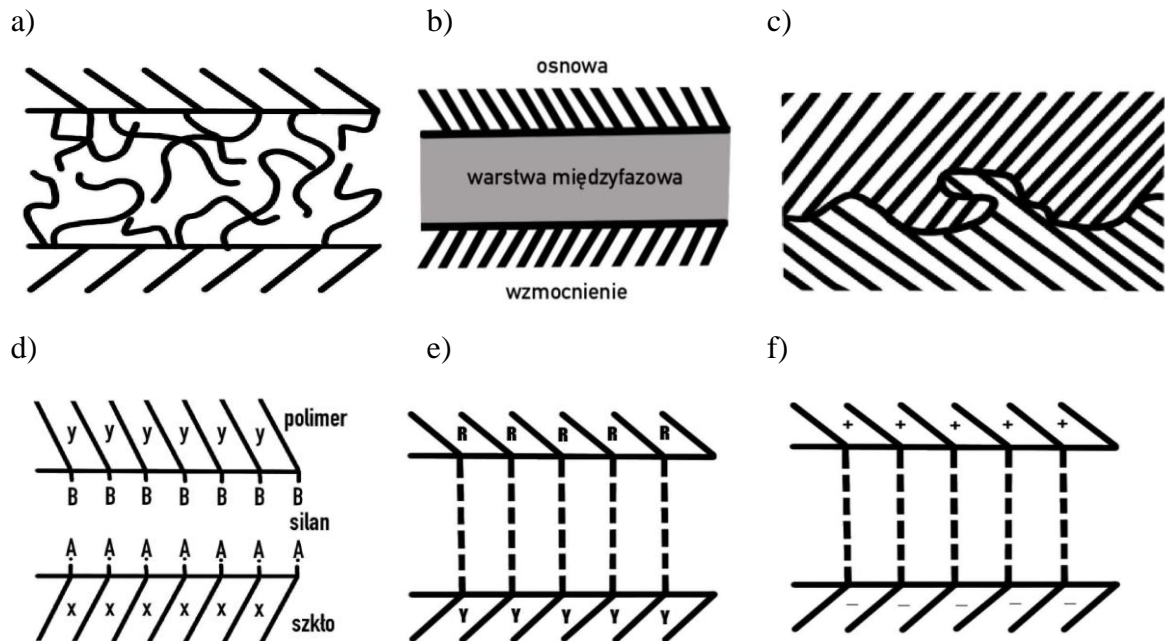
wytwarzania oraz nieprawidłowy sposób realizacji procesu wytwarzania wyrobów kompozytowych metalowych jest najczęstszym źródłem wielu niepowodzeń. W obszarze połączenia występują wówczas różnego rodzaju wady, które przyczyniają się do dyskwalifikacji gotowego wyrobu metalowego.

Na podstawie przedstawionego przeglądu literatury można stwierdzić, że pomimo licznych zastosowań do dziś nie został wykorzystany w pełni potencjał tych materiałów [15].

2.1.3. Rodzaje połączeń materiałów kompozytowych

Właściwości kompozytu zależą zarówno od zastosowanej osnowy jak i wzmocnienia [1]. Należy jednak zwrócić uwagę, że o pełnym sukcesie decyduje zastosowana metoda połączenia, która zagwarantuje trwałość użytkową kompozytowego wyrobu. W tym celu do prawidłowego funkcjonowania wyrobów kompozytowych niezbędna jest dobra przyczepność osnowy do powierzchni wzmocnienia. Zagadnienie jednak jest bardzo złożone i należy je traktować indywidualnie do danego rodzaju kompozytu. Na rysunku 6 przedstawiono schematycznie najczęściej opisywane w literaturze przedmiotu [1, 4, 5, 7, 15] rodzaje połączeń kompozytów.

Rysunki 6a i 6b przedstawiają połączenia reaktywne kompozytów nazywane również połączeniami dyfuzyjnymi. Oznacza to, że składniki kompozytu mają możliwość dyfundowania do granic faz. Zjawisko to jest powszechnie zauważalne w przypadku metali oraz ceramiki. W przypadku tych materiałów w efekcie wystąpienia dyfuzji w obszarze połączenia bardzo często dochodzi do tworzenia roztworów stałych czy faz międzymetalicznych [1].



Rys. 6. Rodzaje połączeń kompozytów a) i b) reaktywne, c) mechaniczne, d) i e) chemiczne, f) elektrostatyczne

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Kolejny rodzaj połączeń to połączenia mechaniczne przedstawione na rysunku 6c, które w przypadku łączenia wyrobów bimetalowych do niedawna uważane były za wysoce korzystne [21, 22]. Obecnie wiadomo, że w przypadku materiałów kompozytowych na jakość tych połączeń ma wpływ wiele innych czynników. Dlatego wytrzymałość takiego połączenia uzależniona jest między innymi od powierzchni składnika w stanie stałym oraz od lepkości ciekłej osnowy, od której oczekuje się wypełnienia jak największej ilości zagłębień [1].

Na rysunkach 6d i 6e przedstawiono połączenia chemiczne, które są efektem zachodzących w obszarze połączenia osnowy ze wzmocnieniem reakcji chemicznych [1]. Wytrzymałość uzyskanego połączenia uzależniona jest od rodzaju wiązań oraz odniesienia ilości wiązań chemicznych do jednostki łączącej powierzchni. Ten rodzaj połączeń jest charakterystyczny dla materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej.

Kolejnym rodzajem połączeń przedstawionym na rysunku 6f są połączenia elektrostatyczne, które powstają, gdy jeden ze składników posiada ładunek dodatni, natomiast drugi ładunek jest ujemny. W efekcie dochodzi do elektrostatycznego oddziaływania pomiędzy poszczególnymi komponentami kompozytu i w rezultacie uzyskuje się trwałe ich połączenie. W praktyce ten rodzaj połączeń występuje w wąskim zakresie i odnosi się do warstw o grubości atomowej poszczególnych kompozytowych komponentów [1].

2.2. Metody wytwarzania materiałów kompozytowych

Przemysłowe wytwarzanie oraz praktyczne stosowanie kompozytów metalicznych przez wiele lat było zdominowane przez państwa, które kiedyś należały do Związku Radzieckiego [4,21÷29]. Wytwarzane na wschodzie kompozyty metalowe stosowane były między innymi do wytwarzania konstrukcji narażonych na gwałtowne pękanie, takie jak [4, 9, 21÷29, 35, 37]:

- zbiorniki ciśnieniowe,
- rury o dużych przekrojach poprzecznych,
- lufy armatnie.

Proces wytwarzania rur oraz zbiorników narażonych na działanie wysokich i zmiennych ciśnień polegał na ciasnym zwijaniu stalowych taśm, które następnie zgrzewano. Metoda ta przez wiele lat była stosowana do formowania wielowarstwowych materiałów kompozytowych narażonych na pękanie. Proces wytwarzania luf armatnich polegał na umieszczeniu przylegających do siebie ściśle dopasowanych cylindrów. Wytworzone wyroby wielowarstwowe w wyniku powstałych wewnętrznych granic pomiędzy metalowymi warstwami uniemożliwiały ich pękanie podczas ich eksploatacji. Również w Rosji (w Moskiewskim Instytucie Wysokich Temperatur oraz w Instytucie Technologicznym w Nowosybirsku) opracowano technologię wytwarzania taśm wielowarstwowych złożonych z materiałów nieżelaznych. Zawierają one w sobie wiele różnych kombinacji metali oraz stopów. W głównej mierze były one zestawieniami aluminium-stal, miedź-stal czy też aluminium i miedzi [10]. Na podstawie pracy [11] zaobserwowano, że składały się czasami nawet z ok. 50 warstw. Natomiast na przełomie XX i XXI wieku, także w innych krajach prowadzone były badania nad warstwowymi kompozytami typu metal-metal. Między innymi materiały warstwowe składające się z naprzemiennie ułożonych warstw stali o różnych zawartościach węgla były od lat 80 ubiegłego wieku przedmiotem badań zespołu z Lawrence Livermore National Laboratory ze Stanów Zjednoczonych. W pracach brali udział Wadsworth, Lesuer oraz Sherby [4, 30, 39]. Również w Polsce przełom wieku XX i XXI to intensywny rozwój wytwarzania kompozytów metalicznych. Jedną z polskich firm, która z powodzeniem łączy metodą zgrzewania wybuchowego wielowarstwowe kompozyty metalowe, jest Explomet z Opola. Natomiast nad procesami plastycznego kształtowania kompozytów metalowych prowadzone są intensywne prace badawcze w ośrodkach badawczych między innymi: Politechniki Opolskiej [19÷23], Politechniki Częstochowskiej [3, 32, 33, 42÷54, 61, 64, 72]

oraz Politechniki Gdańskiej [55-57]. W szybkim tempie wzrosła ilość publikacji poświęconych materiałom warstwowym nanokompozytowym typu metal-metal [13].

Podziału metod wytwarzania kompozytów o osnowie metalowej można dokonać ze względu na różne czynniki decydujące o ich powstaniu. Materiały kompozytowe na osnowie metalowej mogą być wytwarzane metodami bezpośrednimi i pośrednimi [1]. Jako przykład metody bezpośredniej można przytoczyć metodę kierunkowej krystalizacji stopów eutektycznych. Włóknista struktura kompozytu powstaje w wyniku procesu krzepnięcia stopu z jednokierunkowym odprowadzeniem ciepła. W technologii tej wykorzystuje się fakt, że w procesie krzepnięcia stopu eutektycznego poszczególne fazy struktury kompozytowej powstają równocześnie ze stanu ciekłego.

W metodzie pośredniej cykl technologiczny wytwarzania kompozytów o osnowie metalowej stanowi przygotowanie zbrojenia, osnowy oraz ich połączenia z zastosowaniem m. in. technologii odlewniczych, czy też przeróbki plastycznej [1].

Kolejnym podziałem metod wytwarzania kompozytów o osnowie metalicznej może być to z jakiego stanu są one wytwarzane [1]:

a) metody wytwarzania kompozytów metalowych ze stanu stałego, do którego należą między innymi:

- metalurgia proszków,
- prasowanie i zgrzewanie,
- procesy przeróbki plastycznej, takie jak: walcowanie, ciągnięcie oraz wyciskanie;

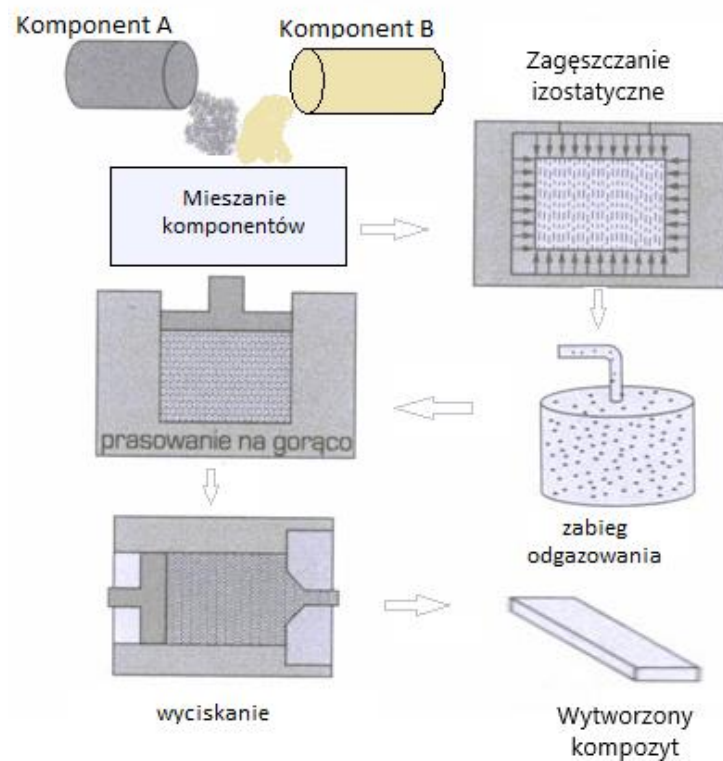
b) metody wytwarzania kompozytów ze stanu ciekłego najczęściej spotykane są:

- procesy odlewania,
- procesy nasycania swobodnego,
- zastosowanie ciśnienia do nasycania – infiltracja;

c) metody wytwarzania kompozytów ze stanu gazowego najczęściej spotykane są:

- proces napyłania plazmowego,
- implementacja jonów.

Metody metalurgii proszków - polegają na mieszaniu proszku osnowy ze zbrojeniem, prasowaniu na zimno, spiekaniu i doprasowaniu. Na rysunku 7 przedstawiono schemat wytwarzania kompozytu z mieszaniny dwóch komponentów proszkowych metalowych A i B. Technologia metalurgii proszków wytwarza się kompozyty umacniane dyspersyjnie oraz kompozyty zbrojone cząsteczkami [73].



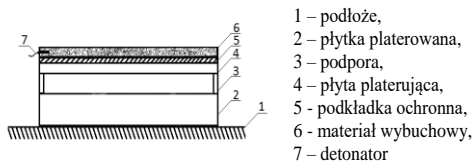
Rys. 7. Schemat wytwarzania kompozytów z proszków metali A i B
Źródło: opracowanie własne na podstawie [73]

2.2.1. Metody wytwarzania kompozytów warstwowych

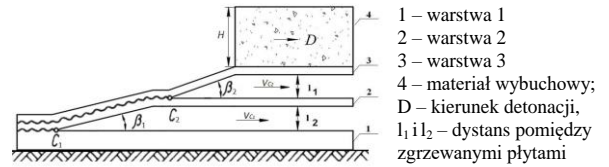
Dużą grupę materiałów stanowią kompozyty warstwowe, wykonane z warstw metali i ich stopów. Znanych i powszechnie stosowanych metod łączenia tych kompozytów do niedawna było stosunkowo niewiele między innymi: wspomniane już odlewanie, napawanie, walcowanie w pakietach czy też platerowanie metodą zgrzewania wybuchowego [3, 32]. Obecnie obserwuje się intensywny rozwój metod łączenia materiałów kompozytowych warstwowych [3, 32]. Opracowano między innymi powszechnie stosowaną metodę łączenia tarcowego komponentów materiałów metalowych kompozytowych [62].

Schematy istotnych dla stanu zagadnienia metod łączenia kompozytów warstwowych metalowych przedstawiono na rysunku 8.

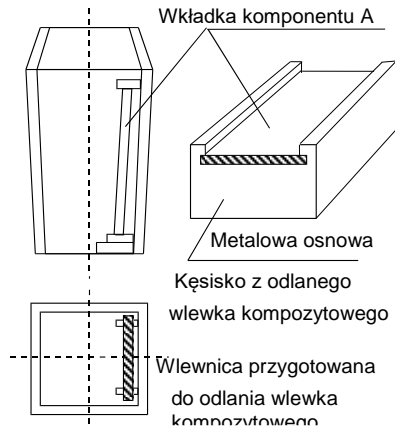
a) dwuwarstwowy



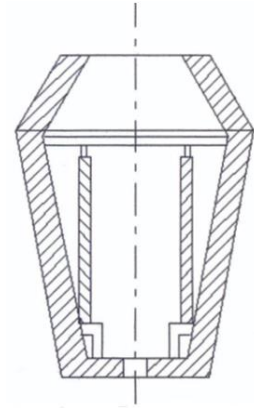
trójwarstwowy



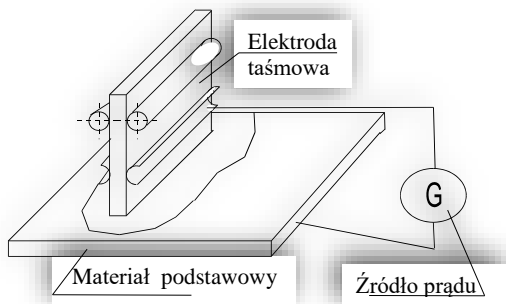
b) dwuwarstwowy



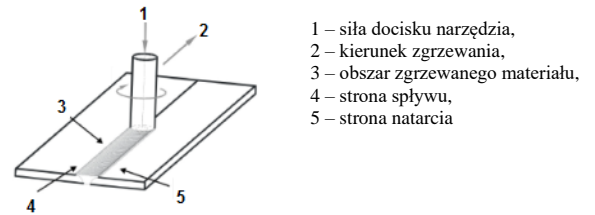
trójwarstwowy



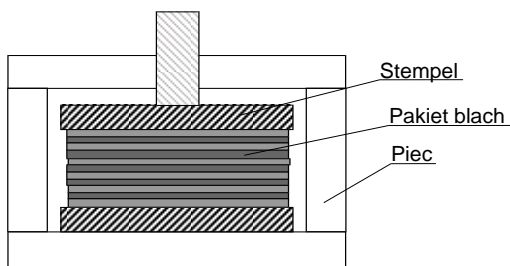
c)



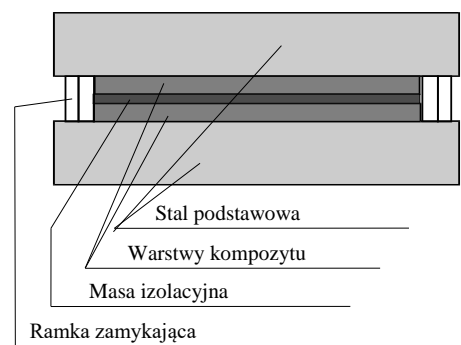
d)



e)



f)



Rys. 8. Wybrane metody łączenia wielowarstwowych kompozytów metalowych:
a) zgrzewanie wybuchowe, b) odlewanie, c) napawanie, d) zgrzewanie tarciove,
e) dyfuzyjne (laminat), f) pakietowe (laminat) [3, 32, 62]

Pierwszym etapem produkcji płaskich wyrobów kompozytowych jest przygotowanie materiałów przeznaczonych na warstwy pasma, a następnie dobór metody ich łączenia.

W pracach [1, 15, 30, 31, 39] omówiono najważniejsze kierunki rozwoju stosowanych metod łączenia wyrobów z materiałów kompozytowych warstwowych - metalowych. Połączenie kilku metali w jeden wyrób kompozytowy warstwowy ma na celu wykorzystanie zróżnicowanych właściwości łączonych materiałów oraz obniżenie kosztów stosowania materiałów jednolitych. Ponieważ stosowanych metod łączenia materiałów kompozytowych warstwowych jest stosunkowo dużo, w niniejszej pracy zamieszczono opis powszechnie stosowanych i znaczących dla ich powstania, które przedstawiono na rysunku 8.

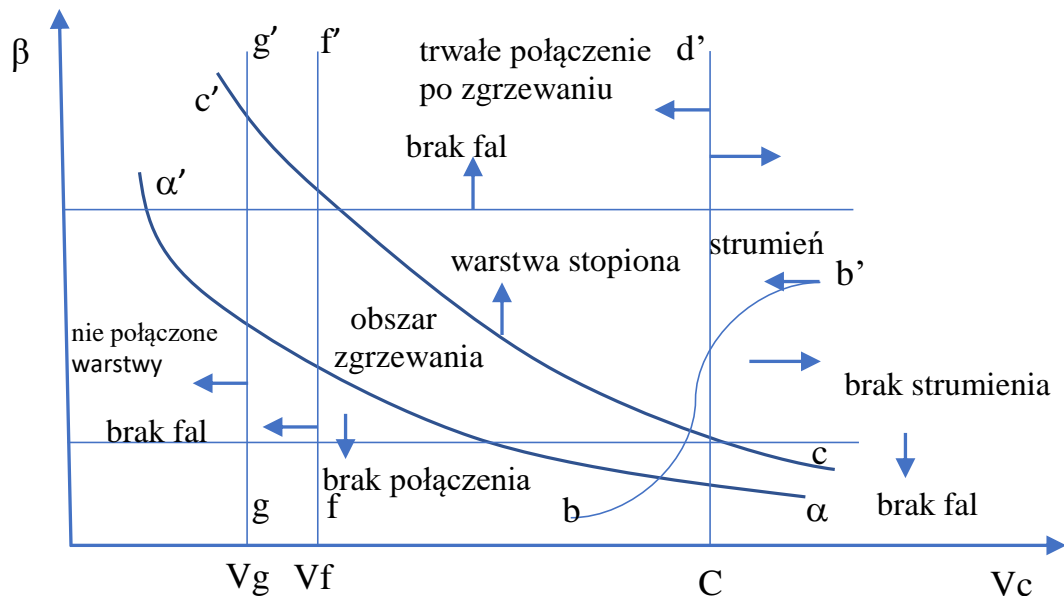
2.2.2. Charakterystyka metod wytwarzania kompozytów warstwowych

W tym podrozdziale zostanie przedstawiona charakterystyka stosowanych metod łączenia materiałów kompozytowych warstwowych [3, 32, 62].

Pomimo opracowania nowych metod łączenia wyrobów metalowych na wyróżnienie zasługuje **metoda zgrzewania wybuchowego** rysunek 8a. Główną zaletą metody zgrzewania wybuchowego jest uzyskiwanie wysokiej jakości obszarów połączeń warstw metalowych. Metoda ta od wielu lat jest powszechnie stosowana do łączenia kompozytowych wyrobów warstwowych - metalowych. Metoda zgrzewania wybuchowego, określana jest jako proces otrzymywania trwałych i wytrzymałych połączeń kompozytu warstwowego złożonego z dwóch lub więcej warstw metalowych. Obszary połączeń uzyskuje się w wyniku zderzenia się warstw z dużymi prędkościami (300-1500 m/s). Do wspomnianego zderzenia warstw dochodzi w wyniku detonacji materiału wybuchowego. Źródłem energii przy zgrzewaniu wybuchowym jest paliwo chemiczne w stanie stałym. Powstałe zjawisko fizyczne można opisać jako szybkie intensywne oswobodzenie energii, a sam proces nazywany jest wysokoenergetycznym. W wyniku zetknięcia łączonych elementów i ich wzajemnego przesunięcia powstaje połączenie z charakterystyczną falistą linią zgrzeiny. Geometryczna i strukturalna budowa połączeń zgrzanych wybuchowo zależy, przede wszystkim od rodzaju zgrzewanych metali, parametrów zgrzewania, grubości zgrzewanych elementów, geometrii zderzenia, rodzaju podłoża oraz stanu przygotowania powierzchni [39, 103]. W procesie wybuchowego zgrzewania, kontrolowana energia materiałów wybuchowych jest

wykorzystywana do tworzenia wiązania metalicznego pomiędzy różniącymi się dwoma lub większą ilością materiałów wchodzących w skład kompozytu.

Mechanizm zgrzewania wybuchowego został obszernie opisany w literaturze [28, 57, 72]. Trwałość połączenia jest zależna od parametrów procesu zgrzewania wybuchowego, co przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Parametry procesu zgrzewania wybuchowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie pracy [57]

Zgrzewanie wybuchowe materiałów kompozytowych jest następstwem współdziałania ze sobą wielu procesów w obszarze zderzenia, są nimi między innymi: samooczyszczanie powierzchni, formowanie się fal międzypowierzchniowych, procesy cieplne, odkształcenie plastyczne, działanie naprężeń rozciągających. Procesowi zgrzewania towarzyszą zjawiska rekrytalizacji i dyfuzji, zachodzące głównie bezpośrednio po uformowaniu obszarów połączeń, które mają istotny wpływ na ich własności. W procesie zgrzewania wybuchowego zastosowanie odpowiednich parametrów procesu przyczynia się do powstawania cyklicznych odkształceń zgrzewanych powierzchni. Odkształcenia te ze względu na ich kształt i charakter - nazywa się falami międzypowierzchniowymi. Długość i amplituda fal międzypowierzchniowych jest zależna od wielu parametrów procesu zgrzewania przedstawionych na rysunku 9. Natomiast odkształcenie plastyczne zderzających się powierzchni warstw jest jednym z podstawowych warunków uzyskania połączenia dla

zgrzewania wybuchowego. W obszarach złączy łączonych warstw można zaobserwować występowanie tzw. faz międzymetalicznych będących w większości mieszaniną łączonych materiałów [3, 103]. Podsumowując podczas łączenia dwóch warstw metalowych efektem finalnym są kompozyty złożone z łączonych komponentów kompozytu oraz występujących w obszarze złącza faz międzymetalicznych powstałych na skutek wysokoenergetycznego procesu zgrzewania wybuchowego.

Kolejną metodą łączenia materiałów metalicznych jest stosunkowo niedawno opracowana **metoda zgrzewania tarcowego**, która polega na nagrzewaniu łączonych elementów ciepłem tarcia [104]. Schemat tej metody przedstawiono na rysunku 8d. W metodzie zgrzewania tarcowego materiałów wykorzystywana jest energia wytwarzana w wyniku tarcia w obszarze styku łączonych materiałów. W wyniku nagrzania i odkształcenia łączonych materiałów następuje odsłonięcie czystych powierzchni metalicznych łączonych elementów i zbliżenie ich na odległość parametru sieci.

Metoda zgrzewania tarcowego składa się z kilku etapów [104]:

- **I etap** – pomiędzy powierzchniami stykowymi materiałów zachodzi tarcie suche lub graniczne, a w efekcie wydzielą się nieznaczna ilość ciepła. Obserwuje się utworzenie tzw. mostków szepnych, następuje wyrywanie cząstek materiału, ich odkształcanie plastyczne i zanik powstałych nierówności.
- **II etap** – powstają i ulegają niszczeniu coraz to nowsze szepienia materiałów metalicznych. W obszarze tarcia następuje nagrzanie się cienkich warstw materiałów zgrzewanych.
- **III etap** – następuje rozwój szepień materiałów metalicznych obejmujących całą powierzchnię tarcia oraz intensywne wydzielanie się ciepła. W rezultacie pojawia się silne uplastycznienie materiału w strefie bliskiej płaszczyźnie tarcia. Temperatura zgrzewanych elementów osiąga wartość maksymalną.
- **IV etap** – uzyskanie wytrzymałego połączenia.

Metoda zgrzewania tarcowego jest obecnie stosowaną metodą do łączenia dwóch różnych metali o stosunkowo niedużych powierzchniach łączenia. Ponadto czas łączenia jest znacznie dłuższy niż przy metodzie zgrzewania wybuchowego.

Następnym sposobem łączenia elementów metalowych jest **metodą napawania**, przedstawiona na rysunku 8c [36]. Polega ona na dokładnym stopieniu materiału dodatkowego (spoiwa) z nadtopieniem materiału podłoża. Źródłem ciepła stapiającego materiał dodatkowy w postaci drutu, pręta, taśmy lub proszku może być płomień gazowy, łuk elektryczny lub wiązka lasera.

Metody napawania można podzielić ze względu na pochodzenie źródła ciepła:

- gazowe,
- elektryczne.

Podstawowym celem metody napawania jest wytwarzanie elementów z uszlachetnioną warstwą wierzchnią zwiększającą odporność na: korozję, zużycie ściernie, erozję, kawitację albo zwiększające żaroodporność i żarowytrzymałość materiału (napawanie produkcyjne). Nakładane materiały posiadające wymagane wysokie właściwości pochodzą z grup: metali i ich stopów, cermetali, ceramiki oraz tworzyw sztucznych. W technice napawania podstawowe znaczenie mają stale niskostopowe, stale wysokostopowe odporne na korozję, wysokowęglowe stopy żelaza, stopy na bazie niklu, kobaltu, stopy miedzi i aluminium, czyste metale – cynk, aluminium, tytan, nikiel cyrkon.

Kolejną charakterystyczną metodą łączenia metali jest **metoda odlewania** przedstawiona na rysunku 8b. Niestety indywidualne zastosowanie metody jest bardzo nieliczne w warunkach przemysłowych. Zamieszczono ją w pracy, ponieważ obecnie często metodę odlewania stosuje się w bezpośrednim połączeniu z procesem walcowania (tzw. metoda TRC). Praktyczne zastosowanie połączenia tych dwóch metod obserwuje się podczas walcowania płaskich i wąskich wyrobów takich jak taśmy bimetalowe [116].

Następną metodą, o której należy wspomnieć jest **metoda łączenia dyfuzyjnego** [36], którą przedstawiono na rysunku 8e. Metoda ta polega na łączeniu blach wielowarstwowych o ograniczonych wymiarach geometrycznych. Warstwy dyfuzyjne w kompozytowych warstwach metalowych i ich stopach powstają w procesach obróbki cieplno-chemicznej. Procesy obróbki cieplnej zachodzących z jednoczesnym oddziaływaniem środowiska na zmiany składu chemicznego wytworzonej pomiędzy łączonymi metalami warstwy pośredniej. Poszczególne warstwy kompozytu są do siebie dociskane w podwyższonej temperaturze. Temperatura podczas takiego procesu wynosi około 50-70% temperatury topnienia warstwy o najniższej granicy topnienia. Zmiana składu chemicznego powoduje zmianę struktury i własności użytkowych warstwy pośredniej jak: utwardzenie powierzchni, podwyższenie odporności na ścieranie i zużycie tribologiczne, podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej, odporności korozyjnej i erozyjnej [31, 36].

Półwyrob w postaci połączonego kompozytowego wsadu wielowarstwowego poddawany jest drugiemu etapowi jakim w przypadku wyrobów płaskich jest proces walcowania.

W dalszej części pracy omówiony zostanie kolejny etap wytwarzania kompozytowych wyrobów warstwowych płaskich.

2.3. Analiza teoretyczna asymetrycznego procesu walcowania kompozytów warstwowych

Drugim etapem wytwarzania płaskich kompozytów warstwowych jest plastyczne kształtowanie połączonego wsadu. Bardzo istotnym zagadnieniem kształtowania plastycznego jest dobór właściwej metody. W przypadku kompozytowych warstwowych wyrobów płaskich bardzo często jest to proces walcowania realizowany na gładkiej beczce. Następnym istotnym zagadnieniem dla przeprowadzenia plastycznego kształtowania jest właściwy dobór parametrów procesu, mający na uwadze osiągnięcie założonego celu jakim jest odpowiedni kształt, wymiary a przede wszystkim zapewnienie trwałości połączeń komponentów kompozytowych. Wymienione czynniki decydują o właściwościach funkcjonalnych wyrobów z materiałów kompozytowych.

Podczas walcowania płaskich wyrobów kompozytowych metalowych ze względu na jego przebieg występuje praktycznie dla wszystkich warunków jego realizacji asymetryczny proces walcowania.

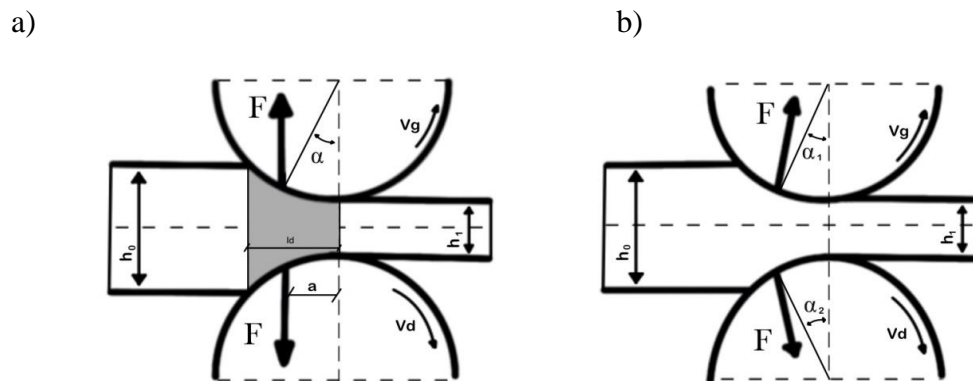
2.3.1. Asymetryczny proces walcowania

Ciągły wzrost wymagań dotyczących wymiarów geometrycznych wyrobów gotowych jest siłą napędową do modernizacji walcowni zarówno blach, taśm z materiałów jednolitych jak i z materiałów kompozytowych warstwowych. W przypadku wytwarzania płaskich wyrobów warstwowych najczęściej stosuje się proces walcowania, który ze względu na zróżnicowane właściwości połączonych warstw metali jest procesem trudnym i złożonym do rozwiązania na drodze teoretycznej. Różnice w własnościach warstw stanowiących kompozyt warstwowy przyczyniają się podczas ich plastycznego kształtowania do [36]: nierównomiernego płynięcia kompozytowych warstw w płaszczyźnie wyjścia z kotliny walcowniczej wynikające z nierównomiernego rozkładu całkowitego gniotu względnego na poszczególne warstwy, niejednorodności stanu naprężeń oraz wyginania się kompozytów warstwowych po wyjściu z kotliny walcowniczej. Niejednorodność prędkości płynięcia warstw kompozytu w płaszczyźnie wyjścia z kotliny walcowniczej dodatkowo jest wzmacniana przez występujące fazy międzymetaliczne w obszarze złączy kompozytu warstwowego. Wady te można częściowo lub całkowicie wyeliminować poprzez zastosowanie w procesie walcowania asymetrii prędkości obwodowych walców roboczych lub ich średnic.

Jednym z pierwszych opisów procesu walcowania była teoria opisująca model prostego walcowania, który przedstawiono na rysunku 10a [31]. Należy zaznaczyć, że do zaistnienia prostego procesu walcowania konieczne jest spełnienie następujących warunków [31]:

- walce robocze muszą mieć jednakowe prędkości obwodowe oraz średnice,
- poddany procesowi walcowania materiał wsadowy musi być jednorodny pod względem własności mechanicznych,
- pasmo przemieszcza się w kotlinie walcowniczej równomiernie i występują jedynie siły nacisku walców.

W praktyce kierunek działających sił F nie jest równoległy do płaszczyzny wyjścia z kotliny walcowniczej jak to przedstawiono na rysunku 10a, tylko nachylone pod kątem α jak to przedstawiono na rysunku 10b. Przedstawiony na rysunku 10b proces walcowania nazwano symetrycznym [31]. Do istnienia symetrycznego procesu walcowania określono też szereg warunków koniecznych do spełnienia. Dotrzymanie wszystkich warunków istnienia symetrycznego procesu walcowania jest bardzo trudne. Dlatego w praktyce przemysłowej proces symetrycznego walcowania występuje stosunkowo rzadko [36].

