

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Katedra Metalurgii i Technologii Metali

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Joanny Jasińskiej

Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Stradomski, prof. PCz.

Częstochowa 2022

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	4
Streszczenie	6
Abstract	8
1. WPROWADZENIE	11
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA	15
2.1. Podstawy technologii obróbki nagniataniem.....	15
2.1.1. Ogólna charakterystyka procesu	15
2.1.2. Wpływ nagniatania na materiał obrabiany	17
2.1.3. Zalety i wady obróbki nagniataniem	20
2.1.4. Parametry obróbki nagniataniem.....	22
2.2. Ogólna charakterystyka staliwa duplex.....	22
2.2.1. Proces odlewniczy staliwa duplex.....	29
2.2.2. Proces nagniatania staliwa duplex.....	32
2.3. Analiza techniczno-ekonomiczna procesów w przedsiębiorstwie.....	33
2.3.1. Ocena efektywności ekonomicznej wdrożenia	34
2.3.2. Okres zwrotu nakładów z inwestycji.....	36
2.3.3. Wskaźniki efektywności wdrożenia.....	38
2.4. Podsumowanie literatury.....	43
3. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA.....	46
3.1. Hipoteza i cele pracy	46
3.2. Plan i zakres badań	47
3.3. Metodyka badań.....	50
3.4. Materiał badawczy	56
3.4.1. Przygotowanie materiału badawczego	56
3.4.2. Warunki realizacji procesu nagniatania	58
3.5. Badania własne	62
3.5.1. Makro i Mikrostruktura.....	62
3.5.2. Chropowatość.....	66
3.5.3. Twardość	74
3.5.4. Badania tribologiczne.....	78
3.5.5. Badania zmęczeniowe	86
3.5.6. Odporność na korozję.....	93
3.6. Analiza wyników badań.....	106

3.7. Ocena potencjału wdrożenia procesu nagniatania do praktyki gospodarczej	110
3.7.1. Analiza okresu zwrotu nakładów z inwestycji	114
3.7.2. Analiza wskaźników produktywności.....	118
3.8. Konkluzje analizy techniczno-ekonomicznej procesu nagniatania	120
4. PODSUMOWANIE.....	123
5. WNIOSKI KOŃCOWE	127
Spis rysunków	129
Spis tabel.....	133
LITERATURA	135

Wykaz ważniejszych oznaczeń

WW	-	warstwa wierzchnia
TWW		transformacja warstwy wierzchniej
NSNT	-	nagniatanie statyczne naporowe toczne (<i>ang. burnishing rolling-pressuring - BRP</i>)
OUNP	-	układ obróbkowy - obrabiarka, uchwyt, narzędzie, przedmiot obrabiany
R_m	-	wytrzymałość na rozciąganie
$R_{p0,2}$	-	umowna granica plastyczności
HRC	-	twardość Rockwella w skali C
s_u	-	stopień względnego umocnienia
S_z	-	powierzchnia zmęczenia
f	-	posuw skrawania
a_p	-	głębokość skrawania
n	-	prędkość obrotowa
v_c	-	prędkość skrawania
f_n	-	posuw nagniatania
a_n	-	głębokość dosuwu nagniataka
v_n	-	prędkość nagniatania
i	-	liczba przejść obróbkowych
r	-	współczynnik korelacji
R_a	-	średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości
R_z	-	najwyższa wysokość profilu chropowatości
K_{Ra}	-	wskaźnik zmniejszenia parametru R_a chropowatości
K_{Rz}	-	wskaźnik zmniejszenia parametru R_z chropowatości
\bar{x}	-	wartość średnia
E_{kor}	-	potencjał korozji
EF	-	początek obszaru pasywacji
Etp	-	potencjał transpasywacji
I_{pas}	-	gęstość prądu pasywacji
PREN	-	wskaźnik odporności na korozję wżerową, <i>ang. Pitting Resistance Equivalent Number</i>
PP	-	Okres Zwrotu Nakładów (OZN), <i>ang. Payback Period</i>

Wykaz ważniejszych oznaczeń

PP _{max}	-	graniczny okres zwrotu nakładów
OECD	-	Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju, <i>ang. Organisation for Economic Cooperation and Development</i>
Eurostat	-	Urząd Statystyczny Wspólnot Europejskich, <i>ang. European Commission's Directorate-General for Statistics</i>
ASTM	-	Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów, <i>ang. American Society for Testing and Materials</i>
AISI	-	Amerykański Instytut Żelaza i Stali, <i>ang. American Iron and Steel Institute</i>
ATE	-	analiza techniczno-ekonomiczna

Streszczenie

Niniejsza dysertacja stanowi wypełnienie luki badawczej w zakresie zagadnienia dotyczącego nagniatania bezmiedziowych gatunków staliwa duplex. Sformułowany temat rozprawy w brzmieniu „Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego” obejmuje analizą dwa gatunki staliwa typu duplex tj. GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3.

Rozprawa przedstawiona została w dwóch częściach: pierwszej – zawierającej zagadnienia teoretyczne oraz drugiej – eksperymentalnej. Zagadnienia teoretyczne obejmują charakterystykę technologii obróbki nagniataniem oraz jej wpływ na kształtowanie właściwości warstwy wierzchniej materiałów inżynierskich. Nadto podjęto rozważania dotyczące genezy, rozwoju, wytwarzania oraz właściwości staliwa duplex.

Dobór rozwiązań technologicznych determinowany jest przez ocenę funkcjonalną procesu, atrakcyjność techniczno-ekonomiczną oraz możliwość wdrożenia, tak istotną z punktu praktycznego działalności przedsiębiorstw. Powyższe stwierdzenie uzasadnia zaprezentowanie zagadnień związanych z dostępnymi w literaturze narzędziami służącymi do oceny mającej za zadanie potwierdzenie pragmatyczności wdrożenia procesu nagniatania staliwa duplex do praktyki wybranego przedsiębiorstwa. W celu zapewnienia przejrzystości pracy w części literaturowej skoncentrowano się głównie na opisie tych metod i wskaźników, które zastosowano w części badawczej dysertacji.

Następnie sformułowano hipotezę oraz cele o charakterze poznawczym i utylitarnym oraz przedstawiono plan badawczy umożliwiający realizację założonych celów dysertacji.

W części eksperymentalnej pracy przedstawiono: metodologię prowadzonych badań, charakterystykę materiału badawczego oraz zamieszczono wyniki badań doświadczalnych procesu nagniatania staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3. Określono właściwości warstwy wierzchniej po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego (NSNT). W ramach realizacji celów rozprawy analizie poddane zostały dwie grupy parametrów: geometryczne i funkcjonalne. Wstępną ocenę powierzchni materiału zrealizowano poprzez analizę makroskopową okiem nieuzbrojonym oraz z zastosowaniem makroskopu. Ocenę parametrów geometrycznych przeprowadzono poprzez badanie chropowatości powierzchni

przed i po procesie nagniatania. Dokonując analizy wpływu procesu nagniatania na badany materiał zrealizowano badania makro- i mikrostruktury, twardości na przekroju próbki i jej powierzchni. Nadto zweryfikowano odporność na korozję, zużycie ściernie oraz zmęczenie mechaniczne powierzchni. Przeprowadzone badania stanowiły podstawę do oceny wpływu procesu NSNT na właściwości bezmiedziowych gatunków staliwa duplex. Uzyskane wyniki zrealizowanych badań laboratoryjnych poddano analizie.

W oparciu o dostępne narzędzia analizy techniczno-ekonomicznej wykonano przedmiotową ocenę dla wybranego zakładu produkcyjnego – PGO S.A. PIOMA Odlewnia w Piotrkowie Trybunalskim, jedyne krajowe producenta duplexowych odlewów stalowych. Do tego celu wykorzystano metodę wielokryterialną obejmującą kryteria progowe oraz uzupełniające, której wyniki zaprezentowano w rozdziale 3.7.

W oparciu o badania laboratoryjne oraz analizę techniczno-ekonomiczną wykazano, że proces NSNT staliwa duplex ma wysoki potencjał wdrożeniowy. Implikacja do warunków przemysłowych jest zasadna zarówno w aspekcie technologicznym, jak i ekonomicznym.

Praca została zakończona podsumowaniem, wnioskami, wykazem literatury, spisem tabel i rysunków.

Abstract

This dissertation fills a research gap in the subject of copper-free duplex cast steel burnishing. The thesis subject, defined as “Assessment of functional properties of copper-free duplex cast steel following the process of static pressure roller burnishing”, covers two grades of duplex cast steel, specifically GX2CrNiMoN22-5-3 and GX2CrNiMoN25-6-3.

The thesis is presented in two sections. Section one discusses theoretical issues, section two concerns the experimental part of the study. The theoretical issues include a characterisation of the burnishing processing technology and its impact on shaping the properties of surface layers of engineering materials. The origins, development, production and properties of duplex cast steel are also examined.

The choice of a specific technological solution depends on the functional assessment of the process, its technical and economic attractiveness, and the viability of deployment, highly important from the practical perspective of business operations. The above warrants discussing the issues related to the assessment tools available in literature, which can be used to verify the pragmatic value of implementing the duplex cast steel burnishing process in a particular business. To ensure adequate clarity of the paper, the literature section focuses mainly on describing the methods and indicators that are used in the research section of the dissertation.

The hypothesis, as well as learning and utilitarian goals are formulated next, and a research plan that enabled completing the assumed goals of the dissertation is presented.

In the experimental part of the paper the research methodology and characteristics of the test material are presented, and experimental test results for the process of burnishing GX2CrNiMoN22-5-3 and GX2CrNiMoN25-6-3 duplex cast steel grades are shown.

The properties of the surface layer following the static pressure roller burnishing (SPRB) process are determined. Two groups of parameters: geometric and functional were analysed as part of the thesis objectives. A preliminary assessment of the material’s surface was performed by means of macroscopic analysis with the naked eye and using a microscope. The geometric parameters were analysed by testing surface roughness before and after the burnishing process. When analysing the effect of the burnishing

process on the test material, sample macro- and microstructure, cross-sectional hardness, and surface were examined. Additionally, resistance to corrosion, abrasive wear, and mechanical fatigue of the surface was verified. The tests provided a basis for assessing the effect of the SPRB process on the properties of copper-free grades of duplex cast steel. The laboratory tests results were subsequently analysed.

Based on the technical and economic analysis tools available, the analysis in question was performed for a selected production facility – PGO S.A. PIOMA Odlewnia in Piotrków Trybunalski, the only domestic manufacturer of duplex steel casts. For this purpose, a multi-criterion method that included threshold and supplementary criteria was used, and the results are shown in section 3.7.

Based on the laboratory tests and a technical and economic analysis, it is demonstrated that the duplex cast steel SPRB process has a high potential for implementation. Implementation for industrial conditions is justifiable both from the technological and economic point of view.

The paper concludes with a summary, conclusion section, list of references, and a list of tables and figures.

*Serdeczne podziękowania za inspirację, pomoc merytoryczną i organizacyjną
w realizacji niniejszej dysertacji składam promotorowi
Dr. hab. inż. Grzegorzowi Stradomskiemu, Prof. PCz.*

*Składam również podziękowania dla przedsiębiorstwa
PGO S.A. PIOMA Odlewnia oddział w Piotrkowie Trybunalskim
a w szczególności Panu Bartoszowi Dąbal za pomoc
w przeprowadzeniu badań.*

1. WPROWADZENIE

Podążając w ślad za myślą Henry'ego Forda, iż: „Wszystko można robić lepiej, niż robi się dzisiaj”, należy poszukiwać rozwiązań, które będą doskonalsze, efektywniejsze, rozwojowe. Wskazaną maksymę odnosić można do wielu aspektów prowadzenia działalności, ale również nauki i życia, gdyż niesie ona uniwersalne przesłanie, aby wyruszać w fascynującą drogę poznania i udoskonalania otaczającej nas rzeczywistości. Od czasów prehistorycznych człowiek wykazuje zainteresowanie światem i zasadami nim rządzącymi. Dzięki ludzkiej naturze – kreatywnej, twórczej, dążącej do zrozumienia i analitycznej, przebyliśmy drogę od wynalezienia pisma, opracowania podstawowych działań arytmetycznych przez wynalazek koła, żarówki, komputera, aż do najnowszych odkryć i osiągnięć nauki. Również w odniesieniu do materiałów inżynierskich – metalowych ludzkość przemierzyła szlak od złota, miedzi, cyny i brązu (czasy prehistoryczne) przez odkrycie żelaza (ok. III w. p.n.e.), stali, niklu, aluminium (XIX w.), tytanu, molibdenu, cyrkonu (XX w.) i wielu innych metali na przestrzeni wieków w tym również stali duplex (1930 r.) [1, 2].

Stopy austenityczno-ferrytyczne (nazywane również duplexami) są stosunkowo młodymi materiałami, ponieważ posiadają około 90-letnią historię. Staliwo i stal duplex były odpowiedzią na zapotrzebowanie rynku, który poszukiwał materiału mogącego stanowić zamiennik dla stali zawierających w składzie kosztowny i trudnodostępny na rynku nikiel, bez uszczerbku dla jakości materiału. Duplexy charakteryzują się wysokimi właściwościami mechanicznymi oraz odpornością na korozję ogólną, wżerową, szczelinową, międzykrystaliczną. Cechy stali i staliwa duplex przyczyniły się do jego szerokiego zastosowania w wielu sektorach przemysłu tj.: przemyśle wydobywczym ropy naftowej, poligrafii, branży petrochemicznej, energetyce – systemach odsiarczania spalin, instalacjach odsalania wody morskiej, przemyśle okrętowym. Na przestrzeni lat udoskonalano duplexy, obecnie można przyporządkować je do pięciu grup [1]:

1. lean duplex – bez celowego dodatku Mo, np. 2304;
2. lean duplex – stopy zawierające Mo, np. S32003;
3. standard duplex – stopy duplex drugiej generacji, posiadające niską zawartość C, wysoką około 22% zawartość Cr oraz około 3% Mo, na przykład 2205 – stanowiący obecnie blisko 60 % ogólnej produkcji stali typu duplex;
4. super duplex – o zawartości Cr pomiędzy 25-26% oraz 3% Mo, posiadające odporność na korozję wżerową (PREN) między 40-45, taki jak 2507;

5. hiper duplex – gatunki wysokostopowe (np. S32707), posiadające wyższą zawartość Cr i Mo, odporność na korozję wżerową (PREN) powyżej 45, stosowane w systemach odsalania wody morskiej, jako materiał na rurociągi i elementy konstrukcji platform wiertniczych.

Główne cechy, które wpływają na popularność staliwa i stali duplex to [3÷8]:

- wysoka odporność na korozję ogólną, korozję międzykrystaliczną, korozję naprężeniową oraz wżerową, wynikająca z zawartość N, Mo, Cr, dzięki czemu mogą mieć zastosowanie w środowisku z chlorkami i kwasami;
- stanowią alternatywę dla stali stopowych jednofazowych (chromowo-niklowej stali austenitycznej, chromowej stali ferrytycznej);
- posiadają korzystne właściwości mechaniczne (wysoka granica plastyczności – 2 razy większa w porównaniu ze stałą austenityczną, mały współczynnik rozszerzalności cieplnej, wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysoka udurowienie i twardość);
- posiadają umiarkowaną cenę w odniesieniu do stali o wysokiej zawartości niklu;
- są dobrze spawalne i obrabialne mechanicznie.

Aktualnie zespoły naukowe kontynuują prace doskonalące proces technologiczny wytwarzania oraz obróbki plastycznej staliwa i stali duplex. Dzięki szybkiemu zwiększaniu się potrzeb w wielu dziedzinach przemysłu przewidywany jest wzrost zapotrzebowania na przedmiotowy materiał, który będzie mógł zapewnić określone właściwości użytkowe wyrobów z niego wytworzonych.

Niniejsza dysertacja ma za zadanie stanowić kolejny krok w rozwoju potencjału badanego materiału i wskazać odpowiedź na pytanie, czy zastosowanie obróbki nagniataniem staliwa duplex umożliwi poprawę jakości wyrobu gotowego w tym również jego właściwości funkcjonalnych. Uzasadniając wybór materiału do badań należy podkreślić, że materiał GX2CrNiMoN22-5-3 stanowi standardowy, komercyjny gatunek typu 2205 i posiada ogromny potencjał, ponieważ ma około 60% udziału w ogólnym rynku konstrukcji wykonanych ze stali typu duplex. Drugi materiał do badań, to staliwo duplex GX2CrNiMoN25-6-3 charakteryzujące się wyższą zawartością Cr oraz Ni, dzięki temu materiał ma wyższą odporność na korozję wżerową oraz szczelinową [1].

Obecna sytuacja przedsiębiorstw mających w profilu działalności produkcję elementów maszyn i urządzeń, wymusza na nich konieczność poszukiwania i wdrażania

rozwiązań technologicznych, które będą nowoczesne, efektywne, korzystne ekonomicznie, a jednocześnie ich stosowanie gwarantuje zapewnienie wymagań norm ekologicznych oraz oczekiwanego poziomu bezpieczeństwa w środowisku pracy [9, 10].

W procesach przeróbki plastycznej określenie parametrów technologicznych procesu, pozwalających na uzyskanie właściwości warstwy wierzchniej zgodnych z założeniami jakościowymi, wymaga konsultacji konstrukcyjno-technologicznej na etapie projektowania procesu produkcji. Zasadniczy wpływ na trwałość, niezawodność produktu oraz koszt jego wytworzenia ma dobór metody obróbki oraz parametrów technologicznych [11, 12]. Jedną z metod obróbki plastycznej warstwy wierzchniej zapewniającą wymagania konkurencyjności oraz łatwą w zastosowaniu jest nagniatanie. Analiza literatury z zakresu kształtowania własności powierzchni materiałów inżynierskich pozwala wskazać tendencje rozwoju wiedzy, jak i praktycznych aspektów stosowania obróbki nagniataniem [13÷19].

W związku z luką badawczą wynikającą ze znikomej liczby opracowań naukowych poruszających zagadnienia dotyczące wpływu nagniatania na staliwo duplex, zasadnym jest podjęcie rozważań w tym zakresie. Wypełnienie luki badawczej w przedmiotowej tematyce stawiane jest za cel naukowy niniejszej dysertacji. Zasadnym uznano przeprowadzenie badań eksperymentalnych polegających na wykonaniu odlewów o kształcie walca ze staliwa duplex w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3, które następnie poddano procesowi przesycania, toczenia oraz nagniatania statycznego naporowego tocznego. Proces nagniatania realizowano dla każdego z czopów przy zastosowaniu stałej prędkości obrotowej i nagniatania oraz zmiennych parametrów posuwu, głębokości dosuwu nagniataka i liczby przejść obróbkowych, przy czym po jednym czopie – stanowiącym punkt odniesienia – pozostawiono nienagniecionym.

Realia współczesnego rynku uzasadniają, aby przedsiębiorstwa, przed podjęciem decyzji o wdrożeniu rozwiązania technologicznego do praktyki ich funkcjonowania, dokonały obiektywnej oceny dotyczącej zasadności alokacji kapitału. Bowiem nawet najbardziej oryginalne rozwiązanie technologiczne może okazać się niezasadne ekonomicznie [20]. W warunkach konkurencji występującej w gospodarce rynkowej koniecznym jest, aby przedsiębiorstwa wykorzystywały zasoby produkcji najefektywniej pod względem finansowym, jak i skutków rynkowych. Ocena potencjału inwestycji o charakterze technicznym polega na określeniu, jak realizacja wpłynie na zmiany technologiczne w przedsiębiorstwie i czy w tym obszarze zagwarantuje atrakcyjność produktów bądź usług. Toteż projekt wdrożenia procesu nagniatania do praktyki

przemysłowej poddano ocenie techniczno-ekonomicznej, co wymagało wykonania prospektywnej oceny wielokryterialnej inwestycji. Ocenę efektywności techniczno-ekonomicznej zrealizowano na przykładzie przedsiębiorstwa PGO S.A. PIOMA Odlewnia oddział w Piotrkowie Trybunalskim. Zastosowana metoda wielokryterialna, opierała się na scoring modelu uwzględniającym kryteria: finansowe, rynkowe, techniczne, technologiczne, zgodność inwestycji ze strategią rozwoju przedsiębiorstwa, posiadane zasoby. Dodatkowe kryteria stanowiły: charakter branży, wiedzę i kompetencje kadry zaangażowanej w proces inwestycyjny, dotychczasowe doświadczenie w realizacji innowacji w przedsiębiorstwie.