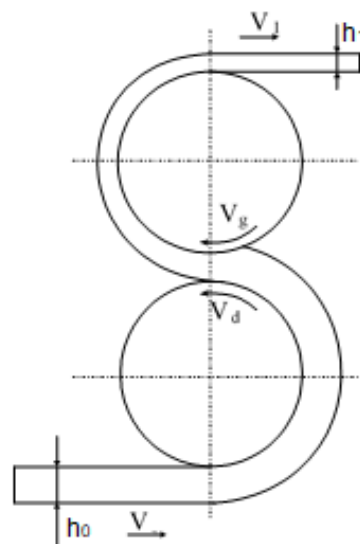


Rys. 10. Schemat rozkładu sił a) dla walcowania prostego, b) dla walcowania symetrycznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [31, 36]

Problemy wynikające z dotrzymania warunków zapewniających symetryczność procesowi walcowania przyczyniły się do powstania teorii asymetrycznego walcowania blach (ASR). Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury, pierwszą pracą opisującą proces asymetrycznego walcowania była praca Sibla [16], która powstała w 1942r. Na podstawie przeprowadzonych w pracy rozważań określono wpływ asymetrii na parametry

technologiczno-ekonomiczne. Pojawiające się w pracy przesłanki o korzystnym wpływie zastosowania asymetrycznego procesu walcowania na obniżenie wartości parametrów siłowo-energetycznych zapoczątkowały nowy kierunek badań [17, 18, 19]. Początkowo prac związanych z asymetrycznym walcowaniem było stosunkowo mało. Jedną z pierwszych prac dotyczących praktycznego zastosowania asymetrii była [68, 69], przedstawiająca praktyczne zastosowanie asymetrycznego procesu walcowania. Opisany w niej proces nazwano PV (od skrótu nazwy rosyjskiej "prokatka - volochenie"). Proces ten polega na jednoczesnym odkształceniu pasma pomiędzy walcami oraz jego rozciąganiu zgodnie z przedstawionym na rysunku 11 schematem. Proces walcowania PV nie znalazły szerszego zastosowania w praktyce przemysłowej ze względu na trudności związane z wprowadzeniem pasma do walców oraz skomplikowany układ napędowy walcarki.



Rys. 11. Schemat asymetrycznego walcowania systemem PV

Źródło: opracowanie własne na podstawie [68]

Efekt jednoczesnego odkształcenia i rozciągania materiału w metodzie PV uzyskano poprzez nadanie walcom roboczym walcarki różnych prędkości obwodowych oraz opasaniu walców walcowanym pasmem. Prawidłowe prowadzenie procesu jest możliwe tylko w przypadku, gdy $V_g > V_d$. Na walcu górnym występuje wówczas tylko strefa opóźnienia, natomiast na walcu dolnym strefa wyprzedzenia. Stosowanie walcarek typu PV daje maksymalny spadek sił nacisku w kotlinie walcowniczej. Jednak ze względu na kłopotliwe wprowadzanie wsadu w szczelinę między walcami, skomplikowany układ napędowy oraz

konieczność stosowania wyrobów długich, jak np. taśmy, rozwiązanie to nie znalazło zastosowania przemysłowego [68, 69].

W latach 90 XX wieku zaobserwowano wzrost zainteresowania asymetrycznym procesem walcowania. Wynikało to z ciągle rosnącej konkurencji na rynku, który oczekiwał bardziej ekonomicznych rozwiązań technologicznych. W efekcie powstało wiele prac [19÷57], których głównym zamierzonym celem było obniżenie kosztów produkcji płaskich wyrobów metalowych w tym kompozytowych. Powstało wiele prac dotyczących asymetrycznego walcowania wyrobów jednorodnych jak i kompozytów warstwowych [18÷42, 51÷57, 63, 70÷81, 84÷88]. W pracach tych wykazano korzystny wpływ asymetrycznego walcowania zarówno na parametry siłowo-energetyczne [28], jak również na krzywiznę walcowanych kompozytów warstwowych opuszczających strefę odkształcenia [23,24,27,31,36]. Wprowadzenie asymetrii prędkości walców roboczych umożliwiło wieloprzepustowe kształtowanie plastyczne płaskich wyrobów z materiałów kompozytowych warstwowych. Problem stanowi w dalszym ciągu dokładne określenie optymalnych warunków prowadzenia asymetrycznego procesu walcowania. Dopiero opracowanie programów komputerowych takich jak [24,27,31]: ELroll, Forge, Ansys, pozwoliło na modelowanie procesów kształtowania plastycznego płaskich wyrobów warstwowych. Na podstawie wyników modelowania numerycznego asymetrycznego procesu walcowania możliwe było przeprowadzenie kompleksowej analizy wpływu asymetrycznego procesu walcowania między innymi na parametry siłowo-energetyczne, krzywiznę walcowanych kompozytów warstwowych oraz zachodzące zmiany strukturalne [33,46,56]. Niestety w przypadku występowania w obszarach połączeń komponentów kompozytu warstwowego faz międzymetalicznych, numeryczne modelowanie procesu walcowania wymagałoby określenia zarówno geometrii tych mieszanin jak i określenia ich właściwości. Dlatego większość zamodelowanych procesów plastycznego kształtowania nie uwzględnia występowania faz międzymetalicznych. Wyniki modelowania numerycznego procesu walcowania z całą pewnością mogą być pomocne przy określeniu parametrów geometrycznych jak i wartości naprężeń, odkształceń itp. Natomiast dokonanie oceny wpływu asymetrycznego procesu walcowania na obszary połączeń komponentów kompozytu staje się dosyć dyskusyjnym zagadnieniem.

W praktyce przemysłowej można napotkać przypadki stosowania walców o różnych średnicach, dla jednakowych wartości prędkości obrotowych oraz walców o tych samych średnicach, lecz zróżnicowanych prędkościach obwodowych [36]. Ze względu na możliwości sterowania procesem o wiele korzystniejszym i bardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest

wprowadzenie asymetrii prędkości walców. Zmiana wartości współczynnika asymetrii uzyskiwana jest poprzez odpowiednie sterowanie prędkościami obrotowymi walców roboczych. Natomiast w przypadku zastosowania rozwiązania różnych średnic walców, każdorazowa zmiana wartości współczynnika asymetrii wymaga wymiany przynajmniej jednego z walców. Ciągła wymiana walców wymusza na technologach zapewnienie szerokiego zaplecza wielu par walców roboczych odpowiadających różnym wartościom współczynnika asymetrii. Liczne wymiany walców sprawiają, że wydajność pracy walcowni jest bardzo niska i z ekonomicznego punktu widzenia rozwiązanie to nie jest korzystne. O wiele korzystniejszym rozwiązaniem jest sterowanie prędkościami obwodowymi walców roboczych. Zmiana wartości współczynnika asymetrii następuje przez wspomnianą już zmianę prędkości obwodowych walców, która w dobie automatyzacji procesów technologicznych praktycznie może zostać uwzględniona w czasie przerwy pomiędzy kolejnymi przepustami. Wówczas operacja zmiany prędkości obwodowych walców nie wpływa na wydajność pracy Walcowni.

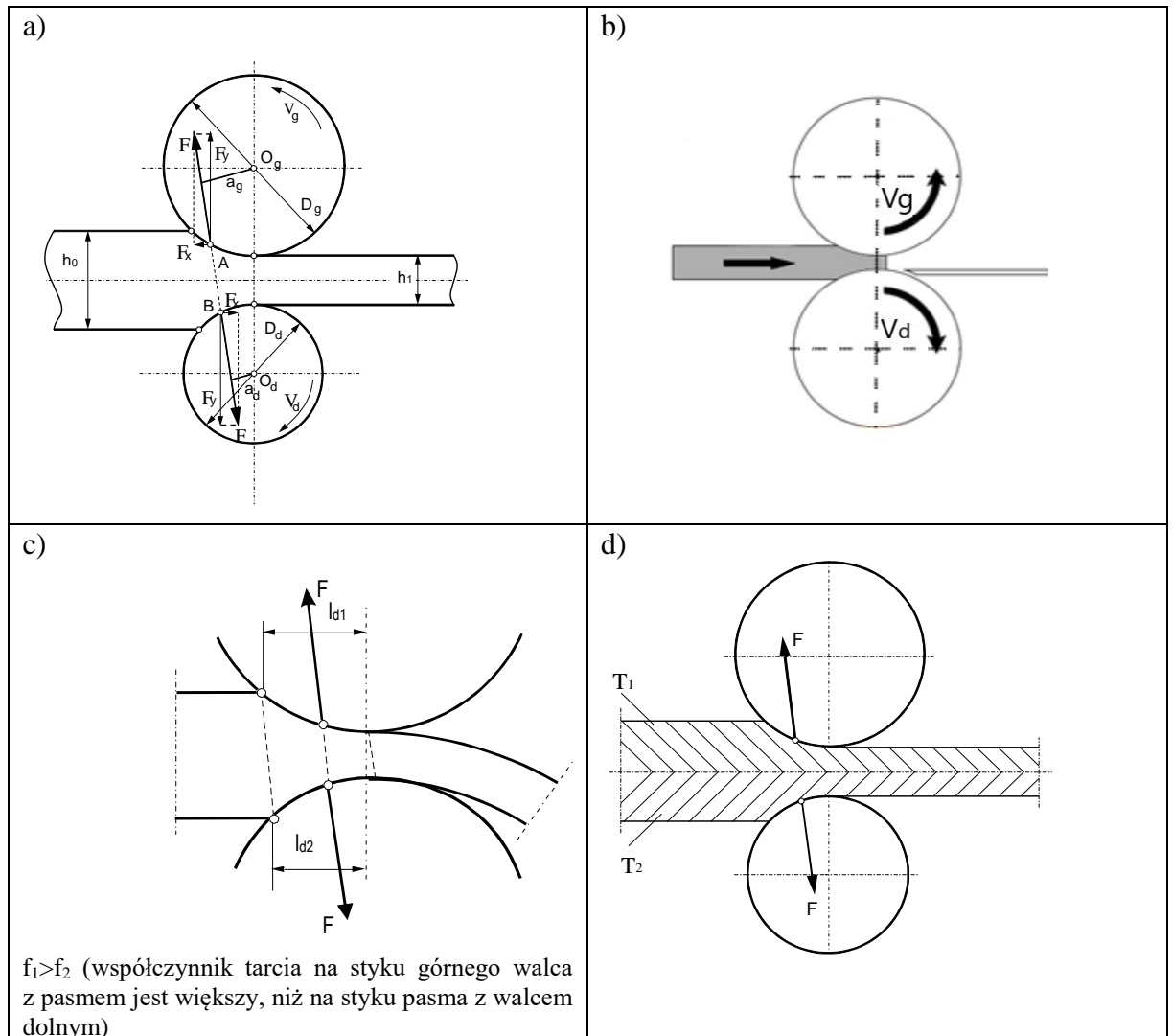
Celowe wprowadzenie asymetrii do procesu walcowania pozwala bezpośrednio oddziaływać na wyroby walcowane znajdujące się w kotlinie walcowniczej. Zarówno w walcowanych materiałach jednorodnych jak i kompozytach warstwowych w wyniku wprowadzenia asymetrii kinetycznej walców roboczych (ASK) pojawiają się wzdłużne naprężenia rozciągające. Ich działanie można przyrównać do występującego naciągu i przeciwnaciągu w procesie walcowania. Występowanie naciągu i przeciwnaciągu w procesie walcowania wpływa na zmniejszenie wartości nacisku jednostkowego w kotlinie odkształcenia [36]. W pracy [36] wykazano również, że zjawisko to korzystnie wpływa na dokładność wymiarową produktu finalnego jakim są blachy i taśmy. Zmniejszenie wartości sił nacisku metalu na walce przyczynia się bowiem do zmniejszenia sprężystego ugięcia stojaków i walców roboczych [61, 73].

W praktyce przemysłowej dotrzymanie warunków symetrycznego procesu walcowania (rysunek 12) jest dosyć trudne, a często wręcz niemożliwe. W efekcie występuje naruszenie symetrii względem osi obojętnej walcowania od strony każdego z walców, a w szczególności, gdy walcowana jest blacha bimetalowa lub wielowarstwowa. Dlatego można stwierdzić, że proces walcowania wyrobów płaskich dwu- i wielowarstwowych jest procesem asymetrycznym.

Ze względu na przyczyny zaburzające proces symetrycznego walcowania blach, rozróżnia się kilka podstawowych typów asymetrii [5, 31, 45, 57, 61, 62]:

- geometryczną, wynikającą z zastosowania walców o różnych średnicach i kątach chwytu (rysunek 12a),

- kinetyczną ASK, wynikająca ze zróżnicowania prędkości kątowych walców (rysunek 12b),
- kontaktową, wynikającą z różnych warunków tarcia na powierzchniach styku pasma z poszczególnymi walcami (rysunek 12c),
- temperaturową, wynikającą z nierównomiernie nagrzanego wsadu przed walcowaniem oraz różnymi warunkami chłodzenia górnej i dolnej powierzchni pasma (rysunek 12d).



Rys. 12. Schematy asymetrycznego walcowania wyrobów płaskich dla: a) średnic walców roboczych, b) kinetyczna ASK wynikająca ze zróżnicowania prędkości obwodowych walców roboczych, c) kontaktowa będąca efektem występowania różnych sił tarcia na styku pasma z walcami, d) temperaturowa będąca efektem nierównomiernego nagrzania materiału do walcowania [5, 31, 57]

2.3.2. *Wpływ asymetrycznego procesu walcowania na nierównomierność odkształcenia komponentów kompozytu warstwowego*

Nierównomierność odkształcenia komponentów kompozytów warstwowych metalowych jest ważnym zagadnieniem technologicznym. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury początek analizowania tego zagadnienia można przypisać na lata 50 ubiegłego wieku. Pierwszymi pracami opisującymi nierównomierne odkształcenie kompozytowych warstw były [20, 107], w których stwierdzono, że odkształcenie warstw uzależnione jest od właściwości materiałów, z których zostały one wykonane. Zagadnienie nierównomierności odkształcenia warstw był i nadal jest tematem wielu prac badawczych [21÷24,26,27,92]. Pierwsze prace głównie ukierunkowane były na wyroby dwuwarstwowe. Na podstawie przytoczonych prac można stwierdzić, że warstwa o większym oporze odkształcenia (nazywana twardą) ulega mniejszym wartości odkształcenia w procesie walcowania. Natomiast zdecydowanie bardziej podatną na plastyczne kształtowanie jest warstwa o mniejszym oporze odkształcenia (nazywana miękką). W przypadku kompozytów o większej liczbie warstw jest podobnie i w głównej mierze na nierównomierność odkształcenia mają wpływ właściwości materiałów stanowiących kompozyt oraz parametry procesu wytwórczego.

Prekursorem, który podjął się rozwiązania problemu nierównomierności odkształcenia warstw blach bimetalowych w procesie walcowania był Pawłow [31, 107]. Należy zaznaczyć, że pierwsze prowadzone prace odnosiły się do dwuwarstwowych wyrobów kompozytowych. Przedstawione rozwiązanie Pawłowa uzależnia wartość odkształcenia poszczególnych warstw od wartości sił nacisku materiału warstwowego na walce robocze. Zaproponowane rozwiązanie można zapisać za pomocą zależności [31, 107]:

$$\Delta h_T = \frac{p_{sM}^2}{p_{sM}^2 + p_{sT}^2} \Delta h \quad (2)$$

$$\Delta h_M = \frac{p_{sT}^2}{p_{sM}^2 + p_{sT}^2} \Delta h \quad (3)$$

gdzie:

Δh_T , Δh_M – gniot bezwzględny warstw: twardej i miękkiej,

Δh – gniot bezwzględny blachy dwuwarstwowej,

p_{sT} , p_{sM} – średni nacisk jednostkowy warstw: twardej i miękkiej.

Przedstawione rozwiązanie do opisu nierównomierności odkształcenia walcowanych materiałów kompozytowych warstwowych wymagałoby określenia średnich sił nacisku pochodzących od walców i przenoszonych przez poszczególne warstwy.

Prace nad określeniem odkształcenia warstw dla płaskich wyrobów dwuwarstwowych były kontynuowane przez Garbuzę, co zostało opisane w pracach [31, 108]. Garbuz zaproponował uwzględnić w zależnościach (2) i (3) szerokość poszczególnych warstw po walcowaniu:

$$\Delta h_T = \frac{p_{sM}^2}{p_{sT}^2 + p_{sM}^2 \frac{b_M}{b_T}} \Delta h, \quad (4)$$

gdzie:

b_T, b_M – szerokość warstwy: twardej i miękkiej.

Okazało się, że zaproponowana przez Garbuzę zależność jest poprawna tylko w przypadku, gdy linia obojętna walcowania pokrywa się z linią wyznaczającą obszar połączenia warstw blach dwuwarstwowych. Stwierdzenie to zostało udowodnione przez Sinicyńa w pracach [31, 106]. Natomiast Sinicyń na podstawie przeprowadzonych rozważań zaproponował wprowadzić do rozwiązania warunek równowagi sił w kotlinie walcowniczej oraz zróżnicowanie grubości warstw tworzących blachy dwuwarstwowe. Zaproponowane rozwiązanie przedstawił w postaci zależności [31, 106]:

$$\frac{\Delta h_M}{\Delta h_T} = \frac{h_{M0}}{h_{T0}} \left[\frac{h}{2h_{M0}} \left(\frac{p_{sT}^2 - p_{sM}^2}{p_{sM}^2} \right) + 1 \right] \quad (5)$$

gdzie:

h – grubość blachy dwuwarstwowej po walcowaniu.

Kolejną pracą, w której pojawia się zagadnienie związane z określeniem odkształceń warstw również dla bimetalowego pasma jest praca Tarnowskiego [109]. Tarnowski zastosował w swoim rozwiązaniu metodę wariacyjną, co pozwoliło mu na opracowanie zależności opisujących odkształcenia względne warstwy twardej od całkowitego odkształcenia względnego blachy bimetalowej:

- dla przypadku połączonych ze sobą warstw stosuje się zależność:

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon} = \frac{1}{A \cdot (1 - B_1) + B_1} \quad (6)$$

- natomiast dla przypadku nie połączonych ze sobą warstw stosuje się zależność:

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon} = \frac{1 + C^2 + (B_1^3 + C^2 B_1) \cdot (A - 1) - 0,65 f' C (A - 1) \cdot (1 - B_1)}{1 + C^2 + (4B_1^3 - 6B_1^2 + C^2 B_1 + 3B_1) \cdot (A - 1)} \quad (7)$$

gdzie:

ε – całkowity gniot względny blachy bimetalowej,

ε_T – gniot względny warstwy twardej (o większym oporze odkształcenia).

A – stała określająca rodzaj łączonych metali σ_{pT}/σ_{pM} ,

B_1 – względna grubość warstwy twardej h_T/h_0 ,

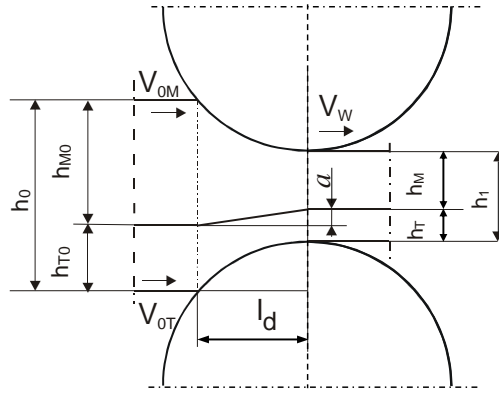
C – współczynnik uwzględniający kształt kotliny l_d/h_0 .

Prace badawcze nad określeniem odkształceń warstw w procesie walcowania blach dwuwarstwowych prowadzili również Buchwałow [110] oraz Korszczikow [112, 117]. W prowadzonych rozważaniach badawczych zastosowali metodę wariacyjną. Na podstawie ich badań nierównomierność odkształcenia, uzależniona jest między innymi: od stosunku grubości warstw, ich właściwości mechanicznych oraz warunków tarcia na styku kompozytu warstwowego z walcami, a także w obszarze styku pomiędzy sąsiednimi warstwami. Do określenia wartości odkształceń zastosowali parametr wariacyjny „ a ”, który wyznacza położenie granicy rozdziału warstw kompozytu w płaszczyźnie wyjścia z kotliny walcowniczej, co przedstawiono na rysunku 13 [31].

$$\varepsilon_M = \frac{\frac{\Delta h}{2} + a}{h_{M0}}, \quad \varepsilon_T = \frac{\frac{\Delta h}{2} + a}{h_{T0}} \quad (8)$$

gdzie:

a – parametr wariacyjny.



Rys. 13. Schemat procesu walcowania kompozytu dwuwarstwowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [31]

Do przedstawionych w pracy [59] rozważań nad procesem walcowania płaskich wyrobów kompozytowych złożonych z dwóch warstw przyjęto, że warstwa miękka spełnia warunki dla ciała lepkoplastycznego umacniającego się liniowo. Natomiast warstwa twarda spełnia warunki dla ciała sztywnoplastycznego. W przedstawionym rozwiązaniu nie uwzględniono, zarówno zjawiska wyprzedzenia w kotlinie walcowniczej jak i sił występujących na powierzchniach nieciągłości.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań autorów pracy [59] powstało następujące równanie wariacyjne:

$$\frac{\delta}{\delta \varepsilon_T} = \left[\int_0^{l_M} \int_0^{h_{M0}} \left(\sigma_{pM} \dot{\varepsilon}_{iM} + \eta \frac{\dot{\varepsilon}^2}{2} \right) dx dz + \int_0^{l_T} \int_0^{h_{T0}} \sigma_{pT} \dot{\varepsilon}_{iT} dx dz + \int_0^{l_M} \psi_M \sigma_{pM} V_{PM} dx + \int_0^{l_T} \psi_T \sigma_{pT} V_{PT} dx + \int_0^{l_T} \psi_{MS} \sigma_{pM} V_{PS} dx \right] = 0, \quad (9)$$

Dopiero w pracy [113] zaproponowano zastosowanie zależności matematycznych do wyznaczenia grubości warstw po procesie walcowania.

$$\frac{h_M}{h_T} = \left(\frac{h_{M0}}{h_{T0}} \right)^k \quad (10)$$

gdzie:

h_{T0} , h_{M0} – grubość warstwy miękkiej i warstwy twardej przed przepustem,

h_M , h_T – grubość warstwy miękkiej i warstwy twardej po przepuście,

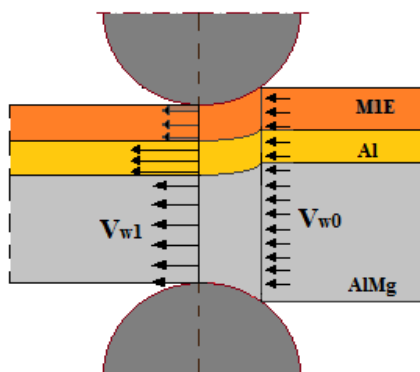
k – współczynnik empiryczny (k dla stopów aluminium przyjmuje się w zakresie $0,75 \div 0,90$).

Zaproponowana zależność (10) po określeniu wartości współczynnika „k” w sposób praktyczny, może z pewnym przybliżeniem być stosowana do określenia zmian grubości warstw pasma w procesie walcowania w wąskim zakresie. Wprowadzenie kompozytu wielowarstwowego bardzo komplikuje możliwość stosowania tej zależności oraz przyczynia się do jej rozbudowania. Dlatego zastosowanie tego rozwiązania do większości kompozytów warstwowych o różnych osnowach metalowych a tym bardziej występujących w obszarach ich połączenia fazach międzymetalicznych jest praktycznie nie możliwe. W niniejszej rozprawie doktorskiej zagadnienie będzie bazowało na badaniach doświadczalnych i dokonywanych pomiarach po każdym przepuszczeniu. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury przedmiotu można stwierdzić, że rozwiązań dotyczących nierównomiernego rozkładu gniotu całkowitego na warstwy kompozytu jest stosunkowo dużo. Należy jednak podkreślić, że zaproponowane rozwiązania w głównej mierze dotyczą określonego zakresu pracy. Obserwuje się brak uogólnionego rozwiązania problemu odkształcenia walcowanych warstw kompozytu oraz faz międzymetalicznych. W dalszej części pracy omówione będzie zagadnienie nierównomiernego płynięcia warstw kompozytowych w płaszczyźnie wyjścia ze strefy odkształcenia, na które zdecydowany wpływ ma nierównomierne odkształcenie warstw w procesie walcowania.

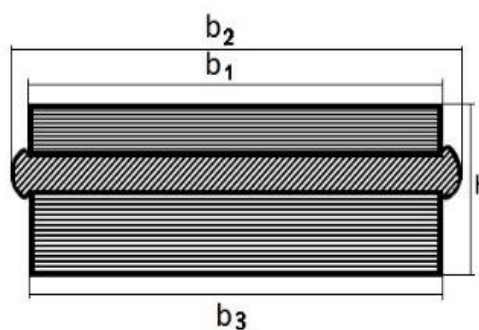
Na rysunku 14 przedstawiono proces walcowania kompozytu trójwarstwowego oraz wpływ nierównomiernego odkształcenia warstw na poszerzenie i wydłużenie w procesie walcowania [21].

Wartość odkształcenia poszczególnych warstw kompozytu uzależniona jest bezpośrednio o ich właściwości a konkretnie oporu odkształcenia jakim się charakteryzuje [21]. Problem walcowania trójwarstwowego kompozytu komplikuje się ze względu na konieczność badania obu obszarów złącza, a konkretnie czy jakość obszaru złącza nie uległa pogorszeniu w wyniku wystąpienia mikropęknięć lub naderwań prowadzących później do rozwarstwień.

a)



b)



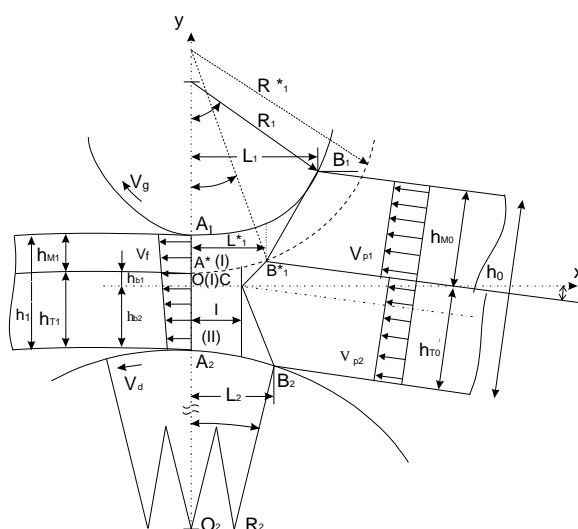
Rys. 14. Wpływ nierównomierności odkształcenia warstw kompozytu trójwarstwowego na nierównomierne poszerzenie oraz nierównomierne płynięcie w kotlinie walcowniczej
 a) nierównomierne płynięcie warstw skutkujące nierównomiernym wydłużeniem, b) nierównomierne poszerzenie warstw po wyjściu z kotliny walcowniczej

Źródło: opracowanie własne na podstawie [21]

Na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 14 można stwierdzić, że nierównomierne płynięcie w płaszczyźnie wyjścia z kotliny walcowniczej jest również uzależnione od liczby warstw stanowiących kompozyt. Rysunek 14 przedstawia proces ASR kompozytu trójwarstwowego, w którym warstwa środkowa ze względu na wysokie właściwości plastyczne płynie zdecydowanie szybciej, niż warstwy skrajne. Zjawisko nierównomierności płynięcia warstw kompozytu w kotlinie walcowniczej jest niebezpieczne ze względu na możliwość powstania rozwarstwienia, a tym samym zniszczenia kompozytu warstwowego.

2.3.3. Wpływ asymetrycznego procesu walcowania na prędkość płynięcia płaskich wyrobów warstwowych w procesie walcowania

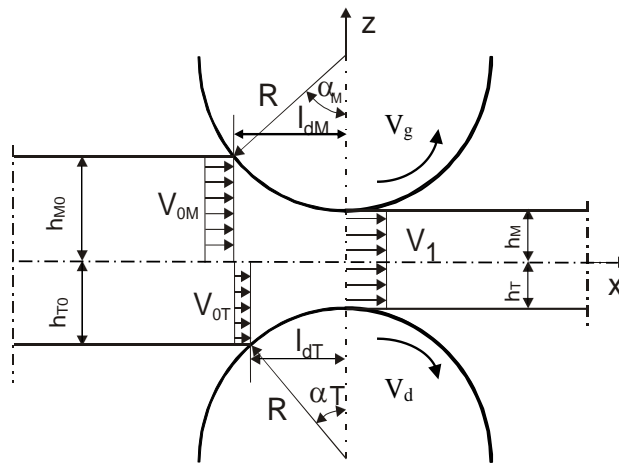
Proces walcowania płaskich kompozytów warstwowych jest skomplikowanym zagadnieniem, które do rozwiązania na drodze teoretycznej wymaga uwzględnienia wielu parametrów. Dlatego przystępując do opracowania technologii nowego procesu walcowania kompozytów warstwowych o osnowach metalowych należy określić właściwości mechaniczne materiałów stanowiących poszczególne komponenty kompozytu, określić czy i jakie występują fazy międzymetaliczne, a także możliwości technologiczne walcowni. Przystępując do opracowania technologii walcowania płaskich kompozytów warstwowych można założyć, że ze względu na różnice w oporach plastycznego kształtowania warstw tworzących kompozyt oraz różnych warunków na powierzchniach styku kompozytu z walcami roboczymi, proces walcowania, z którym mamy do czynienia jest asymetrycznym [21÷24, 78]. Rysunki 15 i 16 przedstawiają schematycznie nierównomierność płynięcia kompozytu dwuwarstwowego. Dla pełnego zobrazowania zagadnienia nierównomiernego płynięcia warstw kompozytu w procesie walcowania, na rysunku 15 przedstawiono proces asymetrycznego walcowania ASR wynikającego z zastosowania różnych średnic walców roboczych. W tym przypadku uzyskanie prostego pasma dwuwarstwowego wymaga doboru średnic walców, co sprowadza się do konieczności wyposażenia walcarki w cały zestaw walców.



Rys. 15. Schemat nierównomiernego płynięcia dwuwarstwowego kompozytu walcowanego z asymetrią średnic walców roboczych [55]

Z ekonomicznego punktu widzenia zastosowanie asymetrii średnic walców roboczych przedstawionego na rysunku 15 jest mało opłacalne, ponieważ wymaga znacznych nakładów finansowych związanych ze stosowaniem wielu walców jak i potrzebnego czasu na ciągłe przezbieranie walcarki. Zdecydowanie korzystniejszym i zastosowanym w dalszej części pracy jest rozwiązanie asymetrii kinetycznej ASK, gdzie do zróżnicowania prędkości walców roboczych wystarczy wprowadzić indywidualne napędy walców roboczych.

Schemat kinetycznej asymetrii prędkości walców roboczych ASK przedstawiono na rysunku 16. Przedstawiony na rysunku 16 schemat odzwierciedla optymalne warunki prowadzenia procesu walcowania kompozytu dwuwarstwowego, dla którego uzyskano proste pasmo opuszczające kotłnię walcowniczą.



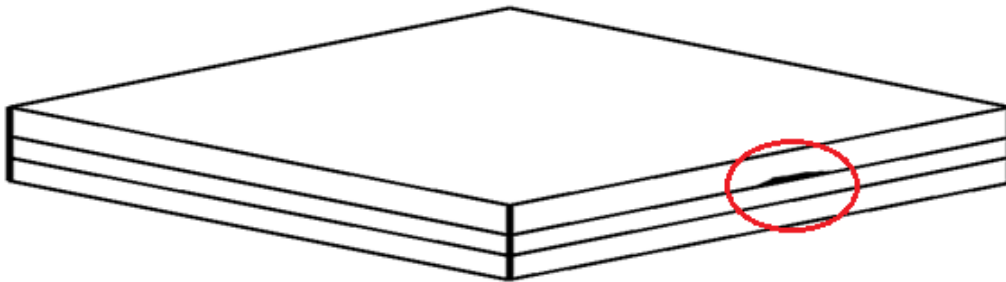
Rys. 16. Schemat asymetrycznego procesu walcowania blach dwuwarstwowych – optymalne warunki prowadzenia procesu [21÷23]

Na rysunkach 15 i 16 przedstawiono wpływ asymetrycznego procesu walcowania na płynięcie komponentów kompozytów warstwowych. Należy zaznaczyć, że w przypadku kompozytów dwuwarstwowych jedna z warstw płynie szybciej niż druga. Natomiast zaznaczona nierównomierność płynięcia warstw blach trójwarstwowych przedstawiona na rys 14 pokazuje, że w przypadku większej liczby warstw kompozytu zagadnienie to jest bardziej złożone, ale poprzez zastosowanie asymetrii prędkości walców roboczych można sterować zarówno ich prędkością płynięcia jak i krzywizną walcowanych pasm kompozytowych warstwowych. Na podstawie przeprowadzonych rozważań można zaobserwować, że prędkość płynięcia poszczególnych warstw stanowiących kompozyt warstwowy jest uzależniona od różnic w właściwościach mechanicznych materiałów będących jego komponentami. Kontynuując rozważania w dalszej części zostaną omówione zagadnienia związane z trwałością obszarów połączeń w procesie walcowania.

2.4. Degradacje mechaniczne w metalowych kompozytach warstwowych

Metalowe kompozyty warstwowe podatne są na procesy degradacji, które w szczególności wpływają niekorzystnie na jakość obszaru połączenia. Degradacja występująca podczas plastycznego kształtowania kompozytów warstwowych, nazywana mechaniczną, polega na osłabieniu obszaru złącza a nawet rozwarstwienia połączonych materiałów metalowych.

W wyniku plastycznego kształtowania oraz nierównomiernego odkształcenia warstw kompozytu w obszarze połączenia występują naprężenia ścinające, które przyczyniają się do powstawania mikropęknięć, naderwań, które następnie prowadzą do rozwarstwienia połączonych materiałów [117]. Problem ten nasila się wraz z pojawieniem się w obszarze połączenia faz międzymetalicznych, które przeważnie są twarde, a tym samym podatne na kruche pęknięcie. Zjawisko rozwarstwienia kompozytu warstwowego nazywane delaminacją przedstawiono na rysunku 17 [117]. Należy zaznaczyć, że proces delaminacji może występować zarówno na jednym poziomie co zostało przedstawione na rysunku 17, jak również na wielu poziomach.



Rys. 17. Schemat pojawienia się delaminacji jednopoziomowej w kompozycie warstwowym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [117]

Powstanie przedstawionej na rysunku 17 delaminacji jest wynikiem omówionej degradacji polegającej na powstaniu mikropęknięć w obszarze połączenia kompozytu warstwowego. Natomiast w następstwie kolejnych operacji plastycznego kształtowania delaminacja będzie propagować jej rozrost do momentu całkowitego rozwarstwienia kompozytu. Delaminację obszaru połączenia kompozytu warstwowego można ujawnić podczas badań makroskopowych.

Do ujawnienia degradacji, skutkującej występowaniem mikropęknięć w obszarze połączenia warstw kompozytu konieczne są badania mikroskopowe.

Bardzo istotny wpływ ze względu na występowanie degradacji oraz delaminacji obszarów połączeń warstw kompozytu jest właściwe prowadzenie procesu technologicznego. W tym przypadku bardzo istotne jest, aby w procesie plastycznego kształtowania kompozytowych blach wielowarstwowych, określić jaki jest wpływ naprężeń ścinających powstałych w procesie asymetrycznego walcowania na obszary połączeń. Należy dążyć, aby naprężenia ścinające nie przyczyniały się do powstawania degradacji czy też delaminacji prowadzących do rozwarstwienia warstw, a tym samym zniszczenia wyrobu. Dlatego sterowanie procesem plastycznego kształtowania jest bardzo istotnym czynnikiem decydującym o właściwościach gotowych płaskich wyrobów kompozytowych.

Do mechanizmów niszczenia warstwowych kompozytów metalowych należących do połączeń mechanicznych należą między innymi:

- naciski pochodzące od walców roboczych w asymetrycznym walcowaniu – szczególnie niebezpieczne podczas kształtowania kompozytów warstwowych, dla których w obszarze połączenia występują twarde i kruche fazy międzymetaliczne. W wyniku dużych sił nacisku często można zaobserwować mikropęknięcia tych wydzieleni, a w kolejnych przepustach walcowniczych pojawienie się delaminacji i rozwarstwień,
- wyginanie walcowanego wielowarstwowego pasma kompozytowego. Skutkującego koniecznością wprowadzenia do procesu wytwarzania prostowania kształtowanego pasma. Zarówno na podstawie danych literaturowych jak i własnych obserwacji można stwierdzić, że zastosowanie dodatkowej operacji prostowania niekorzystnie wpływa zarówno na jakość i trwałość obszaru połączenia jak również koszty produkcji. Wygięcie pasma po procesie walcowania jest efektem nierównomiernego płynięcia warstw kompozytu, a tym samym wystąpienie naprężeń ścinających w obszarze połączeń warstw.

2.5. Teoretyczna analiza techniczno- ekonomiczna procesu wytwarzania kompozytów warstwowych

Problemy przedsiębiorstw branży metalowej to produkcja na zamówienie, krótkie partie, rozbudowany park maszynowy, zróżnicowana produkcja, częste zmiany i konieczność przebrojeń, rozliczenia kosztów i narzędzi. Duża liczba przygotowanych ofert wymaga odpowiedniego przepływu zadań obejmujących wiele działów w firmie [118÷131]:

- sprzedaży,
- technologii,
- produkcji,
- zaopatrzenia,
- planowania.

Bazując na zapotrzebowaniu zgłoszonym przez klienta firmie potrzebna jest szybka informacja dotycząca analizy finansowej, która pozwoli określić koszty produkcji. Zaplanowanie produkcji jest procesem złożonym i czasochłonnym. System produkcyjny jest definiowany jako zorganizowany i celowo zaprojektowany układ materialny. Czas, zasoby czyli maszyny, surowce, narzędzia, ludzie nie są nieograniczone. Planowanie musi zapewnić optymalizację kosztów poprzez ograniczenie przestoju, minimalizację przebrojeń, wariantowy przydział operacji ze stanowiskami roboczymi włącznie. Wymusza to harmonogramowanie z dokładnością do jednego stanowiska pracy. Minimalizacja zapasów magazynowych przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości produkcji to niekończące się wyzwania. Gwarancja terminowości i jakości dostaw wymaga systematycznej klasyfikacji i oceny dostawców. Konieczne jest zapewnienie optymalizacji wykorzystania surowców w celu obniżenia kosztów. Firmy są nastawione na coraz lepsze zaspokajanie potrzeb klientów i rosnące ich wymagania.

Rozliczenie kosztów produkcji to potrzeba szczegółowego ich raportowania i monitorowania w trakcie realizacji zleceń. Analiza opłacalności zamówień, zleceń produkcyjnych, a także obserwacja ich rentowności na różnych poziomach marż stawia kolejne wyzwania będące codziennością firm.

Ważnym etapem produkcji jest kontrola jakości wyrobów gotowych. Realizowana na poziomie przyjęcia surowców na magazyn i na różnych etapach zlecenia produkcyjnego. Dążenie do nieuchwytnej doskonałości (optymalizacja) jest procesem ciągłym.

Ocena zjawisk ekonomicznych występujących w przedsiębiorstwie jest możliwa, w przypadku, gdy znany jest ostateczny rezultat procesu wytwórczego [130, 131].

Firmy obecnie podejmują działania skierowane na wdrożenie zmian prowadzących do jej ewaluacji i konkurencyjności, a w efekcie do podniesienia jej wartości. Dla współczesnej firmy innowacje to [130]:

- wdrażanie nowych technologii,
- wprowadzanie nowych produktów,
- zmiany infrastruktury produkcyjnej i dystrybucyjnej,
- działanie zmierzające do lepszego wykorzystania wiedzy i umiejętności pracowników.

Cele, które skłaniają do wdrożenia innowacji we współczesnej firmie mają charakter ekonomiczny i społeczny. Innowacje są obarczone pewnym stopniem ryzyka, ale stanowią dużą szansę rozwoju firmy. Przedsiębiorca mając na celu doskonalenie procesu produkcji powinien systematycznie wprowadzać innowacyjne rozwiązania technologiczne. W ujęciu podmiotowym J. Schumpeter wskazuje, że siłą sprawczą innowacyjnych zmian jest przedsiębiorca [119].

Według teorii P.F Druckera „przedsiębiorca zawsze poszukuje zmiany, reaguje na nią i wykorzystuje ją jako okazję” [118]. Głównym motywem jest oczywiście uzyskanie korzyści ekonomicznej.

Opierając się na definicji zawartej w *podręczniku Oslo Manual 2018* [120] przedmiotowe rozwiązanie stanowi źródło innowacji procesowej polegającej na zmianie metody wytwarzania. Wiąże się z nią obniżka kosztów wytwarzania nieingerująca w właściwości funkcjonalne gotowego produktu.

Efektywność ekonomiczna jest to różnica lub iloraz efektu użytkowego (wyniku) i nakładów na jego uzyskanie [123]. Efektywność przedsięwzięć powinna uwzględniać nie tylko efekty wymierne wartościowe, ale także powinna określać wpływ efektów niemierzalnych związanych bezpośrednio z przedsięwzięciem np. poprawa parametrów technicznych i użytkowych produkowanych wyrobów. W wielu przypadkach efekty te mogą decydować o wyborze przedsięwzięcia procesu [122]. Kryterium wyboru najkorzystniejszego wariantu nazwane w literaturze [124] efektywnością ekonomiczną, określane jest jako najwyższa wartość wyrażenia:

$$E_f = \frac{P}{I+K} \quad (11)$$

gdzie:

E_f - efektywność ekonomiczna,

P - określona produkcja w czasie (efekt),

I - nakłady inwestycyjne,

K - nakłady eksploatacyjne.

Analiza kosztowa zgodnie z literaturą [125] może być przeprowadzona przy użyciu trzech metod określenia kosztów własnych produkcji:

- kalkulacje podziałowe – polegające na podzieleniu sumy kosztów poniesionych w danym okresie przez liczbę jednostek produkcji wytworzonych w tym okresie, mają zastosowanie przy wytwarzania tego samego produktu lub różnych, ale pokrewnych wytwarzanych w analogiczny sposób,
- kalkulacje doliczeniowe według miejsc powstawania kosztów – umożliwiają dokładne określenie miejsca powstawania kosztów (poszczególne stanowiska pracy, działy produkcyjne), stosowana przy produkcji zleceń, asortymentowej,
- kalkulacja kosztów działań – identyfikacja działań głównych powodujących koszty pośrednie np. wytwarzania, zaopatrzenia, wykazanie wagi każdego z działań głównych w tworzeniu kosztów pośrednich w celu alokacji kosztów pośrednich na pulę kosztów oraz wybór czynników kosztotwórczych dla każdej puli.

W analizowanym przypadku najbardziej przydatną metodą wydaje się być kalkulacja doliczeniowa według miejsc powstawania kosztów. Produkcja ma charakter jednostkowy i małoseryjny (produkcja na zlecenie, asortymentowa). Na tym etapie analizy możliwymi kosztami do określenia są:

- ogół kosztów bezpośrednich,
- czas pracy na wykonanie zlecenia,
- koszty bezpośrednie robocizny,
- koszty energii.

Wskaźniki techniczno – ekonomiczne walcowni

Godzinową teoretyczną wydajność walcowni określa zależność [9]:

$$W = \frac{3600 G}{T} \text{ [Mg/h]} \quad (12)$$

gdzie:

G - masa wsadu, [Mg],

T - takt walcowania, [s].

Takt walcowania to łączny czas pomiędzy początkiem, a końcem walcowania blachy kompozytowej we wszystkich przepustach procesu technologicznego. Stanowi on sumę czasów walcowania oraz czasów operacji dodatkowych i pauz. Takt walcowania zależy od typu zespołu walcowniczego oraz sposobu realizacji procesu walcowania [9].

Podstawą obliczenia efektywności ekonomicznej procesu asymetrycznego walcowania blach będzie określenie kosztów maszynogodziny odnoszących się do eksploatacji określonego urządzenia produkcyjnego. Koszty maszynogodziny ujmują wszystkie rodzaje danego urządzenia stanowiącego zasób wytwarzania.

W literaturze [127] koszt maszynogodziny jest wielkością rozliczeniową, wyrażającą koszty magazynowe odniesione do godziny pracy maszyny. Koszt maszynogodziny jednego urządzenia wyznacza się w zależności [127]:

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I}{T_N} \quad (13)$$

gdzie:

K_{MH} - koszty maszynogodziny (zł/h),

K_A - koszty odpisów amortyzacyjnych (zł/rok),

K_Z - koszty odsetek kalkulacyjnych (zł/rok),

K_R - koszty lokalowe (zł/rok),

K_E - koszty energii (zł/rok),

K_I - koszty utrzymania maszyny w ruchu (zł/rok),

T_N - roczny fundusz czasu pracy, czas użytkowania (h/rok).

Koszt roboczogodziny [127], można określić na podstawie zależności:

$$K_{RH} = K_{MH} + K_P \quad (14)$$

gdzie:

K_{RH} - koszt roboczogodziny (zł/h),

K_{MH} - koszt maszynogodziny (zł/h),

K_P - koszt godzinowej płacy personelu obsługującego (zł/h).

Koszt maszynogodziny można przedstawić jako [128]:

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_E + K_I + K_N + K_{PB} + K_{PP}}{T_N} \quad (15)$$

gdzie:

K_{MH} - koszt maszynogodziny (zł/h),

K_A - koszty amortyzacyjne (zł/rok),

K_Z - koszty odsetek kalkulacyjnych (zł/rok),

K_R - koszty lokalowe (zł/rok),

K_E - koszty energii (zł/rok),

K_I - koszty utrzymania maszyny w ruchu (zł/rok),

K_N - koszty narzędziowe (zł/rok),

K_{PB} - koszty personelu bezpośredniego (zł/rok),

K_{PP} - koszty personelu pośredniego (zł/rok),

T_N - roczny fundusz czasu pracy maszyny, czas użytkowania (h/rok).

Przyjęto założenie, że koszt wykonania operacji walcowania dla dwóch operacji walcowania metodą symetrycznego walcowania i asymetrycznego walcowania blachy trójwarstwowej można policzyć ze wzoru:

$$K_{CP} = K_{MH} + K_P \quad (16)$$

gdzie:

K_{CP} - koszt całkowity procesu (zł/h),

K_{MH} - koszt maszynogodziny (zł/h),

K_P - koszt płacy godzinowej personelu obsługującego (zł/h).

2.6. Podsumowanie przeglądu literatury

Przedstawiony przegląd literatury przedmiotu dotyczący procesu wytwarzania metalowych kompozytów warstwowych jest potwierdzeniem, ciągłej ewaluacji technologii związanych z tymi materiałami. W warunkach przemysłowych obserwuje się duże zainteresowanie nowymi technologiami mającymi na uwadze właściwości funkcjonalne gotowych wyrobów z materiałów kompozytowych. Natomiast nie napotkano w literaturze przedmiotu praktycznych zastosowań procesu walcowania do plastycznego kształtowania metalowych kompozytów warstwowych, co przyczyniło się do opracowania niniejszej dysertacji pracy doktorskiej.

W dokonanym przeglądzie literatury uwidoczniono szereg czynników niekorzystnie wpływających na proces wytwarzania metalowych kompozytów warstwowych. Dotychczasowe rozwiązania skupiają się głównie na wyrobach dwuwarstwowych oraz jakości obszaru połączenia tych warstw.

Kolejnym zagadnieniem, nie uwzględnianym w literaturze jest analiza więcej niż jednego obszaru połączenia warstw wyrobu kompozytowego. Tym samym brakuje kompleksowych rozwiązań uwzględniających wpływ plastycznego kształtowania wyrobów kompozytowych na własności funkcjonalne metalowych warstwowych wyrobów kompozytowych. Pomimo tak wielu pozycji literaturowych dotyczących kompozytów warstwowych nie wykazano zależności nierównomiernego odkształcenia warstw kompozytu na jakość i trwałość więcej niż jednego obszaru połączenia. Tym bardziej, że te obszary mogą cechować się zarówno różną budową, mechanizmem powstania jak i różnym zachowaniem podczas plastycznego kształtowania. Zagadnienie to należy uznać za bardzo ważne ze względu na rozwiązanie naukowe jak i przydatne do opracowywania nowych technologii wytwarzania wyrobów kompozytowych.

Przedstawione w literaturze wyniki badań wskazują, że zastosowanie asymetrii kinetycznej do procesu wytwarzania płaskich warstwowych wyrobów kompozytowych jest jak najbardziej zasadne. Pozwala bowiem na sterowanie krzywizną kompozytowych blach wielowarstwowych przez co umożliwia kształtowanie właściwości funkcjonalnych podczas ich plastycznego kształtowania.

Praktyczne zastosowanie asymetrycznego procesu walcowania przyczynia się również do obniżenia sił nacisku metalu na walce robocze, co korzystnie wpływa na wydłużenie żywotności walców oraz zmniejsza ilość potrzebnej energii do plastycznego kształtowania płaskich wyrobów kompozytowych. Próby aplikacji tego procesu w warunkach

przemysłowych wymagają przeprowadzenia badań laboratoryjnych mających na celu określenie optymalnych warunków prowadzenia procesu walcowania.

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury kompozytowe materiały warstwowe posiadają duży potencjał rozwoju. Obecnie poszukuje się materiałów które łączą w sobie właściwości kilku materiałów, przez co znacznie wpływają na obniżenie kosztów wyrobów.

3. Część badawcza

3.1. Hipoteza, cel i zakres badań

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz badań własnych dotyczących podejmowanej problematyki w rozprawie doktorskiej sformułowano następującą hipotezę pracy:

„Na podstawie znajomości określonych parametrów procesowych oraz określonych właściwości funkcjonalnych kompozytu warstwowego, możliwe jest ich plastyczne kształtowanie z zapewnieniem odpowiedniej jakości obszarów połączenia wyrobu gotowego”.

Cele niniejszej pracy można uważać zarówno za naukowe jak i aplikacyjne. Podstawowym celem naukowym wynikającym bezpośrednio z postawionej hipotezy pracy było: ***dokładne określenie wpływu parametrów procesu wytwarzania kompozytów warstwowych AlMg5-Al-MIE na jakość obszarów złącza oraz wybrane właściwości funkcjonalne.***

Równocześnie istotnym **celem pracy** było wyznaczenie optymalnych parametrów asymetrycznego procesu walcowania kompozytów warstwowych. Za optymalne parametry procesu walcowania w pracy przyjęto parametry zapewniające uzyskanie prostych kompozytowych pasm wielowarstwowych. W ramach rozprawy doktorskiej:

1. Określono jakość i trwałość obszarów połączeń warstw materiałów kompozytowych po procesie łączenia metodą zgrzewania wybuchowego, dla kolejnych etapów plastycznego kształtowania.

Realizacja tego etapu pracy doktorskiej pozwoliła na analizę wytworzonych w metodzie zgrzewania wybuchowego obszarów połączeń międzywarstwowych, a następnie na określenie wpływu poszczególnych etapów procesu technologicznego na ich trwałość i jakość. W tym celu przeprowadzono badania i analizę makroskopową oraz mikroskopową obszarów połączenia warstw kompozytu.

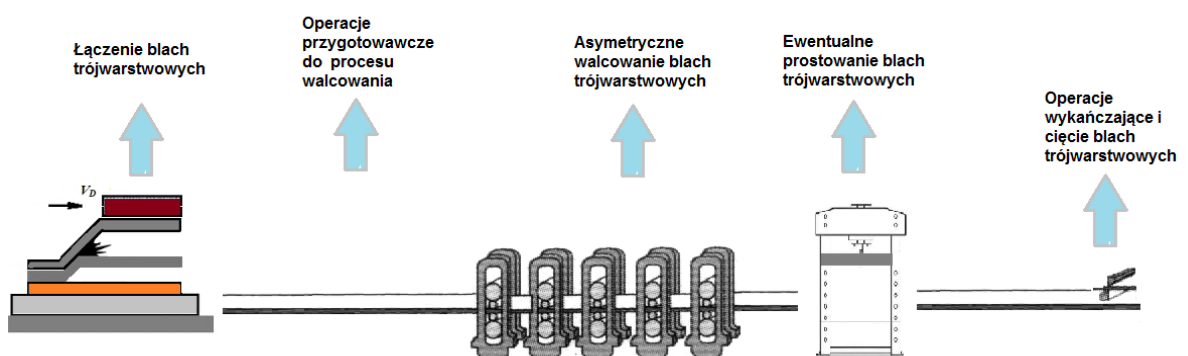
2. Dokonano oceny wpływu asymetrycznego walcowania na przebieg procesu kształtowania kompozytów warstwowych.

W ramach badań określono wpływ asymetrii prędkości walców roboczych na parametry procesu walcowania takie jak rozkład sił nacisku metalu na walce w zależności od zastosowanego współczynnika asymetrii, nierównomierność rozkładu gniotu na warstwy kompozytu oraz promień krzywizny blach kompozytowych. Przeprowadzono badania twardości i wytrzymałości na ścinanie po procesie plastycznego kształtowania.

3. Dokonano oceny potencjału wdrożenia procesu asymetrycznego walcowania do praktyki przemysłowej.

W ramach tego etapu pracy dokonano wstępnej oceny możliwości praktycznego wdrożenia opracowanego procesu technologicznego w warunkach firmy X. Wskazane warunki prowadzenia procesu walcowania kompozytów warstwowych będą pomocne przy ich wdrożeniu w warunkach przemysłowych.

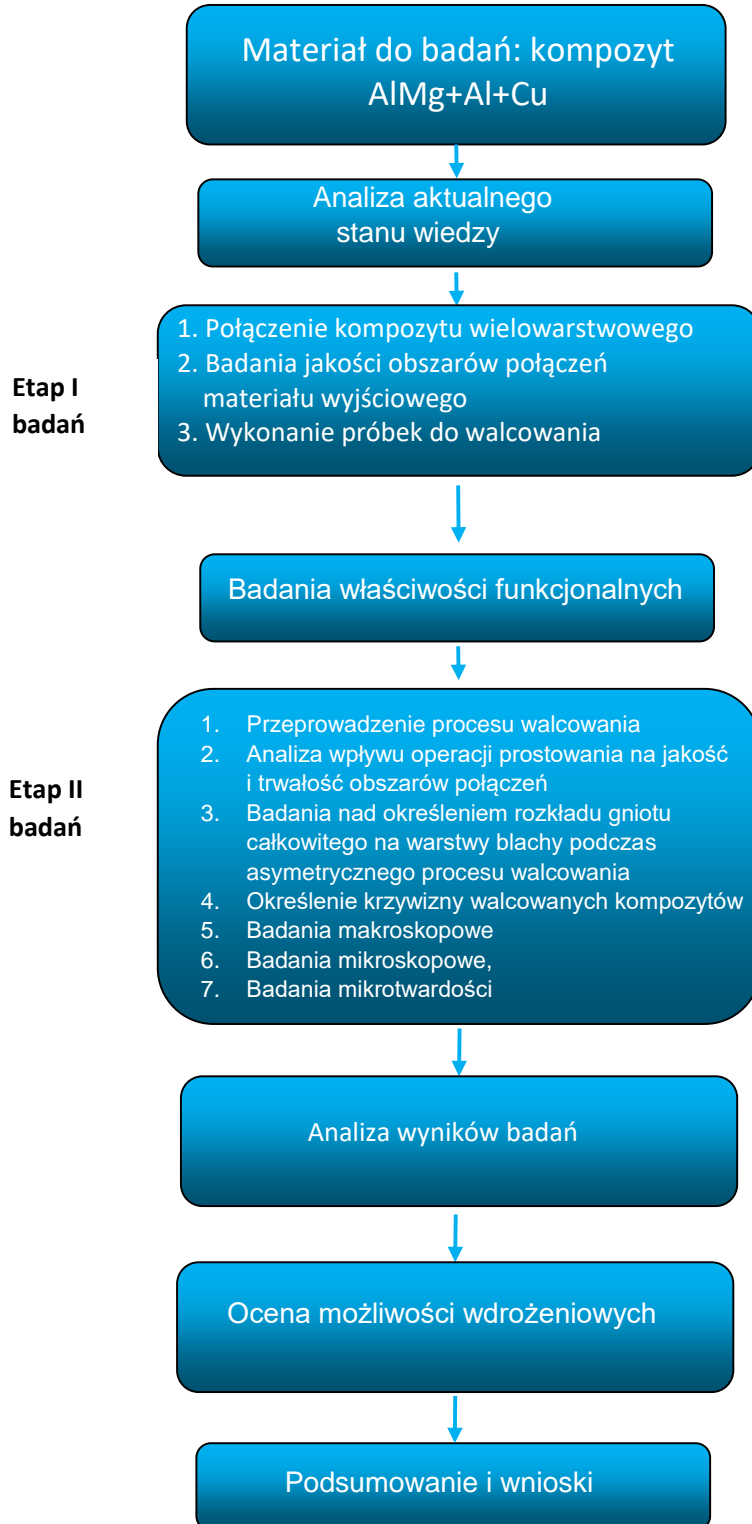
Przeprowadzone w pracy w sposób iteracyjny rozważania miały na uwadze uwzględnienie właściwości użytkowych (głównie jakości wyrobu) w poszczególnych etapach procesu wytórczego rysunek 18. W celu obniżenia kosztów oraz skrócenia cyklu procesu walcowania blach trójwarstwowych przeprowadzono kompleksowe badania mające na celu określenie optymalnych warunków prowadzenia procesu wytwarzania kompozytowych wyrobów wielowarstwowych.



Rys. 18. Schemat procesu wytwarzania kompozytowych blach trójwarstwowych

W celu weryfikacji sformułowanej hipotezy rozprawy doktorskiej oraz postawionych celów, zakres opracowania obejmuje ocenę technologiczną bazującą na badaniach doświadczalnych asymetrycznego procesu walcowania kompozytów warstwowych AlMg5-Al-Cu.

Graficzne przedstawienie przyjętego zakresu pracy doktorskiej przedstawiono na rys 19.



Rys. 19. Schemat blokowy zakresu badań

3.2. Materiał badawczy

W ostatnich latach obserwuje się zwiększone zainteresowanie tematyką wytwarzania wyrobów wielowarstwowych na bazie stopów aluminium i magnezu połączonych często z innymi metalami takimi jak miedź. Do najbardziej popularnych wśród materiałów nieżelaznych, wytwarzanych metodami przeróbki plastycznej należy aluminium i jego stopy. Charakteryzują się one wysoką wytrzymałością właściwą oraz przede wszystkim niską wagą (gęstość średnia ok. $2,7 \text{ g/cm}^3$). Najbardziej popularnymi stopami aluminium są: Al-Mg, Al-Cu, Al-Mn, Al-Mg-Cu, Al-Mg-Si. Należy zaznaczyć, że wadą tych materiałów jest stosunkowo niska wytrzymałość zmęczeniowa [119, 120]. Większość stopów aluminium można kształtować plastycznie zarówno na zimno jak i na gorąco. Kolejnym materiałem cieszącym się dużą popularnością wśród materiałów nieżelaznych otrzymywanych jest miedź i jej stopy. Znajdują one szerokie zastosowanie między innymi w elektrotechnice oraz budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń. Miedź i jej stopy charakteryzują się wysoką przewodnością elektryczną, cieplną oraz odpornością na korozję. Plastyczne kształtowanie miedzi i jej stopów można prowadzić zarówno na gorąco jak i na zimno [119].

Wyroby z materiałów kompozytowych warstwowych bardzo często są wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłowych. W tej grupie występuje wiele wyrobów będących połączeniem metali i stopów z aluminium oraz miedzi, które dość powszechnie są stosowane w energetyce i elektronice. Większość stopów aluminium i miedzi charakteryzuje się możliwością bezpośredniego połączenia. Natomiast wybrana do rozważań w pracy doktorskiej grupa materiałów będąca połączeniem stopów aluminium z magnezem oraz miedzią na dzień dzisiejszy jest niemożliwy. Dlatego do badań w niniejszej pracy zaproponowano zastosowanie warstwy pośredniej charakteryzującą się wysoką możliwością łączenia zarówno ze stopami aluminium z magnezem jak i miedzią.

3.2.1. *Charakterystyka materiałów przyjętych do badań*

W ramach prowadzonych w pracy rozważań przyjęto proces obejmujący proces łączenia oraz plastycznego kształtowania kompozytów warstwowych złożonych z materiałów: AlMg5+Al+Cu. Zaproponowano do powszechnie stosowanego kompozytu warstwowego złożonego z Al-Cu dołączyć jako warstwę zewnętrzną AlMg5. Zastosowanie do badań tego materiału wynikało z zapotrzebowania w przemyśle okrętowym na warstwę zewnętrzną

materiału o bardzo dobrej spawalności, wyższej wytrzymałości niż warstwa Al oraz dobrej odporności na korozyjne oddziaływanie wody morskiej. Natomiast warstwa Al stanowiła warstwę pośrednią umożliwiającą wspomniane wcześniej połączenie w jednym wyrobie warstw AlMg5 i Cu. Przy doborze materiału do badań kierowano się również dość powszechnym nierównomiernym odkształceniem warstw Al i Cu, co skutkowało silnym wyginaniem walcowanych pasm po wyjściu z kotliny walcowniczej. Natomiast spodziewano się, że zastosowanie warstwy AlMg5 jako warstwy zewnętrznej wpłynie na zmniejszenie krzywizny blach kompozytowych opuszczających kotlinę walcowniczą. Skład chemiczny przyjętych do badań materiałów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny materiałów przeznaczonych do badań teoretycznych, M1E (PN-87/H-82120), Al99,8 (PN-79/H-82160), AlMg5 (PN-87/H-88026)

Materiał		Zawartość procentowa pierwiastków								
		Al	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Si
AlMg5	min.	res	-	-	0,20	4,30	-	-	-	-
	max.	zta	0,40	0,10	0,60	5,80	0,05	0,25	0,15	0,40
Al-1050	min.	99,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	max.	res zta	0,40	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	0,25
M1E	min.	-	-	99,9	-	-	-	-	-	-
	max.	-	0,05	res zta	-	-	-	0,03	0,02	0,02

W pracy przyjęto nazywać warstwę Al-1050 warstwą aluminium (lub Al) natomiast M1E warstwą miedzi (lub Cu).

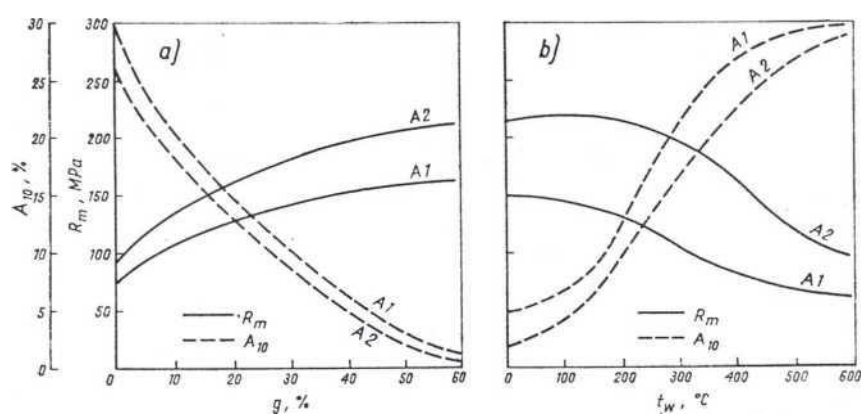
Stop AlMg5 - charakteryzujący się bardzo dobrą spawalnością, odpornością na korozję w wodzie morskiej oraz wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Jest stopem nieutwardzanym wydzieleniowo o strukturze roztworu α na bazie aluminium, w których wzrost wytrzymałości uzyskuje się przez odkształcenie plastyczne. Dostarczany w postaci blach, rur, prętów, drutów i kształtowników. Materiał ten często stosowany jest do produkcji elementów spawanych, w przemyśle stoczniowym i motoryzacyjnym, budowie maszyn i urządzeń oraz konstrukcjach spawanych. Produkuje się również: aparaturę chemiczną, zbiorniki magazynowe, zbiorniki ciśnieniowe, rurociągi, zgrzewane i spawane elementy konstrukcyjne [55,56,132].

Charakteryzuje się minimalną wytrzymałością na rozciąganie 275MPz, granicą plastyczności 125MPa oraz wydłużeniem $A_5 \geq 17\%$.

Stop Al-1050 - charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na korozję atmosferyczną. Posiada wysoką przewodność cieplną i termiczną. Materiał ten znajduje szerokie zastosowanie w przemyśle energetycznym i elektronice, ze względu na dobrą przewodność elektryczną. Ponadto jest podatny do anodowania dekoracyjnego i trudny do obróbki skrawaniem [132]. Aluminium dzięki swoim właściwościom jest szeroko stosowane w przemyśle lotniczym, transporcie i innych gałęziach gospodarki. Należy do grupy metali lekkich, cechuje się dobrym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym. Właściwości te sprawiają, że aluminium jest ważnym materiałem zarówno w chłodnictwie oraz stosowane jest jako przewodnik.

Przy wystawieniu na bezpośredni kontakt z powietrzem na powierzchni aluminium tworzy się warstwa tlenku aluminium Al_2O_3 , która ma doskonałą odporność na korozję. Jest odporne na działanie wody, wielu kwasów organicznych oraz związków azotowych. Nie jest odporne natomiast na działanie wodorotlenków (np. NaOH), kwasów beztlenowych (HCl), wody morskiej i jonów rtęci.

Czyste aluminium nie posiada wysokiej odporności na rozciąganie. Wytrzymałość czystego wyżarzzonego aluminium jest niska $R_m = 70 - 120$ MPa, $R_e = 20 - 40$ MPa, wydłużenie $A_{10} = 30 - 45\%$, przewężenie $Z = 80 - 95\%$. a twardość wynosi 15 - 30 HB.



Rys. 20. Zależność wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia aluminium Al oraz A2 od gniotu (a) i temperatury wyżarzania (b) [132]

Na rysunku 20 przedstawiono, wpływ odkształcenia plastycznego na właściwości mechaniczne aluminium, przy czym stwierdzono, że pod wpływem odkształcenia bardziej umacnia się aluminium o mniejszej czystości.

Poprzez dodatki stopowe takie jak, mangan, krzem, miedź czy magnez można zwiększyć właściwości wytrzymałościowe aluminium i produkować stop o właściwościach dostosowanych do konkretnych zastosowań. Stopy aluminium cechują się korzystnym parametrem konstrukcyjnym, tzn. stosunkiem wytrzymałości do ciężaru właściwego, który jest większy niż dla stali. Ponadto ich udarność nie maleje w miarę obniżania temperatury, co powoduje że w niskich temperaturach mają większą udarność niż stal. Wadą jest niska wytrzymałość zmęczeniowa.