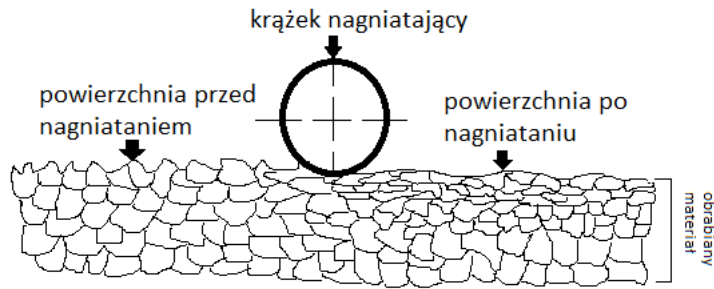
2. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

2.1. Podstawy technologii obróbki nagniataniem

Nagniatanie stanowi jedną z metod obróbki powierzchniowej materiałów, która pozwala uzyskać wyrób o korzystnej jakości technologicznej. Pierwsze działania mające na celu uzyskanie odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej na skutek stykowego działania narzędzia nagniatającego na materiał obrabiany odnotowano w 1916 r. Znaczący rozwój technologii nagniatania przyniosły lata trzydzieste i czterdzieste XX wieku, gdzie znalazło ono zastosowanie do umocnienia elementów maszyn w szczególności wałów i kół zębatach. Dynamiczny postęp technologii nagniatania przypadł kolejno na lata sześćdziesiąte XX wieku skutkując rozwojem metod nagniatania i umożliwiając stosowanie procesu nagniatania jako obróbki gładkościowej oraz dodatkowo dokładnej obróbki wymiarowej [21]. Analiza dostępnej literatury przedmiotu wskazuje, iż aktualne opracowania dotyczące procesu nagniatania koncentrują się na zagadnieniach dotyczących analiz teoretycznych i eksperymentalnych [11, 22÷33], możliwości stosowania tego rodzaju obróbki wykańczającej dla różnych grup materiałów [29, 34], rozwoju narzędzi nagniatających i obrabiarek [34, 35], oraz do obróbki głębokich otworów, otworów nieprzelotowych i powierzchni kształtowych [22, 25, 36]. Aktualnie nagniatanie znajduje się w stadium intensywnego rozwoju, co potwierdza wydawana literatura naukowo-techniczna oraz przyznawane patenty z zakresu technologii i narzędzi do obróbki nagniataniem na całym świecie [13]. Ponadto należy wskazać, że analiza założeń ogólnej polityki zrównoważonego rozwoju przyjętej przez Polskę wskazuje, iż prace naukowe dotyczące rozszerzenia zakresu zastosowania technologii nagniatania wpisują się w kluczowy zakres badawczo-rozwojowy o zasadniczym znaczeniu dla przemysłu oraz innych obszarów zastosowań technologii obróbki warstwy wierzchniej [14].

2.1.1. Ogólna charakterystyka procesu

Obróbka nagniataniem to metoda obróbki powierzchniowej wykańczającej, polegająca na uzyskaniu miejscowego odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej na zimno wskutek działania obciążeń zewnętrznych na obrabiany materiał. Proces nagniatania statycznego naporowego tocznego przebiega w układzie obróbkowym skonstruowanym z: obrabiarki, uchwyty, narzędzia i przedmiotu obrabianego. Schemat zmian strukturalnych w strefie nagniatanej przedstawiono na rysunku 1 [37].



Rys. 1. Schemat zmian strukturalnych materiału w procesie nagniatania

Źródło: opracowanie własne na podstawie [37].

Istnieje wiele rozwiązań technicznych oraz kinematycznych układu obróbkowego. Wyróżniamy około dwudziestu sposobów realizowania obróbki nagniataniem, które klasyfikować można ze względu na różne kryteria podziału. Mając na uwadze oczekiwany efekt obróbkowy wyróżnić możemy:

- nagniatanie gładkościowe stosowane w celu uzyskania zmniejszenia nierówności i chropowatości materiału;
- nagniatanie umacniające, które ma na celu poprawę właściwości ściernych, wytrzymałości na zmęczenie, twardości, odporności na korozję;
- nagniatanie wymiarowo-gładkościowe, którego zadaniem jest uzyskanie jednoczesnej dokładności wymiarowej i zmniejszenie chropowatości;
- nagniatanie topografii, które odnosi się do kształtowania nierówności powierzchni o określonych parametrach stereometrycznych np. wzorów, mikrorowków smarnych.

Przyjmując za kryterium podziału nagniatania charakter działania sił w czasie procesu, wyróżnia się nagniatanie: statyczne i dynamiczne. Podczas nagniatania statycznego element nagniatający pozostaje w stałym kontakcie z obrabianym materiałem i działa ze stałą siłą. W przypadku dynamicznego nagniatania siły są okresowo zmienne, działają dynamicznie. Można dodatkowo wyróżnić nagniatanie dynamiczne uderzeniowe skoncentrowane (odśrodkowe oraz impulsowe) oraz nagniatanie dynamiczne uderzeniowe rozproszone (strumieniowe oraz wibracyjne).

Ze względu na zastosowane w układach obróbkowych narzędzia nagniatające możemy wyróżnić nagniatanie z wykorzystaniem nagniataków bądź głowic

nagniatających. Nagniataki charakteryzują się prostą budową i jednym elementem nagniatającym, natomiast głowice nagniatające posiadają bardziej złożoną budowę. W tabeli 1 przedstawiono przykładowy podział obróbki nagniataniem ze względu na przyjęte kryteria [17, 24, 31, 37, 38].

Tabela 1. Klasyfikacja obróbki nagniataniem ze względu na przyjęte kryteria

OBRÓBKA NAGNIATANIEM					
KRYTERIUM PODZIAŁU	Charakter działania sił na przedmiot obrabiany oraz cechy kinematyczno konstrukcyjne układu		Zastosowane narzędzia nagniatające		Rodzaj kontaktu elementu nagniatającego narzędzia z powierzchnią obrabianą
	Cel obróbki				
OBRÓBKA UMACNIAJĄCA	NAGNIATANIE STATYCZNE	NAGNIATANIE DYNAMICZNE	NAGNIATAKI	GŁOWICE NAGNIATAJĄCE	TOCZENIE BEZ POŚLIZGU
OBRÓBKA GŁADKOŚCIOWA					
OBRÓBKA WYMIAROWO- GŁADAKOŚCIOWA					
OBRÓBKA TOPOGRAFII					
	<ul style="list-style-type: none"> • zwykle • oscylacyjne 	<ul style="list-style-type: none"> • mechaniczne • pneumatyczne • ultradźwiękowe 	<ul style="list-style-type: none"> • krążek • kulka • rolka 	<ul style="list-style-type: none"> GŁOWICE WIELOROLKOWE 	<ul style="list-style-type: none"> ŚLIZGANIE ZDERZENIE Z POWIERZCHNIĄ MATERIAŁU

Źródło: opracowanie własne na podstawie [17, 24, 31, 37, 38].

2.1.2. Wpływ nagniatania na materiał obrabiany

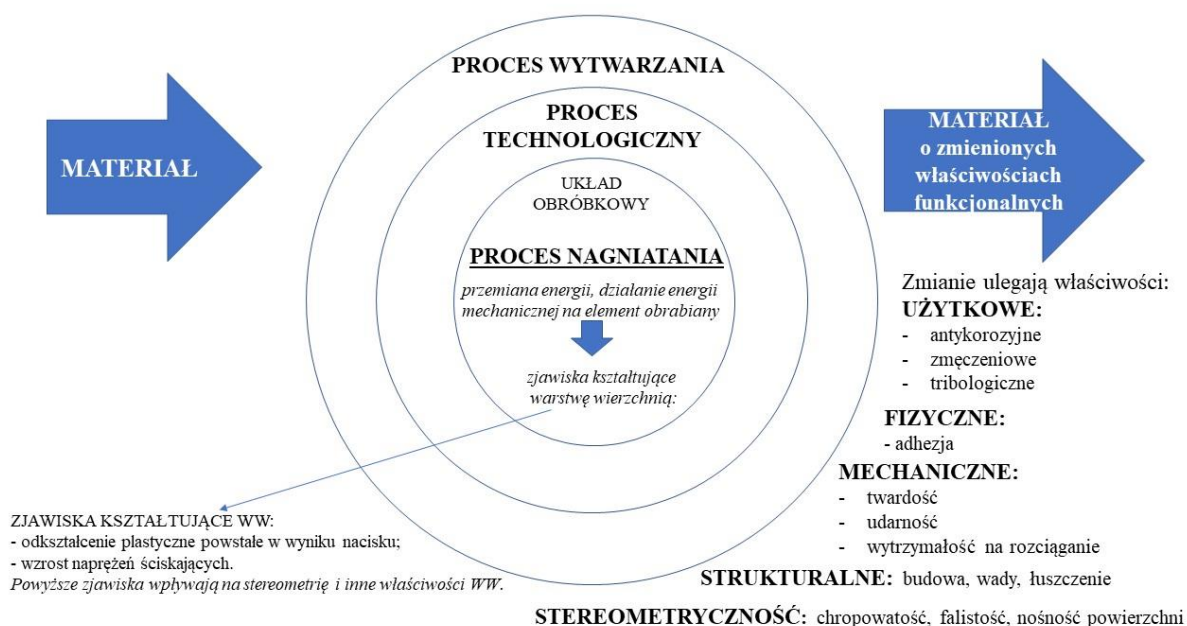
Podczas procesu nagniatania kształtowana jest struktura warstwy wierzchniej materiału o określonych właściwościach i strefowym charakterze. Należy zaznaczyć, że odkształcenia plastyczne zachodzą wyłącznie w warstwie powierzchniowej materiału [37]. Niemniej jednak niejednokrotnie to struktura i właściwości warstwy wierzchniej, a nie czyny przekrój materiału, stanowią o jakości technologicznej wyrobu, przekładając się na określone cechy użytkowe w warunkach eksploatacji [2, 39]. Kształt geometryczny i właściwości warstwy wierzchniej materiału mają wpływ na zużycie, zmęczenie, korozję oraz przewodność elektryczną [37]. Wybrane właściwości warstwy wierzchniej przedstawiono na rysunku 2.

WŁAŚCIWOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ			
MECHANICZNE:	UŻYTKOWE:	STRUKTURALNE:	STEREOMETRYCZNE:
<ul style="list-style-type: none"> - twardość - udarność - przyczepność 	<ul style="list-style-type: none"> - antykorozyjne - zmęczeniowe - tribologiczne 	<ul style="list-style-type: none"> - grubość - makrostruktura - mikrostruktura 	<ul style="list-style-type: none"> - topografia - chropowatość - nośność powierzchni - falistość

Rys. 2. Najważniejsze właściwości warstwy wierzchniej materiału

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2, 31, 37, 39].

Stan warstwy wierzchniej po obróbce nagniataniem charakteryzuje się zgniotem, któremu towarzyszy przemieszczanie się nierówności. Ziarna zostają odkształcone do pewnej głębokości i następuje ich równoległe wydłużenie w kierunku powierzchni i ruchu narzędzia. Teksturę zgniotu można wytwarzać w procesie nagniatania nawet do głębokości kilkunastu milimetrów. Zjawiska zachodzące podczas procesu nagniatania, to odkształcenie plastyczne oraz wzrost naprężeń ściskających do około 1200 MPa. W efekcie zjawisk zachodzących podczas procesu nagniatania kształtują się właściwości funkcjonalne, fizyczne, strukturalne, mechaniczne oraz stereometryczność warstwy wierzchniej materiału. Przyczyną powstawania ściskających naprężeń wewnętrznych jest dążenie warstwy odkształcanej do zwiększania powierzchni, któremu przeciwdziałają sprężyste, głębiej położone warstwy metalu. W efekcie zewnętrzne warstwy materiału nie mają możliwości powiększenia powierzchni. Skutkiem tego w obszarach położonych głębiej powstają równoważące naprężenia rozciągające w rdzeniu. Efektem procesu nagniatania jest umocnienie, którego stopień jest zależny między innymi od struktury metalograficznej stali. Materiał o strukturze sorbitycznej cechuje się możliwością umocnienia do 15%, martenzytycznej od 20-50%, a ferrytycznej do 100% [29÷31, 37]. Nadto stale stopowe posiadają niższy względny przyrost twardości względem stali niestopowych przy tej samej zawartości węgla, co jest wynikiem zniekształcenia siatki krystalograficznej poprzez wprowadzenie dodatków stopowych [40, 41]. Nagniatanie umożliwia kształtowanie właściwości funkcjonalnych materiału podwyższając odporność na działanie czynników eksploatacyjnych, takich jak: ścieranie, zmęczenie powierzchniowe, korozja powierzchniowa. Schemat wpływu procesu technologicznego kształtowania warstwy wierzchniej poprzez nagniatanie przedstawia rysunek 3. Występowanie korzystnych efektów obróbki sprawia, że materiały charakteryzują się wyższą trwałością eksploatacyjną i niezawodnością, niż elementy obrabiane przykładowo w procesach toczenia, frezowania czy szlifowania [31].



Rys. 3. Schemat wpływu procesu technologicznego nagniatania na kształtowanie wyjściowych właściwości materiału

Źródło: opracowanie własne na podstawie [2, 31, 37, 39].

Zastosowanie obróbki nagniataniem, przy odpowiednich parametrach, umożliwia zmniejszenie chropowatości powierzchni. Zasadniczy wpływ na efekt procesu ma odpowiedni dobór parametrów obróbki. Jak wskazuje się w pozycjach literaturowych [27, 42] realizując obróbkę gładkościową należy szczególną uwagę zwrócić na siłę docisku elementu nagniatanego oraz prędkość posuwu. Zbyt mała siła docisku nie zapewni zmniejszenia chropowatości, bowiem nie umożliwi odpowiedniego odkształcenia plastycznego nierówności. Natomiast zbyt duża wartość spowoduje wzrost chropowatości ze względu na zjawisko łuszczenia powierzchni. W przypadku materiałów o twardości poniżej 40 HRC zjawisko zmniejszenia chropowatości związane jest z wypełnieniem nierówności oraz przemieszczeniem nadmiaru materiału nagniatanego. Przemieszczanie nierówności w materiałach o twardości powyżej 40 HRC jest ograniczone, ponieważ największe obciążenia przenoszone są przez wierzchołki nierówności powierzchni nagniatanej powodując poślizg materiału i wypełnienie zagłębień [35]. W odniesieniu do posuwu, wraz z jego wzrostem zwiększa się chropowatość powierzchni. Należy mieć na uwadze, że choć nagniatanie umożliwia zwiększenie dokładności wymiarowej i dokładności kształtu obrabianych przedmiotów, to jest to możliwe w bardzo ograniczonym zakresie. Uzyskany na skutek procesu stan powierzchni może wywierać

istotny wpływ na zużycie ściernie, zmęczeniowe oraz korozyjne. Jak wskazuje B. Nowicki w pracy [43] istnieje silna korelacja pomiędzy chropowatością a wytrzymałością zmęczeniową. Wytrzymałość zmęczeniowa elementu konstrukcyjnego wzrasta wraz ze wzrostem gładkości powierzchni. Zmniejszenie parametru chropowatości powierzchni Ra z 2,5 µm do 0,16 µm pozwala na poprawę wytrzymałości zmęczeniowej nawet o kilkadziesiąt procent, jednak należy podkreślić, że w zakresie wartości parametru Ra = 2,5÷5 µm większy wpływ na wytrzymałość zmęczeniową mają naprężenia własne i mikrostruktura materiału [44]. Nie bez znaczenia dla trwałości zmęczeniowej pozostaje kierunkowość struktury stereometrycznej powierzchni. Wraz ze wzrostem chropowatości zwiększa się wpływ kierunkowości struktury na właściwości zmęczeniowe. Korzystnie na odporność na zmęczenie mechaniczne wpływa stosowanie obciążenia o kierunku równoległym do szeregowych mikrokarbów wielokrotnych [45]. Jak wskazano w pracy [46] obróbka nagniataniem stali nierdzewnej X5CrNi1810 umożliwia poprawę odporności na zmęczenie stykowe.

2.1.3. Zalety i wady obróbki nagniataniem

Mnogość dostępnych metod realizacji procesu nagniatania sprawia, że ocena omawianej technologii nie jest jednoznaczna. W literaturze podkreśla się zarówno zalety, jak i wady procesu. Uwagi wymaga fakt, iż szereg czynników wpływa na końcowy efekt procesu, a stan powierzchni po nagniataniu zależy zasadniczo od:

- wybranej technologii obróbki;
- zastosowanych parametrów technologicznych;
- dokładności układu nagniatającego;
- stanu powierzchni po obróbce poprzedzającej;
- właściwości plastycznych materiału;
- właściwości mechanicznych materiału;
- struktury materiału.

W celu osiągnięcia korzystnego wpływu procesu nagniatania na właściwości wyrobu niezbędne jest uwzględnienie charakterystyki materiałowej i geometrii obrabianego przedmiotu. W tabeli 2 przedstawiono ogólną ocenę procesu nagniatania z podziałem na korzyści i ograniczenia, które ujęto w zakresie trzech aspektów: technologicznego, jakości produktu oraz ekonomicznego.

Tabela 2. Zalety i wady obróbki nagniataniem w aspektach technologicznym, jakości produktu oraz ekonomicznym [opracowanie własne na podstawie 9, 11, 17, 31, 47, 48]

NAGNIATANIE		
	WADY	ZALETY
ASPEKT TECHNOLOGICZNY	Nie wszystkie materiały można nagniatąć, główne ograniczenie stanowi twardość materiału (musi być niższa od twardości narzędzia) i wydłużenie (musi być wyższe niż 6%) ¹	Pozwala na zastąpienie innych operacji: obróbki cieplnej, wykończeniowej np. szlifowania czy docierania, co pozytywnie wpływa na elastyczność produkcji
	Ograniczenia układu OUNP (konieczna duża sztywność)	Łatwość automatyzacji procesu dzięki możliwość stosowania uniwersalnych obrabiarek
	Trudny dobór odpowiednich parametrów realizacji procesu	Może być stosowane do produkcji jednostkowej i seryjnej
	Trudność w stosowaniu do cienkościennych tulei	Obróbka bezwiórowa – brak odprysków
ASPEKT JAKOŚCI PRODUKTU	Konieczność starannej obróbki poprzedzającej proces (ryzyko nierównomiernego zgniotu)	Umożliwia zwiększenie twardości
	Może powodować wady materiału w postaci: rozgniatania stref wprowadzenia i wyprowadzenia narzędzia nagniatającego, sfałdowań materiału i deformacji krawędzi	Zwiększa odporność na zużycie ściernie powierzchni, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję (mały współczynnik tarcia, dobra przyczepność środków smarujących)
	Istnieje ryzyko łuszczenia materiału (przy nagniataniu z dużą siłą)	Umożliwia uzyskanie powierzchni o dużej: gładkości, dokładności wymiarowej, współczynnika odbicia światła, wartości udziału materiałowego profilu nierówności
ASPEKT EKONOMICZNY	Niedostatecznie dopracowane badania symulacyjne, w konsekwencji trudny dobór odpowiednich parametrów procesu i możliwa duża ilość odpadów materiałowych	Zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa i higieny pracy (prosta obsługa stanowiska, mała ilość zagrożeń)
		Umożliwia zapewnienie oczekiwanych właściwości użytkowych wyrobu gotowego przy zastosowaniu tańszego materiału
	Kosztowne elementy nagniatające, dla materiałów twardych - powyżej 40 HRC. Przy materiałach o twardości powyżej 45 HRC istnieje konieczność stosowania diamentowych elementów nagniatających.	Stały koszt bez względu na dokładność, trwałość narzędzi nagniatających
		Wydajna, pozwala na redukcję kosztów wytwarzania (do 4 razy większa wydajność niż szlifowanie, jedno przejście narzędzia)
	Ekologiczna: wydajna/oszczędność energii, brak odpadów/bezwiórowa, może mieć zastosowanie do regeneracji materiału	
	Umożliwia zastąpienie pracochłonnego gładzenia, dogładzania, polerowania, szlifowania	

¹ W literaturze wskazuje się, że przytoczona reguła nie dotyczy żeliwa szarego i niektórych żeliw stopowych, nadto wyjątek stanowią stopy aluminium, które pomimo dużej wartości wydłużenia, nie są zalecane do obróbki nagniataniem ze względu na trudności w uzyskaniu małych chropowości.

2.1.4. Parametry obróbki nagniataniem

Wybór technologii nagniatania oraz parametrów procesu podyktowany powinien być głównie charakterystyką materiału, jego geometrią, a dodatkowo celem zastosowania obróbki np. umocnienie bądź wygładzenie. Dobór parametrów procesu ma istotne znaczenie dla uzyskania założonej jakości technologicznej. Na podstawie opracowań [11, 30, 31, 42] można wskazać, że ustalenia parametrów nagniatania dokonuje się według przybliżonych obliczeń sił i nacisków jednostkowych, wyników badań eksperymentalnych wykonanych na materiałach charakteryzujących się przybliżonymi właściwościami, normatywów specjalistycznych, nomogramów uniwersalnych bądź prób wstępnych. W przypadkach, gdzie nie występują opracowane, sprawdzone zależności i nomogramy oraz dla nagniatania ze skrawaniem zaleca się, aby dobór parametrów wykonywać na podstawie prób wstępnych.

Podstawowe parametry procesu nagniatania tocznego to: posuw, siła docisku oraz prędkość posuwu – ich wielkość należy kształtować w zależności od celu obróbki. Szczególną uwagę należy zwracać na wartość siły docisku, ponieważ zbyt duża siła może być przyczyną zjawiska łuszczenia powierzchni i wzrostu chropowatości, wad powierzchniowych oraz korozji naprężeniowej, a zbyt mała siła spowoduje niedostateczne odkształcenie nierówności oraz chropowatość niezgodną z założeniami jakościowymi [42, 43]. Zależności pomiędzy parametrami nagniatania a jakością powierzchni można znaleźć w pracach [42, 49, 50].

2.2. Ogólna charakterystyka staliwa duplex

Staliwo jest to stop żelaza z węglem i innymi pierwiastkami. Staliwo po otrzymaniu ciekłego metalu w procesie stalowniczym odlewa się do form odlewniczych, a krzepnący w nich odlew stanowi gotowy produkt. W zakresie składu chemicznego staliwo nie różni się znacząco od stali, jednak odmienna struktura materiałów powoduje, że staliwo i stal o analogicznym składzie chemicznym charakteryzują się nieco odmiennymi właściwościami. Staliwo, ze względu na znaczną niejednorodność chemiczną, strukturalną oraz porowatość, posiada niższe właściwości mechaniczne [37].