Stopy aluminium dzieli się na:

- odlewnicze [PN-EN 1706:2001]
- do obróbki plastycznej [PN-EN 573-3:2005]

Aluminium jest materiałem, który często jest przerabiany plastycznie. Najczęściej jest on walcowany lub wyciskany. Przeróbkę plastyczną aluminium można prowadzić na zimno lub na gorąco (ok. 450 °C).

Wszystkie wymienione powyżej zalety sprawiły, iż aluminium jest szeroko stosowanym w przemyśle materiałem, a możliwości jego wdrożenia ciągle rosną we wszystkich dziedzinach techniki. Zastosowanie aluminium, a głównie jego stopów jako materiału konstrukcyjnego warunkują względy ekonomiczne. Duża wytrzymałość aluminium w stosunku do ciężaru właściwego, pozwala na tworzenie lekkich konstrukcji. Dlatego też obserwuje się wzrost zastosowania wyrobów z aluminium do budowy pojazdów mechanicznych, wagonów, a także statków. Obserwuje się również rosnące zastosowanie wyrobów aluminiowych w przemyśle lotniczym, budownictwie oraz mechanice. Aluminium i jego stopy znalazły również szerokie zastosowanie w mechanice precyzyjnej do wyrobu zegarków, sprzętu fotograficznego i kinowego. Natomiast w ostatnich latach obserwuje się zmniejszenie zastosowania aluminium w elektrotechnice.

Kolejną cechą charakterystyczną aluminium to, że jest materiałem paramagnetycznym posiadającym estetyczny wygląd, co sprawiło, że jest ono również stosowane do wytwarzania przedmiotów codziennego użytku.

Stop M1E- charakteryzuje się bardzo dobrą przewodnością elektryczną. Nadaje się do emaliowania i wyżarzania rafinującego. Miedź elektrolityczna o wysokiej czystości, doskonałej przewodności elektrycznej. Miedź jest jednym z pierwszych metali wykorzystywanych przez człowieka do produkcji ozdób, naczyń i broni już w czasach starożytnych. Czysta miedź jest

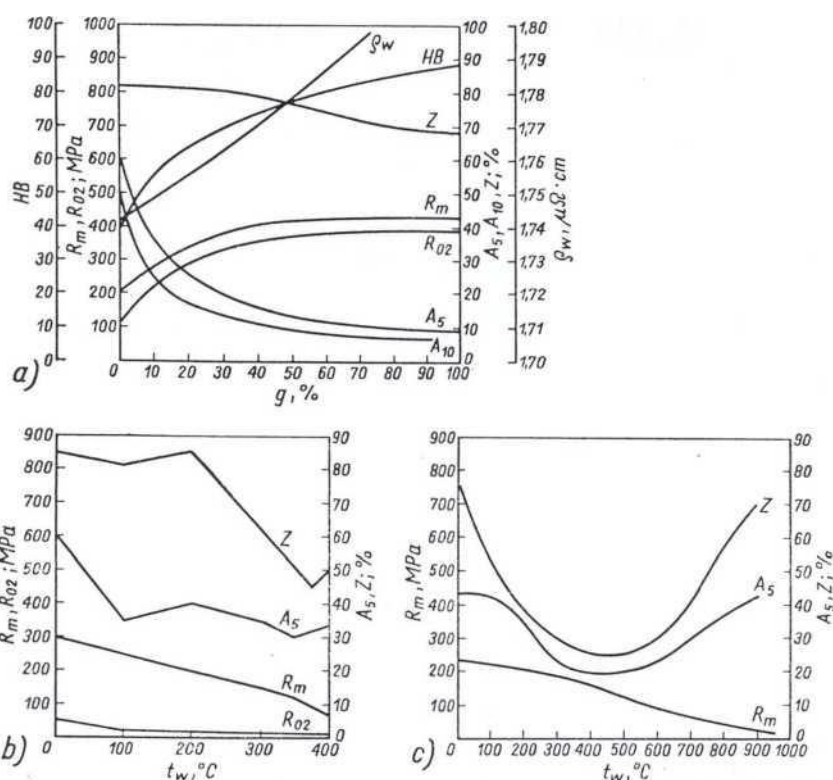
pomarańczowo-czerwona, a w powietrzu pokrywa się czerwonym nalotem. Jest miękkim metalem, wykazującym dobrą kowalność i ciągliwość. Miedź i jej stopy są obecnie szeroko stosowane we wszystkich gałęziach nowoczesnej techniki. Duży zakres zastosowania czystej miedzi jest wynikiem bardzo dobrej przewodności elektrycznej i cieplnej, dużej podatności do obróbki plastycznej na zimno i na gorąco oraz dużej odporności na korozję. Miedź jest odporna na działanie czynników atmosferycznych, ponieważ w obecności wilgoci i tlenku węgla (IV) tworzy zielony związek zwany popularnie patyną. Związek ten chroni miedź przed korozją głębszych warstw. Może ona również ulec korozji, jeśli narażona jest na kontakt z powietrzem zawierającym związki siarki. Ma dodatni potencjał elektrochemiczny i nie reaguje w temperaturze pokojowej z wodą ani rozcieńczonymi kwasami (słabo utleniającymi). W podwyższonej temperaturze reaguje jednak ze stężonym kwasem solnym tworząc kwas tetrachloromiedziowy (II) i wodór [55,56,132].

Miedź ma gęstość $8,96 \text{ g/cm}^3$ i temperaturę topnienia $1084,45 \text{ C}$. Udarność czystej miedzi jest stosunkowo duża i zmienia się w zależności od stopnia gniotu. Wartość jej w stanie wyżarzonym wynosi ok. 2.0 MJ/m^2 zmniejsza się do ok. 1.0 MJ/m^2 po gnioście wynoszącym 60%.

Tak zwana „czysta” miedź zawiera 0,01-1,0% zanieczyszczeń, zależnie od rodzaju wytwarzania, przetwarzania i oczyszczania. Za zanieczyszczenia uważa się takie pierwiastki jak: Bi, Pb, Sb, As, Fe, Ni, Sn, Zn oraz S. W Polsce wytwarza się dwanaście gatunków miedzi, a także pewne ilości miedzi najwyższej jakości o zawartości 99.99% Cu i dopuszczalnej sumie zanieczyszczeń 0.01%. Zastosowanie miedzi jest uzależnione od stopnia jej czystości i tak miedź katodową M0KS i M0K oraz beztlenową M00B, M01B i M0B używa się głównie w elektronice, radiotechnice oraz elektrotechnice. Małe ilości miedzi beztlenowej są stosowane w specjalnej aparaturze chemicznej, na wzorce rentgenografii, mikroanalizie rentgenowskiej oraz w spektroskopii. Miedź katodową przetopioną M1E używa się głównie w przemyśle elektrotechnicznym na wszelkiego rodzaju przewody elektryczne.

Można ją przerabiać plastycznie na zimno i na gorąco. W przypadku przeróbki na zimno sumaryczny gniot może wynieść nawet 90%. Podczas tego procesu następuje utwardzenie metalu, które usuwa się przez wyżarzenie rekrystalizujące (w temp. $450-580^\circ\text{C}$). Przeróbkę plastyczną na gorąco przeprowadza się w temp. $650-800^\circ\text{C}$. Proces obróbki plastycznej na gorąco, powinien być prowadzony w temperaturze wahającej się w granicach $900 - 1050^\circ\text{C}$. Na powierzchni miedzi obrabianej plastycznie na gorąco powstaje krucha i twarda warstewka zgorzeliny, którą kruszy się natryskiem wodnym lub mechanicznie, a następnie usuwa z powierzchni metalu.

Miedź posiada wysokie własności plastyczne przy niskich własnościach wytrzymałościowych, np. wydłużenie A czystej miedzi waha się w granicach 45 - 48%. Na rysunku 21 [55,56,132] przedstawiono zależność własności mechanicznych miedzi od odkształcenia i temperatury.

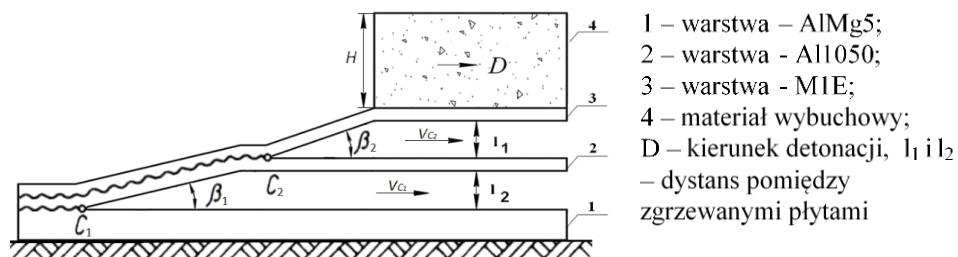


Rys. 21. Wpływ stopnia gniotu (a) oraz temperatury wyżarzania (b i c) na własności mechaniczne miedzi M1E [132]

Badania przeprowadzono na próbkach z kompozytów trójwarstwowych połączonych metodą zgrzewania wybuchowego. Metoda ta polega na powierzchniowym łączeniu takich elementów jak płyty, blachy, rury, pręty itp. Metoda ta zapewnia wysoką jakość połączenia łączonych metali i ich stopów. Jest ona dość popularnym sposobem łączenia półwyrobów wielowarstwowych dzięki temu, że jest nieskomplikowana, względnie tania, a nowoczesne materiały wybuchowe charakteryzują się wysokim bezpieczeństwem podczas ich praktycznego stosowania. W praktyce przemysłowej jest ona z powodzeniem wykorzystywana do łączenia metalowych wyrobów wielowarstwowych przez firmę Explomed z Opola.

Zgrzewanie blach trójwarstwowych przeprowadzono dla warstw: AlMg5, Al (jako przekładka) oraz Cu. Proces zgrzewania blach zrealizowano jako nastrzelanie blachy Cu na blachę Al oraz blachę AlMg5. Blachy nastrzelane Cu miały wymiar 270x750x2, natomiast

wymiary blach: Al 250x600x2 oraz AlMg5 250x600x6. Schemat przebiegu procesu zgrzewania kompozytu warstwowego przedstawiono na rysunku 22.

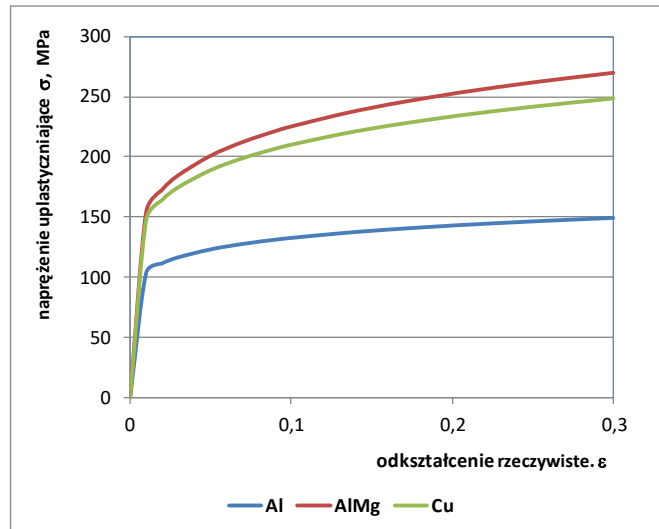


Rys. 22. Schemat procesu zgrzewania kompozytu trójwarstwowego metodą zgrzewania wybuchowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie pracy [56,86]

Połączony kompozyt w materiał wyjściowy następnie był poddawany procesowi walcowania do momentu uzyskania końcowej grubości blach wynoszącej ok. 1mm.

Na rysunku 23 przedstawiono zależność naprężenie – odkształcenie dla materiałów zastosowanych do wytworzenia kompozytu warstwowego. Do opracowania rysunku 23 wykorzystano równania opisujące zależności naprężenie- odkształcenie, ponieważ do badań przyjęto materiał kompozytowy warstwowy już połączony metodą zgrzewania wybuchowego. Na podstawie zależności przedstawionej na rysunku 23 można zaobserwować, że na warstwy zewnętrzne kompozytu dobrano materiały o zbliżonych parametrach kształtowania plastycznego. Różnice w wartościach naprężeń uplastyczniających warstw skrajnych mieszczą się w granicach 5÷8%. Zbliżone właściwości wytrzymałościowe powinny przyczynić się do zmniejszenia efektu wyginania się kompozytowych pasm warstwowych opuszczających kotłinę walcowniczą. Zastosowana tak zwana warstwa pośrednia Al1050 pełni funkcję złącza, dla warstw M1E oraz AlMg5, których bezpośrednie połączenie ze względu na ich własności jest nie możliwe.



Rys. 23. Zależność naprężenie - odkształcenie komponentów stanowiących kompozyt warstwowy

Źródło: opracowanie własne na podstawie prac [56]

Na podstawie przedstawionych na rysunku 23 zależności można wyraźnie zaobserwować, że najmniejszą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzuje się warstwa z czystego aluminium stanowiąca warstwę pośrednią. Natomiast warstwy zewnętrzne zarówno AlMg5, których wytrzymałość na rozciąganie jest bardzo zbliżona.

3.2.2. *Metodyka badań*

Osiągnięcie przyjętych w pracy celów badawczych możliwe było dzięki omówionej poniżej metodyce oraz aparaturze badawczej.

Dokonywano oceny makroskopowej badanych materiałów kompozytowych warstwowych po każdym etapie procesu wytwarzania. Obserwacje makroskopowe prowadzono okiem nieuzbrojonym oraz przy zastosowaniu makroskopu Olympus SZ 32.

Badania jakości obszarów połączeń warstw kompozytu oraz mikrotwardości przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu optycznego Nikon Eclipse MA-200 oraz mikrotwardościomierza FM-700 przedstawionych na rysunku 24 a i b. Do przeprowadzenia analizy mikrostruktury oraz obszarów połączeń warstw kompozytu zastosowano powiększeń 100x, 200x oraz 500x. Mikroskop połączony jest z komputerem i wyposażony jest w oprogramowanie do analizy NIS-Elements D. Zakres powiększeń obrazu wynosi od 50x do 3000x. Natomiast zakres możliwych obciążeń mikrotwardościomierza wynosi od 1 do 1000 g. Pomiar twardości realizowany był zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Mikrotwardościomierz wyposażony jest w zestaw obiektywów umożliwiającą przeprowadzenie analizy uzyskanych pomiarów. Badania mikroskopowe były prowadzone po każdym etapie procesu technologicznego mające na celu uwidocznienie nieciągłości lub mikropęknięć w obszarach połączenia warstw kompozytu.

a)



b)



Rys. 24. Widok a) mikroskopu optycznego Nikon Eclipse MA-200, b) mikrotwardościomierza FM-700

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie wieloprzepustowego asymetrycznego procesu walcowania ASR na półprzemysłowej linii walcowniczej - walcarkę DUO 300. Widok walcarki przedstawiono na rysunku 25. Linia walcownicza wyposażona jest w system pomiarowy walcarki umożliwiający pomiar parametrów energetyczno – siłowych procesu walcowania. Podczas procesu walcowania dokonano bezpośredniego pomiaru wartości siły nacisku metalu na walce. Pomiaru dokonano bezpośrednio za pomocą czujników siły w sposób pośredni na podstawie sygnałów otrzymywanych z przemienników częstotliwości zasilających silniki napędowe górnego i dolnego walca. W trakcie badań eksperymentalnych w systemie pomiarowym walcarki DUO-300 rejestrowano siłę nacisku metalu na walce, która mierzona była za pomocą dwóch przetworników siły typu CL21 o zakresie 250 kN, umieszczonych pomiędzy obudowami łożysk górnego walca i śrubami nastawczymi.



Rys. 25. Widok laboratoryjnej linii walcowniczej w walcarką DUO 300

Podstawowe parametry techniczne walcarki półprzemysłowej Duo 300 zastosowanej do badań:

- walce robocze o średnicy 300 mm,
- długość walca 300 mm,
- wymiary wsadu nie przekraczające 50 x 80 mm,
- wymiary produktu końcowego 30 x 30 mm,
- prędkość obrotowa walca 26 obr/min,
- prędkość walcowania 0,45 m/s,
- moc silników: 2 x 75 kW.

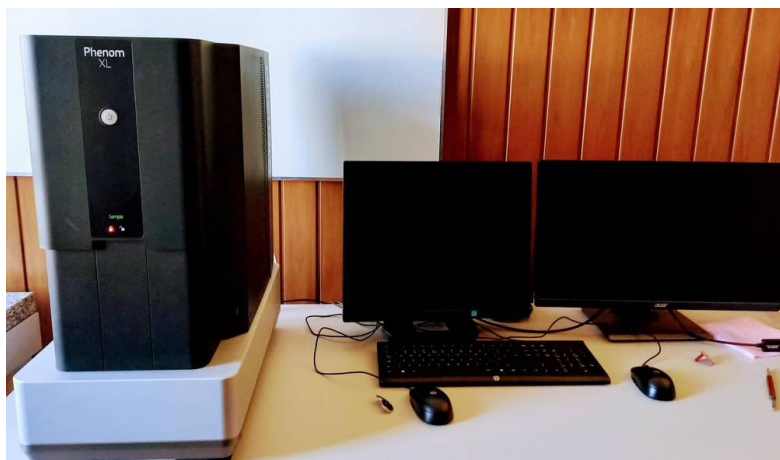
Ponieważ część próbek z kompozytów warstwowych po procesie walcowania ulegała znacznym wygięciom konieczne było poddanie ich procesowi prostowania. W ramach niniejszej pracy proces prostowania próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z-100. Proces prostowania próbek kompozytowych warstwowych przedstawiono na rysunku 26. Po operacji prostowania próbki przed kolejnym przepustem były poddawane badaniom makro i mikroskopowym pod kątem trwałości i jakości obszarów połączeń.



Rys. 26. Widok prostowania próbek kompozytowych warstwowych na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100 - przed kolejnymi przepustami walcowniczymi

Kolejnym urządzeniem badawczym wykorzystanym w pracy był skaningowy mikroskop elektronowy *Phenom XL* wraz ze środowiskiem programistycznym *Phenom Programming Interface*, który umożliwił uzyskanie pełnoekranowego obrazu SEM. Badania przeprowadzono metodą rentgenowskiej spektrometrii z dyspersją energii (*ang. Energy Dispersive Spectroscopy, EDS*). Oprogramowanie *Element Identification* zawiera prosty w obsłudze interfejs użytkownika, którego zadaniem jest wskazanie punktu na obrazie, który ma zostać poddany analizie. Widok mikroskopu elektronowego przedstawiono na rysunku 27. Obserwacji dokonano dla zakresu powiększeń 1000x do 12 000x. Badania ukierunkowane były wykonaniem zarówno rozpoznania jakie fazy międzymetaliczne występują w obszarach połączeń warstw kompozytu jak również dokonaniem oceny trwałości i jakości połączeń.

Badania te przeprowadzono zarówno na próbkach po bezpośrednim połączeniu materiałów stanowiących kompozyt jak również po kolejnych etapach procesu walcowania.



Rys. 27. Mikroskop elektronowy Phenom XL wraz z zestawem komputerowym.

Skaningowa mikroskopia elektronowa to podstawowa metoda badawcza ciała stałego, która polega na skanowaniu powierzchni próbki nanometrową wiązką elektronów, która jest uformowana przez elektronowo-optyczny układ mikroskopu. Odchylenie wiązki odbywa się przy użyciu cewek. Sygnał z powierzchni próbki dociera do detektora, którego najważniejszymi częściami są scyntylator i fotopowielacz. Scyntylator przekształca energię elektronów wtórnych w impulsy świetlne, które w dalszej kolejności są wzmacniane przez fotopowielacz. Pochodzący od detektora sygnał steruje jasnością obrazu powstającego na monitorze. Zdolność rozdzielcza jest parametrem, który charakteryzuje właściwości skaningowego mikroskopu elektronowego SEM i zależy od konstrukcji mikroskopu oraz od konstrukcji mikroskopu oraz rodzaju sygnału wykorzystanego do wytworzenia obrazu. Obraz, który powstaje nie jest obrazem rzeczywistym, lecz powstaje w wyniku oddziaływań elektronów z powierzchnią badanej próbki.

W metodzie EDS uzyskiwane jest widmo z wybranego badanego obszaru lub punktu próbki. Spektrum jest wyskalowane w keV na osi odciętych i liczbą impulsów na osi rzędnych. Linie przewyższające tło tworzą tzw. Piki. Analiza jakościowa polega na identyfikacji występujących linii spektralnych i przypisaniu ich poszczególnym pierwiastkom. Analiza ilościowa wykorzystuje zależność liczby emitowanych impulsów charakterystycznych promieniowania rentgenowskiego pierwiastka od zawartości pierwiastka w analizowanej próbce.

Na podstawie analizy składu chemicznego dokonana zostanie identyfikacja faz międzymetalicznych występujących w obszarach połączeń.

3.3. Badania własne

3.3.1. Makro i mikrostruktura kompozytów warstwowych po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego

Pierwszym etapem wytwarzania kompozytów warstwowych było połączenie materiałów wchodzących w jego późniejszy skład. W celu przeprowadzenia wstępnej oceny jakości obszarów połączeń AlMg5+Al oraz Al+M1E przeprowadzono badania makroskopowe i dokonano obserwacji zarówno okiem nieuzbrojonym jak i przy zastosowaniu makroskopu. Na rysunku 28 przedstawiono widok reprezentacyjnej próbki wyciętej z arkusza bezpośrednio po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego.



Rys. 28. Widok kompozytu warstwowego po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego

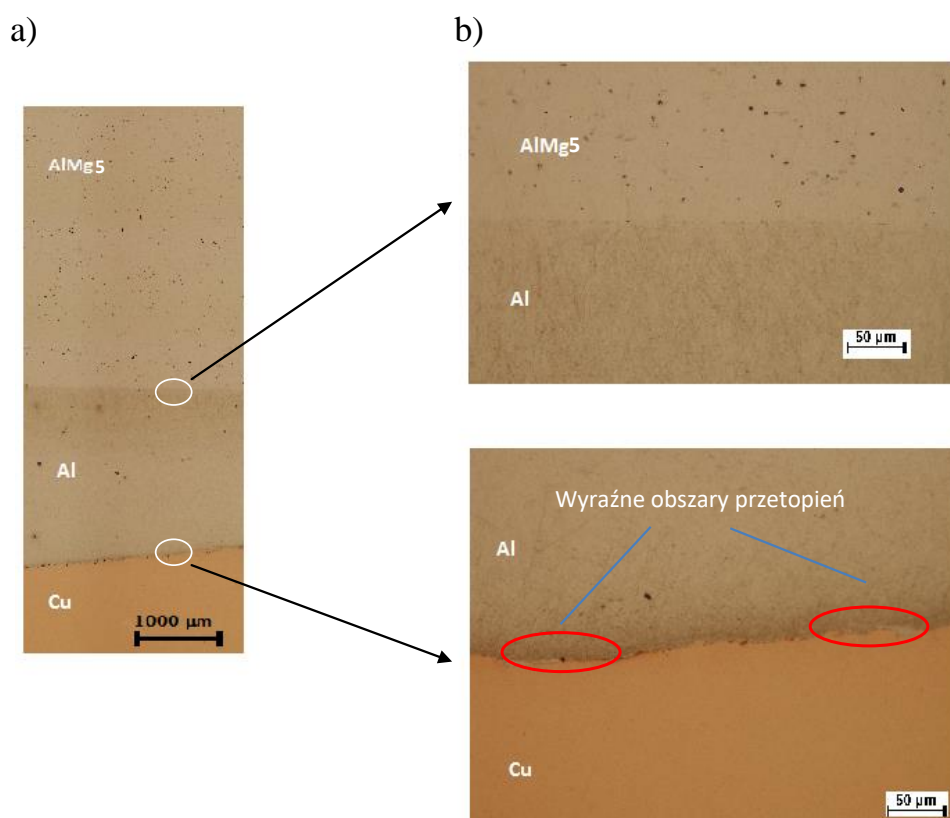
Badania wstępne posłużyły jako kwalifikujące do dalszego procesu wytwarzania – procesowi asymetrycznego walcowania kompozytów warstwowych. Około 10% próbek wykazywały naderwania i pęknięcia w obszarze połączenia warstw Al+M1E. Próbki, dla których zaobserwowano wady w obszarach połączeń były wycięte z tzw. „marginesów” połączonego arkusza. Dlatego przed przystąpieniem do badań z połączonych arkuszy zostały odcięte krawędzie boczne, gdzie występowało największe nagromadzenie wad w postaci niepołączeń warstw Al i M1E. Badania prowadzono dla próbek, które po wstępnej analizie podobnie jak próbka przedstawiona na rysunku 28 nie wykazywały rozwarstwień, podczas obserwacji okiem nieuzbrojonym.

Na rysunku 29 przedstawiono reprezentatywną próbkę po bezpośrednim połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego arkusza AlMg5+Al+M1E. Przeprowadzone obserwacje pozwoliły stwierdzić, że obszar połączenia warstw M1E+Al jest lekko pofalowany i po wstępnych obserwacji można było zauważyć występowanie obszarów, które mogły powstać w postaci mieszanin łączonych metali. Dlatego w dalszej części pracy badawczej przeprowadzono dokładniejsze badania wykorzystujące mikroskopię optyczną. Obszar połączenia warstw Al+AlMg5 jest obszarem prawie, że płaskim bez pofalowań. Na podstawie badań makroskopowych nie stwierdzono w tym obszarze warstwy pośredniej.



Rys. 29. Widok próbki trójwarstwowej po bezpośrednim połączeniu dla powiększenia 25x

Obszar połączenia kompozytów warstwowych wymaga geometrycznej i strukturalnej analizy budowy połączenia, które zależy przede wszystkim od rodzaju zgrzewanych metali, parametrów procesu łączenia oraz grubości łączonych warstw. Na rysunku 30 przedstawiono obszary połączenia kompozytu warstwowego po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego.



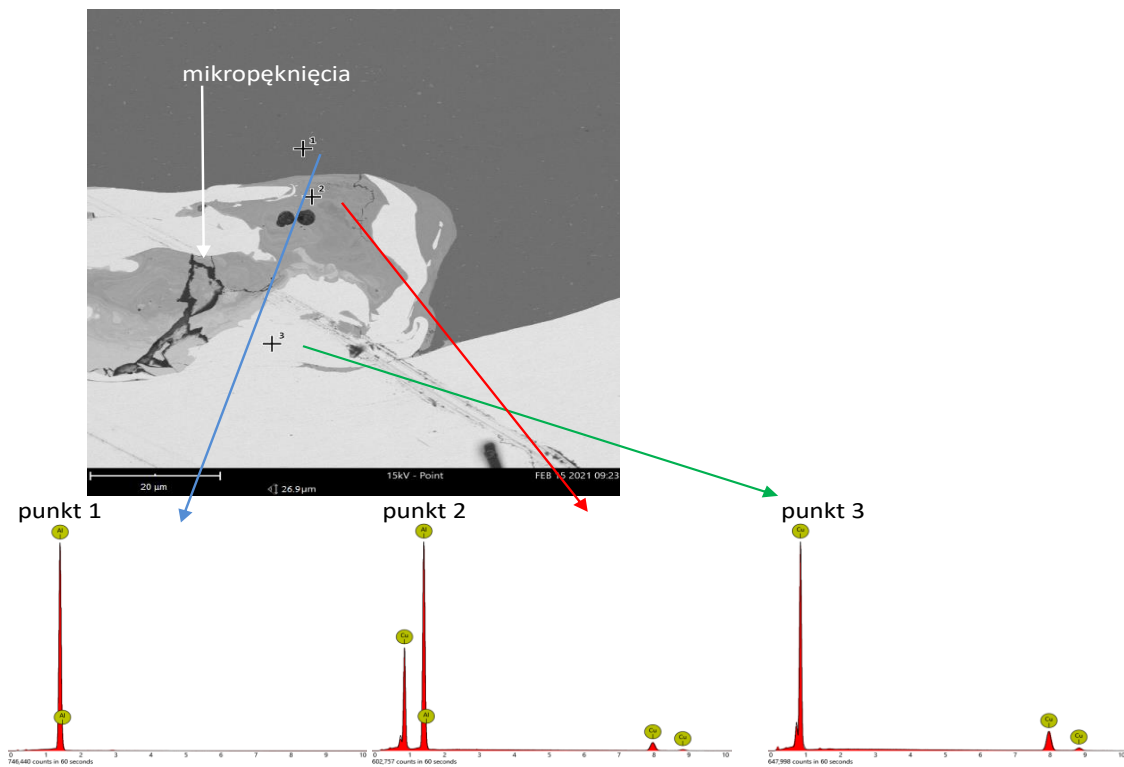
Rys. 30. Widok obszarów połączeń warstw po procesie łączenia metodą zgrzewania wybuchowego a) cały kompozyt warstwowy 50x, b) obszary połączeń dla powiększenia 200x

Wyniki badań przedstawione na rysunku 30 wyraźnie uwidocznily występowanie w obszarze połączenia warstw Al i M1E faz międzymetalicznych. Ponieważ na podstawie dokonanego przeglądu literatury jak i również własnych spostrzeżeń, dość powszechnie wiadomo, że występowanie faz międzymetalicznych w obszarze połączenia warstw często prowadzi do powstawania mikropęknięć oraz naderwań. Przed przystąpieniem do dalszych badań związanych z asymetrycznym walcowaniem blach z kompozytów warstwowych konieczne było przeprowadzenie identyfikacji faz międzymetalicznych. W tym celu wykonano badania scanningowe, które pozwoliły na dokonanie analizy jakości obszarów złączy warstw Al-Cu oraz AlMg5-Al.

W układzie Al-Cu mogą występować stref GP będące skupiskami atomów rozproszonych w przesyconym roztworze, które są całkowicie koherentne z osnową. Dlatego można spodziewać się, że w obszarach przetopień powstałych podczas zgrzewania mogą pojawić się różne mieszaniny międzymetaliczne o różnym składzie chemicznym. Na ich powstawanie przede wszystkim mają wpływ temperatura oraz przebieg chłodzenia. Od ich ilości zależą

właściwości funkcjonalne kompozytowych wyrobów warstwowych. W celu przeprowadzono badania mikroskopii skaningowej obszarów połączenia warstw Al-Cu i Al-AlMg5.

Na rysunkach 31 do 33 przedstawiono wyniki badań skaningowej mikroskopii elektronowej obszaru połączenia Al-Cu. W wyniku przeprowadzonych badań dokonano identyfikacji powstałych faz międzymetalicznych powstałych po procesie zgrzewania wybuchowego.

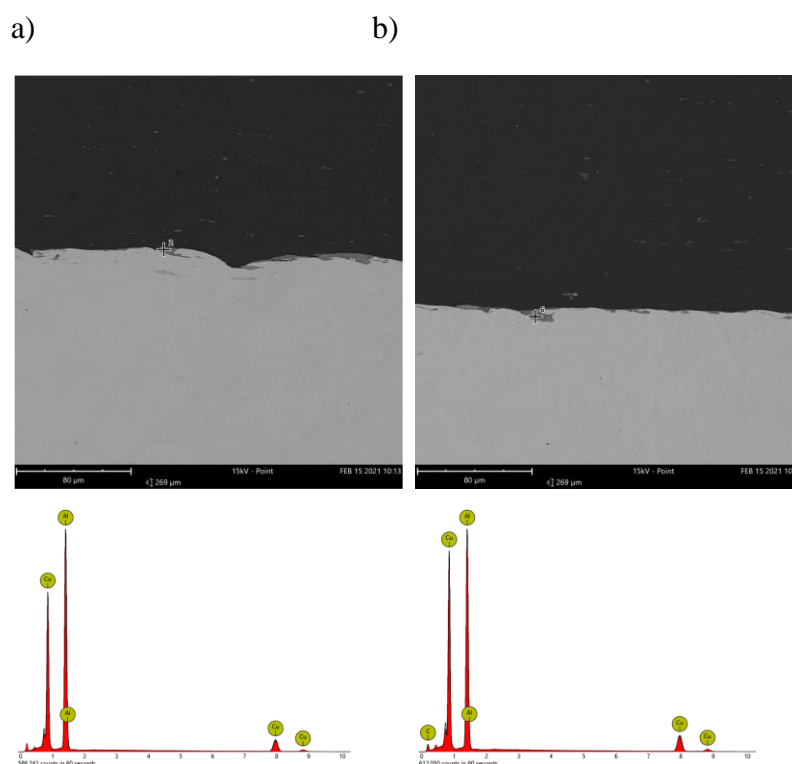


Pierwiastek	Udział pierwiastka, % atomowe	Udział pierwiastka, % wagowe	Nr punktu pomiaru
Al	100	100	1
Al	82,69	67,10	2
Cu	17,31	32,90	
Cu	100	100	3

Rys. 31. Wyniki badań mikroskopii skaningowej obszaru Al-M1E krawędzi bocznej

Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano identyfikacji faz międzymetalicznych powstałych podczas łączenia metodą zgrzewania wybuchowego. Przeprowadzone badania ujawniły występowanie w obszarze łącza fazy Al_2Cu nazwana fazą Θ . Faza ta krystalizuje w układzie tetragonalnym o parametrach sieciowych: $a=0,606nm$ oraz $c=0,487nm$. Powstaje w wyniku przemiany perytektycznej w temperaturze około $590^\circ C$. Faza ta jest składnikiem

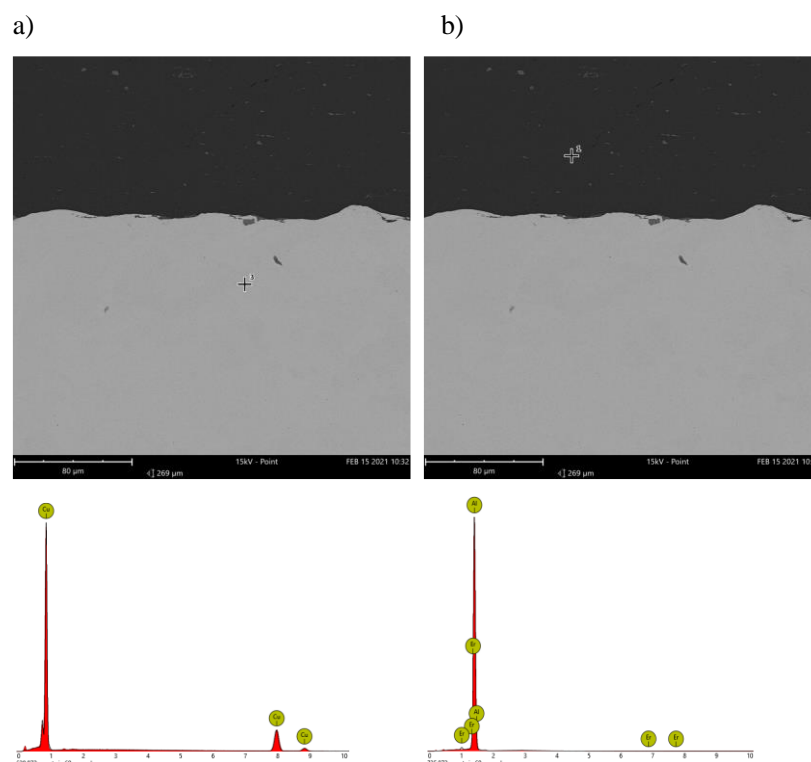
kruchym i dlatego jest składnikiem niepożądanym w obszarze połączenia warstw Al-Cu. Na rysunku 31 przedstawiono nielicznie występujące wyraźne mikropęknięcia w obszarze fazy międzymetalicznej. Występowały one stosunkowo nielicznie w miejscach występowania wyraźnych obszarów przetopień. Najprawdopodobniej mikropęknięcia powstały w momencie stygnięcia materiału po przejściu fali detonacyjnej. Mikropęknięcia mogą podczas procesu walcowania doprowadzić do powstania nieciągłości, a nawet rozwarstwienia połączonych komponentów kompozytu. Dlatego krawędzie boczne po zgrzewaniu wybuchowym zaleca się obciąć, a do procesu walcowania wprowadzić materiał o minimalnej ilości ewentualnie występujących faz międzymetalicznych. Na krawędziach bocznych zaobserwowano też występowanie innych faz przedstawionych na rysunku 32.



Pierwiastek	Udział pierwiastka, % atomowe	Udział pierwiastka, % wagowe	Nr punktu pomiaru
Al	78,55	60,87	2
Cu	21,45	39,13	
Al	78,55	60,87	6
Cu	21,45	39,13	
C	3,07	1,03	

Rys. 32. Wyniki badań mikroskopii scanningowej obszaru Al1050-M1E: a) faza γ_1 , b) faza β

Na rysunku 32 przedstawiono widok obszaru złącza warstw Al-M1E, który został utworzony podczas zgrzewania wybuchowego. Analizowany obszar jest typowym połączeniem powstającym podczas łączenia metali metodą zgrzewania wybuchowego. Kształt tego obszaru można opisać jako nieregularny i falisty. Na rysunkach 32a i 32b zaobserwowano obszary przetopień powstałych podczas zgrzewania wybuchowego. Dokonano identyfikacji występujących w obszarze połączenia faz międzymetalicznych. Na rysunku 32a uwidoczniło występowanie fazy β , która jest roztworem stałym na osnowie Cu_3Al . Krystalizuje ona w układzie regularnym A2 o parametrze sieci 0,295nm. Faza ta w zależności od składu chemicznego wynikającego z rozpuszczalności miedzi i aluminium podlega rozpadowi na mieszaninę faz α γ_1 . Kolejną fazą międzymetaliczną, której występowanie w obszarze złącza określono na podstawie składu chemicznego była faza ζ_2 rysunek 32b. Faza ta krystalizuje w układzie jednoskośnym o stałych sieciowych $a=0,707\text{nm}$, $b=0,408\text{nm}$ oraz $c=1.002\text{nm}$. Przedstawione na rysunkach 32a i 32b wyniki badań mikroskopii elektronowej ujawniają występowanie różnych faz międzymetalicznych w obszarze połączenia Al i M1E. Po dokonaniu analizy przeprowadzonych badań stwierdzono, że fazy te występują liczniej w miarę zbliżania się do krawędzi bocznych łączonego arkusza blachy kompozytowej warstwowej. Na potwierdzenie tego stwierdzenia na rysunku 33 przedstawiono wyniki badań mikroskopii scaningowej próbek wyciętych z części środkowej połączonych komponentów kompozytu warstwowego.



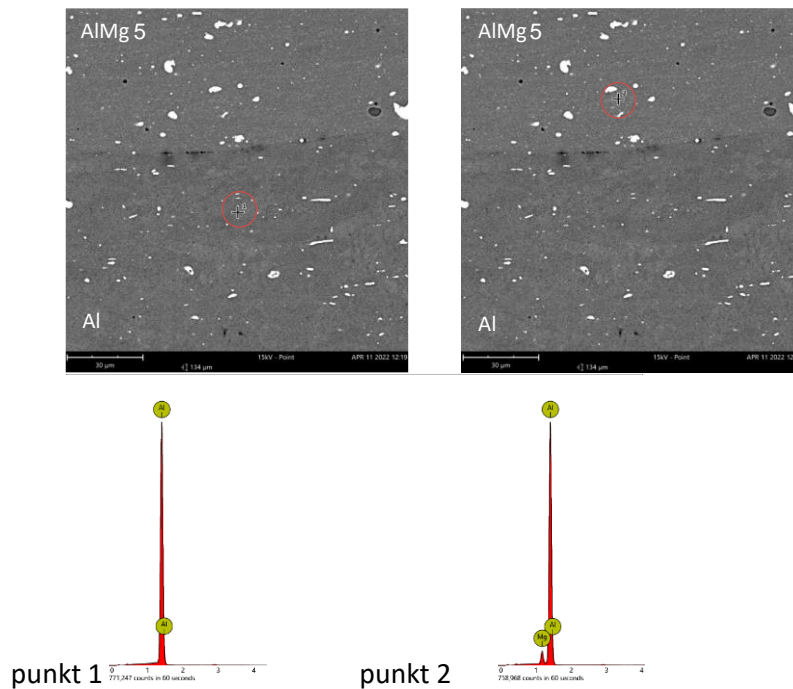
Rys. 33. Wyniki badań mikroskopii scanningowej obszaru Al-Cu, a) pomiar od strony warstwy Al b) pomiar od strony warstwy M1E

Na rysunku 33 przedstawiono obszar połączenia warstw Al oraz M1E dla jednej z próbek pobranych z części środkowej połączonego wybuchem arkusza blachy kompozytowej warstwowej. Wyraźnie obszar połączenia również ma charakter nieregularny i falisty, a ilość przetopień jest znacznie mniejsza niż to miało miejsce dla analizowanych obszarów połączeń próbek pobranych w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi bocznych. Na podstawie przeprowadzonych badań przedstawionych na rysunku 33 nie stwierdzono w obszarze połączenia występowania pęknięć i rozwarstwień.

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie badań drugiego obszaru połączenia kompozytu warstwowego AlMg5+Al. Reprezentatywne wyniki badań przedstawiono na rysunkach 34 i 35.

a)

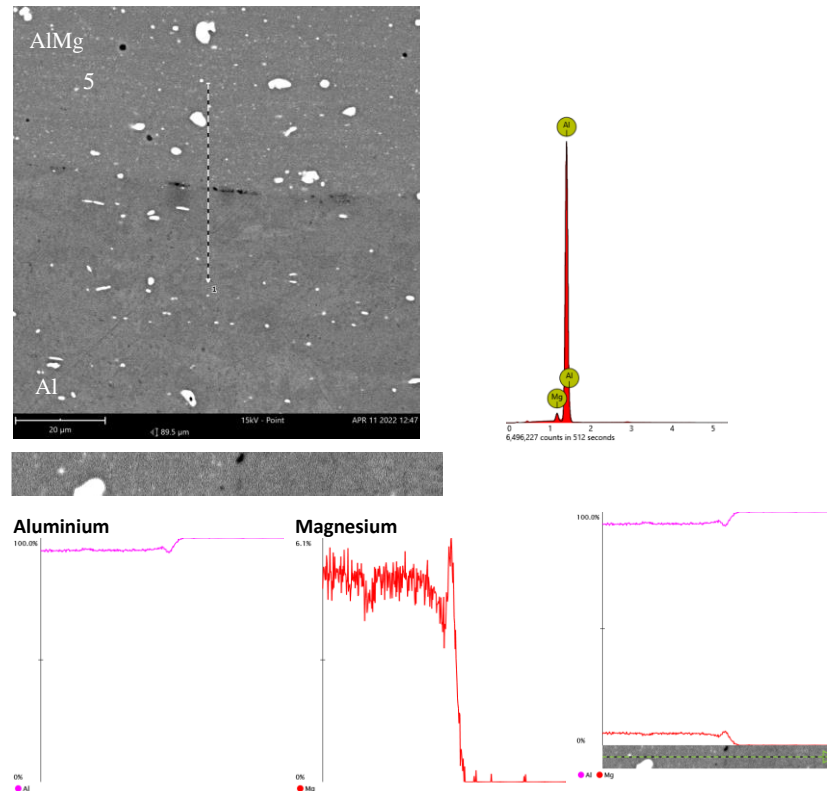
b)



Pierwiastek	Udział pierwiastka, % atomowe	Udział pierwiastka, % wagowe	Nr punktu pomiaru
Al	100	100	1
Cu	94,09	94,64	2
Mg	5,91	5,36	

Rys. 34. Widok obszaru złącza Al1050 oraz AlMg5 a) pomiar punkt 1 warstwa Al, b) pomiar punkt 2 warstwa AlMg5

Na rysunku 34 przedstawiono obszar połączenia Al oraz AlMg5 wraz z punktową analizą składu chemicznego. W obszarze połączenia nie zaobserwowano obszarów przetopień świadczących o występowaniu faz międzymetalicznych. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, że uzyskane połączenie komponentów kompozytu warstwowego zbliżone było do płaskiego bez rozwarstwień i mikropęknięć. Dla potwierdzenia powyższych stwierdzeń wykonano analizę liniową w kilkunastu punktach zarówno dla próbek pobranych z części środkowej jak i zbliżonych do tzw. „marginesu” połączonych arkuszy blach kompozytowych warstwowych. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 35.



Rys. 35 Wyniki liniowej analizy EDS obszaru złącza Al oraz AlMg5

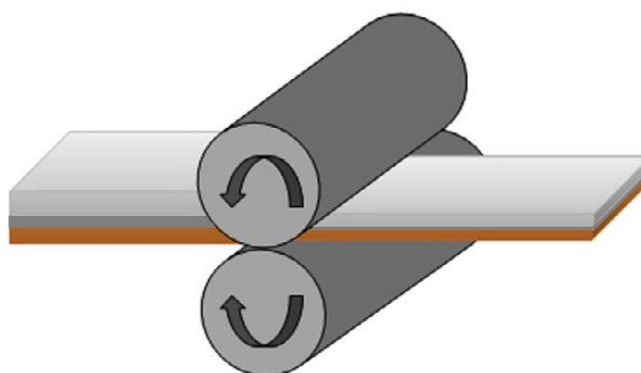
Po przeprowadzeniu analizy obszaru połączenia komponentów kompozytu Al oraz AlMg5 zaobserwowano niewielkie wzbogacenie tej warstwy w aluminium. Nie zaobserwowano wyraźnej warstwy przejściowej. W zdecydowanej większości badanego obszaru połączenia nie zaobserwowano występowania faz międzymetalicznych. Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano pojedyncze i bardzo niewielkie obszary ich występowania. Dlatego przyjęto, że ich występowanie ma znikomą wpływ na trwałość i jakość tego obszaru połączenia, co zostanie przedstawione w dalszej części pracy.

3.3.2. Asymetryczny proces walcowania kompozytów warstwowych

Proces walcowania płaskich kompozytów warstwowych jak już wspomniano w przeglądzie literatury, cechuje duża nierównomierność odkształcenia warstw pasm na jego wysokości. Zjawisko to jest przyczyną powstawania wielu wad, m. in.: wygięcia walcowanych blach kompozytowych warstwowych, które może doprowadzić do uszkodzenia walcarki bądź jej osprzętu. Dlatego do sterowania krzywizną kompozytowych blach warstwowych do procesu

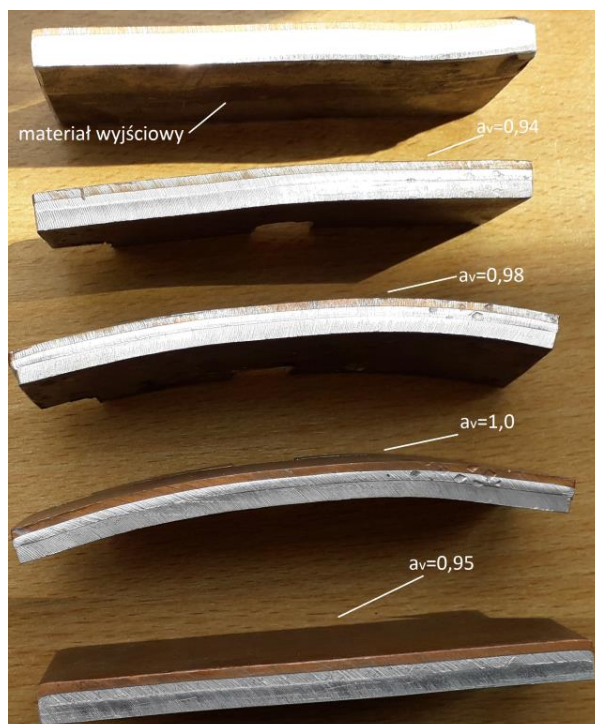
walcowania wprowadza się asymetrię kinematyczną ASK. Odpowiednio dobrany schemat odkształceń oraz zróżnicowanie prędkości obwodowych walców roboczych pozwala na uzyskanie zarówno prostej blach kompozytowej warstwowej jak i o dobrej jakości obszaru złącza porównywalnej ze wsadem uzyskanym po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego.

W podrozdziale zamieszczono reprezentatywne wyniki badań związanych z realizacją asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych przedstawionych na rysunku 36 realizowanego według II wariantów zadawanych wartości gniołów względnych.



Rys. 36. Widok procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych AlMg5-Al-M1E dla warunków optymalnych procesu

W tabeli 2 przedstawiono parametry oraz wyniki pomiarów dla pierwszego z 2 wariantów walcowanych pasm kompozytowych warstwowych AlMg5-Al-M1E. W ramach badań określono wpływ asymetrii kinetycznej na krzywiznę kompozytowych pasm warstwowych oraz rozkłady sił nacisku metalu na walce. Na rysunku 37 przedstawiono widok materiału wyjściowego oraz próbek po asymetrycznym procesie walcowania.



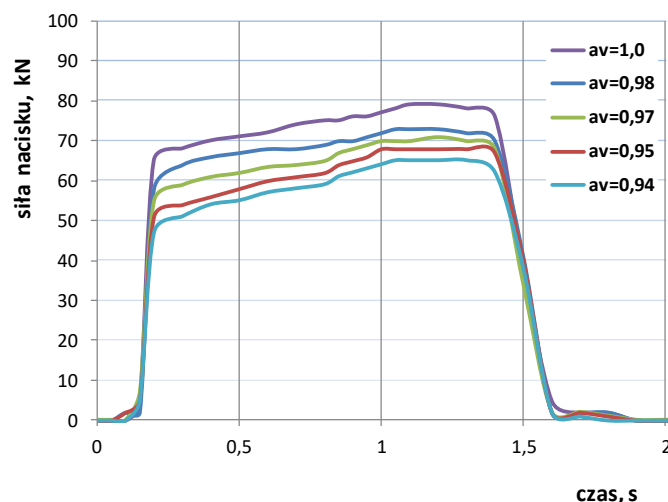
Rys. 37. Widok kompozytowych próbek po pierwszym asymetrycznym przepuszczeniu walcowniczym dla gniotu względnego $\varepsilon=12\%$

Przedstawiony na rysunku 37 widok próbek dla różnych wartości współczynników asymetrii pozwalają na stwierdzenie, że dla asymetrii $a_v=0,95$ uzyskano prostą blachę kompozytową warstwową. W przypadku uzyskania wygiętych pasm po walcowaniu można zauważyć wyraźne wypływanie warstw Al świadczące o nierównomierności odkształcenia warstw na wysokości kompozytowego pasma. Natomiast dla asymetrii $a_v=0,95$ nierównomierność odkształcenia warstw jest najmniejsza, co potwierdzają zamieszczone w tabeli 2 wyniki pomiarów.

Tabela.2. Parametry asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych AlMg5-Al-Cu oraz wyniki pomiarów –wariant I

Nr próbki	ϵ_c %	H_c mm	H_{AlMg} mm	ϵ_{AlMg} %	H_{Al} mm	ϵ_{Al} %	H_{MIE} mm	ϵ_{Cu} %	1/R 1/m	a_v	V_g mm/s
											V_d mm/s
0	-	10	6	-	2	-	2	-	-	-	-
1	12	8,8	5,34	11	1,71	14,5	1,75	12,5	5,02	1,0	87
											87
2	12	8,8	5,32	11,33	1,72	14	1,76	12	2,51	0,98	85,26
											87
3	12	8,8	5,30	11,67	1,72	14	1,78	11	1,42	0,97	84,39
											87
4	12	8,8	5,30	11,67	1,71	14,5	1,79	10,5	0,107	0,95	82,65
											87
5	12	8,8	5,28	12,0	1,71	14,5	1,81	9,5	0,49	0,94	81,78
											87

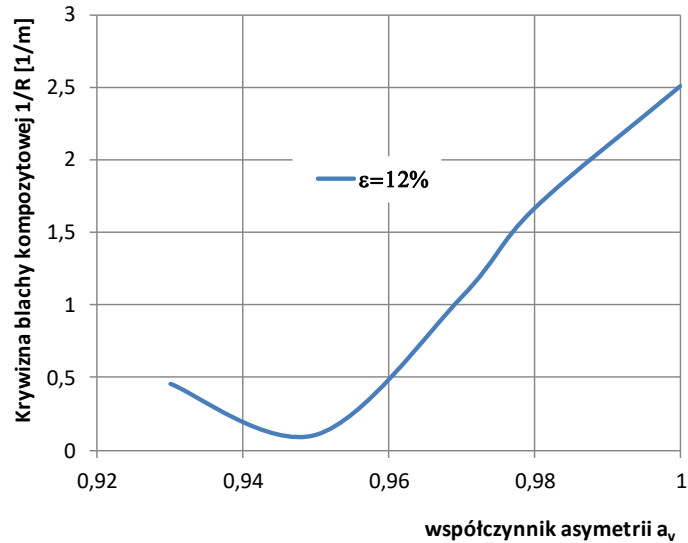
W tabeli 2 przedstawiono parametry geometryczne trójwarstwowych blach kompozytowych walcowanych asymetrycznie dla różnych wartości współczynników asymetrii. Proces walcowania realizowano na blachach kompozytowych, dla których warstwy w procesie walcowania ułożone były zgodnie z rysunkiem 22. Podczas procesu walcowania dokonywano pomiaru sił nacisku metalu na walce. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 38.



Rys. 38. Widok zmian sił nacisku w asymetrycznym procesie walcowania blach kompozytowych dla gniotu względnego $\varepsilon=12\%$

Przedstawione na rysunku 38 wyniki badań pozwalają na sformułowanie stwierdzenia, że wprowadzenie asymetrii kinetycznej do procesu walcowania przyczynia się do obniżeniu wartości sił nacisku metalu na walce. Uzyskane rozkłady sił nacisku metalu na walce potwierdzają dla kolejnych wartości współczynników asymetrii uzyskują coraz mniejsze wartości. Zjawisko to zwłaszcza dla procesu walcowania metalowych kompozytów warstwowych jest szczególnie ważne ze względu na silną wrażliwość faz międzymetalicznych na kruche pęknięcie prowadzące do mikropęknięć naderwań czy też całkowitego rozwarstwienia. Pojawienie się wyżej wymienionych wad w obszarze połączenia będzie z pewnością miało wpływ na trwałość i obniżenie wytrzymałości obszaru połączenia.

Kolejnym ważnym czynnikiem w kształtowaniu plastycznym metalowych kompozytów warstwowych jest wspomniane już nierównomierne odkształcenie warstw będące przyczyną wyginania się kompozytowego pasma po wyjściu z kotliny walcowniczej. Na rysunku 39 przedstawiono przebieg zmian krzywizny kompozytu warstwowego.



Rys. 39. Przebieg zmian krzywizny kompozytowych blach w asymetrycznym procesie walcowania

Uzyskane wyniki pomiarów krzywizny metalowego kompozytu warstwowego przedstawione na rysunku 39 uwidaczniają ścisłą zależność wygięcia kompozytowych pasm od zastosowanej wartości współczynnika asymetrii prędkości obwodowych walców roboczych. W przypadku uzyskania kompozytowych blach warstwowch o dużym wygięciu, dalsza realizacja procesu wytwarzania wymaga dodatkowej operacji technologicznej polegającej na przeprowadzeniu prostowania pasm. Ze względów ekonomicznych rozwiązanie to jest niekorzystne. Wprowadza dodatkowe koszty operacyjne oraz wydłuża czas procesu wytwarzania, co negatywnie wpływa na jego wydajność.

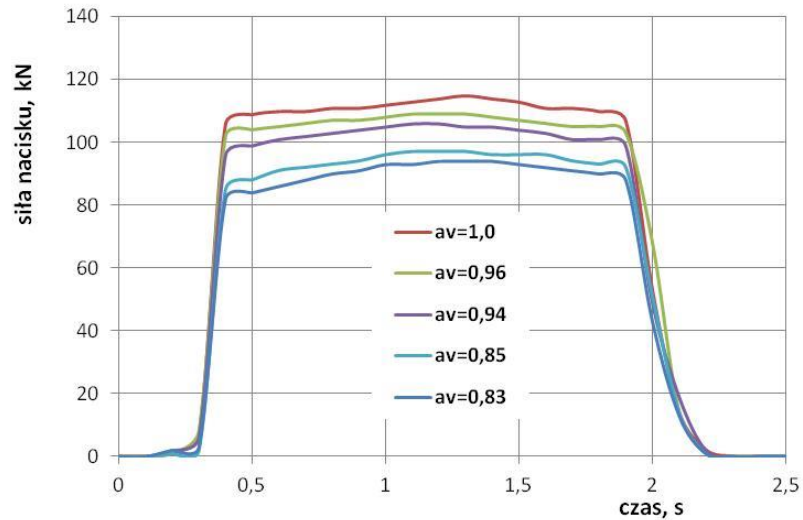
W tabeli 3 przedstawiono zastosowane parametry procesu oraz wyniki pomiarów dla drugiego przepustu pierwszego wariantu. Zamieszczone w tabeli 3 wartości odkształceń są sumą ich wartości dla pierwszego i drugiego przepustu.

Tabela 3. Parametry asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych AlMg5-Al-Cu – drugi przepust, wariant I

Nr próbki	ϵ_c %	H_c	H_{AlMg} mm	ϵ_{AlMg} %	H_{Al} mm	ϵ_{Al} %	H_{Cu} mm	ϵ_{Cu} %	1/R 1/m	a_v	V_g mm/s
											V_d mm/s
0	-	10	6	-	2	-	2	-	-	-	-
1	27	7,3	4,54	24,33	1,29	35,5	1,47	26,5	5,54	1,0	87
											87
2	27	7,3	4,52	24,83	1,29	35,5	1,49	25,5	3,57	0,96	83,52
											87
3	27	7,3	4,51	25,17	1,30	35,0	1,49	25,5	2,11	0,94	81,78
											87
4	27	7,3	4,50	25,0	1,30	35,0	1,50	25,0	0,11	0,85	73,95
											87
5	27	7,3	4,48	25,33	1,30	35,0	1,51	24,5	0,53	0,83	72,21
											87

Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów dochodzimy do analogicznych stwierdzeń, że asymetria kinetyczna pozwala na uzyskanie prostej blachy kompozytowej warstwowej po procesie walcowania. Dokonując analizy wyników należy zwrócić uwagę, że dla drugiego przepustu osiągnięcie prostej blachy było możliwe dla wartości $a_v=0,85$. Wartość ta oznacza wprowadzenie większego zróżnicowania prędkości obwodowych walców roboczych w drugim przepuszczeniu. Na wartość optymalną współczynnika w tym przypadku miały wpływ zarówno zwiększenie wartości odkształcenia w drugim przepuszczeniu jak również zjawisko umocnienia komponentów blach kompozytowych warstwowych.

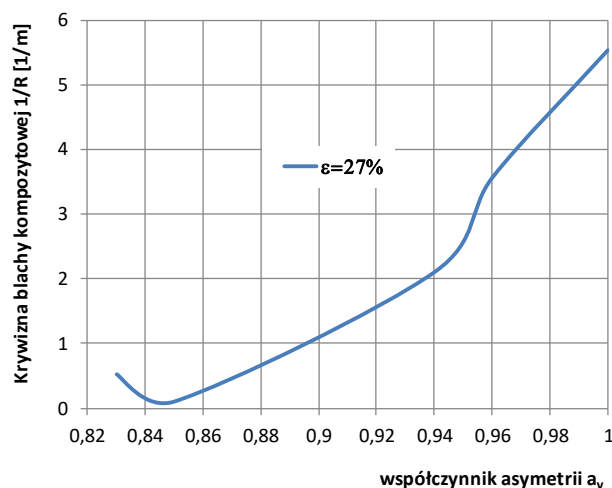
Rysunek 40 przedstawia rozkłady sił nacisku metalu na walce dla drugiego przepustu pierwszego wariantu próbek poddanych procesowi walcowania.



Rys. 40 Przebieg zmian sił nacisku metalu na walce podczas asymetrycznego procesu walcowania – przepust II

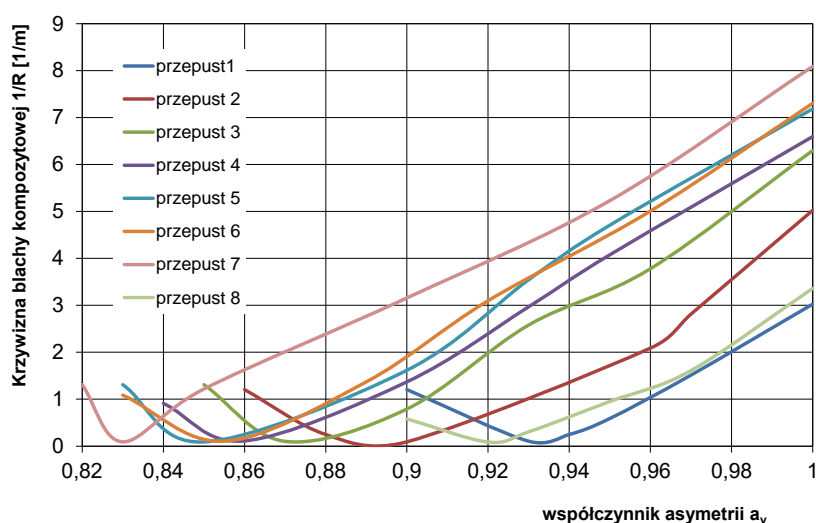
Przedstawione na rysunku 40 rozkłady sił nacisku metalu na walce analogicznie obrazują zależność rozkładów sił nacisku metalu na walce w zależności od wprowadzonej wartości współczynników asymetrii a_v .

Przebieg zmian krzywizny blach kompozytowych warstwowych dla drugiego przepustu wariantu I przedstawiono na rysunku 41.



Rys. 41. Wykres zmian krzywizny podczas asymetrycznego walcowania blach kompozytowych –przepust II, wariant I

Przedstawione na rysunku 41 wyniki przebiegu zmian krzywizn blach kompozytowych warstwowych jest analogiczny do pierwszego przepustu. Po zróżnicowaniu prędkości obwodowych walców roboczych (wartości współczynników asymetrii a_v) dla kolejnych przepustów krzywizna pasma maleje. W zakresie asymetrii $a_v=1,0 - 0,85$ obserwuje się stopniowe zmniejszenie krzywizny blach. Natomiast zmniejszanie wartości współczynnika a_v w kolejnych przepustach skutkowało wygięciem blachy w kierunku przeciwnym. Na rysunku 42 przedstawiono wartości bezwzględne krzywizn blach kompozytowych warstwowych.



Rys. 42. Przebieg zmian krzywizny walcowanego kompozytu warstwowego AlMg5-Al-Cu dla kolejnych przepustów II wariantu walcowanych próbek

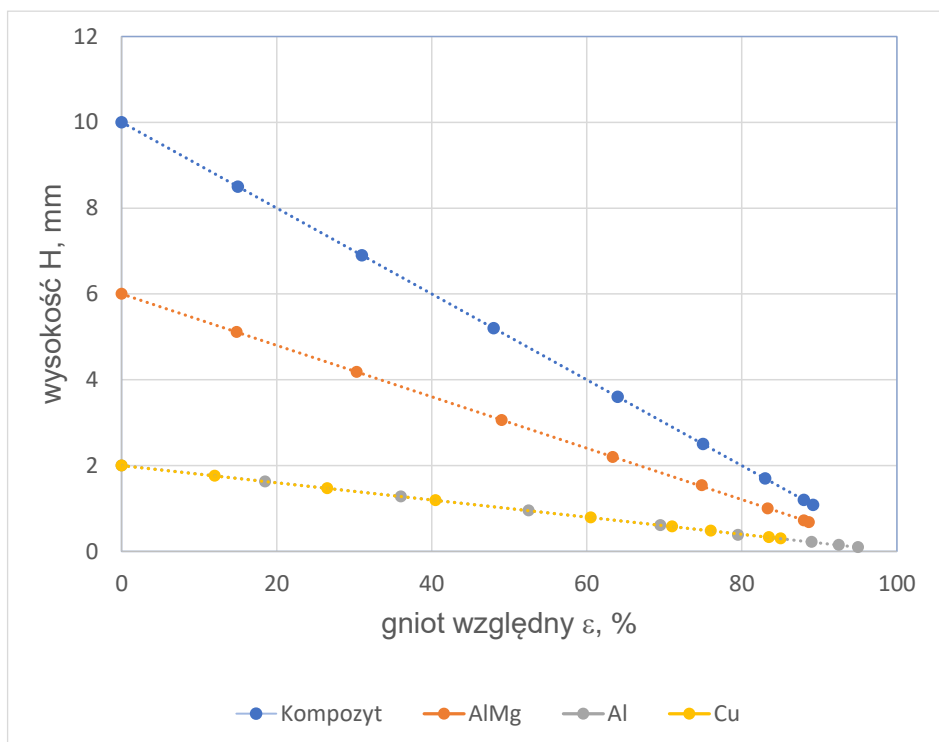
Przedstawione na rysunku 42 wyniki badań krzywizny blach kompozytowych warstwowych dla II wariantu próbek wykazują jej zależność od zastosowanych wartości współczynników asymetrii a_v oraz parametrów prowadzenia procesu walcowania. Podczas procesu kształtowania plastycznego, próbki wygięte poddawano prostowaniu zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 26. Dla II wariantu walcowania blach kompozytowych warstwowych realizacja procesu prowadzona była dla optymalnych warunków procesu. Przeprowadzony proces był powtórzony dla trzech kolejnych blach kompozytowych warstwowych, a uzyskane wyniki badań były nie wykazywały różnic. Miało to na celu wykazanie jak proces walcowania wpływa na jakość i trwałość obszarów połączeń. W ten sposób określono czy badany materiał będzie posiadał właściwości funkcjonalne umożliwiające jego zastosowanie w praktyce przemysłowej.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań dla optymalne warunków realizacji procesu walcowania dla 8 przepustów drugiego wariantu kształtowanych plastycznie próbek kompozytowych warstwowych.

Tabela 4. Parametry technologiczne asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych dla optymalnych wartości współczynnika asymetrii a_v wariant II

Nr przep.	ϵ_c %	H_c	H_{AlMg} mm	ϵ_{AlMg} %	H_{Al} mm	ϵ_{Al} %	H_{Cu} mm	ϵ_{Cu} %	$1/R_{opt}$ 1/m	a_{vopt}	V_g mm/s
											V_d mm/s
0	-	10	6	-	2	-	2	-	-	-	-
											-
1	15	8,5	5,11	14,83	1,63	18,5	1,76	12	0,104	0,93	80,91
											87
2	31	6,9	4,18	30,3	1,28	36	1,47	26,5	0,0912	0,90	78,3
											87
3	48	5,2	3,06	49,0	0,95	52,5	1,19	40,5	0,102	0,87	75,69
											87
4	64	3,6	2,2	63,33	0,61	69,5	0,79	60,5	0,111	0,86	74,82
											87
5	75	2,5	1,54	74,83	0,38	79,5	0,58	71	0,090	0,855	74,39
											87
6	83	1,7	1,0	83,33	0,22	89	0,48	76	0,106	0,85	73,95
											87
7	88	1,2	0,72	88	0,15	92,5	0,33	83,5	0,11	0,83	72,21
											87
8	89,2	1,08	0,68	88,66	0,10	95	0,30	85	0,087	0,92	80,04
											87

Na rysunku 43 przedstawiono przebieg zmian grubości kompozytu oraz warstw stanowiących kompozyt warstwowy dla II wariantu próbek.