Staliwa i stale austenityczno-ferrytyczne, to materiały inżynierskie posiadające blisko 90-letnią historię, która wiąże się z rozwojem materiałów odpornych na korozję. Pierwsze udokumentowane zastosowanie stali nierdzewnej typu duplex miało miejsce w 1930 roku w przemyśle papierniczym (Szwecja). Intensywny rozwój prac nad

Analiza stanu zagadnienia

przedmiotowym materiałem przyniosły lata 40. XX w. (Niemcy, Francja, Finlandia). Początkowo stal ta była wykorzystywana do produkcji zbiorników, pomp oraz wymienników ciepła. Prawdziwą popularność materiał zaczął zdobywać na przełomie lat 70. i 80. przy instalacjach rurociągów podmorskich oraz gazociągów. Przez lata kontynuowano prace nad rozwojem stopów austenityczno-ferrytycznych, dzięki czemu powstawały kolejne generacje materiału. W tabeli 3 zestawiono najczęściej stosowane w przemyśle światowym staliwa i stale duplex.

Tabela 3. Gatunki stali i staliwa typu duplex wraz z zawartością pierwiastków w % masowych oraz PREN [1]

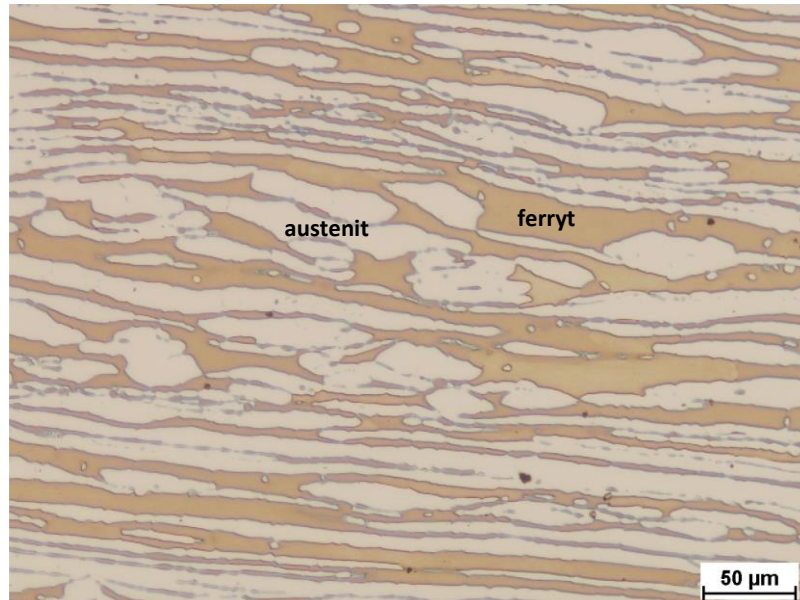
Stale duplex											
<i>ASTM</i>	<i>UNS nr</i>	<i>EN nr</i>	<i>%C</i>	<i>%Cr</i>	<i>%Ni</i>	<i>%Mo</i>	<i>%N</i>	<i>%Mn</i>	<i>%Cu</i>	<i>%W</i>	<i>PREN</i>
Stale duplex pierwszej generacji											
329	S32900	1.4460	0,08	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	-	1.00	-	-	30-31
	S31500	1.4424	0,03	18.0-19.0	4.3-5.2	2.5-3.0	0.05-0.1	-	-	-	28-29
	S32404		0,04	20.5-22.5	5.5-8.5	2.0-3.0	0.20	2.00	1.0-2.0	-	29-30
Stale duplex drugiej generacji											
Lean duplex											
	S32001	1.4482	0.03	19.5-21.5	1.0-3.0	0.6	0.05-0.17	4.0-6.0	1.0	-	21-23
	S32101	1.4162	0.04	21.0-22.0	1.35-1.7	0.1-0.8	0.2-0.25	4.0-6.0	1.0-0.8	-	25-27
	S32202	1.4062	0.03	21.5-24.0	1.0-2.8	0.45	0.18-0.26	2.0	-	-	25-28
2304	S32304	1.4362	0.03	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.6	0.05-0.2	2.5	0.05-0.6	-	25-28
	S82011		0.03	20.5-23.5	1.0-2.0	0.1-1	0.15-0.27	2.0-3.0	0.5	-	25-27
	S82012	1.4635	0.05	19.0-20.5	0.8-1.5	0.1-0.6	0.16-0.26	2.0-4.0	1.0	-	24-26
	S82122		0.03	20.5-21.5	1.5-2.5	0.6	0.15-0.2	2.0-4.0	0.5-1.5	-	24-26
		1.4655	0.03	22.0-24.0	3.5-5.5	0.1-0.6	0.05-0.2	2.0	1.0-3.0	-	25-27
		1.4669	0.045	21.5-24.0	1.0-3.0	0.5	0.12-0.2	1.0-3.0	1.6-3.0	-	25-27
Molybdenum-containing lean duplex											
	S32003		0.03	19.5-22.5	3.0-4.0	1.5-2.0	0.14-0.2	2.0	-	-	30-31
	S81921		0.03	19.0-22.0	2.0-4.0	1.0-2.0	0.14-0.2	2.0-4.0	-	-	28
	S82031	1.4637	0.05	19.0-22.0	2.0-4.0	0.6-1.4	0.14-0.24	2.5	1.0	-	27
	S82121		0.035	21.0-23.0	2.0-4.0	0.3-1.3	1.15-0.25	1.0-2.5	0.2-1.2	-	27-28
	S82441	1.4662	0.03	23.0-25.0	3.0-4.5	1.0-2.0	0.2-0.3	2.5-4.0	0.1-0.8	-	33-34
Standard duplex											
2205	S31803	1.4462	0.03	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	2.0	-	-	33-35
2205	S32205	1.4462	0.03	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	0.14-0.2	2.0	-	-	35-36
	S32950		0.03	26.0-29.0	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15-0.35	2.0	-	-	36-38
	S32808		0.03	27.0-27.9	7.0-8.2	0.8-1.2	0.3-0.4	1.1	-	2.1-2.5	36-38

cd. Tabeli 3.

<i>Super duplex</i>											
	S32506		0.03	24.0-26.0	5.5-7.2	3.0-3.5	0.08-0.2	1.0	-	0.05-0.3	40-42
	S32520	1.4507	0.03	24.0-26.0	5.5-8.0	3.0-4.0	0.2-0.35	1.5	0.5-2.0	-	40-43
255	S32550	1.4507	0.04	24.0-27.0	4.4-6.5	2.9-3.9	0.1-0.25	1.5	1.5-2.5	-	38-41
2507	S32750	1.4410	0.03	24.0-26.0	6.8-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	1.5	0.5	-	40-43
	S32760	1.4501	0.03	24.0-26.0	6.8-8.0	3.0-4.0	0.2-0.3	1.0	0.5-1.0	0.5-1.0	40-43
	S32906	1.4477	0.03	28.0-30.0	5.8-7.5	1.5-2.6	0.3-0.4	0.8-1.5	0.8	-	41-43
	S39274		0.03	24.0-26.0	6.8-8.0	2.5-3.5	0.24-0.32	1.0	0.2-0.8	1.5-2.5	40-42
	S39277		0.025	24.0-26.0	6.5-8.0	3.0-4.0	0.23-0.33	0.8	1.2-2.0	0.8-1.2	40-42
<i>Hyper duplex</i>											
	S32707		0.03	26.0-29.0	5.5-9.5	4.0-5.0	0.3-0.5	1.5	1.0	-	49-50
	S33207		0.03	29.0-33.0	6.0-9.0	3.0-5.0	0.4-0.6	1.5	1.0	-	52-53
<i>Cast duplex stainless steels</i>											
<i>CD4MCu Grade 1A</i>	J93370		0.04	24.5-26.5	4.75-6.0	1.75-2.25	-	1.0	2.75-3.25	-	32-33
<i>CD4MCuN Grade 1B</i>	J93372		0.04	24.5-26.5	4.7-6.0	1.7-2.3	0.1-0.25	1.0	2.7-3.3	-	34-36
<i>CD3MCuN Grade 1C</i>	J93373		0.03	24.0-26.7	5.6-6.7	2.9-3.8	0.22-0.33	1.2	1.4-1.9	-	40-42
<i>CE8MN Grade 2A</i>	J93345		0.08	22.5-25.5	8.0-11.0	3.0-4.5	0.1-0.3	1.0	-	-	38-40
<i>CD6MN Grade 3A</i>	J93371		0.06	24.0-27.0	4.0-6.0	1.75-2.5	0.15-0.25	1.0	-	-	35-37
<i>CD3MN Cast 2205 Grade 4A</i>	J92205		0.03	21.0-23.5	4.5-6.5	2.5-3.5	0.1-0.3	1.5	-	-	35-37
<i>CE3MN Cast 2507 Grade 5A</i>	J93403	1.4463	0.03	24.0-26.0	6.0-8.0	4.0-5.0	0.1-0.3	1.5	-	-	43-45
<i>CD3MWCuN Grade 6A</i>	J93380		0.03	24.0-26.0	6.5-8.5	3.0-4.0	0.2-0.3	1.0	0.5-1.0	0.5-1.0	40-42

Dzięki szczególnym właściwościom sukcesywnie wypierają tradycyjne stale odporne na korozję, również z zastosowań jako elementy odlewane [1, 51]. Charakterystyczną cechą omawianego materiału jest dwufazowa struktura austenityczno-ferrytyczna. Ogólnie przyjmuje się, że korzystne właściwości materiału można uzyskać dla równowagi fazowej w zakresie 30 do 70% ferrytu do austenitu, jednak w praktyce przemysłowej oczekiwanym stosunkiem ilościowym faz, zapewniającym optymalne właściwości materiału, jest równa ilość ferrytu i austenitu bądź nieznacznie wyższy udział austenitu [1]. Dwufazowa struktura wpływa na dobre właściwości wytrzymałościowe oraz odporność na korozję. Właściwości stali austenityczno-ferrytycznych są wyższe niż stali austenitycznych (np. AISI 304, 316), co jak wskazują autorzy w pracy [52] ma istotne znaczenie w możliwości zastosowania stali duplex na obudowy zbiorników magazynowych gazu i oleju, które podczas użytkowania są narażone na działanie mediów żrących przy wysokim ciśnieniu (69÷207 MPa) i temperaturze (149÷260°C). Wadę

materiału stanowi skłonność do pękania oraz wrażliwość na szybkość stygnięcia [51, 53, 54]. Mikrostruktura stali duplex przedstawiona została na rysunku 4, gdzie obszar ciemniejszy to ferryt, a jaśniejszy austenit.



Rys. 4. Przykładowa mikrostruktura duplex, traw. Mi21Fe

Źródło: materiały własne.

Istotne znaczenie poza równowagą fazową stanowią fazy międzymetaliczne występujące w strukturze, które powstają na skutek niejednorodnej szybkości krystalizacji i chłodzenia odlewów, segregacji pierwiastków oraz warunków pracy elementów [2, 6, 7, 52, 54]. Zasadniczo ich obecność wpływa na wzrost kruchości i obniżenie odporności na korozję [55÷57]. Krystalizacja staliwa duplex jest złożonym systemem metalurgicznym. Autorzy wielu prac [58÷64] koncentrują się nad mechanizmami krystalizacji staliwa duplex wykazując istnienie czterech podstawowych modeli jego krystalizacji w układzie równowagi fazowej Fe-Cr-Ni. W zależności od zawartości pierwiastków stopowych staliwo duplex może krystalizować w układzie: ferrytycznym, austenitycznym, ferrytyczno-austenitycznym lub austenityczno-ferrytycznym. Na podstawie literatury [61, 62, 65÷73] można wnioskować, że większość gatunków stali i staliwa duplex ma dobierany skład w ten sposób, aby krystalizować według modelu ferrytycznego, co oznacza, że oczekiwanym jest, by jedyną fazą krystalizującą z cieczy był ferryt. Natomiast dwufazowa struktura otrzymywana jest w wyniku przemiany ferrytu w austenit w stanie stałym przy temperaturze około 1300°C. Otrzymany stosunek ferrytu do austenitu w temperaturze pokojowej zależy od zawartości składników stopowych oraz

szybkości studzenia odlewu. Wzrost szybkości studzenia powoduje wyhamowanie przemiany ferrytu w austenit, a tym samym powoduje zwiększenie udziału ferrytu w strukturze w temperaturze pokojowej [74].

W literaturze [3, 54, 75, 76÷79] podkreśla się, że w obrębie jednego odlewu istnieje możliwość wystąpienia mieszanego modelu krystalizacji, co wynika z odmiennej szybkości chłodzenia odlewu w jego rdzeniu (wolniejsze chłodzenie) i obszarach brzegowych odlewu (szybsze chłodzenie).

W aspekcie technologicznym liczna zawartość składników stopowych skutkuje trudnościami w procesach produkcji odlewów. Zawartość poszczególnych pierwiastków determinuje rozwój mikrostruktury materiału, wpływa na wielkość i rodzaj wydzielania się faz wtórnych, a w związku z tym właściwości funkcjonalnych. Literatura przedmiotu [6, 7, 51, 53, 57, 80] określa szereg faz występujących w stalach i staliwach typu duplex, jednak ze względu na fakt, iż ich analiza nie leży w głównym obszarze problematyki prezentowanej w niniejszej dysertacji ich szersze omówienie zostanie pominięte. W tabeli 4 scharakteryzowano wpływ wybranych pierwiastków na rozwój struktury oraz właściwości stopów austenityczno-ferrytycznych.

Tabela 4. Wpływ wybranych pierwiastków stopowych na właściwości stali i staliwa duplex [opracowanie własne na podstawie 1, 4÷7, 42, 54, 81, 83÷85]

PIERWIĄSTEK stopowy	OPIS
<p><i>Chrom</i> Cr</p>	<p>W staliwie duplex zawartość chromu - zgodnie z normą [85], mieści się w przedziale od 21% do 27%. Chrom jest pierwiastkiem ferrytotwórczym, przy jego wyższej zawartości niezbędny jest wzrost zawartości niklu, aby utworzyć strukturę austenityczną lub duplex. Dodatek chromu jest niezbędny, aby zapewnić odporność na korozję naprężeniową. Wraz ze wzrostem zawartości Cr w stalach nierdzewnych rośnie odporność na korozję atmosferyczną. Zawartość Cr powyżej 22% powoduje wyraźny wzrost odporności na korozję wżerową i odporność na korozję szczelinową. Pierwiastek ten rozszerza zakres potencjałów pasywacji i zmniejsza gęstość prądu pasywacji. Zwiększa możliwość wystąpienia w strukturze kruchej fazy σ i węglików.</p>
<p><i>Molibden</i> Mo</p>	<p>Zawartość <i>Mo</i> w staliwach duplex - zgodnie normą [85], powinna mieścić się w zakresie 1,3 do 5%. Podobnie jak chrom, molibden stanowi pierwiastek ferrytotwórczy. Ma korzystny wpływ na odporność korozyjną ogólną, wżerową i szczelinową w roztworach chlorków. Jego zawartość w staliwach duplex powinna wynosić co najmniej 3,5%, gdy potencjalny problem może stanowić korozja naprężeniowa spowodowana chlorkami. Zalecana zawartość tego pierwiastka nie powinna przekraczać 5%, ze względu na ryzyko pęknięcia materiału wynikające z obszaru występowania fazy σ.</p>

cd. Tabeli 4.

<p><i>Azot</i> N</p>	<p>Zgodnie z normą [85] zawartość azotu w staliwie duplex może wynosić od 0,1 do 0,25%. Azot stanowi pierwiastek austenitotwórczy, zwiększa odporność na korozję wżerową i szczelinową poprzez zwiększenie podatności na pasywację. Optymalną odporność na korozję wżerową uzyskuje się przy jego zawartości w przedziale 4÷8% w staliwach o zawartości 22÷28 Cr. Azot pozytywnie wpływa na strukturę stopu, opóźnia formowanie faz międzymetalicznych, dzięki czemu ułatwia powstawanie struktury austenityczno-ferrytycznej. Ponadto azot równoważy skłonność Cr i Mo do tworzenia fazy σ. Jego dodatek pozwala na ograniczenie udziału kosztownego niklu w materiale. Pierwiastek sprzyja zwiększeniu ilości chromu w austenicie, ograniczając różnice w składzie chemicznym obu faz.</p>
<p><i>Nikiel</i> Ni</p>	<p>Normatywna zawartość niklu w staliwach duplex mieści się w przedziale 4,5 do 8,5% [85]. Jego zadaniem jest zrównoważenie mikrostruktury, tak aby zapewnić odpowiedni stosunek ferrytu i austenitu. Nikiel jest pierwiastkiem austenitotwórczym. Nadmierna zawartość w staliwie duplex może być przyczyną wzrostu zawartości austenitu, sprzyjając większemu stężeniu pierwiastków stabilizujących ferryty (Cr, Mo) i ich skłonność do wytwarzania fazy Sigma.</p>
<p><i>Miedź</i> Cu</p>	<p>Miedź stanowi pierwiastek nadający szczególnych właściwości staliwu duplex. Zgodnie z normą [85] występują trzy gatunki staliwa duplex zawierające w składzie chemicznym miedź. Według zaleceń zawartość miedzi w staliwie duplex powinna wynosić maksymalnie do 3,5% masowego. Miedź zapobiega powstawaniu fazy σ w strukturze staliwa duplex. Dodatek miedzi w odlewie korzystnie kształtuje właściwości lejne materiału i jest niezbędny do wystąpienia naturalnego starzenia materiału. Pierwiastek ten podnosi wytrzymałość na zużycie ścierne oraz odporność na korozję w środowisku kwasu siarkowego. Minusem miedzi jest, iż raz wprowadzona do stopu jest niemożliwa do wyświeżenia.</p>

Aktualnie udział stali duplex w ogólnym rynku stali jest niewielki, jednak z uwagi na właściwości materiału, przewidywany jest wzrost znaczenia tych gatunków. Dotychczas znalazły one zastosowanie w sektorach przemysłu związanych z produkcją elementów maszyn i urządzeń, od których wymagana jest wysoka wytrzymałość, odporność na korozję, to jest przemysłe wydobywczym ropy naftowej, poligrafii, branży petrochemicznej, energetyce – systemach odsiarczania spalin, instalacjach odsalania wody morskiej, przemyśle okrętowym [1, 51, 54, 86]. Obecnie w Unii Europejskiej wymagania dotyczące stosowania odlewów ze staliwa austenityczno-ferrytycznego, sposób ich badania oraz znakowania określono normą PN-EN 10283:2019. Zgodnie z wskazanym dokumentem wyróżnia się 7 gatunków staliwa duplex, a poszczególne z nich scharakteryzowano według składu chemicznego w tabeli 5 [85].

Tabela 5. Gatunki staliwa austenityczno-ferrytycznego wraz z charakterystyką składu chemicznego wg PN-EN 10283:2019 (zawartość pierwiastków w % masowych) [85]

Gatunki staliwa		Skład chemiczny, % masowy										
Oznaczenie chemiczne	Numer EN	C*	Si*	Mn*	P*	S*	Cr	Mo	Ni	N	Cu	W*
GX4CrNiMoN26-5-2	1.4474	0,05	1,0	2,00	0,035	0,025	25,0 do 27,0	1,3 do 2,0	4,5 do 6,5	0,12 do 0,2	-	-
GX4CrNiN26-7	1.4347	0,05	1,5	1,5	0,035	0,02	25,0 do 27,0	-	5,5 do 7,5	0,1 do 0,2	-	-
GX2CrNiMoN22-5-3	1.4470	0,03	1,0	2,0	0,035	0,025	21,0 do 23,0	2,5 do 3,5	4,5 do 6,5	0,12 do 0,2	-	-
GX2CrNiMoN25-6-3	1.4468	0,03	1,0	2,0	0,035	0,025	24,5 do 26,5	2,5 do 3,5	5,5 do 7,0	0,12 do 0,25	-	-
GX2CrNiMoCuN25-6-3-3	1.4517	0,03	1,0	1,5	0,035	0,025	24,5 do 26,5	2,5 do 3,5	5,0 do 7,0	0,12 do 0,22	2,75 do 3,5	-
GX2CrNiMoN25-7-3	1.4417	0,03	1,0	1,5	0,03	0,02	24,0 do 26,0	3,0 do 4,0	6,0 do 8,5	0,15 do 0,25	1,0*	1,0*
GX2CrNiMoN26-7-4	1.4469	0,03	1,0	1,0	0,035	0,025	25,0 do 27,0	3,0 do 5,0	6,0 do 8,0	0,12 do 0,22	1,3*	-

* oznacza wartości maksymalne pierwiastka

Należy podkreślić, że większość krajów powszechnie akceptuje normy światowych organizacji normalizacyjnych, takich jak Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN), International Organization for Standardization (ISO), American Society for Testing and Materials (ASTM). Systemy standaryzacji stopów metali, które wydawane są przez powyższe organizacje, nie są całkowicie tożsame, albowiem uwzględniają staliwa typu duplex o odmiennych, choć zbliżonych własnościach i składzie chemicznym. Dla przykładu Amerykańskie Stowarzyszenia Badań i Materiałów (ASTM) dopuszczają staliwa duplex z zawartością węgla sięgającą nawet do 0,08% [1].