Rys. 43. Wykres zmian grubości kompozytu warstwowego oraz warstw wchodzących w jego skład podczas procesu walcowania dla optymalnych wartości współczynnika asymetrii a_v II wariantu

Wyniki pomiaru grubości warstw po kolejnych przepustach procesu walcowania przedstawione na rysunku 43. Są to wyniki dla optymalnych warunków prowadzenia procesu walcowania. Na podstawie rysunku 43 można stwierdzić, że warstwy kompozytu ulegają różnym wartościom odkształceń w procesie walcowania. Wyraźnie większym odkształceniom ulega warstwa Al, dla której dokładny pomiar grubości już po czwartym przepuszczeniu wymaga stosowania badań makroskopowych. Natomiast przebieg zmian grubości warstw AlMg i Cu jest zdecydowanie równomierniejszy i proporcjonalny do zadanych wartości gniołów względnych. W przypadku realizacji procesu walcowania blach kompozytowych warstwowanych dla wartości współczynników asymetrii innych niż optymalnych zaobserwowano wzrost nierównomierności odkształcenia warstw blach kompozytowych, co potwierdzone jest również w literaturze przedmiotu [44-47]

3.3.3. Makro i mikrostruktura kompozytów warstwowych po asymetrycznym procesie walcowania

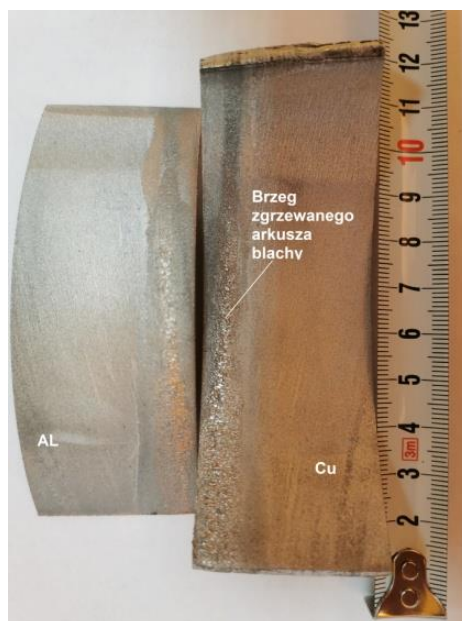
Prowadzenie asymetrycznego procesu walcowania kompozytów warstwowych wymaga ciągłej obserwacji obszarów połączenia warstw. Zarówno kształt geometryczny jak i własności funkcjonalne wytwarzanych blach kompozytowych mają decydujący wpływ na jakość gotowych wyrobów.

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji po połączeniu kompozytu warstwowego metodą zgrzewania wybuchowego można stwierdzić, że krawędzie będące marginesami łączonych arkuszy są najbardziej narażone na pęknięcia i mikropęknięcia. Dlatego zaleca się ich odcinanie przed przystąpieniem do procesu kształtowania plastycznego.

Obszary połączeń kompozytowych blach warstwowych wymagają geometrycznej i strukturalnej analizy budowy połączenia. Na jakość i trwałość połączenia mają wpływ zarówno metoda, rodzaju zgrzewanych materiałów, parametrów procesu łączenia oraz grubości spajanych elementów. W niniejszym podrozdziale analizie poddano zarówno ich trwałość jak i przebieg zmian zachodzących w obszarach połączeń podczas plastycznego kształtowania w asymetrycznym procesie walcowania. Niewłaściwy dobór materiału oraz parametry procesu walcowania prowadzić mogą do powstawania wad, które praktycznie dyskwalifikują kompozytowy wyrób. Poniżej zostaną przedstawione i omówione wady oraz przyczyny ich powstania podczas realizacji procesu walcowania.

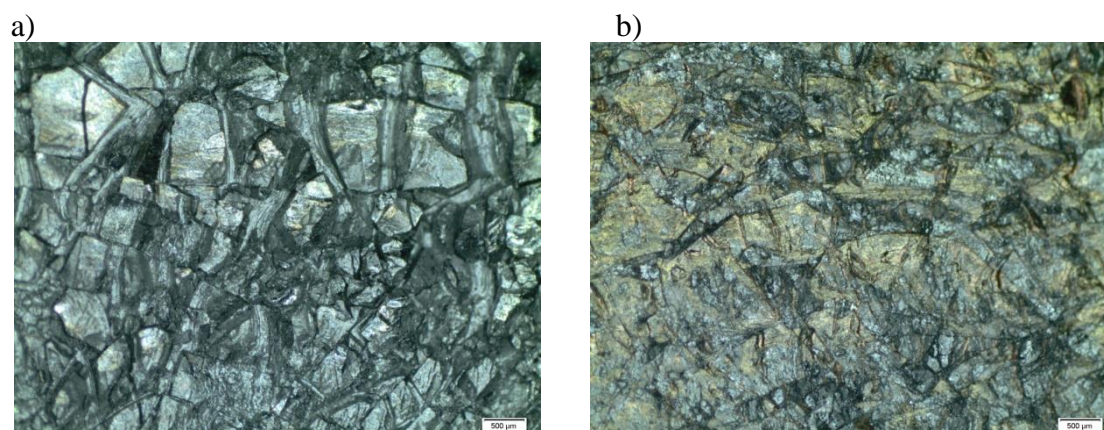
- Wady pojawiające się w obszarach połączeń

Pęknięcia i mikropęknięcia są często początkiem rozwarstwienia walcowanych wyrobów kompozytowych warstwowych. W ramach badań wstępnych przeprowadzono proces walcowania próbki pobranej z marginesu połączonego arkusza. Próbka poddana została plastycznemu kształtowaniu w procesie walcowania z gniosem $\varepsilon=12\%$ zgodnie z wariantem I. W pierwszym przepuście nastąpiło rozwarstwienie w obszarze połączenia warstw Al-M1E, co przedstawiono na rysunku 44.



Rys. 44. Widok rozwarstwionej próbki po pierwszym przepięciu dla $\varepsilon=12\%$ -wariant I

Powierzchnie próbki rozwarstwionej poddano badaniom makroskopowym, co przedstawiono na rysunku 45.



Rys. 45. Widok obszaru rozwarstwienia z wyraźnymi występowaniem faz międzymetalicznych

a) warstwa Al, b) warstwa Cu

Po dokonaniu analizy obszaru połączenia zarówno od strony warstwy Al rysunek 45a, jak również od strony warstwy Cu rysunek 45b, wyraźnie widoczne są obszary przetopień świadczące o obecności faz międzymetalicznych. Jak już wspomniano fazy te są kruche i twarde. Dokonując analizy można stwierdzić, że połączenie zarówno sił nacisku oraz naprężeń w obszarze połączenia związanych z nierównomiernością odkształcenia warstw doszło do ich kruchego pęknięcia i w końcowym etapie rozwarstwienia.

Na rysunku 46 przedstawiono zaobserwowane częściowe rozwarstwienie próbki poddanej procesowi walcowania według wariantu II, dla gniotu względnego $\varepsilon=15\%$.

Rozwarstwienie



Rys. 46. Wyraźne powstawanie rozwarstwienia materiału próbki walcowanej dla gniotu względnego $\varepsilon=15\%$ - wariant II

Przedstawione na rysunku 46 częściowe rozwarstwienie pasma kompozytowego warstwowego było spowodowane również występowaniem w tym obszarze nagromadzenia obszarów faz międzymetalicznych. Próbka została pobrana zbyt blisko marginesu połączonego arkusza kompozytowego. Podczas drugiego przepustu nastąpiło rozwarstwienie próbki przedstawionej na rysunku 46 w obszarze połączonych warstw Al-Cu. Natomiast w obszarze połączenia warstw Al-ALMg5 wystąpiło tylko częściowe rozwarstwienie w obszarze zaznaczonym na rysunku 46.

Rozwarstwienia i mikropęknięcia zaobserwowano na próbkach wyciętych w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi bocznych łączonych półwyrobów wielowarstwowych, co stanowiło około 5% wszystkich próbek przygotowanych do badań. Dla pozostałych badanych próbek nie zaobserwowano rozwarstwień. Natomiast obserwowano drobne mikropęknięcia w obszarze połączenia Al-Cu. Obszar połączenia warstw Al-ALMg5 zarówno po bezpośrednim połączeniu jak również po procesie walcowania nie wykazywał podatności na powstawanie mikropęknięć czy też naderwań. W dalszej części pracy przedstawiono wpływ asymetrycznego walcowania na obszary połączeń warstw blach kompozytowych warstwowych

- Analiza obszarów połączeń w procesie asymetrycznego walcowania

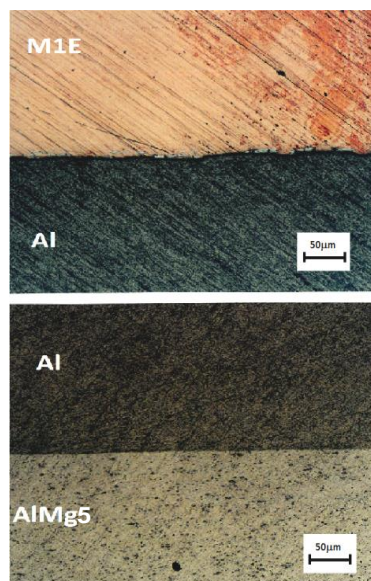
W tej części pracy zostaną przedstawione wyniki badań i analiza trwałości i jakości obszarów połączeń blach kompozytowych warstwowych. Na rysunku 47 przedstawiono widok blachy kompozytowej po drugim przepuście walcowanej według wariantu II. Pasma kompozytowe walcowano dla współczynnika asymetrii $a_v=1,0$.



Rys. 47. Widok walcowanego pasma kompozytowego po drugim przepuście dla $a_v=1,0$.

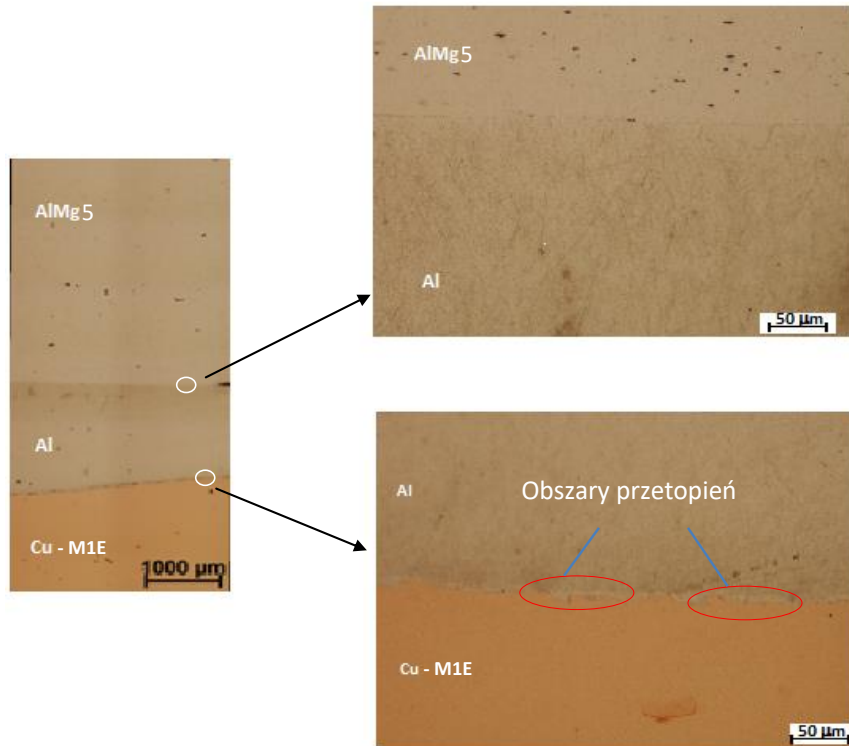
Na podstawie rysunku 47 można zaobserwować wyraźne wypływanie warstwy środkowej na zewnątrz pasma. Wynika to z większego odkształcenia warstwy Al w procesie walcowania. Ponieważ proces walcowania realizowano dla jednakowych prędkości obwodowych $a_v=1,0$ można zauważyć wyraźne wygięcie pasma po wyjściu z kotliny walcowniczej. W dalszej części pracy przedstawione zostaną wyniki badań uzyskane dla optymalnych wartości współczynników asymetrii a_{vopt} zapewniających uzyskanie prostych blach kompozytowych warstwowych po procesie plastycznego kształtowania.

Rysunek 48 przedstawia widok obszarów połączeń warstw Al-M1E oraz Al-AlMg5 po trzecim przepuście przeprowadzonym dla współczynnika asymetrii prędkości obwodowych $a_{vopt}=0,87$.



Rys. 48. Widok obszarów połączenia warstw kompozytu trójwarstwowego po trzecim przepuszczeniu dla $a_{vopt}=0,87$

Na podstawie dokonanych obserwacji obszarów połączeń warstw przedstawionych na rysunku 48 nie stwierdzono rozwarstwień oraz mikropęknięć. Wartość wprowadzonej asymetrii prędkości obwodowych walców roboczych zapewniła uzyskanie prostej blachy kompozytowej warstwowej po wyjściu z kotliny walcowniczej (tabela 4). W obszarze połączenia warstw Al-M1E zaobserwowano obszary faz międzymetalicznych, które po trzecim przepuszczeniu nie ulegały pęknięciom, które mogłyby w kolejnych przepustach prowadzić do rozwarstwień. Natomiast w obszarze połączenia warstw Al-AlMg5 nie zaobserwowano występowania faz międzymetalicznych. Dokonując porównania przedstawionych na rysunkach 29 i 48 obszarów połączenia warstw Al-AlMg5 można zauważyć, że w wyniku procesu walcowania nastąpiła praktycznie całkowita likwidacja niewielkiego pofalowania tego obszaru. Dlatego można uznać, że występujący obszar połączenia warstw Al-AlMg5 jest płaski. Na rysunku 49 przedstawiono widok całego kompozytu warstwowego na wysokości oraz dokonano analizy obszarów połączeń po czwartym przepuszczeniu walcowania według wariantu II.



Rys. 49. Widok obszarów połączeń warstw po czwartym przepuszczeniu walcowniczym dla $a_{\text{vopt}}=0,86$, a) kompozyt warstwowy na wysokości pasma, b) obszary połączeń warstw AlMg5-Al oraz Al-M1E

Przedstawione na rysunku 48 obszary połączeń warstw blachy kompozytowej warstwowej po czwartym przepuszczeniu nie wykazywały występowania mikropęknięć oraz naderwań dla optymalnych warunków prowadzenia procesu walcowania. Dochodzimy do analogicznych spostrzeżeń, że w obszarze połączenia warstw Al-M1E występują obszary przetopień będące mieszaniną łączonych metali, które w procesie walcowania nie uległy pęknięciom. Natomiast w obszarze połączenia warstw AlMg5-Al nie zaobserwowano negatywnego wpływu procesu walcowania na trwałość ich połączenia.

Rysunek 50 przedstawia widok pasma kompozytowego warstwowego po piątym przepuszczeniu przeprowadzonym według drugiego wariantu procesu walcowania.



Rys. 50. Widok walcowanego pasma kompozytowego po piątym przepuście dla $a_{vopt}=0,855$

Przedstawiony na rysunku 50 widok pasma kompozytowego warstwowego pozwala stwierdzić, że zastosowana asymetria prędkości walców roboczych była poprawna, ponieważ uzyskano proste pasmo po procesie walcowania. Wyraźnie można zaobserwować wypływanie warstwy poza obszar połączonego kompozytu warstwowego. Natomiast warstwy AlMg5 i M1E ulegały praktycznie jednakowemu wydłużeniu, co świadczy o proporcjonalnym odkształceniu analizowanych warstw. Na rysunku 51. przedstawiono widok próbki trójwarstwowej po 5 przepuście walcowniczym.



Rys. 51. Widok pasma kompozytowego warstwowego po piątym przepuście walcowniczym dla $a_{vopt}=0,855$

Przedstawiony na rysunku 51 widok obszarów połączeń warstw analizowanego kompozytu pozwala stwierdzić, że proces walcowania przebiegał prawidłowo i nie powodował pojawienia się w tych obszarach mikropęknięć i naderwań.

Analogiczne badania obszarów połączeń przeprowadzono po szóstym przepuście przeprowadzonym dla optymalnej wartości współczynnika asymetrii $a_{vopt}=0,85$, co przedstawiono na rysunku 52.



Rys. 52. Widok obszarów połączenia warstw kompozytu trójwarstwowego po 6 przepuście dla $a_{vopt}=0,85$

Na rysunku 52 przedstawiono widok obszarów połączeń obszarów Al-M1E oraz Al-AlMg5, dla których nie zaobserwowano utraty połączenia. Nie zaobserwowano w miejscach połączeń warstw kompozytu mikropęknięć i pęknięć. Po szóstym przepuście dokonano cięcia z krawędzi bocznych nadmiaru wypływającej warstwy Al. Rysunek 53 przedstawia widok walcowanych pasm po 7 i 8 przepuście walcowniczym.



Rys. 53. Widok przewalcowanych próbek po 7 przepuście dla $a_{vopt}=0,83$, oraz po 8 przepuście dla $a_{vopt}=0,92$

Dokonując analizy przedstawionych na rysunku 53 blach kompozytowych warstwowych po 7 i 8 przepuście walcowniczym przeprowadzonym dla optymalnych wartości współczynników asymetrii a_{vopt} można stwierdzić, że uzyskane pasma są proste. Na rysunku 54 przedstawiono widok obszarów połączeń warstw Al-M1E oraz Al-AlMg5 po ostatnim przepuście zrealizowanym dla wariantu II.



Rys. 54. Widok obszarów połączenia warstw kompozytu trójwarstwowego po 8 przepuście

Przedstawione na rysunku 54 obszary połączeń warstw blach kompozytowych po ostatnim przepuście były trwałe bez mikropęknięć czy też naderwań. Dokonując analizy obszaru będącego połączeniem warstw Al-M1E można stwierdzić na podstawie przeprowadzonych obserwacji, że występujące fazy międzymetaliczne w procesie walcowania nie ulegały znacznym odkształceniom. Po procesie walcowania zrealizowanym dla optymalnych wartości współczynników asymetrii prędkości walców roboczych nie stwierdzono negatywnego wpływu procesu walcowania na trwałość obszaru połączenia.

Na rysunku 55 przedstawiono przewalcowanych blach kompozytowych warstwowych po ostatnim przepuście realizowanym dla optymalnych wartości współczynników asymetrii zrealizowanych według dwóch wariantów.



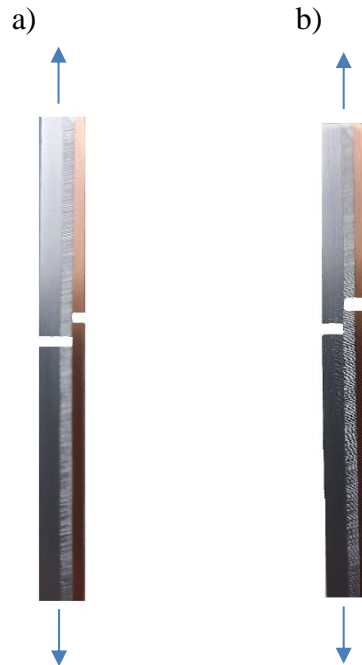
Rys. 55. Widok kompozytowych pasm po ostatnim zrealizowanym przepuście walcowniczym zrealizowanym dla gniotu całkowitego $\epsilon=89,2\%$ prowadzonych dla walcowanych wg wariantów I i II

Rysunek 55 przedstawia widok walcowanych próbek kompozytowych warstwowych AlMg5-Al-Cu walcowanych asymetrycznie według dwóch wariantów. Uzyskane po ostatnim przepuszczeniu pasma kompozytowe były proste, a w obszarach połączeń nie występowały rozwarstwienia ani mikropęknięcia.

Przedstawione w tym podrozdziale wyniki badań i ich analiza pozwalają na dokonanie oceny trwałości obszarów połączeń blach kompozytowych po kolejnych przepustach procesu kształtowania plastycznego. W dalszej części pracy rozważania będą prowadzone pod kątem wpływu procesu walcowania na wytrzymałość obszarów połączeń na ścinanie.

3.3.4. Wytrzymałość obszarów połączeń na ścinanie

W celu określenia jakości obszarów połączeń komponentów wchodzących w skład kompozytu przeprowadzono badania wytrzymałości obszarów połączeń na ścinanie na próbkach przygotowanych zgodnie z rysunkiem 56. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej. Próbki wycięto z materiału wsadowego oraz po pierwszych trzech przepustach.



Rys. 56. Widok próbek do badań wytrzymałości na ścinanie połączonych obszarów a) M1E-Al, b) Al-AlMg5

Na rysunku 56 przedstawiono schemat badań właściwości wytrzymałościowych obszarów złączy na ścinanie. W tabeli 5 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie obszarów połączeń poszczególnych komponentów kompozytu. W przypadku próbek po procesie walcowania w pracy zamieszczono wyniki dla optymalnych wartości współczynników asymetrii a_v .

Tabela 5. Parametry procesu ścinania obszarów połączeń

Obszar połączenia	Etapy procesu	S [mm ²]	P [N]	R _s [MPa]
M1E-Al	po zgrzewaniu wybuchowym	20,4	1450,4	71,0
	I przepust	19,7	1333	67,70
	II przepust	19,2	1267	66,0
	III przepust	20,1	1313	65,3
	IV przepust	19,8	1255,8	64,4
Al - AlMg5	po zgrzewaniu wybuchowym	20,1	1246,2	62,0
	I przepust	20,6	1215	58,98
	II przepust	20,2	1172	58,02
	III przepust	20,5	1223	59,65
	IV przepust	20,4	1213	59,46

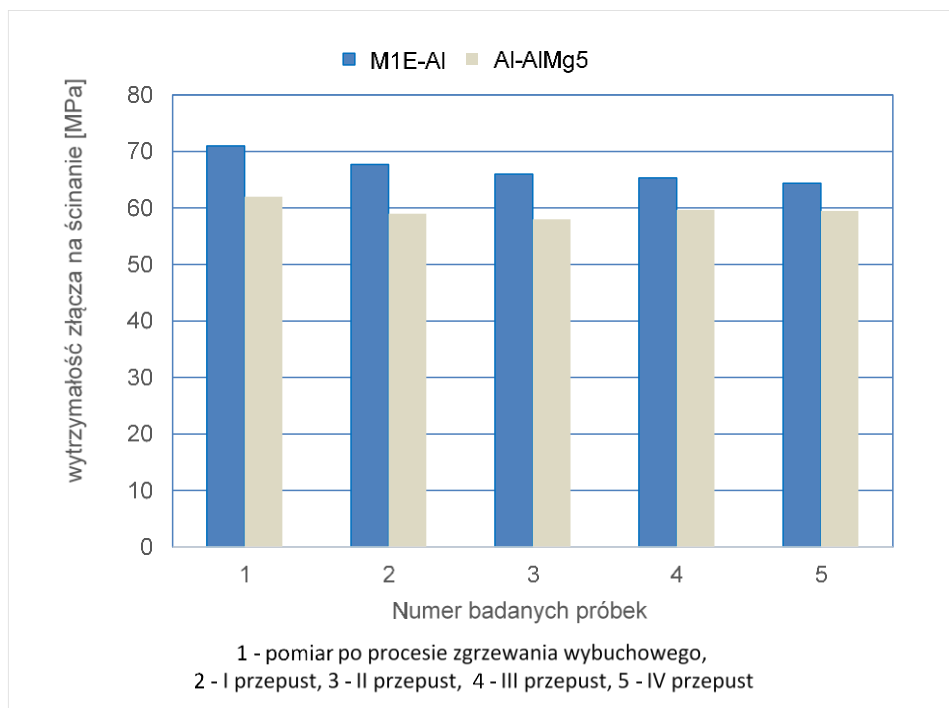
gdzie:

S – pole połączenia poddane ścinaniu,

P – maksymalna siła ścinająca,

R_s – wytrzymałość złącza na ścinanie.

Przedstawione w tabeli wyniki badań wytrzymałości złączy na ścinanie posłużyły do opracowania rysunku 57, na którym przedstawiono przebieg zmian w kolejnych etapach procesu wytwarzania blach kompozytowych warstwowych. Badania przeprowadzono dla materiału bezpośrednio połączonego metodą zgrzewania wybuchowego oraz dla blach walcowanych z asymetrią kinetyczną zapewniającą uzyskanie prostych pasm.



Rys. 57. Wytrzymałość złącza na ścinanie w kompozytach trójwarstwowych M1E-Al-AlMg5

Na podstawie przedstawionych na rysunku 57 wyników badań można zaobserwować, że największą wytrzymałość na ścinanie uzyskuje się bezpośrednio po procesie łączenia metodą zgrzewania wybuchowego. Podczas badań wykazano, że po procesie walcowania, dla optymalnych wartości współczynników asymetrii kinetycznej następuje stosunkowo nieduże zmniejszenie wartości wytrzymałości na ścinanie. Wyraźnie większe osłabienie obszaru połączenia obserwuje się w przypadku warstw M1E-Al, niż ma to miejsce w przypadku obszaru połączenia warstw Al-AlMg5. Natomiast zupełnie niezadawalające wyniki badań otrzymano po procesie walcowania i prostowania. Po dwóch, trzech kolejnych operacjach walcowania i prostowania w obszarze złącza Al-AlMg5 zaobserwowano wyraźne naderwania i pęknięcia, które podczas kontynuacji procesu technologicznego skutkowały rozwarstwieniem. Na podstawie przedstawionych w niniejszej pracy badań mikrostrukturalnych, można z dużym przekonaniem sądzić, że na zmniejszenie wartości wytrzymałości na ścinanie w dużej mierze ma wpływ powstawanie mikropęknięć w obszarach występowania faz międzymetalicznych. Największe nagromadzenie faz międzymetalicznych na podstawie analizy wyników badań zaobserwowano w obszarze złącza M1E-Al. Kolejnym czynnikiem wpływającym na osłabienie obszaru połączenia jest nierównomierne odkształcenie warstw, któremu podczas walcowania towarzyszy występowanie naprężeń ścinających w obszarze złącza wynikające z nierównomiernego płynięcia warstw stanowiących kompozyt. Dokonując analizy ilościowej

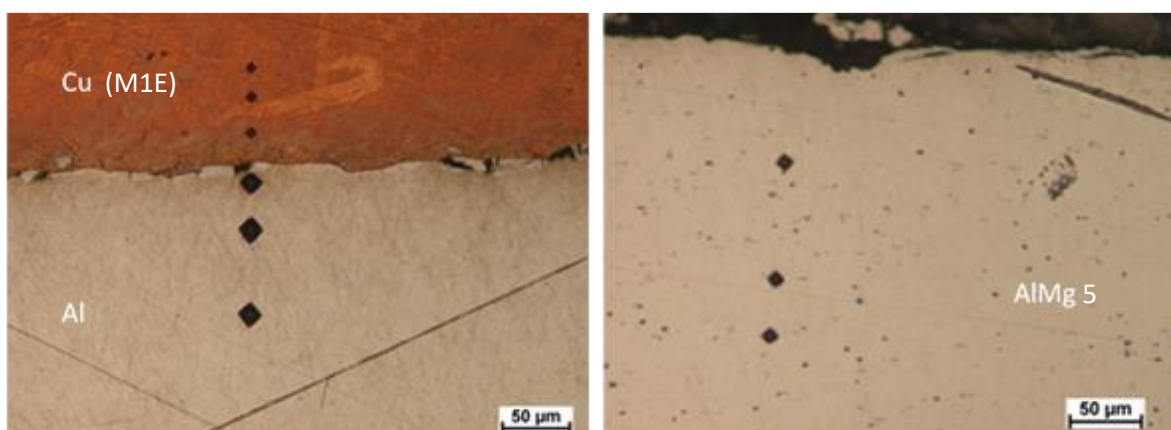
maksymalne zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie w przypadku obszaru połączenia M1E-Al osiągnęło wartość 11%, natomiast w przypadku obszaru Al-ALMg 5%.

3.3.5. Mikrotwardość

W tym podrozdziale przedstawiono wyniki pomiaru mikrotwardości mierzonej na przekroju badanego materiału oraz na powierzchni zewnętrznej próbek. Na podstawie uzyskanych wyników badań określono stopień względnego umocnienia dla wszystkich wariantów względem próbki referencyjnej.

Pomiar twardości dla małej sile obciążającej (HV0,05) na przekroju materiału zrealizowano metodą Vickersa z wykorzystaniem twardościomierza *FM-700* firmy *FutureTech*. Pomiar przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1.

Na rysunku 58 przedstawiono widok reprezentatywnych pomiarów mikrotwardości komponentów kompozytu warstwowego.

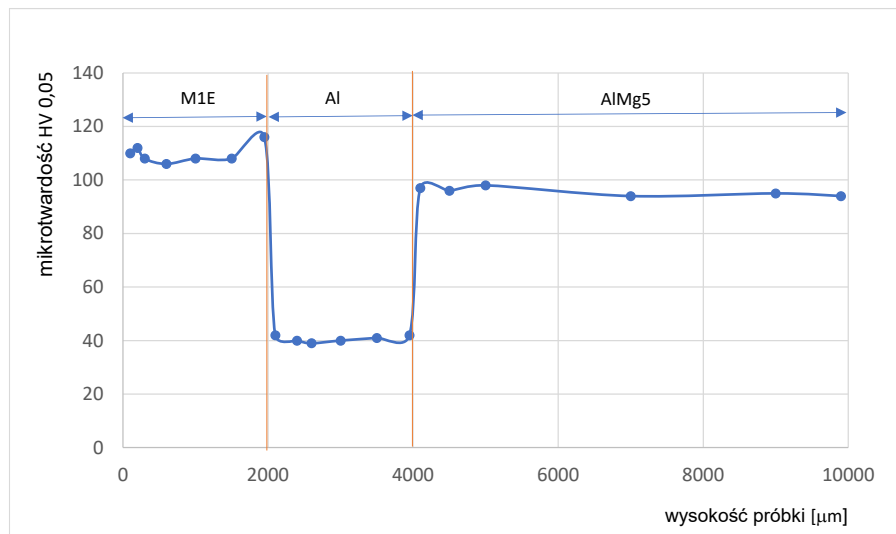


Rys. 58. Widok reprezentatywnych pomiarów twardości komponentów kompozytu warstwowego AlMg5-Al-M1E po metodzie zgrzewania wybuchowego

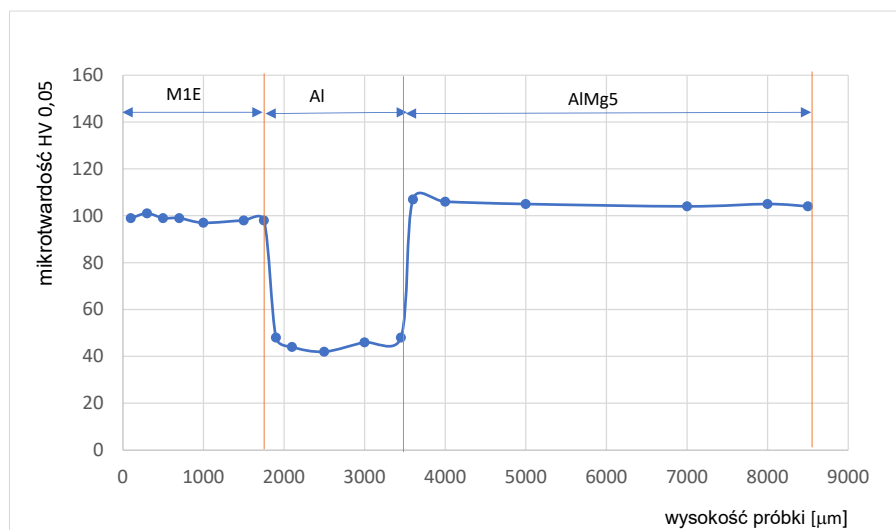
Przedstawione na rysunku 58 wyniki pomiaru mikrotwardości na wysokości pasma kompozytowego warstwowego pokazują, że po bezpośrednim połączeniu największą mikrotwardością charakteryzuje się warstwa M1E. Dlatego można przypuszczać, że wygięcie blachy kompozytowej po procesie walcowania powinno nastąpić w kierunku jej położenia. Przedstawiony na rysunku 37 widok walcowanych blach kompozytowych pokazuje, że ulegały one wygięciu w kierunku warstwy AlMg5. Na rysunku 59 przedstawiono wyniki pomiarów

mikrotwardości komponentów blachy kompozytowej warstwowej zmierzone po bezpośrednim połączeniu oraz po pierwszym przepuszczeniu walcowniczym zrealizowanym dla wariantu II.

a)



b)



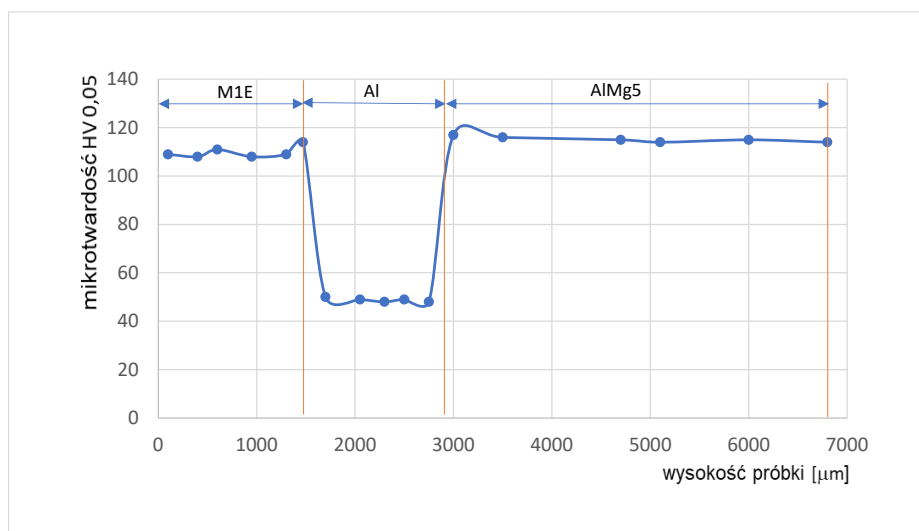
Rys. 59. Wyniki pomiarów mikrotwardości na wysokości kompozytu a) materiał wsadowy po zgrzewaniu wybuchowym, b) po procesie walcowania dla gniotu względnego $\epsilon=15\%$

Na podstawie wyników badań zamieszczonych na rysunku 59 wyraźnie widać wpływ procesu walcowania na wzrost wartości mikrotwardości warstw Al i AlMg5. Natomiast w przypadku warstwy M1E zaobserwowano po pierwszym przepuszczeniu obniżenie wartości mikrotwardości. Odzwierciedleniem tego zjawiska było wygięcie blach kompozytowych warstwowych w kierunku warstwy twardszej, którą okazała się warstwa AlMg5.

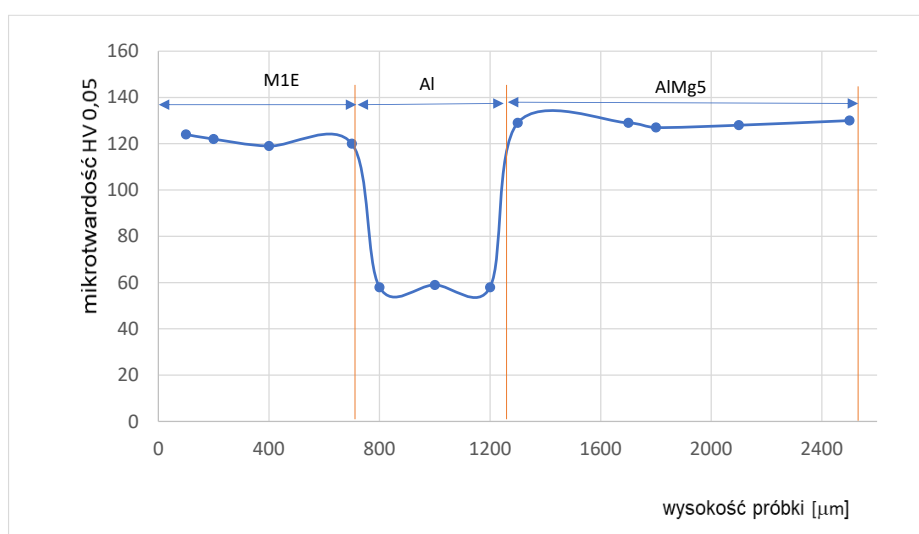
Wyniki badań uzyskane według wariantu I były analogiczne.

Rysunek 60 przedstawia wyniki pomiarów mikrotwardości warstw po drugim i piątym przepuszczeniu przeprowadzonym według wariantu II.

a)



b)



Rys. 60. Wyniki pomiarów mikrotwardości na wysokości kompozytu a) po drugim przepuszczeniu $\epsilon_c=31\%$, b) po piątym przepuszczeniu $\epsilon_c=75\%$,

Na podstawie przedstawionych na rysunku 60 wyniki pomiarów mikrotwardości na wysokości blach kompozytowych warstwowych można zaobserwować, że dla kolejnych przepustów walcowniczych dla wszystkich warstw następuje wzrost wartości mikrotwardości. Różnice w mikrotwardości pomiędzy wsadem, a gotowym wyrobem walcowanym wynosiły odpowiednio 27% dla warstwy M1E, 45% dla warstwy Al oraz 21% dla warstwy AlMg5. Po uwzględnieniu obniżenia wartości mikrotwardości po pierwszym przepuszczeniu dla warstwy M1E

można przyjąć, że różnice w mikrotwardościach warstw M1E i AlMg5 są porównywalne. Największą różnicę obserwuje się dla warstwy Al, która ulegała największym odkształceniom w procesie walcowania. Podkreślić należy, że po ostatnim przepuszczeniu jej grubość wynosiła 0,1mm, co stanowiło zmniejszenie grubości o 95% w odniesieniu do jej wysokości w kompozytowym wsadzie.

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że w wyniku walcowania blach kompozytowych warstwowych możliwe jest uzyskanie gotowego wyrobu o odpowiednich własnościach mechanicznych. Występowanie warstwy Al_2Cu będącej mieszaniną miedzi i aluminium nie spowodowało rozwarstwiania się warstwy Al-M1E podczas realizacji procesu asymetrycznego walcowania prowadzonego dla a_{vopt} . Prowadzenie procesu walcowania bez zróżnicowania prędkości walców roboczych skutkowało coraz większym wygięciem kompozytowych pasm wymuszając dodatkową operację związaną z prostowaniem. Często już podczas prostowania lub po kolejnym przepuszczeniu dla tych warunków procesu obserwowano występowanie mikropęknięć i naderwań w obszarze połączenia warstw Al-AlMg5

3.3.6. Analiza wyników badań

Przedstawione w rozdziale wyniki badań umożliwiają przeprowadzenie analizy wpływu kolejnych etapów procesu wytwórczego na własności funkcjonalne płaskich wyrobów kompozytowych warstwowych.

Pierwszy i podstawowym zagadnieniem było prowadzenie procesu wytwarzania w sposób zapewniający trwałość obszarów połączeń w kompozytowym materiale. Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostrukturalnych wykazano, że po pierwszym etapie polegającym na połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego komponentów stanowiących kompozyt, w obszarze Al-M1E występują fazy międzymetaliczne. Obszar złącza tych warstw jest typowym połączeniem powstającym w wyniku łączenia metali metodą zgrzewania wybuchowego. Cechuje go nieregularny, rozbudowany i falisty kształt. Drugim poddanym analizie był obszar połączenia warstw Al- AlMg_5 . Obszar połączeniu po zgrzewaniu wybuchem wykazywał niewielkie pofalowania, a miejscami był praktycznie płaski. Podczas badań mikroskopowych uwidocznione nieliczne o bardzo małych wielkościach obszary przetopień. Ze względu na ujawnione różnice w powstałych obszarach połączeń warstw większą uwagę należało poświęcić obszarowi połączenia warstw Al-M1E. Występujące w tym obszarze liczne przetopienia skutkujące powstawaniem faz międzymetalicznych wpływa niekorzystnie na jego trwałość i wytrzymałość.

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie kształtowania plastycznego płaskich kompozytów warstwowych AlMg_5 -Al-M1E. Podczas kształtowania plastycznego zastosowano asymetrię kinetyczną ASK polegającą na zróżnicowaniu prędkości obwodowych walców roboczych. Zastosowane asymetryczne walcowanie ASR miało na celu uzyskanie prostych blach kompozytowych warstwowych po kolejnych przepustach walcowniczych. W ramach badań określono wpływ procesu walcowania na jakość i wytrzymałość obszarów połączeń warstw stanowiących kompozyt. Wykazano, że prowadzenie procesu walcowania bez asymetrii prędkości walców, pozwalającej na uzyskanie prostego pasma, przyczynia się do wyginania się blach kompozytowych po przepuszczeniu. Uzyskane wyniki badań mikrostrukturalnych pokazują, że w wyniku wygięcia blach w obszarze Al-M1E pojawiają się mikropęknięcia i naderwania, które podczas dalszego procesu technologicznego wpływają znacząco na obniżenie jakości i trwałości tego obszaru. W przypadku obszaru połączenia warstw AlMg_5 -Al zaobserwowano niewielkie zmiany w wytrzymałości na ścinanie. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że powstałe obszary przetopień w płaszczyźnie połączenia warstw Al-M1E nie

ulegają odkształceniom plastycznym. Występujące mikropęknięcia i pęknięcia faz międzymetalicznych pojawiają się najczęściej podczas wyginania walcowanego pasma i poddawania go operacji prostowania. Pozwala to na stwierdzenie, że częste wyginanie połączone z plastycznym kształtowaniem wpływa niekorzystnie na trwałość połączenia warstw kompozytu. Natomiast po przeprowadzeniu analizy wyników badań mikrostrukturalnych dla warunku prowadzenia procesu walcowania zapewniającego uzyskanie prostych blach kompozytowych warstwowych wpływ procesu walcowania na trwałość i jakość obszarów połączenia jest stosunkowo niewielki. Otrzymane wyniki badań wytrzymałości obszarów połączeń jak i twardości można bezpośrednio odnieść do ich mikrostruktury, a konkretnie do występujących w obszarach połączeń faz międzymetalicznych. Podczas procesu walcowania analizie poddano problem nierównomierności odkształcenia warstw. Zaobserwowano podobnie jak i opisuje literatura [3, 31, 106], że nierównomierność odkształcenia materiałów stanowiących warstwy kompozytu zależy od ich własności oraz prowadzenia procesu walcowania. Największym odkształceniom ulegała warstwa pośrednia Al, która stanowiła łącznik pomiędzy niełączącymi się bezpośrednio warstwami M1E i AlMg5. Zastosowanie procesu asymetrycznego walcowania sprzyjało zwiększeniu równomierności odkształceń poszczególnych warstw.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano, że zastosowanie metody zgrzewania wybuchowego oraz asymetrycznego procesu walcowania jest uzasadnione technologicznie. Dobór optymalnych parametrów procesów łączenia i kształtowania plastycznego ma wpływ na poprawę właściwości funkcjonalnych płaskich kompozytów warstwowych. Uzyskane wyniki badań mogą stanowić wstęp do oceny możliwości wdrożeniowej w warunkach przemysłowych.

3.3.7. Ocena możliwości wdrożeniowej asymetrycznego procesu walcowania kompozytowych blach warstwowych do praktyki przemysłowej

Uwzględniając informacje opublikowane w specjalistycznej literaturze [117-131] zalecanym jest, aby techniczno - ekonomiczne oceny możliwości wdrożeniowej w warunkach przemysłowych były realizowane dla konkretnego podmiotu.

Podstawę ewolucji i egzystencji przedsiębiorstw stanowią nowe rozwiązania technologiczne oraz inwestycyjne. Wiąże się z nimi szereg problemów i zagrożeń, ale przede wszystkim stanowią one szansę rozwoju. Określenie zasadności nowych inwestycji wymaga przeprowadzenia wieloetapowej analizy obejmującej parametry techniczno-ekonomiczne będące podstawą oceny wdrożenia do warunków przemysłowych przewidzianego rozwiązania technologicznego. Wyniki przeprowadzonej analizy pozwalają na wstępną ocenę możliwości wdrożeniowej, która jest podstawą w procesie decyzyjnym podmiotu gospodarczego.

W tej części pracy zamieszczono ocenę możliwości wdrożeniowej procesu wytwarzania blach kompozytowych warstwowych w przedsiębiorstwie Huzap Sp. z o.o. znajdującym się w Bytomiu. Firma powstała w 1998r. Historia firmy sięga 1985r, kiedy to jej założyciele rozpoczęli swoją działalność w dziedzinie budowy maszyn w znanych zachodnich koncernach. Działalność firmy bazuje na projektowaniu i konstruowaniu maszyn i urządzeń wysokiej jakości z uwzględnieniem najnowocześniejszego stanu techniki. Misją firmy jest chęć ciągłego doskonalenia otwartość na zmiany i innowacje. Za swój cel firma stawia partnerskie relacje z klientami, doradztwo oraz korzystne rynkowo ceny.

Firma oferuje instalacje linii mieszalnych, podzespoły przemysłowe, spawanie stali, systemy rurowe, walcowanie blach i wiele innych. Uzasadnieniem wyboru przedsiębiorstwa Huzap do realizacji analizy wdrożenia technologii procesu asymetrycznego walcowania kompozytowych blach warstwowych stanowiło:

- posiadane możliwości technologiczne wytwarzania blach,
- profil działalności,
- otwartość na innowacje,
- oświadczenie w obróbce metali.

Głównym celem oraz prognozowanymi efektami przewidzianej inwestycji są:

- obniżenie kosztów działalności operacyjnej,
- wdrożenie nowej technologii produkcyjnej,
- zdobycie konkurencyjności rynkowej,
- zwiększenie sprzedaży produktów,
- modernizacja i rozwój przedsiębiorstwa.

Uwzględniono wiedzę i kompetencje kadry zaangażowanej w proces produkcyjny, charakter prowadzonej działalności, dotychczasowe doświadczenie zdobyte w realizacji innowacji w przedsiębiorstwie.

Przedmiotowa analiza mająca na celu potwierdzenie zasadności wdrożenia procesu asymetrycznego walcowania blach wielowarstwowych do praktyki przedsiębiorstwa zrealizowano na podstawie danych uzyskanych od firmy, które dotyczyły możliwości produkcyjnych oraz technologicznych realizacji procesu walcowania.

Na podstawie uzyskanych danych ustalono ocenę atrakcyjności inwestycji.

Przy założonych parametrach inwestycyjnych i technicznych do analizy koncepcji oceny ryzyka inwestycji wykorzystano samodzielnie opracowane operaty (wykonane metodą badawczą), które pozwoliły na:

- analizę progu rentowności
- wartościowaniu kosztów eksploatacyjnych
- klasyfikacji poszczególnych czynności związanych z przedsięwzięciem.

Firma Huzap obecnie prowadzi działalność związaną z kształtowaniem blach zarówno z metali nieżelaznych jak i stalowych. Ale jest zainteresowana rozszerzeniem tej działalności o wprowadzenie procesu wytwórczego kompozytowych blach warstwowych, których komponenty stanowią materiały metalowe. W tym celu są zainteresowani zakupem odpowiedniego wyposażenia. Przed wprowadzeniem tej technologii do praktyki przemysłowej potrzebna jest ocena możliwości wdrożenia procesu ASR do warunków panujących w firmie. W tym celu w dalszej części rozprawy doktorskiej przeprowadzoną wstępną analizę możliwości wdrożeniowych.

Identyfikacja zagrożeń

Pierwszą metodę jaką zastosowano do oceny ryzyka była analiza SWOT (analiza mocnych i słabych stron oraz szans i zagrożeń inwestycji polegającej na wprowadzeniu do produkcji asymetrycznie walcowanych blach trójwarstwowych). W tabeli 6 przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy SWOT dla przedsięwzięcia związanego z wprowadzeniem asymetrycznego procesu walcowania płaskich wyrobów kompozytowych warstwowych.

Tabela 6. Analiza SWOT dotycząca wprowadzenia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów wielowarstwowych (opracowanie własne).

Mocne strony	Słabe strony
Automatyczne sterowanie urządzeń Możliwość zarobku Produkcja wyrobu o wysokiej jakości Spadek czasu pracy na wykonanie pojedynczej partii wyrobu	
Szanse	Zagrożenia
Zwiększenie sprzedaży Konkurencyjność rynkowa Poszerzenie produkowanego asortymentu	Brak zamówień od klientów

Do analizy ryzyka zaplanowanej inwestycji asymetrycznego walcowania blach wielowarstwowych oraz rozwiązywania problemów jakościowych w firmie Huzap zaproponowano diagram K. Ishikawy.

Pozwala on na rozpoznanie i zidentyfikowanie najczęściej występujących niezgodności i przyczyn ich powstawania. Jest on graficznym schematem prezentującym oddziaływanie czynników, które powodują skutki występujące w danym procesie. Diagram porządkuje logicznie i chronologicznie przyczyny lub czynności ze względu na zdefiniowany problem.

Pojedynczy proces jest sekwencją czynności przekształcającym mierzalne wejścia w mierzalne wyjścia. Uzyskiwany efekt jest wynikiem działania kilku czynników.

- materiałowego (ang. material) – właściwości obrabianego materiału
- człowieka (ang. manpower) – umiejętności pracownika
- maszyny (ang. machine) – możliwości technologicznych
- metod (ang. method) – techniki wytwarzania
- zarządzania (ang. management) – metody zarządzania
- środowiska (ang. environment) – warunki produkcyjne, czynniki środowiskowe, otoczenia
- pomiar (ang. measurement) – metoda pomiaru.

Zastosowanie wykresu Ishikawy zasadne jest nie tylko na etapie procesu wytwarzania, ale także jako skuteczna metoda analizy problemów w fazie projektowania technologicznego przygotowania produkcji, a więc na etapach, na których efektywność podejmowanych działań jest największa dla osiągnięcia stawianego celu.

Opracowanie diagramu Ishikawy składa się z kilku faz:

- określenie przyczyn głównych (ogólnych)
- zdefiniowanie przyczyn szczegółowych
- wybór czynnika krytycznego.

Przyczyny ogólne zostają zapisane na osiach skierowanych do głównej osi diagramu. Określenie przyczyn szczegółowych jest połączone z przyczynami głównymi. Przyczyny szczegółowe stanowią rozwinięcie przyczyn głównych.

Ostatnią fazą podczas tworzenia diagramu jest wybór przyczyny krytycznej, najbardziej prawdopodobnej.

Analizy z wykorzystaniem wykresu Ishikawy stosowane są do usprawnienia procesu i podejmowania działań korygujących mających na celu:

- identyfikację pojawiających się problemów,
- określenie miejsc ich występowania,
- analizę przyczyny,
- propozycja usuwania niedogodności,
- wybór i wdrożenie najlepszego rozwiązania oraz ocena skuteczności.

Ujęcie technologiczne wykresu Ishikawy w sposób zasadniczy odnosi się do wady wyrobu, jednocześnie wskazując na korelację z poszczególnymi operacjami technologicznymi, w których określa się potencjalne przyczyny, ma szczególne znaczenie w praktyce inżynierskiej.

Wartością tego narzędzia jest ujęcie danego problemu w sposób całościowy, czytelny, prosty i łatwy do opracowania, co ma znaczenie na etapie diagnozowania przyczyn problemu.

Kolejne etapy opracowywania wykresu Ishikawy obejmują:

- analizę zdefiniowanego problemu,
- opracowywanie wykresu będącego omówieniem wszystkich możliwych przyczyn oraz ustalenia głównych kategorii możliwych przyczyn,
- opracowywanie wykresu do każdej kategorii przyczyn przyporządkowane są kierunki działania, które określają główne przyczyny badanego problemu,
- wykres rozbudowywany jest przez dołączanie kolejnych przyczyn i podprzyczyn
- sprawdzenie kompletności wykresu i analiza wykresu.

Zidentyfikowana przyczyna, która prawdopodobnie ma największy wpływ na skutek powinna być przeanalizowana czy zidentyfikowana przyczyna stanowi rozważany problem. Następnie określić sposób wyeliminowania najbardziej prawdopodobnego procesu powstawania badanej niezgodności. Podać konkretną propozycję rozwiązania badanego problemu [120].

Przedmiotową analizę mającą na celu potwierdzenie zasadności wdrożenia procesu asymetrycznego walcowania blach wielowarstwowych do praktyki przedsiębiorstwa zrealizowano w oparciu o informacje pozyskane od firmy, a dotyczące możliwości produkcyjnych oraz technologicznych realizacji procesu walcowania blach, kompetencji kadry pracowniczej.

Zgromadzone dane pozwoliły ocenić atrakcyjność wprowadzanych operacji technologicznych.

Analizowany proces produkcyjny to walcowanie na zimno kompozytu wielowarstwowego AlMg5-Al-M1E. Proces walcowania na zimno pozwala na zmianę właściwości blachy poprzez oddziaływanie walców. Na całkowity proces walcowania blach wielowarstwowych składają się poszczególne etapy procesu technologicznego:

- operacje przygotowawcze do procesu walcowania
- walcowanie blach wielowarstwowych
- ewentualne prostowanie blach wielowarstwowych
- operacje wykańczające blach wielowarstwowych.

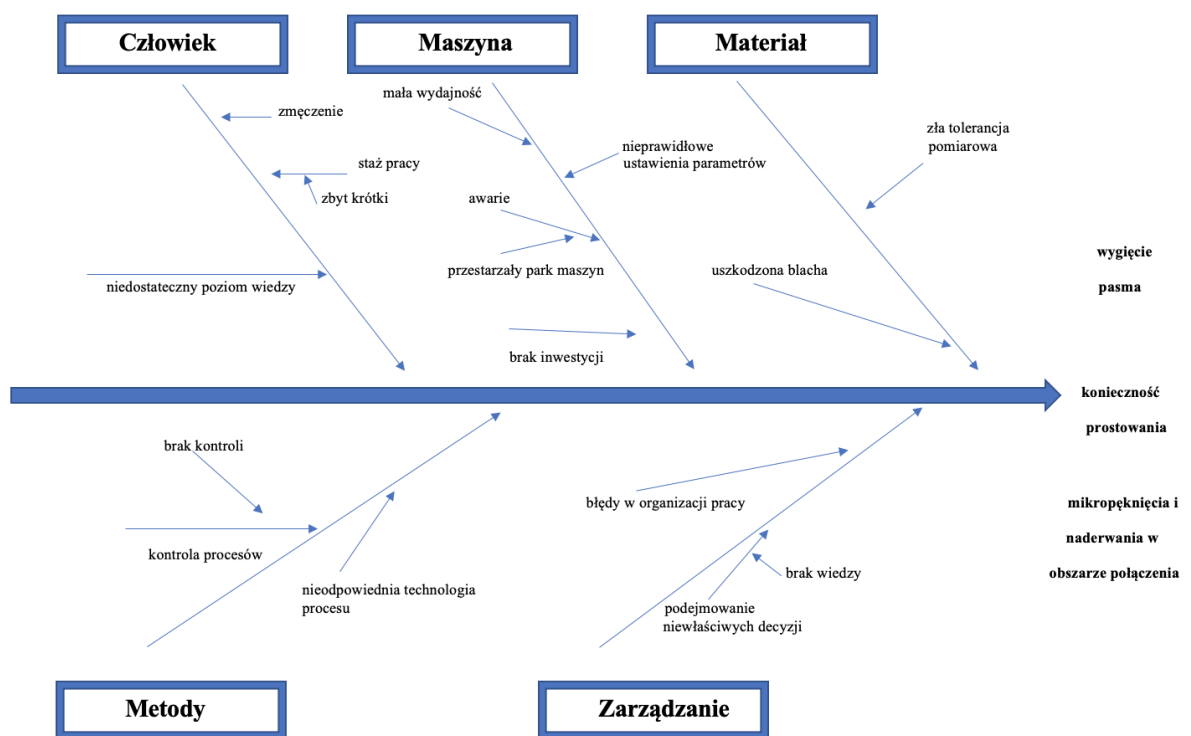
Tak przeprowadzony proces pozwala na uzyskanie produktów charakteryzujących się wysoką jakością oraz precyzją wykończenia. Podstawowym problemem poddanym analizie z wykorzystaniem diagramu Ishikawy jest wygięcie pasma podczas walcowania z jednakową prędkością obwodowych walców roboczych blach wielowarstwowych.

Wada ta skutkowała wprowadzeniem do procesu technologicznego operacji prostowania podczas, którego w obszarze połączenia pojawiały się mikropęknięcia i naderwania.

W kategorii „metody” widoczne są przyczyny takie jak: przestarzały park maszyn, brak inwestycji, mała wydajność, nieprawidłowe ustawienia parametrów walcowania.

W dużej mierze drogą do sukcesu przedsiębiorstwa Huzap będzie usprawnienie aktualnego procesu walcowania.

Wytwarzanie produktu szybciej, taniej i najważniejsze wolnego od wad.



Rys. 61. Diagram Ishikawy dla analizy powstania niezgodności podczas symetrycznego procesu walcowania kompozytowych blach warstwowych (opracowanie własne).

Na podstawie danych uzyskanych od firmy Huzap w przypadku procesu wytwarzania małoseryjnych blach kompozytowych warstwowych tradycyjną metodą walcowania symetrycznego, problemem jest wygięcie pasma powodujące dodatkowe koszty związane z ich prostowaniem.

Wprowadzenie asymetrii kinetycznej ASR do procesu wytwarzania nie tylko pozwala na wytwarzanie kompozytowych wyrobów płaskich o oczekiwanych właściwościach funkcjonalnych, ale również znacząco przyczynia się do obniżenia kosztów produkcji.

W przypadku walcowania seryjnego blach kompozytowych warstwowych, produkcja jest powtarzalna, a koszty ich wytwarzania są odpowiednio niższe.

Firma Huzap jest zainteresowana rozbudową linii produkcyjnej wdrażającej proces ASR, która będzie skutkować obniżeniem kosztów produkcji. Prognozy kosztowe wykonane przez firmę klasyfikują modernizację linii produkcyjnej jako opłacalną. Zaplanowano zakup walcarki asymetrycznej wraz z oprzyrządowaniem. Dane dotyczące aktualnej wysokości kosztów procesu walcowania blach stanowią dane poufne firmy.

Kalkulacja wykonana przez firmę Huzap pozwoliła wyciągnąć wnioski, że rozbudowa linii produkcyjnej będzie skutkować obniżeniem kosztów energii oraz roboczogodziny na poziomie ok. 10%- 12 %.

Analizując powyższe do procesu walcowania w firmie Huzap porównując metody symetrycznego walcowania oraz asymetrycznego walcowania blachy trójwarstwowej w produkcji zleceń i ustalaniu ceny indywidualnej do otrzymanego zlecenia można stwierdzić, że walcowanie asymetryczne stanowi innowację procesową powodującą wymierne korzyści obniżające koszty energii elektrycznej oraz koszty personelu bezpośredniego.

Wobec powyższego zasadnym jest implementowanie go do warunków przemysłowych.

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy oraz badań własnych można stwierdzić, że sformułowane cele pracy zostały osiągnięte. Podjęta tematyka badawcza pracy zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym pozwoliła na pozytywne zweryfikowanie postawionej hipotezy. Niniejsza dysertacja odnosi się do zasadności stosowania asymetrii prędkości walców roboczych do wytwarzania płaskich blach z materiałów kompozytowych warstwowych. Na podstawie analizy literatury oraz badań własnych wykazano, że poprzez zastosowanie asymetrii prędkości walców można oddziaływać na jakość płaskich wyrobów kompozytowych warstwowych, co bezpośrednio przekłada się na ich właściwości funkcjonalne.

Przeprowadzone badania doświadczalne - makroskopowe, mikroskopowe, twardości, wytrzymałości na ścinanie zarówno dla próbek po procesie łączenia jak i po procesie walcowania blach kompozytowych warstwowych potwierdziły, że zastosowanie ASR umożliwia utrzymanie wysokich właściwości funkcjonalnych wytwarzanych wyrobów. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że optymalna wartość współczynnika asymetrii prędkości walców roboczych nie tylko pozwala na uzyskanie prostego pasma po procesie walcowania, ale również wpływa na jakość i trwałość obszarów połączeń warstw kompozytów. Natomiast dla innych wartości współczynnika asymetrii niż optymalna uzyskiwano wygięte pasma o promieniach krzywizny zależnych od wartości parametrów procesu technologicznego. W przypadku wygiętych blach dalsza realizacja procesu technologicznego wiązała się z koniecznością przeprowadzenia procesu prostowania. Po procesie prostowania w obszarach połączenia powstawanie mikropęknięć i naderwań w obszarze Al-M1E (w miejscu występowania warstwy kruchej). Kontynuacja procesu plastycznego kształtowania pasma po jednym lub dwóch prostowaniach kończyła się zazwyczaj rozwarstwieniem warstwy Al i warstwy M1E oraz całkowitym zniszczeniem walcowanego wyrobu kompozytowego. Dlatego w głównej mierze w pracy zamieszczono wyniki badań dla optymalnych warunków realizacji procesu walcowania ASR.

Na podstawie przeprowadzonych badań dotyczących kompozytów warstwowych AlMg5-Al-M1E można sformułować następujące wnioski i stwierdzenia:

- Potwierdzona została hipoteza pracy, iż na podstawie znajomości określonych parametrów procesowych oraz określonych właściwości funkcjonalnych kompozytu warstwowego,

możliwe jest ich plastyczne kształtowanie z zapewnieniem odpowiedniej jakości obszarów połączenia wyrobu gotowego.

- W procesie łączenia komponentów kompozytu warstwowego w obszarze połączenia warstw Al-M1E zaobserwowano występowanie kruchej warstwy pośredniej oraz połączenie faliste. Natomiast w obszarze połączenia Al-ALMg5 zaobserwowano połączenie płaskie bez obszarów przetopień.
- Podczas prowadzenia procesu plastycznego kształtowania kompozytu warstwowego z zastosowaniem jednakowych prędkości obwodowych walców roboczych obserwowano wyginanie się kompozytowych blach, skutkujące występowaniem mikropęknięć i naderwań, które prowadziły do rozwarstwienia w obszarze połączenia warstw Al-M1E. Wprowadzenie ASR do procesu wytwarzania płaskich wyrobów kompozytowych pozwoliło wyeliminować niepożądane wyginanie kompozytowego pasma, a także utrzymanie wysokiej jakości obszaru połączenia warstw Al-Cu. Stąd wniosek, że odpowiednio dobrane parametry procesu ASR umożliwiają poprawę właściwości funkcjonalnych wyrobów z materiałów kompozytowych warstwowych,
- Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że wprowadzenie ASR do procesu plastycznego kształtowania wyrobów kompozytowych warstwowych powoduje obniżenie wartości sił nacisku metalu na walce. W wyniku tego zjawiska obserwuje się zmniejszenie energochłonności procesu technologicznego,
- Przedstawionych w pracy doktorskiej wyniki badań technologicznych oraz wstępnej analizy możliwości wdrożeniowej, można stwierdzić, że istnieje potencjał implementacji do praktyki przemysłowej.

Podsumowując, zaproponowana w dysertacji metoda kształtowania plastycznego płaskich kompozytów warstwowych z zastosowaniem ASR jest uzasadnionym ekonomicznie i technologicznie rozwiązaniem, które ma decydujący wpływ na jakość oraz właściwości funkcjonalne wyrobu gotowego.

Literatura

1. Boczkowska A., Krzesiński G., Kompozyty i techniki ich wytwarzania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016,
2. Herzberg R.W., Deformation and fracture mechanics of engineering materials, Wiley, New York 1983,
3. Dyja H., Mróz S., Rydz D.: Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych, Politechnika Częstochowska, Prace Naukowe Wydziału Inżynierii Procesowej Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria Metalurgia nr 33, Częstochowa 2003,
4. Lesuer D.R., Syn C.K., Sherby O.D., Wadsworth J., Lewandowski J.J., Hunt W.H., Mechanical behaviour of laminated metal composites, International Materials Reviews, 41, 1996, pp. 169-197,
5. Jimenez J.A., Ruano O.A., Smirnov O.M., Sherby O.D., Microstructural studies of a roll-bonded laminated ultrahigh carbon steel bar, Materials Characterization, 27, 1991, pp. 141-145.
6. Potapow I.N., Lebedew V.N., Kobalew A.G., Kuznetsow A.A., Bykow A.A., Klyuchnikow R.M., Laminated metal composites: a textbook, Metallurgiya, Moskwa 1986,
7. Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., Kompozyty. Wyd 2 zm ed. Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
8. <https://docplayer.pl/58322132-Temat-9-nauka-o-materialach-kompozyty-i-materialy-ceramiczne.html>, (12.11.2021).
9. Karpinos D.M. i inni.: Proczność kompozycyjnych materiałów. Nauka Dumka, Kijew 1978,
10. Rogalski G., Fydrych D., Walczak W.: Zastosowanie zgrzewania wybuchowego do wytwarzania kompozytów metalowych z osnową aluminiową. Przegląd Spawalnictwa 2013,
11. Braszczyńska -Malik K.N., Pędzich Z., Pietrzak K., Rosłaniec Z., Sterzyński T., Szweycer M., Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych. Kompozyty (Composites) 5(2005)1, 19-24,
12. German J.: Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych. Kraków: Politechnika Krakowska, 2001.