Stanowiące przedmiot badań staliwo duplex charakteryzuje się wysokimi właściwościami mechanicznymi, jest odporne na korozję ogólną, wżerową, szczelinową, międzykrystaliczną oraz naprężeniową. Obecnie stosowane staliwo austenityczno-ferrytyczne umiarkowanie poddaje się obróbce plastycznej, może być umacniane poprzez zgmiot, jest wysoce wytrzymałe, ma dobrą udarność. Nie bez znaczenia pozostaje również fakt, iż obecnie stosowane stale duplex są dobrze spawalne, co potwierdzają przykładowe opracowania naukowe [87÷90]. Istotną rolę w określeniu zastosowania materiałów mają ich właściwości mechaniczne, pozwalające wskazać zdolność materiału do przenoszenia obciążeń. Zgodnie z normą PN-EN 10283:2019 w tabeli numer 6 przedstawiono

właściwości mechaniczne staliwa austenityczno-ferrytycznego dla próbek po przesyleniu, w odniesieniu do odlewów o maksymalnej grubości ścianki wynoszącej 15 cm.

Tabela 6. Właściwości mechaniczne staliwa duplex w temperaturze pokojowej według PN-EN 10283:2019 [85]

Gatunki staliwa		Właściwości mechaniczne			
Oznaczenie chemiczne	Numer ISO	Minimalna umowna granica plastyczności; $R_{p0,2}$ [MPa]	Minimalna wytrzymałość na rozciąganie; R_m [MPa]	Minimalne wydłużenie względne; A [%]	Minimalna Udarność; KV [J]
GX4CrNiMoN26-5-2	1.4474	420	600	20	30
GX4CrNiN26-7	1.4347	420	590	20	30
GX2CrNiMoN22-5-3	1.4470	420	600	20	30
GX2CrNiMoN25-6-3	1.4468	480	650	22	50
GX2CrNiMoCuN25-6-3-3	1.4517	480	650	22	50
GX2CrNiMoN25-7-3	1.4417	480	650	22	50
GX2CrNiMoN26-7-4	1.4469	480	650	22	50

W literaturze podkreśla się korzystne cechy środowiskowe staliwa duplex, które wynikają z jego trwałości i możliwość recyklingu. Staliwo duplex, jako materiał z grupy materiałów nierdzewnych, jest trwałe, posiada wysoki potencjał eksploatacyjny oraz znaczną możliwość wtórnego wykorzystania. Około 90% zużytej stali nierdzewnej jest poddawane recyklingowi i ponownie wykorzystywane – bez utraty jakości. Dodatkowo zastosowanie procesu nagniatania, jako alternatywy dla np. szlifowania jest działaniem zgodnym z koncepcją zrównoważonego rozwoju przemysłu, ponieważ jest technologią przyjazną środowisku i umożliwia zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów [91].

2.2.1. Proces odlewniczy staliwa duplex

Odlewnictwo jest technologią wytwarzania pozwalającą na uzyskanie przedmiotów z metali, polimerów lub ceramiki w dowolnych kształtach z niewielkimi ograniczeniami [92]. Proces polega na zalewaniu odpowiednio ukształtowanych form odlewniczych materiałem w stanie ciekłym, który wypełniając formę odlewniczą uzyskuje po zastygnięciu wymagany kształt oraz właściwości mechaniczne istotne z punktu widzenia pożądanej funkcjonalności wyrobu odlewanego. W odniesieniu do materiałów metalicznych właściwości mechaniczne są wynikiem zastosowania odpowiedniego składu chemicznego oraz temperatury wytopu, jak również zastosowanych parametrów obróbki

cieplnej i mechanicznej odlewu po wytopie. Odlewnictwo traktowane jest jako część przemysłu metalurgicznego, a zarazem przemysłu produkującego wyroby metalowe, jednak niewłaściwym jest utożsamianie odlewnictwa z hutnictwem.

Rozważając praktyczne uzasadnienie zastosowania odlewu do dalszej obróbki należy podkreślić zalety związane z technologią odlewania. Pierwszy aspekt stanowi możliwość uzyskania kształtu wyrobu gotowego, jaki trudno uzyskać stosując inne procesy kształtowania. Kolejnym pozytywnym atutem pracy z materiałami odlewanymi jest możliwość obniżenia kosztów wytwarzania. Wykonanie wyrobu gotowego zawierającego otwory, łopatki, żeberka jest znacznie tańsze niż późniejsze poddawanie wyrobu obróbce skrawaniem. Dodatkowo dzięki technikom szybkiego prototypowania i zaawansowanej technologii odlewnictwa wykonanie odlewu o skomplikowanych kształtach jest możliwe w krótkim czasie. Ponadto w odróżnieniu od konstrukcji spawanych, materiały w postaci lanej nie posiadają spoin, co przekłada się na wzrost ich odporności na zmęczenie i skutkuje zmniejszeniem masy wyrobu, poprawą jego właściwości mechanicznych oraz obniżką kosztów wytworzenia [92].

Dotychczas na rynku krajowym wykonywanie odlewów ze staliwa austenityczno-ferrytycznego przysparzało wielu problemów technologicznych wynikających głównie z koniecznością utrzymania dużej dyscypliny technologicznej, prowadzenia ścisłej kontroli procesu metalurgicznego, technologii odlewania, kontroli zasilania odlewów, temperatury zalewania, jak i sterowania procesem stygnięcia. Równie istotne znaczenie ma jakość złomu obiegowego, często z dużą zawartością miedzi dodawanej w celu poprawy właściwości użytkowych odlewów z tego tworzywa. Znaczącym problemem, ze względów ekonomicznych, jest zagwarantowanie odpowiedniej jakości wsadu zapewniającego uzyskanie zalecanej przez polską normę PN-EN 10283 zawartości węgla – poniżej 0,03% [75, 81]. Prowadząc zatem wytop sposobem odzyskowym ważne jest wyeliminowanie wszelkich materiałów, narzędzi i oprzyrządowania, które mogą stanowić źródło węgla. Jak wskazują źródła literaturowe nawet minimalne różnice w zawartości węgla w materiale wpływają znacząco na jakość wyrobu gotowego [75].² Ze względu na swój skład chemiczny tj.: niską zawartość węgla i wysoką zawartość chromu (powyżej 21%), zawartość niklu (zwykle nie mniej niż 3 do 6%) oraz dodatek pierwiastków takich jak molibden i azot, badane stopy (GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3) charakteryzują się niskimi właściwościami odlewniczymi. Nie ma to znaczenia przy

² Wskazane problemy technologiczne wykazano w odniesieniu do produkcji masywnych odlewów ze staliwa duplex.

odlewach ze znaczną grubością ścianek, jednak zalecaną, najbardziej efektywną, gwarantującą zapewnienie właściwości użytkowych technologią odlewania cienkościennych odlewów (nawet poniżej 1 mm) jest odlewanie odśrodkowe [83].

Pomimo ciągłego wzrostu zapotrzebowania na odlewy ze staliwa duplex niewielka liczba przedsiębiorstw krajowych posiada je w swojej ofercie, z tego powodu zachodzi konieczność ich importowania. Odlewnie zlokalizowane na terenie Polski, które oferują wykonanie odlewów ze staliwa duplex to:

- Zakład Mechaniki Przemysłowej "ZAMEP" Sp. z o.o. w Gliwicach (produkcja odlewów w procesie przetopu do 1000 kg) [93];
- PGO S.A. Pioma - Odlewnia oddział w Piotrkowie Trybunalskim (po raz pierwszy w Polsce produkcja odlewów wysokostopowych duplex do około 4000÷5000 kg przy zastosowaniu konwertora AOD) [94];
- Gliwickie Zakłady Urządzeń Technicznych „GZUT” Spółka Akcyjna (produkcja odlewów w procesie przetopu do 500 kg) [95].

Przyczyn ograniczonej produkcji można upatrywać w trudnościach technologicznych oraz czynnikiem ekonomicznym związanym z koniecznością poniesienia nakładów finansowych na dostosowanie linii produkcyjnej [51]. W świetle analizy bibliograficznej zjawiska wywierające determinujący, negatywny wpływ na technologię wytwarzania odlewów ze staliwa duplex stanowią: mechanizm krystalizacji oraz wydzielanie się szeregu faz międzymetalicznych [4, 6, 7, 51, 53, 57, 80]. Ze względu na stan techniczny rodzimych odlewni istnieje tendencja do wytwarzania elementów ze staliwa duplex o podwyższonej zawartości węgla, co może powodować ryzyko występowania pęknięć na gorąco. Istotne znaczenie mają korelacje pomiędzy sposobem krystalizacji, mikrostrukturą i tendencją do tworzenia się pęknięć w staliwach typu duplex o zmiennej, podwyższonej zawartości węgla [5, 54].

Z analizy literatury oraz zgłoszeń patentowych wynika, iż szereg ośrodków naukowych koncentruje swoją działalność na problematyce projektowania, wdrażania oraz usprawniania technologii wytwarzania staliwa duplex, co sprzyja możliwości zastosowania technologii w praktyce przemysłowej [51, 81, 83]. Właściwe zaprojektowanie procesu technologicznego pozwala na sterowanie strukturą materiału i uzyskanie optymalnych własności eksploatacyjnych odlewów. Odpowiedni dobór technologii wytwarzania pozwala na sterowanie udziałem faz w mikrostrukturze, a tym samym finalnymi

własnościami wyrobów [5]. Utrudnienie analizy procesu wytwarzania odlewów ze staliwa duplex stanowi brak w literaturze szczegółowych analiz przypadków (np. uszkodzeń odlewów), czego przyczynę można upatrywać w tajemnicy przedsiębiorstw i bardzo silnej konkurencji na rynku.

2.2.2. Proces nagniatania staliwa duplex

Według danych literaturowych [9, 37, 47, 96, 97] obróbka nagniataniem jest procesem kształtowania warstwy wierzchniej materiału pozwalającym na uzyskanie wyrobu o założonych, korzystnych właściwościach warstwy wierzchniej (WW). Możliwe jest sterowanie parametrami procesu nagniatania w taki sposób, aby uzyskać optymalne właściwości użytkowe wyrobu, co bezpośrednio przekłada się na jego trwałość. Ten typ obróbki może stanowić alternatywę dla obróbki skrawaniem, co pozwala na wzrost produktywności poprzez ograniczenie pracochłonności i zużycia energii. Nadto nagniatanie sprzyja ograniczeniu strat materiałowych oraz korzystnie kształtuje poziom bezpieczeństwa pracowników - ograniczenie zagrożenia w postaci wiórów czy odprysków.

Opracowania naukowe dotyczące nagniatania staliwa duplex stanowią bardzo skromny dorobek aktualnej wiedzy. W dostępnej literaturze brak jest pozycji, które koncentrują się na tematyce nagniatania tegoż materiału i w sposób kompleksowy obejmują zagadnienie w aspektach technologicznym oraz ekonomicznym. Zgodnie z danymi literaturowymi [42] nagniatanie może mieć zastosowanie do obróbki umacniającej oraz gładkościowej staliwa w gatunku GX2CrNiMoCuN25-6-3-3. Posuw, głębokość dosuwu nagniatania, prędkość nagniatania to główne parametry technologiczne procesu, które warunkują jego efekty. W opracowaniu [42] wskazano, zależność pomiędzy posuwem nagniatania a wskaźnikiem zmniejszenia chropowatości powierzchni oraz stopniem względnego umocnienia, określając, że wzrost posuwu nagniatania powoduje zmniejszenie wartości stopnia względnego umocnienia warstwy wierzchniej i wskaźnika chropowatości powierzchni.

Podkreślić należy, iż obróbka nagniataniem nie jest przeznaczona dla każdego materiału, wobec czego niezbędne jest sprawdzenie, czy przedmiotowa metoda obróbki plastycznej będzie użyteczna dla konkretnego zastosowania. Dotychczas nie opracowano zagadnień dotyczących efektów procesu nagniatania staliwa austenityczno-ferrytycznego w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3, jest to zagadnienie wymagające uzupełnienia. Wskazać można, że staliwo duplex spełnia podstawowe kryteria kwalifikujące je do grupy materiałów, których właściwości można skutecznie kształtować

podczas obróbki nagniataniem. Oczekiwanym efektem NSNT bezmiedziowych gatunków staliwa duplex jest poprawa właściwości funkcjonalnych materiału w obszarze WW.

2.3. Analiza techniczno-ekonomiczna procesów w przedsiębiorstwie

Literatura przedmiotu dotycząca działalności podmiotów gospodarczych w aspekcie ekonomicznym wyróżnia dwa elementy analizy ekonomicznej: analizę finansową oraz techniczno-ekonomiczną. Analiza finansowa obejmuje zagadnienia związane z analizą bilansu majątkowego oraz rachunkiem zysków i strat, oceną przepływów pieniężnych, analizą czynników kształtujących wynik finansowy, jak również ocenę sytuacji finansowej przedsiębiorstwa. Przedmiotem analizy techniczno-ekonomicznej (ATE) są poszczególne odcinki działalności gospodarczej przedsiębiorstwa i efektywność zastosowania czynników produkcji. ATE koncentruje się na ocenie: poziomu uzyskiwanej produkcji, wyposażenia technicznego, technologii wytwarzania, zaopatrzenia materiałowego i asortymentu prowadzonej produkcji, wskaźnikach zatrudnienia, wydajności pracy, gospodarki energetycznej i materiałowej itp. Zależność między analizą techniczno-ekonomiczną i analizą finansową ma charakter sprzężenia zwrotnego. Zjawiska będące przedmiotem analizy techniczno-ekonomicznej wywołują skutki w obszarze finansów. Z drugiej strony zasoby i środki finansowe warunkują i kształtują zjawiska o charakterze techniczno-ekonomicznym [98]. Najogólniej można wskazać, że przedmiot analizy techniczno-ekonomicznej stanowią głównie skutki ekonomiczne realizowanych procesów cząstkowych oraz rozwiązań organizacyjno-technicznych występujących na poszczególnych obszarach działalności gospodarczej przedsiębiorstw [98, 99].

W pracy [12] autor podkreśla również, że przed zastosowaniem w praktyce przemysłowej rozwiązań technologicznych mających na celu zwiększenie trwałości eksploatacyjnej materiałów koniecznym, choć często pomijanym, jest uprzednie dokonanie oceny techniczno-ekonomicznej procesu. Brak etapu oszacowania ekonomicznych efektów proponowanych rozwiązań technologicznych może skutkować błędną oceną potencjału implementacyjnego procesu do warunków gospodarczych. Realizacja prac aplikacyjnych przyczyniła się do rozwoju szeregu metod obliczeniowych służących do oceny techniczno-ekonomicznej rozwiązań, które są szeroko prezentowane w literaturze [12, 20].

2.3.1. Ocena efektywności ekonomicznej wdrożenia

W odniesieniu do oceny opłacalności planowanych działań obejmujących wdrożenie innowacyjnych projektów, fundamentalne znaczenie odgrywa analiza ryzyka inwestycyjnego oraz rachunek efektywności zamierzonych inwestycji, tak w aspekcie finansowym, jak i w niektórych przypadkach w aspekcie społecznym [20, 100÷102]. Decyzja o alokacji kapitału w określoną inwestycję powinna być oparta na obiektywnych wnioskach wynikających z zastosowania dostępnych metod rachunku efektywności inwestycji [20]. Dorobek literatury przedmiotu z zakresu metod prowadzenia oceny zasadności ekonomicznej inwestycji oraz działalności innowacyjnej jest okazały i stanowi źródło wsparcia w zakresie teorii (definicji, klasyfikacji, interpretacji), jak i potrzeb praktyki (zaleceń metodycznych, możliwości i warunków zastosowań).

Rozpoczynając rozważania dotyczące oceny ekonomicznej wdrożenia innowacyjnej inwestycji za zasadne należy uznać, w pierwszej kolejności, określenie znaczenia pojęć innowacja oraz inwestycja. Definicja innowacji wprowadzona została w 1911 r. przez J. A. Schumpetera, autor określił ją jako następujące działania:

- wprowadzenie udoskonalonego lub nowego produktu na rynek;
- wprowadzenie udoskonalonej lub nowej technologii produkcji;
- otwarcie nowego rynku;
- zakup surowców i półfabrykatów z wcześniej niewykorzystywanego źródła;
- reorganizacja procesów przemysłowych [103].

Na przestrzeni lat powstało wiele opracowań, w których autorzy prezentowali swoje pojęcie znaczenia innowacji w szerokim [104÷110] lub wąskim ujęciu [111÷116]. Na szczególną uwagę zasługuje publikacja OECD oraz Eurostatu [117], podręcznik jest przyjęty jako źródło międzynarodowego standardu w zakresie, tak definicji innowacji, jak i praktyki gromadzenia i analizy danych w tym przedmiocie. Według definicji prezentowanej w podręczniku rozumiana jest ona jako: *„wdrożenie nowego lub znacząco udoskonalonego produktu (wyrobu lub usługi) lub procesu, nowej metody marketingowej lub nowej metody organizacyjnej w praktyce gospodarczej, organizacji miejsca pracy lub stosunkach z otoczeniem”* [117]. Tak prezentowana definicja stanowi szerokie ujęcie innowacji i pozwala na zakwalifikowanie różnorodnych działań do jej zakresu. Jest ona rozszerzeniem węższej definicji zaprezentowanej w drugim wydaniu podręcznika Oslo [118], w którym innowację odnoszono do innowacji technologicznej i kategoryzowano w obrębie produktu i procesu.

Badania w obszarze innowacji skupiają wiele dyscyplin, w tym również koncepcje ekonomiczne, które stanowią źródło istotnych spostrzeżeń umożliwiając ocenę efektywności ekonomicznej wdrożenia. W ekonomii inwestycje utożsamia się z działaniem gospodarczym, którego celem nadrzędnym jest powiększenie już istniejących lub wytworzenie nowych dóbr [119, 120]. W literaturze przedmiotu pojęcie inwestycji ujmowane jest wielorako, jednak zasadniczo można wyróżnić wspólne elementy wskazywane dla inwestycji tj.: konieczność poniesienia nakładu, oczekiwany – korzystny efekt, wpływ czasu oraz ryzyko związane z przedsięwzięciem. W. Rogowski [20] wyróżnia dwa nurty definiowania inwestycji:

- nurt monetarny (finansowo-płatniczy) – ujmujący inwestycję jako rachunek przepływów pieniężnych;
- nurt rzeczowy (majątkowy) – traktujący inwestycję jako zamianę kapitału w aktywa.

Każdorazowo przedsiębiorstwo powinno ocenić zgodność inwestycji ze strategią przedsiębiorstwa, gdyż takie działanie zapewnia optymalną alokację kapitału. Zbieżność inwestycji ze strategią stanowi jedno z kryteriów oceny jej atrakcyjności. Aktualnie innowacyjne inwestycje stanowią aspekt strategii biznesowej mającej zapewnić przewagę konkurencyjną. Wskazane jest, aby polityka przedsiębiorstwa była realizowana odpowiedzialnie z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego inwestycji. Ocena wpływu innowacji na działalność gospodarczą powinna obejmować zdefiniowanie jej rodzaju, wskazania oczekiwanych korzyści występujących w określonym czasie, opracowanie metod realizacji zadań przy uwzględnieniu potrzeb konkretnego podmiotu gospodarczego i jego zasobów. Należy wskazać, że zarządzanie projektami jest nierozzerwalnie związane z ryzykiem. Standardowe wdrożenia obarczone są niższym ryzykiem niż projekty innowacyjne, co wynika m.in. z braku konieczności realizacji etapu badań i rozwoju, który mógłby przynieść nieoczekiwane efekty [121, 122]. W praktyce przedsiębiorstwa przyjmują różne strategie zarządzania ryzykiem. Jednym ze skutecznych narzędzi jego minimalizacji jest rachunek efektywności ekonomicznej. Opiera się on na szeroko opisanych w literaturze metodach i technikach, wśród których można wskazać:

- metody proste, nieuwzględniające wartości pieniądza w czasie, oparte na zysku jako mierze korzyści netto;

- metody dyskontowe, uwzględniające wartość pieniądza w czasie, oparte na przepływach pieniężnych wykorzystujące zasady rachunku dyskonta [20, 100, 101, 122].

Ze względu na moment realizacji można wyróżnić rachunek efektywności:

- prospektywny – stanowiący podstawę do podjęcia decyzji inwestycyjnej, wykonywany przed rozpoczęciem inwestycji;
- retrospektywny – pełniący niejako funkcję kontrolną, realizacja następuje podczas lub po zakończeniu inwestycji.

Kryterium sposobu przeprowadzania rachunku efektywności inwestycji pozwala wyróżnić:

- rachunek wielowskaźnikowy, ocena realizowana jest na podstawie zebranych cząstkowych wskaźników;
- rachunek jednowskaźnikowy, ocena dokonywana jest na podstawie jednego syntetycznego wskaźnika [122].

Dobór instrumentów analitycznych, służących do bezwzględnej oceny opłacalności inwestycji zależy jest w szczególności od:

- posiadanego zasobu informacji o inwestycji;
- etapu inwestycji.

Jak wskazują badania zrealizowane przez W. Rogowskiego [20], w praktyce krajowej, przedsiębiorstwa najczęściej łączą metody dyskontowe z prostymi, a najistotniejszym kryterium wyboru jest znajomość metody i wymagania nadzorcze.

Ze względu na zakres przedmiotowy niniejszego opracowania w dalszej części literaturowej omówione zostaną wybrane metody i techniki oceny efektywności inwestycji, które znalazły zastosowanie w części badawczej dysertacji.

2.3.2. Okres zwrotu nakładów z inwestycji

Jedną z najczęściej stosowanych metod prostych, wykorzystywanych do oceny zasadności realizacji przedsięwzięcia jest okres zwrotu z inwestycji – OZN (ang. *Payback period – PP*). Okres zwrotu nakładów definiowany jest jako: „*czas niezbędny do odzyskania nakładów inwestycyjnych, poniesionych na realizację danego zamierzenia z dodatnich przepływów pieniężnych generowanych przez projekt w kolejnych okresach*” [122]. Podstawą oceny opłacalności inwestycji jest określenie oczekiwanego czasu zwrotu poniesionych nakładów – OZN_{max} . Jest to metoda stosowana również w celu oceny ryzyka inwestycji, ponieważ umożliwia wskazanie na jaki okres zamrożony będzie kapitał zaangażowany w inwestycję. Uznaje się, że im dłuższy okres zwrotu z inwestycji, tym

ryzyko inwestycyjne jest wyższe. Ogólny algorytm metody przedstawia następująca formuła (2.1):

(2.1)

$$\sum_{t=0}^m I = \sum_{t=m+1}^{OZN} KN_t$$

gdzie:

I – nakłady inwestycyjne poniesione na inwestycję;

OZN – okres zwrotu z nakładów;

KN – korzyści netto generowane przez inwestycję;

t = 0 do m – okresy życia inwestycji, w czasie których ponoszone są nakłady inwestycyjne;

t = m + 1 – okresy życia inwestycji, w czasie których występują dodatnie korzyści netto.

Algorytm 2.1 ujmuje okres zwrotu nakładów jako skumulowaną korzyść netto powstałą w poszczególnych fazach cyklu życia inwestycji, aż do czasu zrównoważenia ich z nakładami inwestycyjnymi. W literaturze można spotkać różne warianty ujmowania nakładów inwestycyjnych i korzyści netto. W pracy przyjęto, iż do szacowania korzyści netto zasadnym jest wykorzystanie wyniku finansowego, czyli zysku, natomiast lewą stronę równania stanowią będą całkowite nakłady inwestycyjne finansowane kapitałem własnym przedsiębiorstwa. Zaletą kryterium okresu zwrotu jest prostota obliczeń i interpretacji wyników. Metoda preferuje projekty o szybkim okresie zwrotu, umożliwia pominięcie w analizie odległych, a przez to trudnych do oszacowania, przepływów gotówkowych. Do wad metody można zaliczyć:

- brak uwzględnienia wartości pieniądza w czasie;
- trudność oceny dla projektów nietypowych;
- arbitralność przyjęcia wymaganego okresu zwrotu;
- brak uwzględnienia przepływów pieniężnych po okresie zwrotu.

Główne kryteria decyzyjne opierają się na doświadczeniu wykonującego ocenę, który przyjmuje horyzonty wiarygodnej prognozy oraz średnie wartości dla przedsiębiorstw z branży. Maksymalny dopuszczalny okres zwrotu (OZN_{max}) określany jest arbitralnie [20, 100]. W praktyce im okres zwrotu jest krótszy, tym większa opłacalność inwestycji.

2.3.3. Wskaźniki efektywności wdrożenia

Ocena efektywności inwestycji ponad efekty finansowe powinna uwzględniać atrakcyjność w ujęciu techniczno-ekonomicznym oraz rynkowym. Przedsiębiorstwa produkcyjne wytwarzają w podstawowym procesie wytwórczym produkty, które mają zaspokoić potrzeby nabywcy. Realizacja procesu produkcyjnego, a w tym również procesu wytwórczego ma niezwykle istotny wpływ na efekt działalności. Zdolność do osiągnięcia założonych celów związana jest ze stopniem wykorzystywania posiadanych zasobów. W warunkach konkurencji występującej w gospodarce rynkowej koniecznym jest, aby przedsiębiorstwa wykorzystywały zasoby produkcji najefektywniej pod względem finansowym, jak i skutków rynkowych [28]. Ocena potencjału inwestycji o charakterze technicznym polega na określeniu, jak realizacja wpłynie na zmiany technologiczne w przedsiębiorstwie i czy w tym obszarze zagwarantuje atrakcyjność produktów bądź usług. Ocena efektywności procesów technologicznych opiera się głównie na relacji uzyskanego efektu do poniesionego nakładu. W literaturze przedmiotu w odniesieniu do procesu produkcyjnego dominuje efektywność ekonomiczna bazująca na podejściu wskaźnikowym, określana wzorem (2.2) [123]:

(2.2)

$$\mathbf{E} = \frac{e}{n}$$

gdzie:

E – efektywność;

e – efekty;

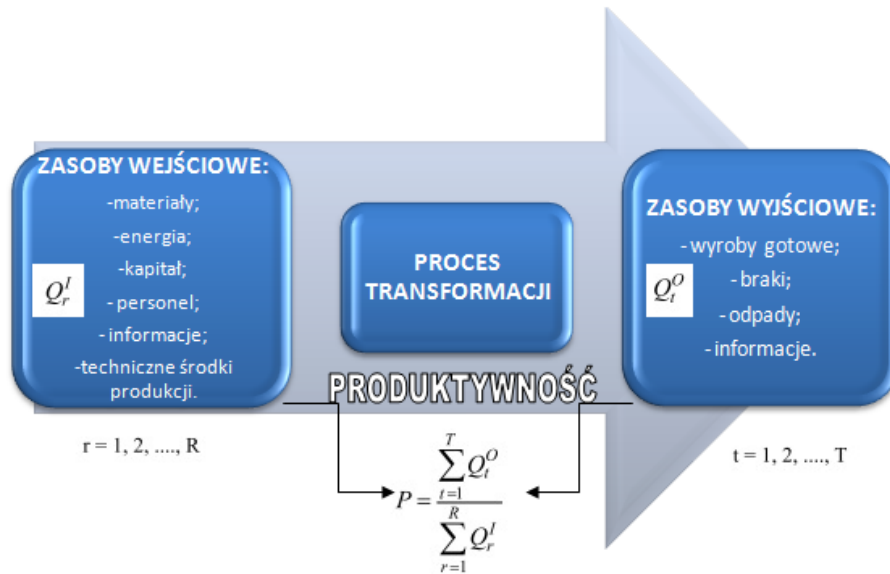
n – nakłady.

Brak jest uniwersalnych metod służących do kompleksowej ewaluacji efektywności operacyjnej procesu produkcji. W praktyce gospodarczej niezbędne jest wykorzystywanie wybranych oraz odpowiednio zaadaptowanych metod, technik i mierników oceny efektywności procesu produkcji [124, 125]. W ocenie nowych uruchomień technologicznych istotne jest wskazanie, jaka wartość dodana powstanie na skutek wdrożenia i określenie czy zmianie ulegnie stosunek osiągniętych wyników do nakładów. Czynności mające za zadanie kształtowanie efektywności procesu produkcyjnego w sferze operacyjnej mogą być realizowane w celu kształtowania produktywności, zmniejszania kosztów, minimalizacji strat oraz skracania trwania cyklu produkcyjnego [127]. Odwołując

się do wzoru 2.2 można wskazać, że efektywność procesu produkcji kształtowana jest poprzez zmianę stosunków nakładów do uzyskiwanych efektów w postaci:

- zmniejszenie nakładów przy zachowaniu poziomu efektów;
- zmniejszenie nakładów przy zwiększeniu poziomu efektów;
- stały poziom nakładów przy wzroście poziomu efektów;
- wzrost poziomu nakładów przy znacznym wzroście poziomu efektów [124, 127÷129].

Jednym z mierników efektywności jest produktywność, która stanowi zagadnienie literatury ekonomicznej oraz technicznej. Wśród pozycji literaturowych poruszających problematykę produktywności warto wymienić pozycję [130], która kompleksowo i syntetycznie przedstawia zagadnienia związane z produktywnością. Produktywność jest pojęciem wielowymiarowym. W ujęciu technicznym stanowi miarę efektywności działania organizacji, wyrażoną stosunkiem osiągniętych wyników produkcyjnych do nakładów wykorzystanych do ich uzyskania tzn. można ją odnosić do sposobu wykorzystanych min. materiałów, energii czy kapitału. Produktywność oznacza wielkość produkcji uzyskaną z jednostki określonego zasobu [131]. Natomiast w ujęciu społeczno-ekonomicznym jest identyfikowana jako zdolność postępu, wyrażającą się w organizowaniu i wspieraniu wszelkiego rodzaju przedsięwzięć podejmowanych w celu ciągłego podnoszenie efektywności działania organizacji, poprawiania jej pozycji rynkowej oraz zwiększanie zadowolenia pracowników z warunków pracy [131]. Autorka pracy [132] zaproponowała następującą definicję produktywności w ujęciu technicznym: „Produktywność jest to stosunek wielkości produkcji wytworzonej i sprzedanej (dostarczonej do klienta) w rozpatrywanym okresie do ilości wykorzystywanych i/lub zużytych w tym okresie zasobów wejściowych”. Tak zaprezentowana definicja produktywności wskazuje, że można ją odnosić do efektywności wykorzystania elementów wejściowych systemu produkcyjnego tj. materiałów, energii, kapitału, wiedzy, nakładu pracy, czasu, co zostało zaprezentowane na rysunku 5.



Rys. 5. Techniczna koncepcja produktywności

Źródło: opracowanie własne na podstawie [132].

Ogólny wzór na produktywność prezentuje algorytm (2.3):

(2.3)

$$P = \frac{\sum_{t=1}^T Q_{ti}^O}{\sum_{r=1}^R Q_{ri}^I}$$

gdzie:

Q_{ti}^O – ilość produktów wyjściowych rodzaju t wyprodukowana i dostarczona do odbiorców w okresie t ;

Q_{ri}^I – ilość zasobu wejściowego rodzaju r zużywana w okresie i ;

$r = 1, 2, \dots, R$ – rodzaje zasobów zużywanych przez system;

$t = 1, 2, \dots, R$ – liczba rodzajów produktów wytwarzanych przez system;

p_{ti}^O – cena jednostkowa produktu rodzaju t uzyskiwana w okresie i ;

p_{ri}^I – koszt jednostkowy zasobu rodzaju r płacony w okresie i .

Poziom produktywności jest zależny od wielu wzajemnie oddziałujących czynników, występujących w procesie twórczym oraz od zjawisk technicznych, ekonomicznych i społecznych. Główny podział wynika z możliwości ich kontrolowania przez przedsiębiorstwo, wyróżnia się czynniki zewnętrzne oraz wewnętrzne. Czynniki zewnętrzne nie mogą być kontrolowane przez przedsiębiorstwo, w tej grupie wymienić można: klimat, zasoby naturalne, uwarunkowania polityczne, ekonomiczne czy społeczne.

Drugą grupę stanowią czynniki wewnętrzne, które mogą być kształtowane przez przedsiębiorstwo. Wśród nich wyróżnia się: zasoby ludzkie, środki pracy, materiały i energie, proces produkcyjny oraz sposób zarządzania. Pomiar produktywności może być prowadzony na wielu poziomach w przedsiębiorstwie, a swoim zakresem obejmować całą organizację, jak i jej poszczególne elementy. Kształtowanie produktywności polega na podejmowaniu działań w obszarach czynników produktywności, których podział zaprezentowano na rysunku 6 [130, 132, 133].



Rys. 6. Podział czynników produktywności

Źródło: opracowanie własne na podstawie [130, 132, 133].

Pomiar produktywności związany jest z określeniem mierników i wskaźników będących zasadniczym elementem jej analizy. W literaturze najczęściej przedstawione są w postaci ilorazu, zawierającego w liczniku wielkość wytworzonej produkcji, a w mianowniku miarę zasobów zużytych lub wykorzystanych do jej wytworzenia [130]. Przydatność określonych mierników dostosowana powinna być do indywidualnych potrzeb przedsiębiorstwa. Syntetyczne indeksy produktywności mogą być skonstruowane w oparciu o dane odnoszące się do tonażu przypadającego na jednego zatrudnionego, ilości roboczogodzin przypadających na jednostkę produkcji, kosztu wytworzenia jednostki produkcji, zysku, czy też wartości dodanej, przypadającej na jednego zatrudnionego w przedsiębiorstwie. Przykładowe rodzaje mierników produktywności wraz ze sposobem wyrażenia przedstawia tabela 7.

Tabela 7. Wybrane wskaźniki produktywności, sposoby ich wyrażania oraz przykłady działań na rzecz wzrostu produktywności
[opracowanie własne na podstawie 125, 130, 132, 133]

Przykład wskaźnika produktywności	Sposób wyrażenia wskaźnika	Przykładowe działania na rzecz zwiększenia produktywności
Produktywność czasu pracy pracownika	- liczba wyrobów na roboczogodzinę [np. 50 szt/rg]	- motywowanie pracowników - właściwy dobór kadry - szkolenia pracowników - realizacja pracy w komfortowych ergonomicznych warunkach - zastosowanie wydajnych procesów technologicznych
Produktywność materiałów	- wielkość produkcji na jednostkę materiałów [szt/kg] - liczba wadliwych dostaw surowców na łączną liczbę dostaw surowców - określany w [%]	- zmniejszenie materiałochłonności - wykorzystanie tańszych substytutów materiałów - doskonalenie źródeł dostawy - zmniejszenie liczby braków - zastosowanie innowacyjnych, bardziej wydajnych, mniej ubytkowych metod produkcji - właściwy dobór materiału
Produktywność energii	- liczba wyrobów na 1 kWh energii zużytej [np. 50 szt/kWh] - liczba jednostek wyrobu na jednostkę kosztów za energię [np. 50 szt/zł]	- zmniejszenie energochłonności procesu; - doskonalenie źródeł dostawy energii;
Produktywność kapitału	- stosunek nakładów kapitałowych do wielkości produkcji sprzedanej [np. 300 zł/szt]	- kontrola kosztów
Produktywność procesu	- liczba wyrobów na roboczogodzinę [np. 50 szt/rg] - liczba reklamowanych wyrobów na liczbę wyrobów ogólnie- określany w [%] - liczba maszynogodzin do roboczogodzin [mtg/rg]	- wyeliminowanie czynników zakłócających proces; - automatyzacja, robotyzacja procesu - innowacyjne wdrożenia technologii - zmniejszenie czasu produkcji wyrobu

Właściwe zarządzanie poziomem produktywności pozwala na efektywne wykorzystanie wszystkich zasobów przedsiębiorstwa. Jej analiza w przedsiębiorstwie umożliwia scharakteryzowanie jego działalności operacyjnej i jest narzędziem skutecznego zarządzania. Optymalizacja procesów produkcyjnych poprzez zwiększanie produktywności stanowi bardzo istotne zagadnienie z zakresu działalności przedsiębiorstw, choć jak wskazuje literatura trudno o uniwersalne rozwiązania w tym zakresie. Niektórzy znani autorzy m.in. M.E. Porter utożsamiają produktywność z konkurencyjnością, podkreślając jej kluczowe znaczenie dla przetrwania i rozwoju przedsiębiorstwa, wskazując, iż produktywność przesądza o zdolności do wykorzystania zasobów, a co za tym idzie do uzyskania zysku, który stanowi zasadnicze źródło rozwoju [134].

2.4. Podsumowanie literatury

Inspirację do zajęcia się problematyką nagniatania staliwa duplex stanowią między innymi prace Katedry Metalurgii i Technologii Metali Politechniki Częstochowskiej dotyczące doskonalenia procesów wytwarzania i obróbki materiałów. Na podstawie analizy literatury, badań wstępnych oraz własnych doświadczeń autorka za zasadne uznała napisanie dysertacji pt. *Ocena właściwości funkcjonalnych bezmiedziowego staliwa duplex po procesie nagniatania statycznego naporowego tocznego*. Uzasadniając wybór tematu należy podkreślić, iż problematyka technologii nagniatania staliwa duplex stanowi bardzo istotne, wymagające uzupełnienia zagadnienie naukowe i praktyczne, którego rozwój może przyczynić się do zwiększenia konkurencyjności polskiego przemysłu. Znikoma ilość opracowań naukowych, w szczególności najnowszych, dotyczy procesu nagniatania staliwa duplex, brak jest dostępnych opracowań dotyczących nagniatania bezmiedziowych gatunków staliwa duplex, w związku z czym słusznym jest prowadzenie badań w tym zakresie.

Analiza literatury przedmiotu pozwala stwierdzić, iż proces nagniatania posiada wiele zalet, pomimo których, zdaniem autorki jest niedostatecznie stosowany w warunkach przemysłowych. Przyczyn takiego stanu rzeczy można upatrywać w trudnościach wynikających z metodyki projektowania procesu, między innymi braku dopracowanych metod numerycznych, które zapewniałyby produkcję wyrobu o zaprojektowanych właściwościach funkcjonalnych dla określonych warunków eksploatacji. Bariery stosowania omawianego procesu w praktyce gospodarczej wynikają również z ograniczonej ilości opracowań dotyczących oceny potencjału jego wdrożenia w aspekcie techniczno-ekonomicznym - co stanowi jeden z determinujących czynników decyzyjnych.

W oparciu o literaturę [31, 47] należy wskazać, że obróbka nagniataniem jest ekoinnowacyjna posiada zalety, tak w aspektach technologicznym, ekonomicznym, jak i ekologicznym, co powinno stanowić dodatkowy argument za implementacją do praktyki jednostek gospodarczych. W celu uargumentowania zasadności zastosowania procesu nagniatania w praktyce przemysłowej należy dokonać jego oceny w odniesieniu do konkretnego przedsiębiorstwa. Analiza opłacalności wdrożenia umożliwi udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy przygotowanie i wdrożenie określonego rozwiązania - nagniatania staliwa duplex jest uzasadnione. Brak jest uniwersalnych metod służących do kompleksowej ewaluacji nowych wdrożeń, zatem niezbędnym jest odpowiednie adaptowanie metod prezentowanych w literaturze [20]. Dobór instrumentów analitycznych służących do oceny przedsięwzięcia powinien być zależny od etapu inwestycji oraz zbioru informacji w oparciu, o które można wykonać kosztorysy. Odpowiednie opracowanie i zestawienie wyników poszczególnych analiz możliwe jest np. w postaci scoring modelu i może być podstawą do prospektywnej, bezwzględnej oceny opłacalności działania. W odniesieniu do zastosowania procesu nagniatania staliwa duplex, ocena w aspekcie techniczno-ekonomicznym umożliwi uzupełnienie oceny perspektywy rozwoju przedmiotowej technologii w przemyśle.

Projektując proces nagniatania należy uwzględnić wiele czynników, które mają wpływ na jakość technologiczną materiału. Wybór technologii obróbki materiału ma niezwykle istotne znaczenie w kształtowaniu struktury i właściwości warstwy wierzchniej, a tym samym na jego cechy użytkowe. Właściwie dobrany materiał i technologia obróbki pozwala na uzyskanie oczekiwanych efektów przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów wytwarzania (począwszy od etapu badania i rozwoju, wdrożenia przez koszty związane z procesem wytwórczym, eksploatacją, modernizacją i konserwacją). Zastosowanie nagniatania jako alternatywy dla szlifowania umożliwia wzrost produktywności poprzez obniżenie pracochłonności i zużycia energii oraz materiału [96].

Jak wskazuje się w literaturze przedmiotu staliwo duplex, to materiał posiadający ogromny potencjał rozwoju. Aktualnie główne wskazania do jego wykorzystania, to środowiska silnie korozyjne bądź okresowo zmienne, miejsca z utrudnioną możliwością wymiany elementów lub takie gdzie ich wymiana byłaby wysoce kosztowna. Przykładem tego są instalacje pracujące w środowisku wody morskiej, zbiorniki uzdatniania wody ściekowej, instalacje odsalania wody morskiej, mosty, balustrady, mola, elementy zbiorników i silników okrętowych.

Nagniatanie staliwa duplex stanowi rozwiązanie technologiczne, które wpisuje się w aktualną politykę zrównoważonego rozwoju przemysłu, bowiem jest to materiał trwały, możliwy do recyklingu, a technologia pozwala na ograniczenie energochłonności. Na podstawie dostępnej literatury wskazać można, że właściwości warstwy wierzchniej bezmiedziowych gatunków staliwa duplex (ze względu na charakterystykę materiałową) powinny być możliwe do kształtowania w procesie nagniatania, co wymaga jednoznacznej weryfikacji w badaniach eksperymentalnych.

3. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

3.1. Hipoteza i cele pracy

Analiza danych literaturowych, badania własne oraz spostrzeżenia dotyczące problematyki obróbki nagniataniem staliwa duplex pozwalają na sformułowanie następującej hipotezy pracy:

„Zastosowanie obróbki nagniataniem bezmiedziowego staliwa duplex jest uzasadnione technologicznie i ekonomicznie, umożliwia poprawę jakości oraz właściwości funkcjonalnych wyrobu gotowego w związku z tym posiada potencjał implementacji do praktyki przemysłowej”.

Mając na uwadze sytuację problemową związaną ze znikomą liczbą opracowań naukowych dotyczących technologicznych i funkcjonalnych aspektów wpływu procesu nagniatania na staliwo duplex typu GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3 za główne cele niniejszej dysertacji przyjęto:

1. określenie możliwości oraz zakresu kształtowania warstwy wierzchniej materiału badawczego z zastosowaniem procesu NSNT;
2. ocena wpływu badanej technologii na właściwości geometryczne powierzchni bezmiedziowego staliwa duplex;
3. wskazanie wpływu procesu NSNT na właściwości funkcjonalne badanych gatunków staliwa.