13. Brautman L., Krock R.H.: Composite materials. New York:Academic Press,1975.
14. Kainer K.U., Metal Matrix Composites. Custom- made Materials for Automotive and Aerospace Engineering, Wiley-VCH, Weinheim 2003.
15. Hufenbach W., Czulak A., MalczykP., Gruhl A., Kompozyty na osnowie metali lekkich Innowacyjne kierunki rozwoju nowoczesnych konstrukcji, Projektowanie i Konstrukcje, 11, p. 14-19, 2011
16. Siebel E.: "The Theory of Rolling Processes between Unequally Driven Rolls". Archiv Für Das Eisenhüttenwesen 15 (9): 125-128, 1942
17. Mordal K., Szarek A.: Modelowanie stanu naprężeń i odkształceń w kompozycie UHMWPE – włókno węglowe, Aktualne Problemy Biomechaniki, nr 17, str. 85-92, 2019,
18. Kubik K., Rydz D.: „Analiza obszaru złącza blach bimetalowych” XLII Studencka Konferencja Naukowa, Politechnika Częstochowska Innowacje w Inżynierii Produkcji, Technologii Materiałów i Bezpieczeństwie, 2018,
19. Prażmowski M., Paul H., Żok, F.: “Zastosowanie technologicznej warstwy pośredniej w układach platerowanych wybuchowo na przykładzie układu cyrkon–stal; Application of a technological interlayer in the explosive welding on the example of zirconium–steel clad”, *Weld. Tech. Rev.*, vol. 86, no. 4, 2014,
20. Paul H., Faryna M., Prażmowski M., Bański R.: Changes In The Bonding Zone Of Explosively Welded Sheets. Zmiany w warstwie połączenia płyt zgrzewanych wybuchowo, Archives Of Metalurgy And Materials, Volume 56, 2011, Issue 2,
21. Prażmowski M., Paul H., Żok, F.: “Zastosowanie technologicznej warstwy pośredniej w układach platerowanych wybuchowo na przykładzie układu cyrkon–stal; Application of a technological interlayer in the explosive welding on the example of zirconium–steel clad”, *Weld. Tech. Rev.*, vol. 86, no. 4, 2014,
22. Paul H., Prażmowski M., Morgiel J., Faryna M., Skuza W.: Przemiany fazowe w strefie połączenia blach zgrzewanych wybuchowo, Rudy i metale nieżelazne R 58, nr 11, s. 611÷614, 2013,
23. Paul H., Faryna M., Prażmowski M., Bański R.: Changes In The Bonding Zone Of Explosively Welded Sheets. Zmiany w warstwie połączenia płyt zgrzewanych wybuchowo, Archives Of Metalurgy And Materials, Volume 56, 2011, Issue 2,
24. Górski M., Kotala B., Białożor R.: Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego. XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 6–9 maja 2018,

25. Klupa A.: Rury z materiałów kompozytowych do przesyłania paliw gazowych. „Nafta-Gaz”, nr 9, s. 805–809, 2010,
26. Braszczyńska -Malik K.N., Pędzich Z., Pietrzak K., Rosłaniec Z., Sterzyński T., Szweycer M., Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych. Kompozyty (Composites) 5(2005)1, 19-24,
27. Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.: Kompozyty - podstawy projektowania i wytwarzania. Oficyna Wydawnicza PW. Warszawa 1993,
28. Ślężona J.: Podstawy technologii kompozytu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1998.
29. Wadsworth J., Lesuer D.R., Ancient and modern laminated composites – from the Great Pyramid of Gizeh to Y2K, *Materials Characterization*, 45, 2000, pp. 289-313.
30. Konieczny M.: Kształtowanie właściwości mechanicznych kompozytów warstwowych o osnowie Boczkowska A., Krześciński G., Kompozyty i techniki ich wytwarzania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016,
31. Dyja H.: Symetryczny i asymetryczny proces walcowania dwuwarstwowych wyrobów płaskich, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1990r
32. Rydz D., Skoblik R.: Numerical modelling of asymmetric double-layer Al-Cu plate rolling process, *Advances in Materials Science*, Vol. 6, Nr 2(10), s. 29-34, October 2006,
33. Chepurko M. I., i inni: Proizvodstvo bimetallicheskih trub i prutkov. Metallurgija, Moskwa 1986,
34. Potapow I.N., Lebedew V.N., Kobalew A.G., Kuznetsow A.A., Bykow A.A., Klyuchnikow R.M., Laminated metal composites: a textbook, Metallurgiya, Moskwa 1986,
35. Jimenez J.A., Ruano O.A., Smirnov O.M., Sherby O.D., Microstructural studies of a roll-bonded laminated ultrahigh carbon steel bar, *Materials Characterization*, 27, 1991, pp. 141-145.
36. Kum D.W., Oyama T., Ruano O.A., Sherby O.D., Development of ferrous laminated composites with unique microstructure by control of carbon diffusion, *Metallurgical Transactions A*, 17, 1986, pp. 1517-1521,
37. Lee S., Wadsworth J., Sherby O.D., Impact properties of a laminated composite based on ultrahigh carbon steel and Hadfield manganese steel, *Mechanics Research Communication*, 31, 1990, pp. 233-248,

38. Lesuer D.R., Riddle R.A., Gogolewski R.P, Syn C.K., Cunningham B.J., Fracture toughness and impact properties of laminated metal composites, 3rd International Conference on Composites Engineering, New Orleans 1996,
39. Rydz D.: The optimal conditions for production of bimetallic plate St36K+0H13J in asymmetrical hot rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume: 157-158, December 20, 2004, pp. 609-612,
40. Rydz D., Dyja H., Krakowiak M.: The influence of thickness of bimetallic layer (18G2A+0H18N10T) on distribution of the relative flow rate, *Proceedings of The Ninth International Manufacturing Conference in China (IMCC'2000)* s. 393-394, 16-17 August 2000, Hong Kong, *Journal of Materials Processing Technology* 138, p. 120-122, Elsevier, 2003,
47. Dyja H., Rydz D.: Numerical analysis of stresses in asymmetrical rolling of bimetallic plate, *CO-MAT-TECH'99, 7 międzynarodna vadecka konferencia/*, TRNAVA, s.300-305, 1999,
48. Rydz D., Skoblik R.: Problemy numerycznego modelowania walcowania blach Al-Cu i AlMg-Al-Cu zgrzewanych wybuchowo *MANUFACTURING'01. Współczesne problemy wytwarzania. T.1. Konferencja naukowo-techniczna* s. 261-268, Poznań 2001,
49. Wachowski M., Kosturek R., Sniezek L., Mróz S., Gloc M., Kawczyńska A.: The Analysis of the Microstructure of AZ31/AA1050/AA2519 Laminate Obtained by Explosive Welding Method, *Materials and Technology*, Vol.53, nr 2, p. 239-243, 2019,
50. Wachowski M., Kosturek R., Sniezek L., Mróz S., Stefanik A., Szota P.: The Effect of Post-Weld Hot-Rolling on the Properties of Explosively Welded Mg/Al/Ti Multilayer Composite. *Materials*. 13. 1930, 2020,
51. Mola R., Mróz S., Szota P., Sawicki S.: The analysis of the plastic deformation of two-layered magnesium – aluminium alloys (AZ31 – Al), *Metallurg*. 55 (4), p. 625-627, 2016,
52. Mróz S., Stefanik A., Szota P., Kwapisz M., Wachowski M., Sniezek L., Gałka A Szulc Z.: Numerical And Experimental Modeling Of Plastic Deformation The Multi-Layer Ti/Al/Mg Materials. *Archives of Metallurgy and Materials*. 64. 1361-1368, 2019,
53. Mróz S., Gontarz A., Drozdowski K., Bala H., Szota P.: Forging of Mg/Al bimetallic handle using explosive welded feedstock. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 18. 401-412. 2018,
54. Dyja H., Mróz S., Stradomski S., Lesik L., Maranda A., Nowaczewski J., „Wytwarzanie bimetalowych prętów międz-stop Al metodą wybuchową.”, *Inżynieria Mater.*, t. R. XXIII, , ss. 21–25, 2002,
55. Skoblik R., Wilczewski L.: *Technologia Metali*, Politechnika Gdańska 2006,

56. Skoblik R., Rydz D.: Problemy numerycznego modelowania walcowania blach AlMg-Al-Cu, *Manufacturing 2001*, s. 261-268, Poznań,
57. Walczak Z., *Zgrzewanie wybuchowe*, Wyd. Naukowo Techniczne, 1989,
58. Park J.S., Lim H.K., Park E.S., Shin H.S., Lee W.H., Kim W.T., Kim D.H., Fracture behaviour of bulk metallic glass/metal laminate composites, *Materials Science and Engineering A*, 417, 2006, pp. 239-242,
59. Stradomski G., Rydz D.: Numeryczna analiza walcowania blachy trójwarstwowej tytan-tantal-stal, *Hutnik-Wiadomości Hutnicze*, s.374-377, nr 5, 2012,
60. Uścińowicz R.: *Procesy odkształcania metalowych kompozytów warstwowych*. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2015,
61. Dyja H., Wosiek E., Morawiecki M.: Zastosowanie zgrzewania wybuchowego i walcowania do wytwarzania blach platerowanych o wysokich własnościach wytrzymałościowych, *Ogólnopolska Konferencja: Nowe technologie w przeróbce plastycznej*, Częstochowa 1980,
62. Buszta S., Piotr M., Śliwa R., Ostrowski R.: „Możliwości wykorzystania materiału ceramicznego na narzędzia do realizacji procesu zgrzewania tarcowego z przemieszaniem cienkich blach tytanowych”. *Obróbka Plastyczna Metali XXIX (3)*: 253–276, 2018,
63. Haga T., Suzuki S.: A twin-roll caster to cast clad strip, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 138, Issues 1–3, p. 366-371, 2003
64. Siebel E.: “The Theory of Rolling Processes between Unequally Driven Rolls”. *Archiv Für Das Eisenhüttenwesen* 15 (9): 125-128, 1942.
65. Juretzek G.: "Rolling Force and Moment with Mismatched Roli Diameters". *Freibergerer Researchcorpus B* 16: 74-81, 1957
66. Dewhurst P., Collins I.F., Johnson W.: A Theoretical and Experimental Investigation into Asymmetrical Hot Rolling, *Int. J. Mech. Sci.*, 16, s. 389-397, 1974,
67. Johnson W, Needham G. Paper 11: An Experimental Study of Asymmetrical Rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*. 180(9):270-281, 1965,
68. Vydrin V.N., Ageev L.M., Sudakov N.V. Samokhvalov L.N.: Opyt promyshlennogo ispolzovanija prokatki – volochenija dlja pravki polos, *Stal'*, 5, s. 54-55. 1982
69. Vydrin V,N., Ageev L.M., Sukharev V.A.: Krutjashhij moment na bochke valkov polosoj, *Izv. V.U.Z., Chern. Metall.*, 12, s. 88-91, 1976,
70. www.kronosedm.pl, 11.03.2020r.,

71. Hamauzu S., Yamada K., Kawanami T.: Rigid-Plastic Finite-Element Method Analysis of Asymmetric Rolling, Mat. Konf. COMPLAS'87, eds, Owen D.R.J., Hinton E., Onate E., Barcelona, s. 1087-1096, 1987,
72. Dyja H.: Pietrzyk M.: A study of Deformation During Rolling of Bimetal Plate and Sheet. W: 4th International Steel Rolling Conference The Science and Technology of Flat Rolling Vol. 2, Deauville, 12.1-12.7, 1987,
73. Przybyszewski B.: Wpływ udziału granic międzyfazowych na właściwości kompozytów ceramika-metal, Politechnika Warszawska 2011, https://repo.pw.edu.pl/docstore/download/WUT52f5a80326dc4cf6b06244da983764a8/Bart%C5%82omiej+Przybyszewski_Praca+in%C5%BCynierska.pdf, 10.03.2022
74. Pan D., Sansome D.H.: An Experimental Study of the Effect of Roll – Speed Mismatch on the Rolling Load during the Cold Rolling of Thin Strip, J. Mech. Work. Techn., 6, s. 361-377, 1982,
75. Pietrzyk M., Dyja H.: Simulation of metal of metal flow and heat transfer during hot rolling of bimetallic plates, Steel Res., 1991, 62, nr 6, 248-255,
76. Yu J. Gao D., Yu D.: Later Roll Force in Asymmetrical Rolling and its Influence on Rolling Stability, ISIJ Int., 35, 1995, s. 1489-1493.
77. Rydz D., Koczurkiewicz B., Stradomski G., Garstka T., Wypart J.: The Effect Of The Asymmetrical Rolling Process On Structural Changes In Hot-Rolled Bimetal Sheets, Archives of Metallurgy and Materials, no 4, p. 1495-1501, 2019,
78. Rydz D., Stradomski G., Dyja H.: Influence of relative rolling reduction and thickness layers bimetallic plate at the non-uniformity of the strain after rolling process, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.179, 2017,
79. Rydz D, Stradomski G, Szarek A, Kubik K, Kordas P. The Analysis of Pressed Cups Producing Possibilities from Rolled Bimetallic Al-1050 + Cu-M1E Sheets. *Materials.*; 13(10):2413, 2020,
80. Rydz D., Kubik K.: Analiza procesu wytwarzania bimetalowych blach cienkich, Rudy i Metale Nieżelazne, Recykling, nr 11, s. 26-29, 2018,
81. Kubik K., Rydz D.: „Analiza obszaru złącza blach bimetalowych” XLII Studencka Konferencja Naukowa, Politechnika Częstochowska Innowacje w Inżynierii Produkcji, Technologii Materiałów i Bezpieczeństwie, 2018,
82. Stradomski G., Rydz D.: Numeryczna analiza walcowania blachy trójwarstwowej tytan–tantal–stal, Hutnik-Wiadomości Hutnicze, s.374-377, nr 5, 2012,

83. Collins Ian Frederick. 1975. "A Slipline Field Analysis of Asymmetrical Hot Rolling." *International Journal of Mechanical Sciences* 17 (10): 643-651,
84. Kawalek Anna, Henryk Dyja, Marcin Knapieński.: "Wpływ asymetrycznego walcowania na poprawę wskaźników techniczno- ekonomicznych procesu walcowania blach na gorąco." *Hutnik- Wiadomości Hutnicze*, 75, s 316-320, 2008,
85. Wilk K., Pietrzyk M., Okon R., Pardej H., Bagrowski W.. "Możliwości Zastosowania Niesymetrycznego Walcowania W Walcowni Taśm Na Zimno Huty Warszawa." *Hutnik. Wiadomości Hutnicze* 58, s 54-60, 1991,
86. Collins I.F., Dewhurst P.: A Slipline Field Analysis of Asymmetrical Hot Rolling, *Int. J. Mech. Sci.*, 17, p. 643-651., 1975,
87. Pimenov A.F., Skorokhodov V.N., Trajno A.I., Efremov N.I., Radjukevich L.V., Lipukhin Ju. V.: Asimmetrichnye processy prokatki – analiz, sposoby i perspektivy primeneniya, *Stal'*, 3, , s. 53-56, 1982
88. Harer O. K., Lu J. S., Schwenzfeier W., Fischer F. D.: Front end bending in asymmetric rolling, *Modelling of metal rolling processes* 3, 13-15 December 1999, Church House Conference Centre London, UK s. 312-318.
89. Hwang Y.M., Chen T.H., Hsu H.H.: Analysis of Asymmetrical Clad Sheet Rolling by Stream Function Method, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 38. No 4, 1996,
90. Kalmykov V.V. Anan'ev I.N.: Klassen E.JA.: Analiz energosilovykh parametrov asimmetrichnoj gorjachej prokatki metodom konechnykh elementov, *Metally*, 4, s. 92-93, 1989,
91. Kiuchi M., Hsiang S.H., Hwang Y.M.: Analytical model of asymmetrical rolling processes of sheet, 4th International Steel Rolling Conference, "The Science and Technology of Flat Rolling", Deauville, vol. 2, s.F.4.1., 1987,
92. Potapkin V.F., Satonin A.V. Dobronosov Ju.K.: Osobennosti deformacii metalla pri asimmetrichnoj prokatke tonkih polos, *Metally*, 4, s. 62-66, 1987,
93. Drożdż T., Sochaczewski W., Bombik Z.: Badania nad zastosowaniem zgrzewania wybuchowego do wytwarzania blach bimetalicznych ze stopów CuSn5/AgPd30. *Materiały Elektroniczne* 1, s. 24-31, 1979,
94. Pesin A. M., Salganik V. M., Dyja H., Chikishev D.N., Pustovoitov D. O., Kawalek A.: *Asymmetric rolling: Theory and Technology*, *Hutnik –Wiadomości Hutnicze*, nr5/2012, Wydawnictwo Sigma-Not, Warszawa 2012,

95. Dyja H., Sałganik W. M., Piesin A. M., Kawalek A.: Asymetryczne walcowanie blach cienkich. Teoria, technologia i nowe rozwiązania, Metalurgia i Inżynieria Materiałowa Monografie nr 137, wyd. I, 348 s., Metalurgia i Inżynieria Materiałowa, 2008 r,
96. Dyja H.: Symetryczny i asymetryczny proces walcowania dwuwarstwowych wyrobów płaskich, Seria Monografie Nr 12, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1990,
97. Pesin A., Pustovoytov D., Sverdlik M.: Influence of different asymmetric rolling processes on shear strain. *Int J Chem Nucl Metall Mater Eng.* 8. 422-424, 2014,
98. Sinicyn V. G.: Nesimmetrichnaya prokatka listov i lent, *Metallurgiya*, s. 166, 1984,
99. Salganik V. M., Pesin. A. M., Shabalin Yu., A.: Novye sposoby i ustrojstva asimmetrichnoj prokatki, *Chernaya metallurgiya, Byul. in-ta „Chermedinformaciya”*, M., vyp. 9, s. 61–63, 1990,
100. Johnson W., Needham G.: An experimental study of asymmetrical rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180, 1966,
101. Johnson W., Needham G.: Further Experiments in Asymmetrical Rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 8:443-455, 1966,
102. Liang Hao, Hong-Shuang Di, Dian-Yao Gong.: Analysis of Sheet Curvature in Asymmetrical Cold Rolling. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 20(5):34-37, 2013,
103. Salimi M., Sassani F.: Modified slab analysis of asymmetrical plate rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44:1999-2023, 2002,
104. Minton J., Brambley E.: Meta-Analysis of Curvature Trends in Asymmetric Rolling, *International Conference on the Technology of Plasticity, Procedia Engineering* 207, p. 1355–1360, 2017,
105. Kawalek Anna, Henryk Dyja, Marcin Knapieński.: “Wpływ asymetrycznego walcowania na poprawę wskaźników techniczno- ekonomicznych procesu walcowania blach na gorąco.” *Hutnik- Wiadomości Hutnicze*, 75, s 316-320, 2008,
106. Sinicyn V. G.: Nesimmetrichnaya prokatka listov i lent, *Metallurgiya*, s. 166, 1984,
107. Pawłow L.M.: Teorija prokatki, *Metallurgizdat*, Moskwa 1950,
108. Golowanenko S. A., Meandrow L.W.: Proizvodstvo bimetallov, *Metallurgija*, Moskwa 1966,
109. Tarnowski I. Ja. I in.: Kontaktnyje naprjaznija pri plasticzeskoj deformacj, *Metallurgija*, Moskwa 1966
110. Buchwałow O.: Problemy deformacjii metalłow. *Trudy Ural. NIICzM*, t. 6, *Mietalurgija*, 1968.

111. Chawla N., Chawla K. K.: Metal matrix composites, 2006 Springer Science+Business Media, Inc
112. Zasucha P.F., Korszczyk W. D. Bukhvalov G. B., Erszow A. A.: Bimetalliczeskij prokat. Metallurgija, Magnitogorsk 1958,
113. Lukaszkin N.D., Perlin I.L., Korol W.K.: Siłowyje usłowija pri prokatke bimetalla stal H18N10T-aluminij i jego spławy. Stal, nr 9, 1971,
114. Dobrucki W. Zarys obróbki plastycznej metali. Katowice, Wyd. Śląsk 1975,
115. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. Thermo-mechanical analysis of a lever preform forming from magnesium alloy AZ31. Archives of Metallurgy and Materials, vol.57 Issue 4, s. 1211-1218, 2013,
116. Król S., Bański R., Szulc Z., Gałka A.: Practical aspects of structural tests of titanium-steel bonds made by explosive cladding and exposed to thermal process loads. Advances in Material Science 7, p. 50÷56, 2007,
117. Korszczyk W.D.: Połączenie platirovannoj aluminijem tonkolistowoj stalidla głębokoj wytężki. Stal nr 5, 1968.
118. Drucker, Peter F. PWE, Warszawa 1992r.,
119. Schumpeter J. Teoria Rozwoju Gospodarczego, PWN Warszawa 1960r.,
120. Podręcznik Oslo 2018. Wydawnictwo przygotowane przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju oraz Urząd Statystyczny Wspólnot Europejskich OECD Eurostat 2018 Oslo Manual
121. Szczęśniak B., Zasadzień M., Wapiennik Ł.: Zastosowanie analizy Pareto oraz diagram Ishikawy do analizy przyczyn odrzutów w procesie produkcji silników elektrycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria Organizacja i Zarządzanie 63, 125-147, 2012,
122. Marciniak S., Rafalski R.: Efektywność przedsięwzięć- organizacyjnych. PWE, Warszawa 1983r.,
123. Mała Encyklopedia Ekonomiczna .Warszawa 1974, str.185,
124. Luty W.: Poradnik Inżyniera .Obróbka cieplna stopów żelaza. Wyd. Naukowo techniczne 1977r.,
125. Knosala R.: Inżynieria Produkcji. Kompendium wiedzy. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne 2017r.,
126. Herian J., Rafalski Z., Halaczek D., Hadasik E.: Wybrane Techniki Wytwarzania Wyrobów Metalowych. Wskaźniki Techniczno-Ekonomiczne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2004

127. Warnecke H. J., Bullinger H. J., Voegelé A.: Rachunek Kosztów dla Inżynierów. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995r.,
128. Orłowski K. A., Walichnowski A.: Analiza ekonomiczna produkcji warstw licowych podłóg klejonych warstwowo. Drewno. Prace naukowe Doniesienia. Komunikaty. 2013 vol.56 nr 189, s.115-127.,
129. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 14 września 2021r. w sprawie minimalnego wynagrodzenia za pracę oraz wysokości minimalnej stawki godzinowej w 2022r. (Dz.U.z 2021r.,poz.1690),
130. Gabrusewicz W.: Podstawy analizy finansowej, Wydanie zmienione, Warszawa 2005r.,
131. Sierpińska M., Jachna T.: Ocena przedsiębiorstwa według Standardów Światowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005r.,
132. Skoblik R.: Walcowanie blach Al-Cu połączonych metodą wybuchową, Praca Badawcza, niepublikowana, Gdańsk 1996

Spis rysunków

Rys. 1. Schemat wytwarzania taśmy kompozytowej	14
Rys. 2. Schemat klasyfikacji kompozytów	16
Rys. 3. Podział kompozytów uzależniony od postaci wzmocnienia: a-c) włókniste, d) wzmacnianie cząstkami, e) warstwowe	16
Rys. 4. Schemat powstawania kompozytu warstwowego (laminatu)	17
Rys. 5. Widok kompozytu Cu-fazy międzymetaliczne po próbie rozciągania [20].....	20
Rys. 6. Rodzaje połączeń kompozytów a) i b) reaktywne, c) mechaniczne, d) i e) chemiczne, f) elektrostatyczne.....	22
Rys. 7. Schemat wytwarzania kompozytów z proszków metali A i B [73]	25
Rys. 8. Wybrane metody łączenia wielowarstwowych kompozytów metalowych: a) zgrzewanie wybuchowe, b) odlewanie, c) napawanie, d) zgrzewanie tarciove, e) dyfuzyjne (laminat), f) pakietowe (laminat) [3, 32, 62]	26
Rys. 9. Parametry procesu zgrzewania wybuchowego	28
Rys. 10. Schemat rozkładu sił a) dla walcowania prostego, b) dla walcowania symetrycznego	32
Rys. 11. Schemat asymetrycznego walcowania systemem PV	33
Rys. 12. Schematy asymetrycznego walcowania wyrobów płaskich dla: a) średnic walców roboczych, b) kinetyczna ASK wynikająca ze zróżnicowania prędkości obwodowych walców roboczych, c) kontaktowa będąca efektem występowania różnych sił tarcia na styku pasma z walcami, d) temperaturowa będąca efektem nierównomiernego nagrzania materiału do walcowania [22, 36, 76]	36
Rys. 13. Schemat procesu walcowania kompozytu dwuwarstwowego.....	40
Rys. 14. Wpływ nierównomierności odkształcenia warstw kompozytu trójwarstwowego na nierównomierne poszerzenie oraz nierównomierne płynięcie w kotlinie walcowniczej a) nierównomierne płynięcie warstw skutkujące nierównomiernym wydłużeniem, b) nierównomierne poszerzenie warstw po wyjściu z kotliny walcowniczej.....	42
Rys. 15. Schemat nierównomiernego płynięcia dwuwarstwowego kompozytu walcowanego z asymetrią średnic walców roboczych [55]	43
Rys. 16. Schemat asymetrycznego procesu walcowania blach dwuwarstwowych – optymalne warunki prowadzenia procesu [21÷23].....	44
Rys. 17. Schemat pojawienia się delaminacji jednopoziomowej w kompozycie warstwowym.	45
Rys. 18. Schemat procesu wytwarzania kompozytowych blach trójwarstwowych.....	55
Rys. 19. Schemat blokowy zakresu badań	56

Rys. 20. Zależność wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia aluminium Al oraz A2 od gniotu (a) i temperatury wyżarzania (b) [16].....	59
Rys. 21. Wpływ stopnia gniotu (a) oraz temperatury wyżarzania (b i c) na własności mechaniczne miedzi M1E [16]	62
Rys. 22. Schemat procesu zgrzewania kompozytu trójwarstwowego metodą zgrzewania wybuchowego	63
Rys. 23. Zależność naprężenie - odkształcenie komponentów stanowiących kompozyt warstwowy...64	
Rys. 24. Widok a) mikroskopu optycznego Nikon Eclipse MA-200, b) mikrotwardościomierza FM-700	65
Rys. 25. Widok laboratoryjnej linii walcowniczej w walcarką DUO 300	66
Rys. 26. Widok prostowania próbek kompozytowych warstwowych na maszynie wytrzymałościowej Zwick Z100 - przed kolejnymi przepustami walcowniczymi.....	67
Rys. 27. Mikroskop elektronowy Phenom XL wraz z zestawem komputerowym.	68
Rys. 28. Widok kompozytu warstwowego po połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego.....	69
Rys. 29. Widok próbki trójwarstwowej po bezpośrednim połączeniu dla powiększenia 25x	70
Rys. 30. Widok obszarów połączeń warstw po procesie łączenia metodą zgrzewania wybuchowego a) cały kompozyt warstwowy 50x, b) obszary połączeń dla powiększenia 200x	71
Rys. 31. Wyniki badań mikroskopii scaningowej obszaru Al-M1E krawędzi bocznej	72
Rys. 32. Wyniki badań mikroskopii scaningowej obszaru Al1050-M1E: a) faza γ_1 , b) faza β	73
Rys. 33. Wyniki badań mikroskopii scaningowej obszaru Al-Cu, a) pomiar od strony warstwy Al, b) pomiar od strony warstwy M1E.....	75
Rys. 34. Widok obszaru złącza Al1050 oraz AlMg5 a) pomiar punkt 1 warstwa Al, b) pomiar punkt 2 warstwa AlMg5.....	76
Rys. 35 Wyniki liniowej analizy EDS obszaru złącza Al oraz AlMg5.....	77
Rys. 36. Widok procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych AlMg5-Al-M1E dla warunków optymalnych procesu	78
Rys. 37. Widok kompozytowych próbek po pierwszym asymetrycznym przepuście walcowniczym dla gniotu względnego $\varepsilon=12\%$	79
Rys. 38. Widok zmian sił nacisku w asymetrycznym procesie walcowania blach kompozytowych dla gniotu względnego $\varepsilon=12\%$	81
Rys. 39. Przebieg zmian krzywizny kompozytowych blach w asymetrycznym procesie walcowania ...	82
Rys. 40 Przebieg zmian sił nacisku metalu na walce podczas asymetrycznego procesu walcowania – przepust II.....	84
Rys. 41. Wykres zmian krzywizny podczas asymetrycznego walcowania blach kompozytowych – przepust II, wariant I.....	84

Rys. 42. Przebieg zmian krzywizny walcowanego kompozytu warstwowego AlMg5-Al-Cu dla kolejnych przepustów II wariantu walcowanych próbek.....	85
Rys. 43. Wykres zmian grubości kompozytu warstwowego oraz warstw wchodzących w jego skład podczas procesu walcowania dla optymalnych wartości współczynnika asymetrii a_v dla II wariantu.....	87
Rys. 44. Widok rozwarstwionej próbki po pierwszym przepuście dla $\varepsilon=12\%$ - wariant I	89
Rys. 45. Widok obszaru rozwarstwienia z wyraźnymi występowaniem faz międzymetalicznych a) warstwa Al, b) warstwa Cu.....	89
Rys. 46. Wyraźne powstawanie rozwarstwienia materiału próbki walcowanej dla gniotu względnego $\varepsilon=15\%$ - wariant II.....	90
Rys. 47. Widok walcowanego pasma kompozytowego po drugim przepuście dla $a_v=1,0$	91
Rys. 48. Widok obszarów połączenia warstw kompozytu trójwarstwowego po trzecim przepuście dla $a_{vopt}=0,87$	92
Rys. 49. Widok obszarów połączeń warstw po czwartym przepuście walcowniczym dla $a_{vopt}=0,86$, a) kompozyt warstwowy na wysokości pasma, b) obszary połączeń warstw AlMg5-Al oraz Al-M1E	93
Rys. 50. Widok walcowanego pasma kompozytowego po piątym przepuście dla $a_{vopt}=0,855$	94
Rys. 51. Widok pasma kompozytowego warstwowego po piątym przepuście walcowniczym dla $a_{vopt}=0,855$	94
Rys. 52. Widok obszarów połączenia warstw kompozytu trójwarstwowego po 6 przepuście dla $a_{vopt}=0,85$	95
Rys. 53. Widok przewalcowanych próbek po 7 przepuście dla $a_{vopt}=0,83$, oraz po 8 przepuście dla $a_{vopt}=0,92$	95
Rys. 54. Widok obszarów połączenia warstw kompozytu trójwarstwowego po 8 przepuście.....	96
Rys. 55. Widok kompozytowych pasm po ostatnim zrealizowanym przepuście walcowniczym zrealizowanym dla gniotu całkowitego $\varepsilon=89,2\%$ prowadzonych dla walcowanych wg wariantów I i II.....	96
Rys. 56. Widok próbek do badań wytrzymałości na ścinanie połączonych obszarów a) M1E-Al, b) Al-AlMg5.....	97
Rys. 57. Wytrzymałość złączy na ścinanie w kompozytach trójwarstwowych M1E-Al-AlMg5	99
Rys. 58. Widok reprezentatywnych pomiarów twardości komponentów kompozytu warstwowego AlMg5-Al-M1E po metodzie zgrzewania wybuchowego.....	100
Rys. 59. Wyniki pomiarów mikrotwardości na wysokości kompozytu a) materiał wsadowy po zgrzewaniu wybuchowym, b) po procesie walcowania dla gniotu $\varepsilon=15\%$	101

Rys. 60. Wyniki pomiarów mikrotwardości na wysokości kompozytu a) po drugim przepuście $\varepsilon_c=31\%$, b) po piątym przepuście $\varepsilon_c=75\%$,.....	102
Rys. 61. Diagram Ishikawy dla analizy powstania niezgodności podczas symetrycznego walcowania blachy trójwarstwowej (opracowanie własne).	111

Spis tabel

Tabela 1. Skład chemiczny materiałów przeznaczonych do badań teoretycznych, M1E (PN-87/H-82120), A199,8 (PN-79/H-82160), AlMg5 (PN-87/H-88026)	58
Tabela.2. Parametry asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych AlMg5-Al-Cu oraz wyniki pomiarów–wariant I	80
Tabela 3. Parametry asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych AlMg5-Al-M1E – drugi przepust, wariant I	83
Tabela 4. Parametry technologiczne asymetrycznego procesu walcowania blach kompozytowych warstwowych dla optymalnych wartości współczynnika asymetrii a_v wariant II	86
Tabela 5.. Parametry procesu ścinania obszarów połączeń	98
Tabela 6. Analiza SWOT dotycząca wprowadzenia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów wielowarstwowych (opracowanie własne)	108

Załącznik

FORMULARZ GOTOWOŚCI WDROŻENIOWEJ	
A. Dane jednostki	Politechnika Częstochowska
Wydział/Instytut	Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Katedra	Katedra Metalurgii i Technologii Metali
Dyscyplina, której dotyczy opis	Inżynieria Materiałowa
B. Tytuł opisu wpływu (max 150 znaków ze spacjami)	
Wdrożenie technologii asymetrycznego walcowania wielowarstwowych wyrobów płaskich	
C. Wkład działalności naukowej	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Charakterystyka procesu ▪ Efekty działalności 	<p>W praktyce przemysłowej dotrzymanie warunków symetrycznego procesu walcowania jest dosyć trudne, a często wręcz niemożliwe podczas plastycznego kształtowania wyrobów wielowarstwowych. W efekcie występuje naruszenie symetrii względem osi obojętnej walcowania od strony każdego z walców, a w szczególności gdy walcowana jest blacha trimetalowa. Walcowanie blach i taśm wielowarstwowych jest w zdecydowanej większości procesem asymetrycznym. Dlatego do sterowania procesem często wprowadza się asymetrię prędkości obwodowych walców roboczych, która pozwala na sterowanie zarówno krzywizną pasma jak i rozkładem gniotu całkowitego na poszczególne komponenty blachy wielowarstwowej.</p> <p>Należy zauważyć, że metale i stopy metali, pomimo ekspansji tworzyw sztucznych, nadal są na czołowym miejscu w grupie materiałów konstrukcyjnych stosowanych we współczesnej technice. W ostatnim czasie można stwierdzić, że wraz z daleko idącym postępem technologicznym obserwuje się wzrost zapotrzebowania na nowe, wyspecjalizowane materiały konstrukcyjne o unikatowych właściwościach fizykochemicznych. Wobec wyczerpywania się dostępnych dla przemysłu złóż rzadkich metali oraz wzrastających kosztów ich pozyskania i przetworzenia, poszukuje się nowych niedrogich rozwiązań, które sprostałyby dzisiejszemu i przyszłemu zapotrzebowaniu. Pewną i stosunkowo niedrogą technologią jest wytwarzanie materiałów warstwowych na bazie istniejących metali poprzez ich trwałe zespolenie. Sprzyja temu rozwój zaawansowanych technik łączenia metali. Przewidywanym efektem prowadzonej działalności będzie wprowadzenie na rynek krajowy wyrobów wielowarstwowych po procesie walcowania.</p>
D. Informacja o podmiocie gospodarczym zainteresowanym wdrożeniem	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nazwa i siedziba przedsiębiorstwa 	HUZAP Sp.z o.o 41-905 Bytom Ul.Konstytucji 61
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Krótką charakterystyka prowadzonej działalności (do 100 wyrazów) 	Firma zajmująca się budową maszyn od 30 lat. Oferująca szeroki zakres usług min. walcowanie stożków i części cylindrycznych z blach ze stali zwykłej ,nierdzewnej oraz metali kolorowych. Produkcja zbiorników ciśnieniowych i bezciśnieniowych wykonanych ze stali zwykłej bądź szlachetnej. Konstrukcje stalowe ze stali węglowych ,wysokostopowych i nierdzewnych (rurociągi, silosy, zbiorniki).


HUZAP Sp. z o.o.⁽²⁾
 41-905 Bytom, ul. Konstytucji 61
 NIP 6262812392 Regon 240271066