Zakładając, iż niniejsza dysertacja będzie miała wymiar praktyczny, za cel użyteczny przyjęto dodatkowo wskazanie oceny potencjału aplikacyjnego technologii nagniatania staliwa duplex do warunków przemysłowych. Potwierdzenie hipotezy w tym zakresie będzie wymagało realizacji oceny wielokryterialnej wdrożenia NSNT do praktyki wybranego przedsiębiorstwa.

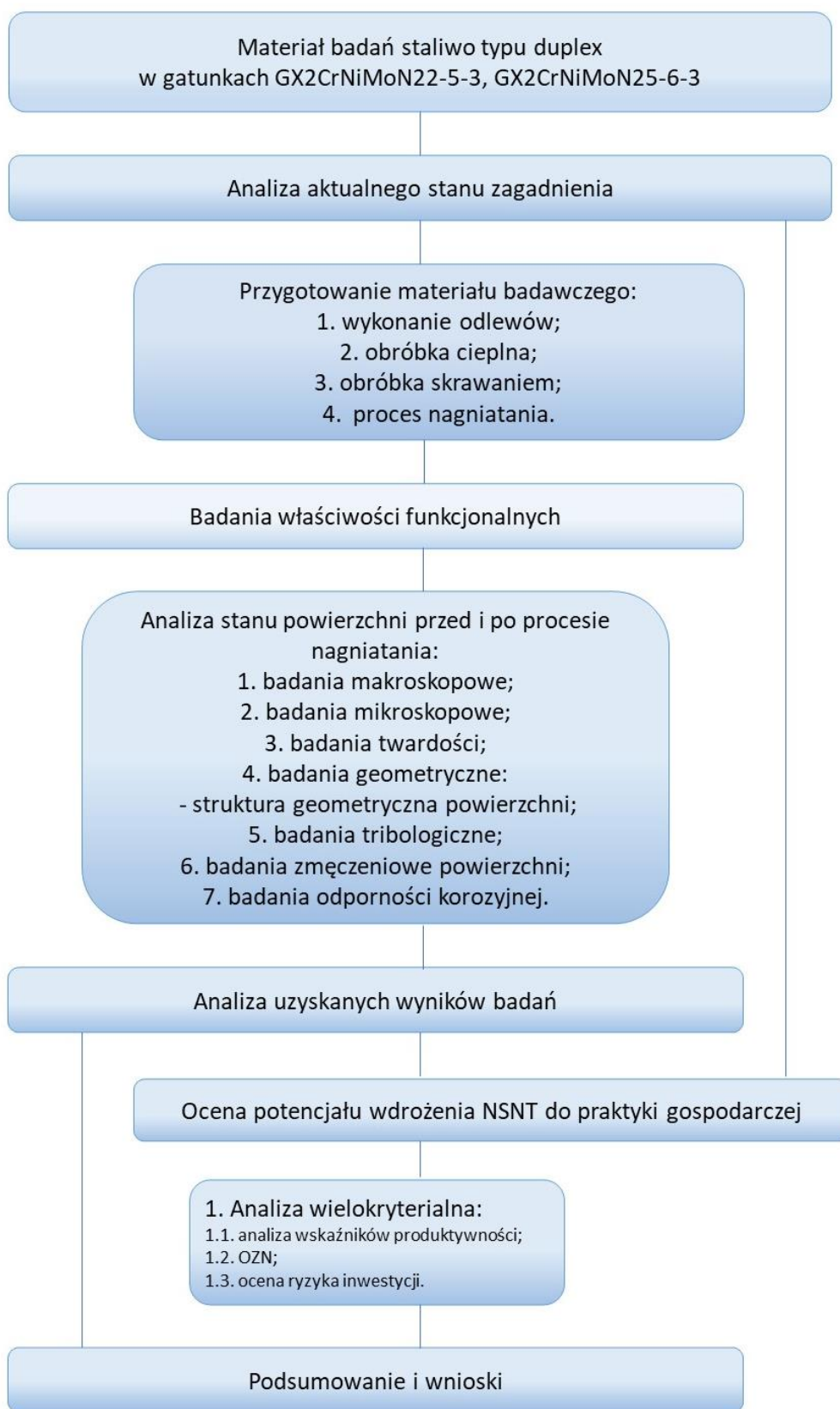
3.2. Plan i zakres badań

W celu sprawdzenia słuszności hipotezy rozprawy oraz wobec powyżej sformułowanych celów, zakres opracowania obejmuje ocenę technologiczną opierającą się na badaniach doświadczalnych procesu nagniatania staliwa duplex typu GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3, którą zrealizowano w warunkach laboratoryjnych. Zakres badań laboratoryjnych obejmował:

- wstępną ocenę powierzchni materiału poprzez analizę makroskopową okiem nieuzbrojonym oraz z zastosowaniem makroskopu *Olympus SZ 32*, który umożliwia uzyskanie powiększeń od 6,7 do 45x;
- badania mikroskopowe struktury z zastosowaniem mikroskopu optycznego *Nikon Eclipse MA-200* oraz skaningowego mikroskopu elektronowego *Phenom XL*;
- badania parametrów chropowatości powierzchni poszczególnych próbek przy zastosowaniu profilometru stykowego *DIAVITE DH-5*;
- pomiar twardości na przekroju badanego materiału metodą Vickersa na Twardościomierzu *FM-700* firmy *FutureTech* oraz twardości powierzchni zewnętrznej walca metodą Rockwella na Twardościomierzu *Rockwell HR-150A*;
- badania odporności na zużycie ściernie przy użyciu testera tribologicznego z zastosowaniem metody T-05 typ rolka-klocek;
- badania odporności na zmęczenie stykowe przy wykorzystaniu urządzenia do badań wytrzymałościowych *INSTRON 8874*;
- badanie oceny zmian powierzchni po badaniu odporności na zmęczenie mechaniczne zrealizowano z wykorzystaniem mikroskopu *Keyence VHX-7000* oraz skaningowego mikroskopu elektronowego *Phenom XL*;
- badania odporności na korozję z zastosowaniem metody potencjodynamicznej przy użyciu zestawu do badań elektrochemicznych wraz z oprogramowaniem *CHI618A Electrochemical Analyzer*.

Nadto przeprowadzono wielowskaźnikową analizę techniczno-ekonomiczną wdrożenia procesu NSNT do praktyki przemysłowej, co wymagało przeprowadzenia prospektywnej, bezwzględnej oceny tego działania w oparciu o założone kryteria progowe i uzupełniające, które przedstawiono w postaci scoring modelu.

Przyjęte cele oraz zakres pracy wymagały opracowania schematu blokowego i jego realizacji. Graficzne przedstawienie koncepcji realizacji tematu dysertacji przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat blokowy zakresu badań

Źródło: opracowanie własne.

Założona procedura badawcza zapewnia rozwiązanie następujących problemów badawczych, ujętych w formie pytań:

1. Czy obróbka nagniataniem staliwa duplex pozwala korzystnie kształtować właściwości warstwy wierzchniej badanych materiałów?
 - 1.1. Jak proces NSNT wpływa na chropowatość powierzchni?
 - 1.2. Jak proces NSNT wpływa na twardość?
 - 1.3. Jak proces NSNT kształtuje mikrostrukturę WW?

2. Czy zastosowanie obróbki NSNT staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3 umożliwia poprawę właściwości funkcjonalnych materiału?
 - 2.1. Czy możliwa jest poprawa właściwości zmęczeniowych?
 - 2.2. Czy możliwa jest poprawa odporności korozyjnej?
 - 2.3. Czy możliwa jest poprawa właściwości tribologicznych?

3. Czy wdrożenie procesu nagniatania staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3 do praktyki przedsiębiorstwa jest uzasadnione ekonomicznie?

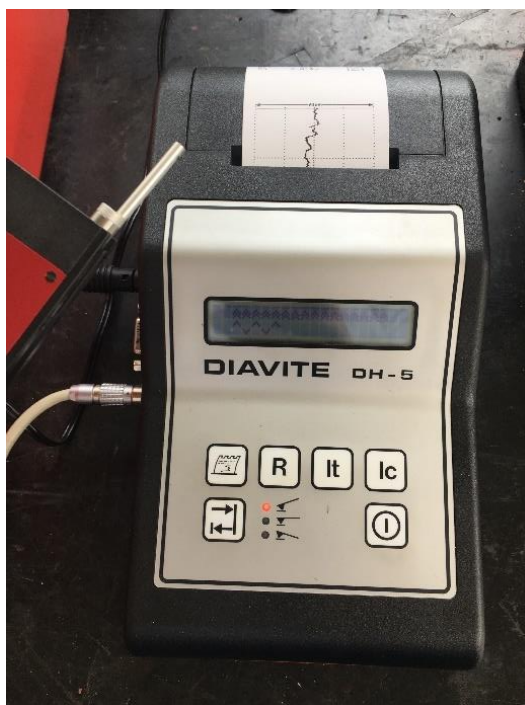
3.3. Metodyka badań

Dla osiągnięcia założonych celów badawczych wykorzystano opisaną poniżej metodykę i aparaturę badawczą.

Ocenę makroskopową powierzchni badanych materiałów zrealizowano poprzez obserwację makroskopową okiem nieuzbrojonym oraz przy użyciu makroskopu *Olympus SZ 32*, który umożliwia uzyskanie obrazu w powiększeniach od 6,7 do 45x.

Do oceny parametrów chropowatości powierzchni wykorzystano profilometr stykowy *DIAVITE DH-5* (rys. 8) firmy Hahn & Kolb Polska Sp. z o.o., przy pomocy którego możliwe było dokonanie pomiarów następujących parametrów chropowatości powierzchni: R_a , R_z , R_{max} , R_{3z} , R_q , R_t oraz uzyskanie profilogramu powierzchni. Badanie zrealizowano stosując następujące parametry:

- odcinek przejazdu igły pomiarowej równy 4,8 mm;
- odcinek pomiarowy równy 4 mm;
- 5 odcinków elementarnych o długości 0,8 mm;
- prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego 0,5 mm/s.



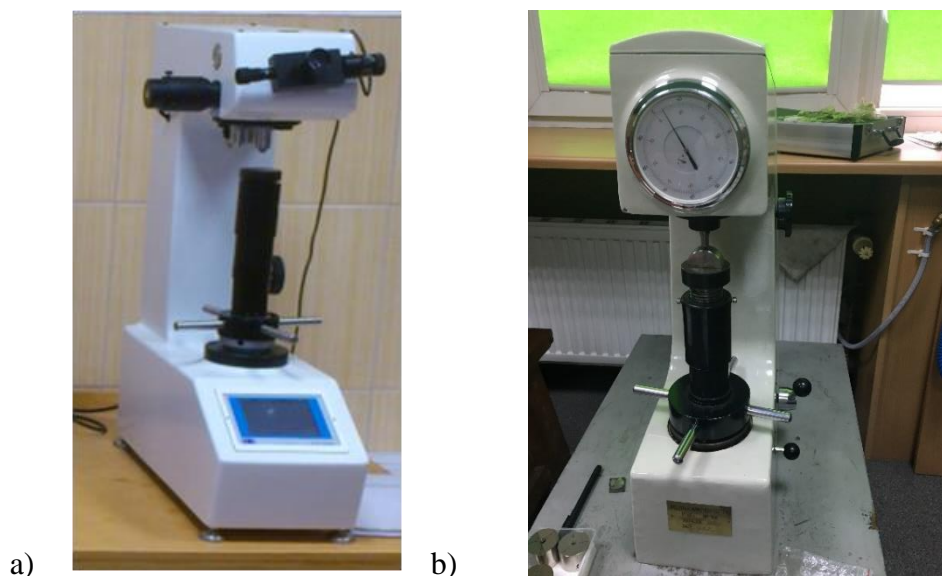
Rys. 8. Profilometr stykowy DIVIDE DH-5

Do przeprowadzenia analizy mikrostruktury wykorzystano mikroskopię optyczną oraz metalografię ilościową. Badania wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego *Nikon Eclipse MA-200* (rys. 9) w świetle odbitym w technice obserwacji pola jasnego. Obserwacja prowadzona była z zastosowaniem powiększeń 100x, 200x, 500x. Zgłady metalograficzne użyte do badań trawione były odczynnikiem Mi21Fe. Wykorzystany mikroskop połączony był z zestawem komputerowym, na którym zainstalowane było specjalistyczne oprogramowanie *NIS-Elements D* umożliwiające akwizycję danych oraz ich analizę, w tym również ustalenie ilościowego udziału faz w strukturze.



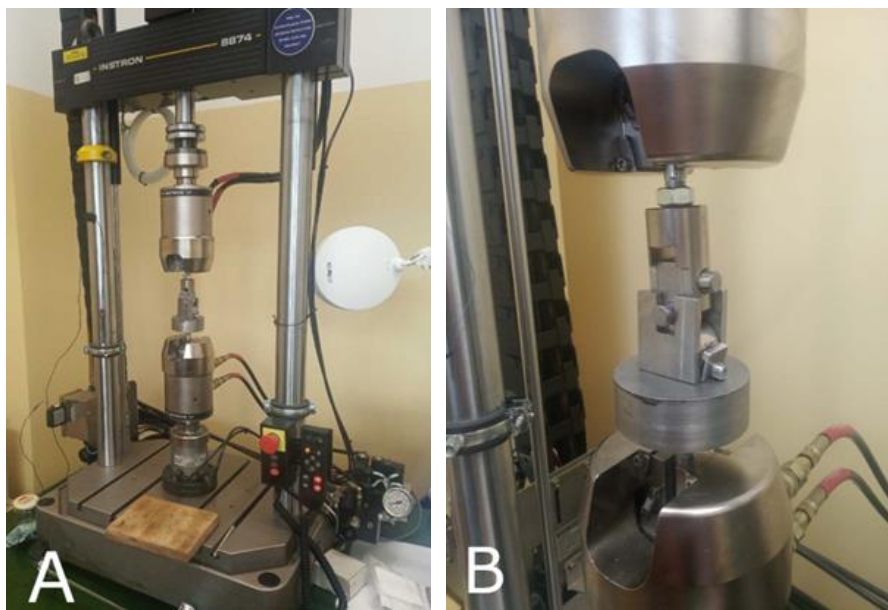
Rys. 9. Mikroskop optyczny *Nikon Eclipse MA-200* wraz z zestawem komputerowym

Pomiar twardości przy małej sile obciążającej (HV1) na przekroju materiału zrealizowano metodą Vickersa na Twardościomierzu *FM-700* firmy *FutureTech* (rys. 10a). Pomiar realizowany był zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Zastosowano nominalną siłę obciążającą równą 9,897N, czas obciążenia 5s. Nadto przeprowadzono pomiar twardości powierzchni zewnętrznej walca przed i po procesie nagniatania zgodnie z normą PN-EN ISO 6508-1 dla pomiarów realizowanych na Twardościomierzu *Rockwell HR-150A* (rys. 10b). Zastosowano pomiar w skali C siłą wstępną $F_0 = 98,07$ N, siłą główną $F_1 = 1373$ N i czasem obciążenia siłą główną 10 s.



Rys. 10. Twardościomierze: a) Vickers FM-700; b) Rockwell HR-150A

Badanie trwałości zmęczeniowej materiału dokonano w warunkach obciążeń cyklicznych, do tego celu wykorzystano urządzenie *INSTRON 8874* (rys. 11). Badania laboratoryjne odporności na mechaniczne zmęczenie stykowe zrealizowano we współpracy z Uniwersytetem Technologiczno-Przyrodniczym im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy. W czasie badania zastosowano maksymalną siłę docisku wynoszącą 2,2 kN, liczbę cykli równą 3 mln. Przeciwpórką był walec o średnicy 12 mm wykonany z stali łożyskowej 100Cr6 o twardości 58 HRC, która pozostawała w styku stałym i współpracowała z powierzchnią walcową badanych materiałów. Wartość obciążenia została określona na podstawie badań wstępnych realizowanych w trakcie procesu nagniatania. W celu oceny zmiany makro- i mikrostruktury oraz identyfikacji mechanizmu generującego uszkodzenia powstałe na skutek działania cyklicznych obciążeń o przebiegu sinusoidalnym, obszary zużycia poddano obserwacji przy zastosowaniu cyfrowego mikroskopu *KEYENCE VHX-7000* (rys. 12) oraz skaningowego mikroskopu *Phenom XL* (rys. 13).



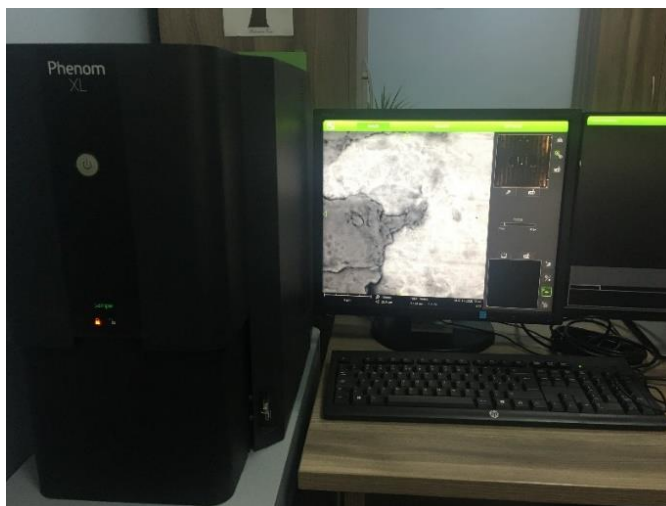
Rys. 11. Stanowisko badawcze wykorzystane do oceny wytrzymałości zmęczeniowej - A, fotografia zamocowania próbki do badania – B

Mikroskop cyfrowy KEYENCE VHX-7000 połączony jest z zestawem komputerowym, który umożliwia przechwytywanie obrazu w wysokiej rozdzielczości i jego szczegółową obserwację.



Rys. 12. Mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000

Skaningowy mikroskop elektronowy *Phenom XL* wraz z środowiskiem programistycznym *Phenom Programming Interface* umożliwił uzyskanie pełnoekranowego obrazu SEM. Obserwacji dokonano przy powiększeniach 1000x, 5000x, 10000x, 12000x.



Rys. 13. Mikroskop elektronowy Phenom XL wraz z zestawem komputerowym.

Badania wpływu procesu nagniatania na odporność na zużycie ścierne zrealizowano przy użyciu testera tribologicznego (rys. 14a) z zastosowaniem metody *T-05* (typ rolka-klocek). Test realizowano przy styku liniowym, a przeciwpróbkę stanowił pierścień o średnicy 35 mm wykonany z stali łożyskowej 100Cr6 o twardości 58÷63 HRC. Zastosowano następujące parametry badania:

- temperatura pokojowa;
- obciążenie stałe = 5 N;
- całkowita droga tarcia równa 7,5 km;
- prędkość obrotowa wynosząca 500 obr/min.

Próbki do badań wycięte zostały z walców, co wymagało ustalenia położenia badanych próbek w węzle tarcia i zmodyfikowania mocowania. Każdą z próbek poddano 15 cyklowym badaniom. Ubytek materiału po każdym cyklu badania określano za pomocą wagi analitycznej (rys. 14b) *OHAUS PX125D* o dokładności pomiarowej 0,00001 g. Podczas badania rejestrowano siłę tarcia umożliwiającą wyznaczenie współczynnika tarcia.

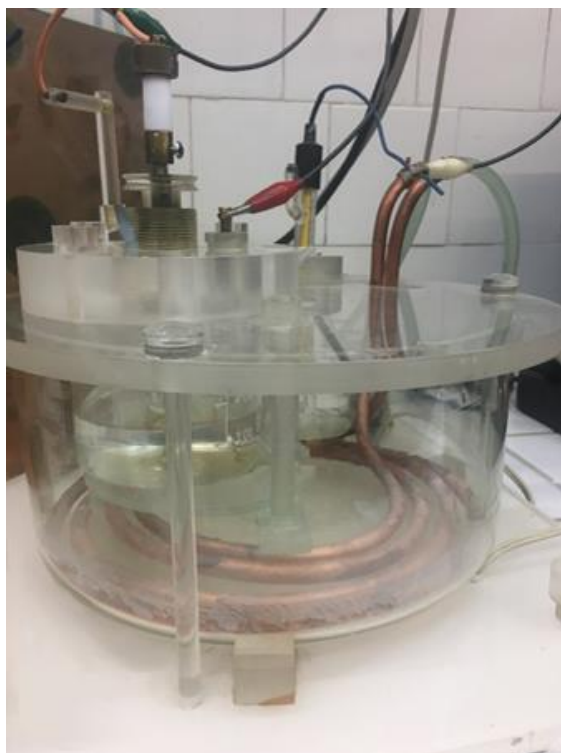


Rys. 14. Tester tribologiczny - A oraz waga analityczna - B

Badania laboratoryjne odporności na korozję zrealizowano w warunkach przyspieszonej korozji przy użyciu zestawu do badań elektrochemicznych (rys. 15) wraz z oprogramowaniem *CHI618A Electrochemical Analyzer*. Elektrode badaną stanowił materiał A i B zainkludowany w żywicy epoksydowej w postaci walców o średnicy 3 mm. Elektrode odniesienia stanowiła elektroda kalomelowa. Badanie prowadzono w temperaturze pokojowej w zakresie potencjału początkowego (Init) E(V) wynoszącego -1 do potencjału końcowego (Final) E(V) równego 2. Jako medium zastosowano syntetyczny roztwór wody morskiej o stężeniu 1% i pH równym 8. Zaproponowany roztwór badawczy odpowiada składem oraz pH wodzie morskiej w morzu Bałtyckim. Dzięki oprogramowaniu *CHI618A Electrochemical Analyzer* możliwym było rejestrowanie krzywych potencjodynamicznych oraz danych stanowiących charakterystykę korozyjną w postaci:

- potencjału korozji (E_{kor} , V);
- początku obszaru pasywacji (E_F , V);
- potencjału transpasywacji (E_{tp} , V);
- gęstości prądu pasywacji (I_{pas} , A/cm²).

Dodatkowo próbki przed i po badaniu odporności korozyjnej, celem porównania, poddano obserwacji przy użyciu mikroskopu optycznego Nikon eclipse MA-200.



Rys. 15. Urządzenie elektrochemiczne

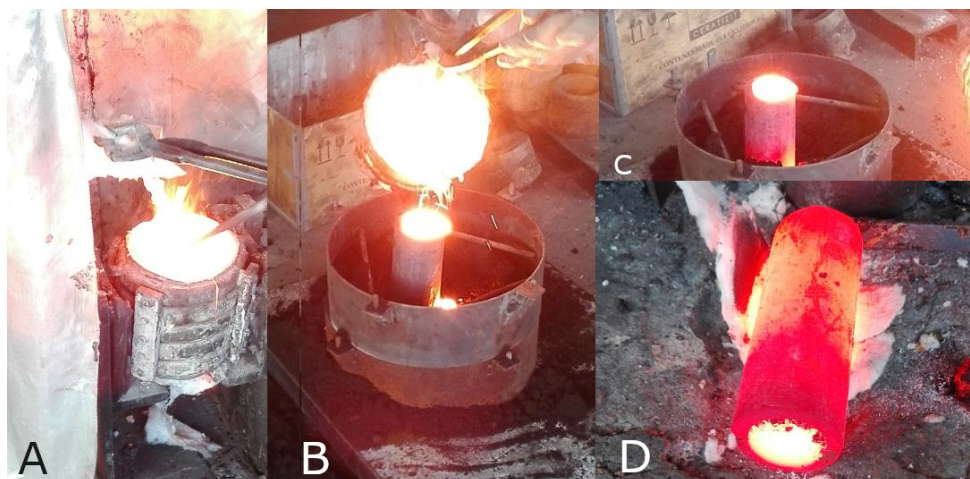
3.4. Materiał badawczy

Przygotowanie badań eksperymentalnych niniejszej dysertacji koncentrowało się na określeniu problemu badawczego, zaprezentowanego w rozdziale 3. W celu udzielenia wiarygodnej odpowiedzi na zadane pytania problemowe konieczne było przeprowadzenie analizy literatury przedmiotu oraz realizacja badań niezbędnych do wypełnienia celów badawczych. Wytypowany materiał do badań stanowiło staliwo typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3. W pracy przyjęto oznaczenie staliwa duplex zgodnie z systemem znakowym PN-EN 10283:2019.

3.4.1. Przygotowanie materiału badawczego

Materiałem badawczym były wykonane w warunkach laboratoryjnych odlewy walcowe \varnothing 45 mm. Proces został zrealizowany w laboratorium topienia metali Katedry Metalurgii i Technologii Metali Politechniki Częstochowskiej przy wykorzystaniu pieca indukcyjnego, tyglowego *Leybold Heraeus ISI/III*.

W celu wyeliminowania naprężeń, ujednorodnienia mikrostruktury oraz rozpuszczenia faz międzymetalicznych, odlewy poddane zostały przesycaniu w temperaturze około 1150°C przez 2 h. Proces przygotowania odlewów zaprezentowano na rysunku 16.



Rys. 16. Przygotowanie odlewu do badań (A - rozgrzany materiał w tyglu; B - zalewanie grafitowej formy odlewniczej; C, D - stygnący odlew)

W zakresie składu chemicznego wytworzone odlewy spełniały wymagania normy [85]. Normatywny i rzeczywisty skład chemiczny uzyskano w oparciu o metodę spektralną przy zastosowaniu urządzenia *Spektro-lab* firmy *Spectro* i zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8. Skład chemiczny badanego staliwa wraz z odniesieniem do normy PN-EN 10283:2019, % masowy

Oznaczenie chemiczne		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	N
GX2CrNi MoN22-5-3	Badany materiał	0,028	1,45	0,551	0,001*	0,005*	21,95	5,61	3,24	pow. 0,108
	wg normy	0,03*	2,0*	1,0*	0,025*	0,035*	21,0 do 23,0	4,5 do 6,5	2,5 do 3,5	0,12 do 0,2
GX2CrNi MoN25-6-3	Badany materiał	0,027	1,08	0,97	0,001*	0,005*	25,59	6,76	3,32	pow. 0,108
	wg normy	0,03*	2,0*	1,0*	0,025*	0,035*	24,5 do 26,5	5,5 do 7,0	2,5 do 3,5	0,12 do 0,25

* oznacza wartości maksymalne pierwiastka

W następnym etapie przygotowania materiału powierzchnie zewnętrzne walcowe poddano procesowi toczenia wzdłużnego średnio dokładnego na tokarce uniwersalnej CDS 500x1000. Proces toczenia został zrealizowany na sucho, bez zastosowania chłodzenia.

Toczenie wzdłużne wykonano nożem tokarskim wyposażonym w płytki wielostrzowe TNMX 16 04 08 - WM wykonane z węglików spiekanych typu 4015 firmy *Sandvik Coromant*. Podczas obróbki skrawaniem zastosowano następujące parametry skrawania:

- posuw $f = 0,08$ mm/obr;
- głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm;
- prędkość obrotową $n = 1400$ obr/min;
- prędkość skrawania $v_c = 190$ m/min.

Kolejno próbki poddano obróbce wykończeniowej poprzez nagniatanie statyczne naporowe toczne (NSNT). Opis warunków realizacji procesu nagniatania zaprezentowano w podrozdziale 3.4.2.

3.4.2. Warunki realizacji procesu nagniatania

Proces nagniatania zrealizowano na stanowisku laboratoryjnym, przeznaczonym do obróbki wykończeniowej poprzez nagniatanie statyczne naporowe toczne, bazującym na obrabiarce uniwersalnej z możliwością wykorzystania wymiennych elementów nagniatających o różnych promieniach zaokrąglenia części roboczych (rys. 17). Zastosowano nagniatąk krążkowy (NK-01) z dociskiem sztywnym.

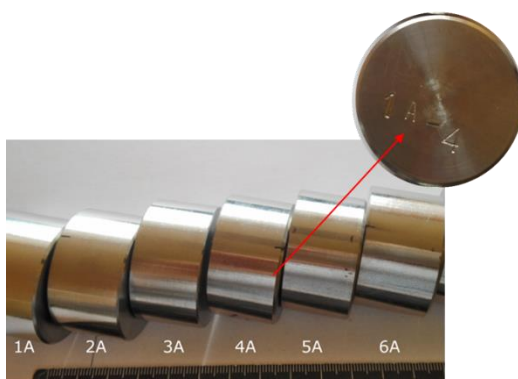


Rys. 17. Nagniatąk krążkowy NK-01 (1) z możliwością stosowania wymiennych elementów w postaci krążka (2) przeznaczony do nagniatania statycznego naporowego tocznego (NSNT) powierzchni walcowych zewnętrznych (3)

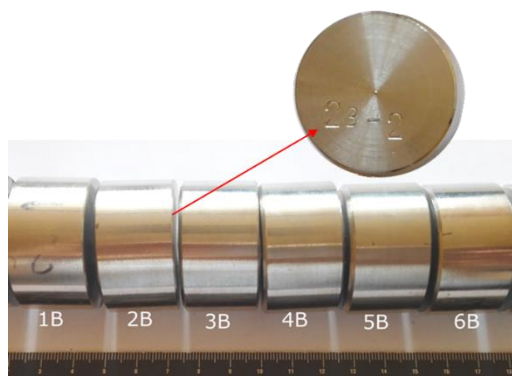
Zgodnie z założonym zakresem badawczym, materiał został pocięty na 22 walce, które odpowiadały różnym wariantom realizacji procesu NSNT. Próbki oznakowano z uwzględnieniem gatunku staliwa oraz parametrów realizacji procesu nagniatania:

- odlew „A” – staliwo GX2CrNiMoN25-6-3 (rys. 18);
- odlew „B” – staliwo GX2CrNiMoN22-5-3 (rys. 19).

Kolejno próbki do poszczególnych badań były pobierane z określonych walców (wariantów). Zdjęcia przygotowanego materiału do realizacji badań przedstawiono na rysunkach 18, 19.



Rys. 18. Przykładowe próbki w kształcie walca, staliwo duplex w gatunku GX2CrNiMoN25-6-3 po procesie nagniatania



Rys. 19. Przykładowe walce ze staliwa duplex serii 2205 w gatunku GX2CrNiMoN22-5-3 po procesie nagniatania

Dobór parametrów procesu technologicznego nagniatania został określony na podstawie wstępnych eksperymentalnych badań materiałów o podobnych właściwościach i prób wstępnych. Dokonano pomiaru siły docisku nagniataka NK-01 metodą statyczną za pomocą czujnika tensometrycznego siły *FT-5304M/A/16*. Określono, że dosuw nagniataka równy 1 mm był równoznaczny z przyłożeniem siły równej 3 kN. Dosuw nagniataka równy 0,5 mm odpowiadał sile 1,5 kN. Nagniatanie powierzchni

walcowych zewnętrznych wykonano na tokarce uniwersalnej CDS 500x1000, za pomocą nagniatąka (NK-01) posiadającego element nagniatający w kształcie krążka $\varnothing 50$ mm i promieniu zaokrąglenia równym 3 mm, wykonanym z stali narzędziowej typu 145Cr6 o twardości 66 HRC. Podczas obróbki nagniataniem wałków „A” i „B” zastosowano następujące parametry technologiczne:

- posuw $f_n = 0,1 \div 0,5$ mm/obr;
- głębokość dosuwu nagniatąka $a_n = 0,5 \div 1,0$ mm;
- prędkość obrotową $n = 710$ obr/min;
- prędkość nagniatania $v_n = 100$ m/min;
- liczba przejść obróbkowych $i = 1$ oraz 2.

Do smarowania i chłodzenia użyto olej maszynowy. W tabeli 9 zestawione zostały parametry nagniatania poszczególnych próbek ze staliwa duplex z serii GX2CrNiMoN25-6-3, a w tabeli 10 dla staliwa GX2CrNiMoN22-5-3.

Tabela 9. Parametry nagniatania próbek ze staliwa duplex z serii GX2CrNiMoN25-6-3, dla prędkości nagniatania $v_n = 100$ m/min, oraz dla różnych wartości posuwu f_n i dla głębokości dosuwu nagniatąka $a_n = 0,5$ mm i $a_n = 1,0$ mm (całkowity dosuw nagniatąka $a_{nc} = 1$ mm i $a_{nc} = 2$ mm) dla jednego i dwóch przejść nagniatąka $i = 1$ oraz 2

staliwo	Ozn. próbki	f_n [mm/obr]	a_n [mm]	a_{nc} [mm]	i [-]	v_n [m/min]
GX2CrNiMoN25-6-3	1A	0,1	1	1	1	100
	2A	0,2	1	1	1	100
	3A	0,3	1	1	1	100
	4A	0,4	1	1	1	100
	5A	0,5	1	1	1	100
	6A	0,2	1	2	2	100
	7A	0,1	0,5	1	2	100
	8A	0,2	0,5	1	2	100
	9A	0,3	0,5	1	2	100
	10A	0,4	0,5	1	2	100
	11A	próbka referencyjna				

Tabela 10. Parametry nagniatania próbek ze staliwa duplex z serii GX2CrNiMoN22-5-3, dla prędkości nagniatania $v_n = 100$ m/min, oraz dla różnych wartości posuwu f_n i dla głębokości dosuwu nagniatania $a_n = 0,5$ mm i $a_n = 1,0$ mm (całkowity dosuw nagniatania $a_{nc} = 1$ mm, $a_{nc} = 2$ mm) dla jednego i dwóch przejść nagniatania $i = 1$ oraz 2

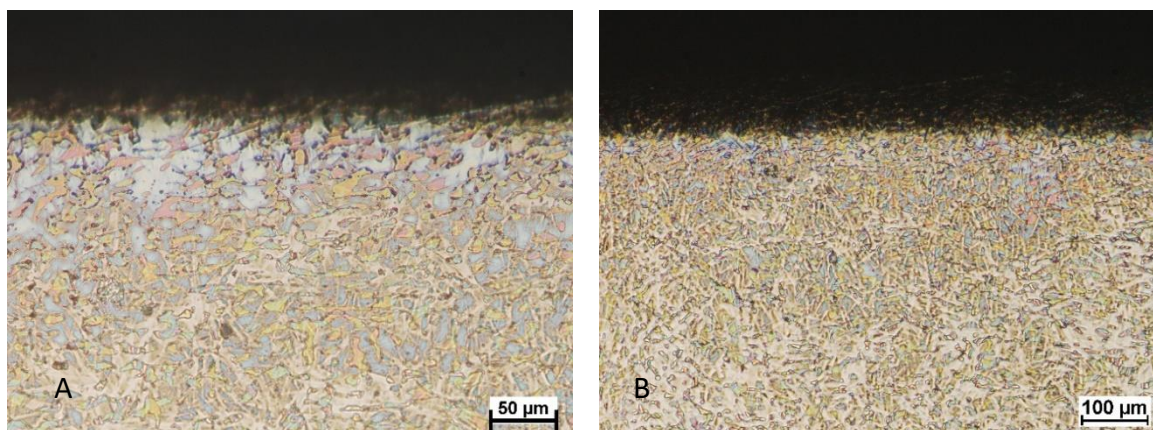
staliwo	Ozn. próbki	f_n [mm/obr]	a_n [mm]	a_{nc} [mm]	i [-]	v_n [m/min]
GX2CrNiMoN22-5-3	1B	0,1	1	1	1	100
	2B	0,2	1	1	1	100
	3B	0,3	1	1	1	100
	4B	0,4	1	1	1	100
	5B	0,5	1	1	1	100
	6B	0,2	1	2	2	100
	7B	0,1	0,5	1	2	100
	8B	0,2	0,5	1	2	100
	9B	0,3	0,5	1	2	100
	10B	0,4	0,5	1	2	100
	11B	próbka referencyjna				

3.5. Badania własne

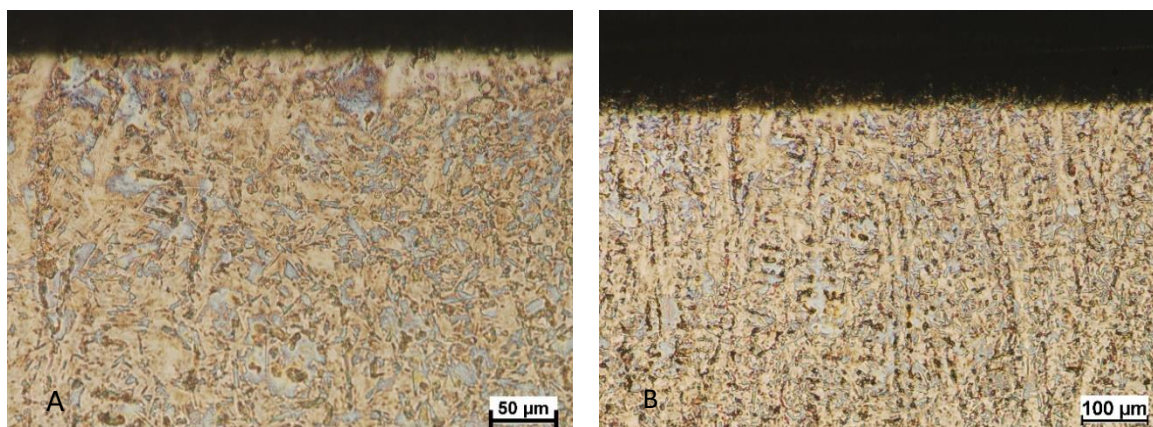
3.5.1. Makro i Mikrostruktura

W celu dokonania wstępnej oceny powierzchni materiału przed, jak i po procesie nagniatania wykonano analizę makroskopową okiem nieuzbrojonym oraz z zastosowaniem mikroskopu Olympus SZ 32. Nie zaobserwowano wad (tak przed, jak i po procesie nagniatania) oraz nieciągłości na powierzchni badanego materiału.

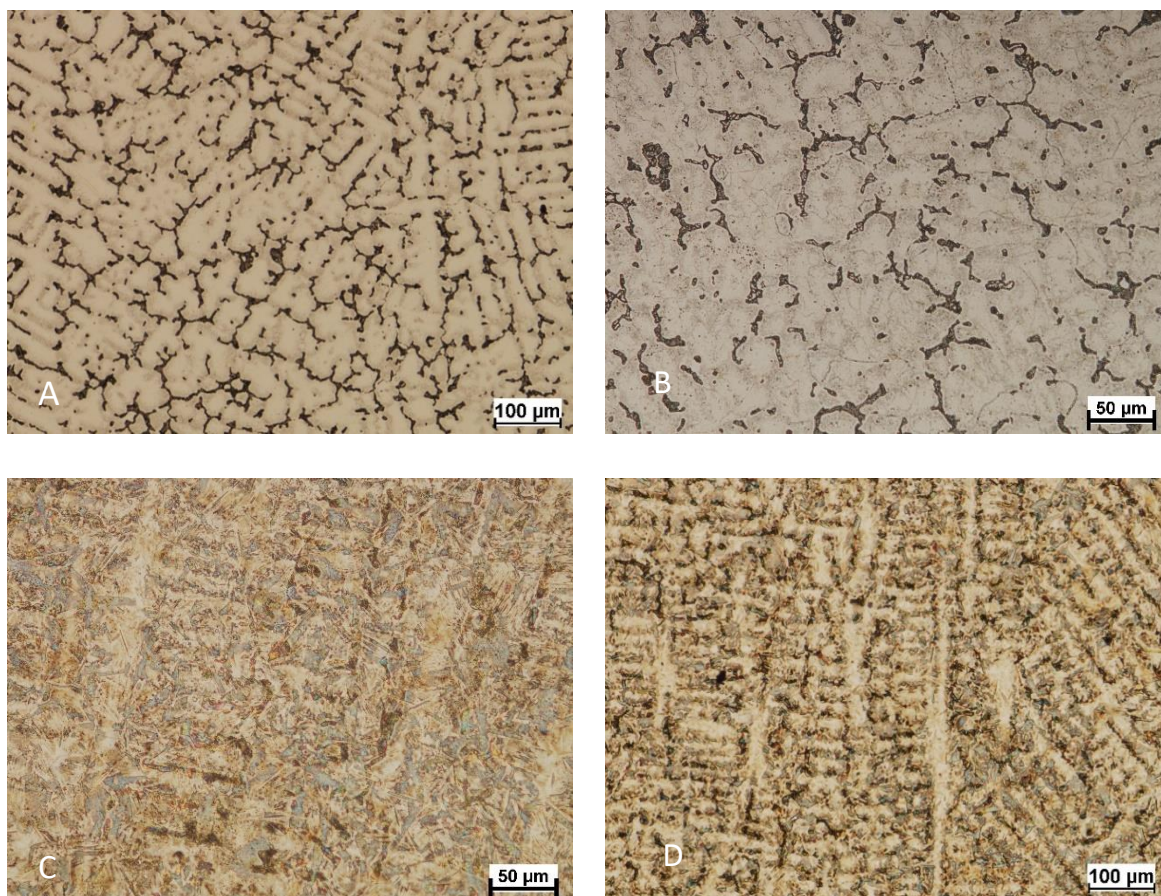
Po wstępnej ocenie makroskopowej powierzchni zrealizowano ocenę mikrostruktury przy użyciu mikroskopu optycznego *Nikon Eclipse MA-200*, do trawienia zastosowano odczynnik metalograficzny Mi21Fe. Ocenie poddano obszar WW oraz rdzenia materiału. Przykłady zarejestrowanych mikrostruktur obrazują rysunki 20÷22.



Rys. 20. Mikrostruktura warstwy wierzchniej staliwa GX2CrNiMoN25-6-3 po procesie NSNT, powiększenie A - 200x, B - 100x, mikroskop świetlny



Rys. 21. Mikrostruktura warstwy wierzchniej staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 po procesie NSNT, powiększenie a) 200x, b) 100x, mikroskop świetlny



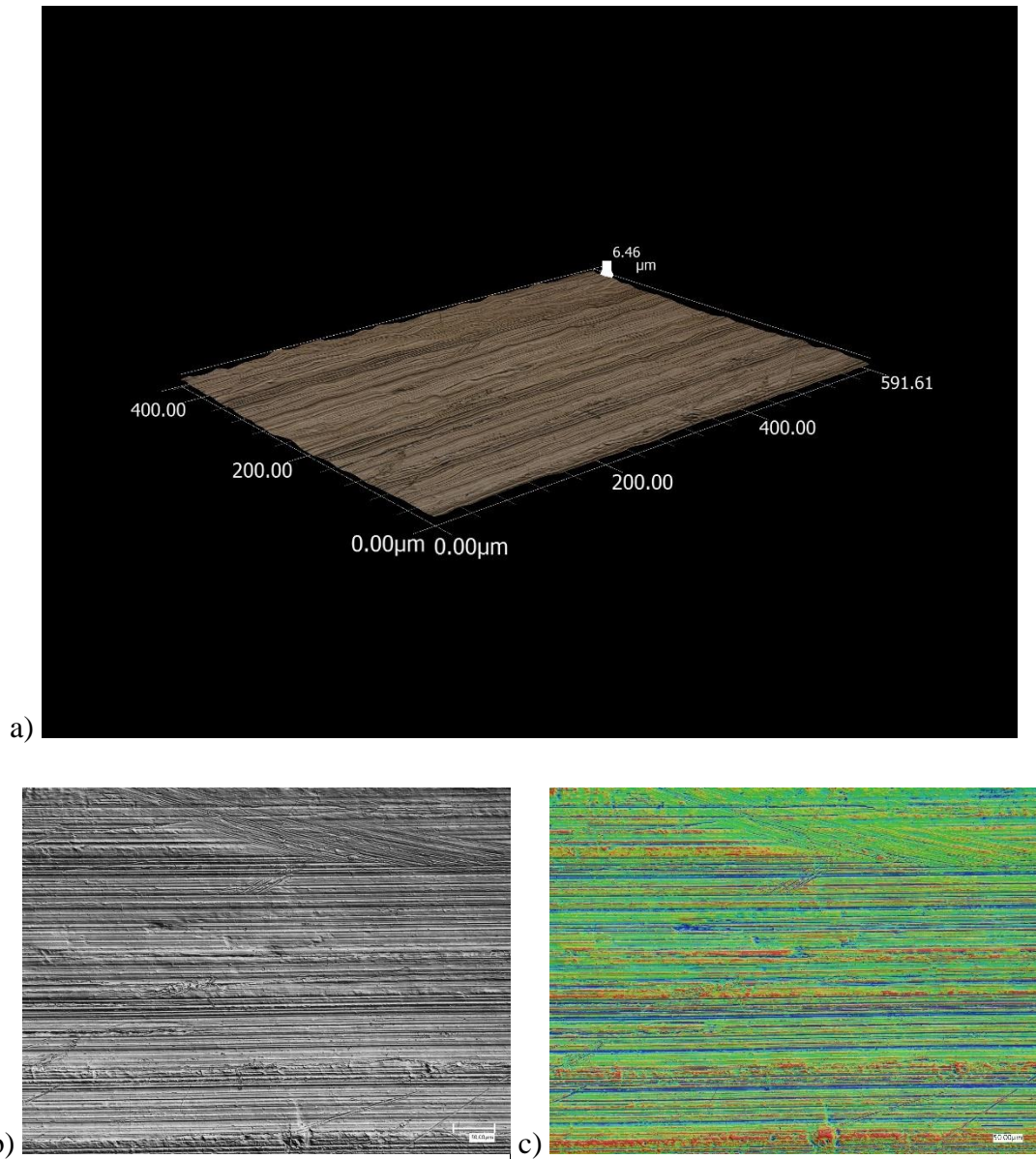
Rys. 22. Przykładowe mikrostruktury rdzeni badanych odlewów; a), d) powiększenie 100x; b), c) powiększenie 200x; mikroskop świetlny

Mikrostruktura badanego materiału wskazuje charakterystyczną dla odlewów wyraźną strukturę dendrytyczną, nie zaobserwowano wydzielenia fazy Sigma, co świadczy o prawidłowym przeprowadzeniu procesu przesycania. Procentowy udział poszczególnych faz ferryt-austenit, uzyskany poprzez wykorzystanie narzędzi do komputerowej analizy obrazu, wynosi około 45/55%, co jest zgodnie z danymi literaturowymi między innymi [1, 135] i jest oczekiwanym stosunkiem ilościowym faz. Nadto w efekcie siły docisku materiał odkształcił się plastycznie, czego uwidocznieniem jest zmiana orientacji kierunkowej ziarn w warstwie wierzchniej. Struktura materiału po obróbce nagniataniem, w WW charakteryzuje się zgniotem, ziarna zostały spłaszczone i równolegle wydłużone w kierunku powierzchni i ruchu narzędzia. Ocena WW została uzupełniona o dane uzyskane przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego *KEYENCE VHX-7000*, a przykładowe obrazy zaprezentowano na rysunku 23.



Rys. 23. Obraz mikrostruktury badanego materialu z widocznym zasięgiem warstwy wierzchniej po procesie nagniatania; KEYENCE VHX-7000

Grubość warstwy wierzchniej uzyskanej w efekcie realizacji procesu nagniatania jest funkcją złożoną, zależną w szczególności od granicy plastyczności materiału, jego struktury poprzedzającej proces obróbki cieplnej i mechanicznej oraz parametrów technologicznych procesu nagniatania (siły docisku, temperatury realizacji procesu, ilości przejść obróbkowych, posuwu i innych). Pod wpływem pracy nagniatania w warstwie wierzchniej obrabianego staliwa zaszło odkształcenie plastyczne. Przy zastosowanych parametrach realizacji procesu NSNT uzyskano warstwę wierzchnią o grubości około 1 mm. Powierzchnia próbek charakteryzuje się kierunkowością śladów po obróbce, przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 24. Średni odstęp między wzniesieniami profilu zmniejsza się wraz z obniżeniem parametrów posuwu, co zweryfikowano na podstawie pomiarów parametru RSm przy zastosowaniu mikroskopu *KEYENCE VHX-7000*.



Rys. 24. Przykładowa struktura geometryczna powierzchni po NSNT; a – obraz 3D; b - obraz 2D- światło spolaryzowane monochromatyczne, c) obraz 2D- światło spolaryzowane – mapa kolorów

3.5.2. Chropowatość

Ocenę parametrów chropowatości powierzchni poszczególnych próbek wykonano na profilometrze stykowym DIAVITE DH-5, przy pomocy którego możliwe było dokonanie pomiarów parametrów chropowatości powierzchni: Ra, Rz, Rmax, R3z, Rq, Rt oraz uzyskanie profilogramu powierzchni. Pomiary realizowane były w taki sposób, aby kierunek ruchu głowicy pomiarowej urządzenia był prostopadły do kierunku obróbki nagniataniem. Badanie nierówności powierzchni zrealizowano zgodnie z normą PN-EN ISO 4288:2011 [136]. Pomiar wykonano z trzykrotnym powtórzeniem w odniesieniu do każdego wariantu próbki materiału A i B stosując następujące parametry:

- odcinek przejazdu igły pomiarowej równy 4,8 mm;
- odcinek pomiarowy równy 4 mm;
- 5 odcinków elementarnych o długości 0,8 mm;
- prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego 0,5 mm/s.

Wyniki średnich wartości wybranych parametrów chropowatości oraz wskaźniki zmniejszenia chropowatości powierzchni oznaczonymi jako K_{Ra} i K_{Rz} zaprezentowano w tabeli 11 dla staliwa GX2CrNiMoN25-6-3, oraz dla materiału GX2CrNiMoN22-5-3 w tabeli 12. Wskaźnik K_{Ra} określono jako iloraz średniej arytmetycznej rzędnych profilu chropowatości powierzchni przed procesem nagniatania (Ra') przez parametr Ra powierzchni po procesie. K_{Rz} wyznaczono jako iloraz średniej arytmetycznej pięciu najwyższych wysokości profilu chropowatości w odcinkach elementarnych (Rz') przed procesem nagniatania przez parametr Rz po procesie.

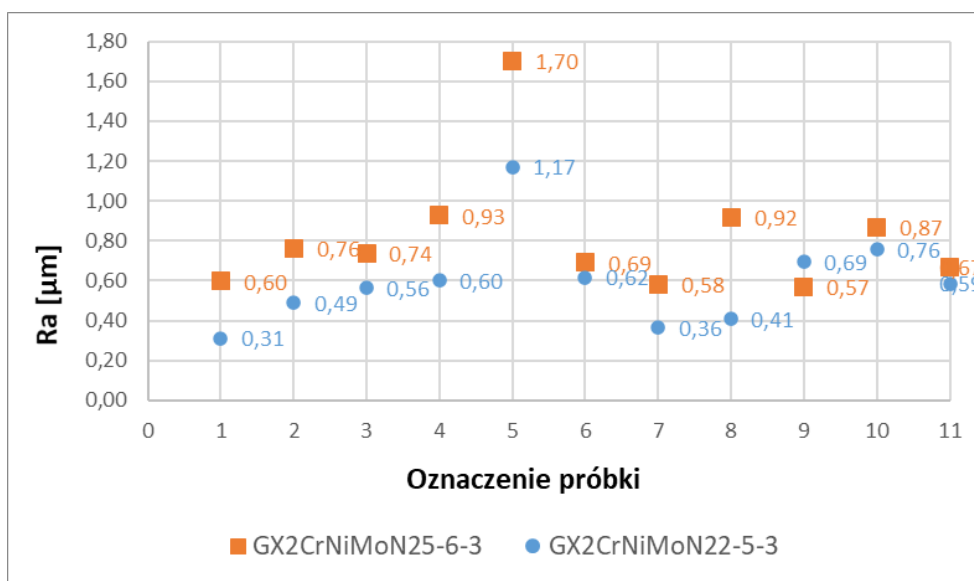
Tabela 11. Parametry chropowatości powierzchni po obróbce powierzchniowej nagniataniem staliwa GX2CrNiMoN25-6-3

staliwo GX2CrNiMoN25-6-3											
nr. czopa	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A
Ra [μm]	0,60	0,76	0,74	0,93	1,70	0,69	0,58	0,92	0,57	0,87	0,67
Rz [μm]	3,27	3,83	4,10	4,40	6,67	3,37	3,37	4,23	3,07	3,87	3,53
Rmax [μm]	4,37	5,00	5,83	5,20	8,53	4,43	4,07	5,07	3,73	5,20	4,27
R3z [μm]	2,70	3,47	3,63	3,93	6,27	3,03	3,00	4,00	2,67	3,70	3,17
Rt [μm]	4,50	5,70	6,00	5,77	9,00	4,90	4,37	5,40	4,17	5,10	4,93
Rq [μm]	0,74	0,97	0,96	1,13	1,97	0,86	0,75	1,13	0,72	0,94	0,85
K_{Ra}	1,12	0,88	0,91	0,72	0,39	0,97	1,15	0,73	1,18	0,77	1,00
K_{Rz}	1,08	0,92	0,86	0,80	0,53	1,05	1,05	0,83	1,15	0,91	1,00

Tabela 12. Parametry chropowatości powierzchni po obróbce powierzchniowej nagniataniem staliwa GX2CrNiMoN22-5-3

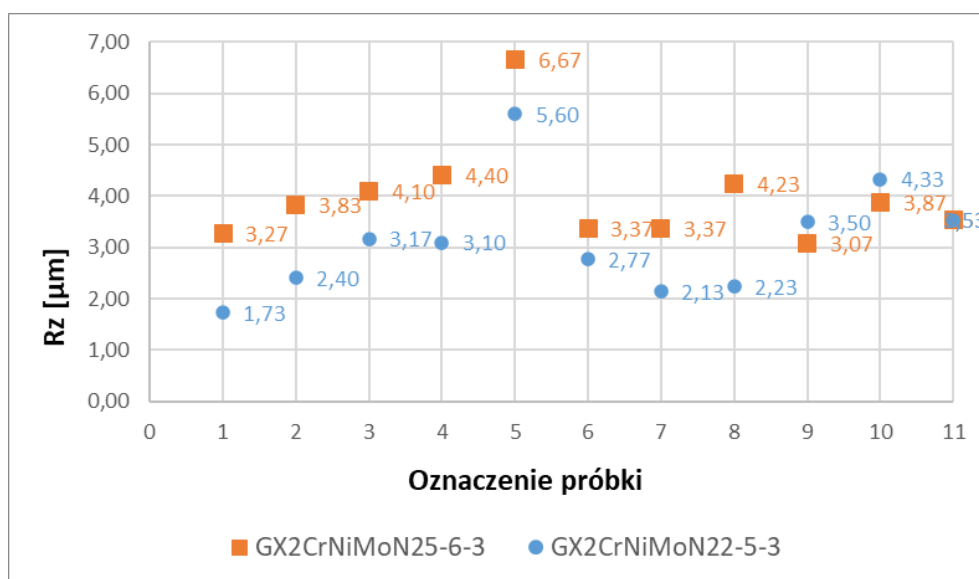
staliwo GX2CrNiMoN22-5-3											
nr. czopa	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B
Ra [μm]	0,31	0,49	0,56	0,60	1,17	0,62	0,36	0,41	0,69	0,76	0,59
Rz [μm]	1,73	2,40	3,17	3,10	5,60	2,77	2,13	2,23	3,50	4,33	3,53
Rmax [μm]	1,93	3,30	4,20	4,00	6,73	4,13	3,10	2,90	5,53	9,60	4,13
R3z [μm]	1,67	2,13	2,83	2,73	5,07	2,47	1,93	2,00	3,07	3,70	3,03
Rt [μm]	2,30	3,37	4,27	4,47	6,73	4,30	3,10	3,33	6,00	9,60	4,43
Rq [μm]	0,40	0,62	0,73	0,74	1,39	0,78	0,48	0,53	0,90	1,07	0,73
K _{Ra}	1,87	1,20	1,04	0,98	0,50	0,95	1,61	1,43	0,85	0,78	1,00
K _{Rz}	2,04	1,47	1,11	1,14	0,63	1,27	1,66	1,58	1,01	0,82	1,00

Na rysunku 25 przedstawiono wykres porównujący uzyskane parametry Ra dla poszczególnych wariantów obróbki materiału A i B.



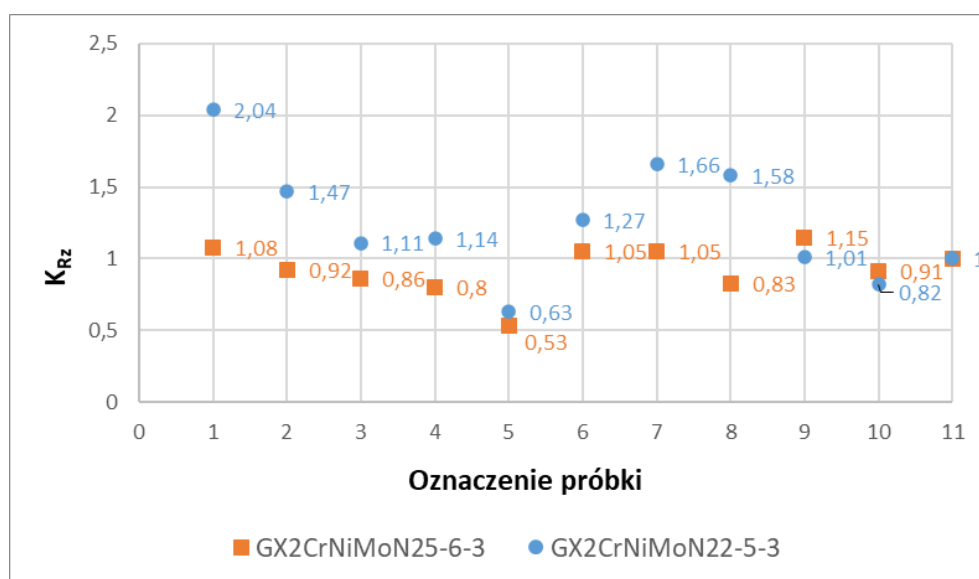
Rys. 25. Wykres parametru Ra dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B

Rysunek 26 przedstawia zestawienie parametrów Rz dla wszystkich wariantów próbek badanych materiałów.

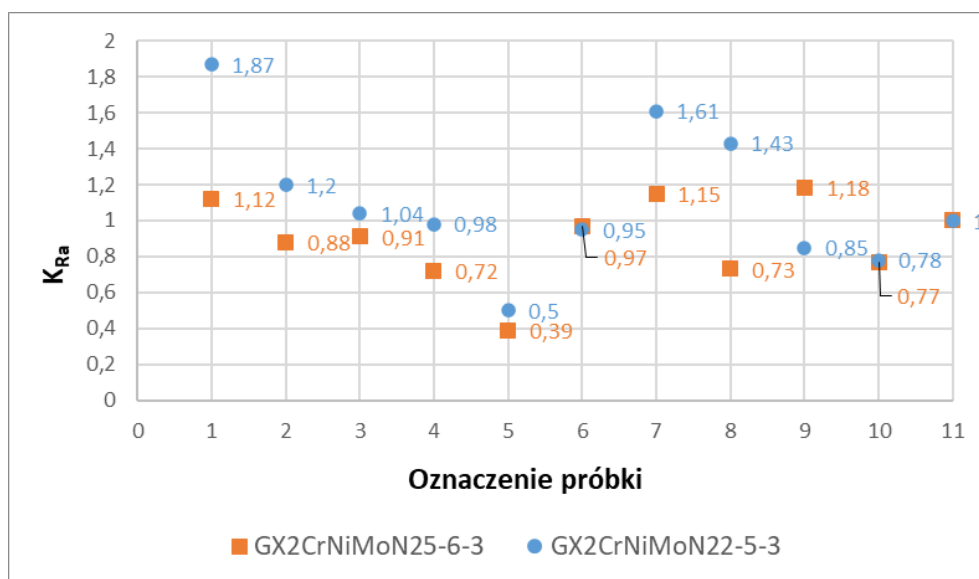


Rys. 26. Wykres parametru Rz dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B

Najkorzystniejsze zmiany powierzchni w zakresie uzyskanej chropowatości po procesie NSNT otrzymano dla próbek **1A** ($K_{Ra} = 1,12$; $K_{Rz} = 1,08$); **7A** ($K_{Ra} = 1,15$; $K_{Rz} = 1,05$); **9A** ($K_{Ra} = 1,18$; $K_{Rz} = 1,15$); **1B** ($K_{Ra} = 1,87$; $K_{Rz} = 2,04$); **7B** ($K_{Ra} = 1,61$; $K_{Rz} = 1,66$); **8B** ($K_{Ra} = 1,43$; $K_{Rz} = 1,58$). Wartość wskaźników zmniejszenia parametrów chropowatości powyżej 1 oznacza uzyskanie oczekiwanego efektu procesu NSNT w postaci zwiększenia gładkości powierzchni. Im wyższą wartość przyjmują wskaźniki (K_{Ra} , K_{Rz}) tym zakres zmian jest większy. Wykres porównujący wskaźnik zmniejszenia parametru chropowatości Rz i Ra dla poszczególnych próbek materiału A i B przedstawiono na rysunkach 27 oraz 28.



Rys. 27. Wykres wskaźnika zmniejszenia parametru Rz chropowatości (K_{Rz}) dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B



Rys. 28. Wykres wskaźnika zmniejszenia parametru Ra chropowatości (K_{Ra}) dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych można zaobserwować zależność pomiędzy wskaźnikami zmniejszenia parametrów Ra, Rz i posuwem. Uzyskane efekty procesu nagniatania w aspekcie gładkościowym wskazują na istotny związek pomiędzy stopniem zmniejszenia parametrów chropowatości, a prędkością posuwu, co potwierdzają dane literaturowe, jak i badania własne autorki [27, 42, 50].

Na podstawie analizy matematycznej istnieje możliwość ustalenia wzajemnych powiązań pomiędzy zmiennymi, które charakteryzuje się na podstawie kierunku i siły korelacji. Współczynnik korelacji liniowej mieści się w przedziale $<-1; 1>$. Poprzez bezwzględną wartość określa siłę współzależności, natomiast znak współczynnika wskazuje na jej kierunek. Poniżej przedstawiono siłę związku w zależności od wartości współczynnika:

- poniżej 0,2 – praktycznie brak związku;
- 0,2÷0,4 – korelacja niska;
- 0,4÷0,6 – korelacja umiarkowana;
- 0,6÷0,8 – korelacja wysoka - zależność znaczna;
- 0,8÷0,9 – bardzo wysoka zależność;
- 0,9÷1,0 – zależność praktycznie pełna [137].

W celu określenia relacji pomiędzy zmienną niezależną f_n a zmienną zależną Ra przeprowadzono analizę korelacji liniowej Pearsona, wartość współczynnika korelacji zmiennych obliczono na podstawie wzoru 3.1 [138].

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

gdzie:

r_{xy} – współczynnik korelacji, zawierający się w przedziale $\langle -1; 1 \rangle$;

x_i – i-te wartości zmiennej f_n [mm/obr];

y_i – i-te wartości zmiennej Ra [μm];

\bar{x} – średnia z populacji x ;

\bar{y} – średnia z populacji y .

W tabeli 13 przedstawiono wartości współczynników korelacji liniowej r pomiędzy zmienną niezależną f_n a zmienną zależną Ra dla staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 oraz dla staliwa GX2CrNiMoN25-6-3.

Tabela 13. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona

Staliwo	Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy zmienną f_n a Ra	Siła i kierunek zależności
GX2CrNiMoN22-5-3	$r = 0,88$	zależność bardzo wysoka, kierunek dodatni
GX2CrNiMoN25-6-3	$r = 0,74$	korelacja wysoka - zależność znaczna, kierunek dodatni

W celu weryfikacji istotności statystycznej współczynnika korelacji liniowej określono test istotności współczynnika korelacji. Poniżej przedstawiono hipotezy:

Hipoteza zerowa (H_0): $\rho = 0$

Hipoteza alternatywna (H_1): $\rho \neq 0$

Obliczono statystykę testową testu istotności korelacji, korzystając ze wzoru:

(3.2)

$$t_{emp} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

gdzie:

r – wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona obliczona na podstawie próby;

n – liczebność próby.

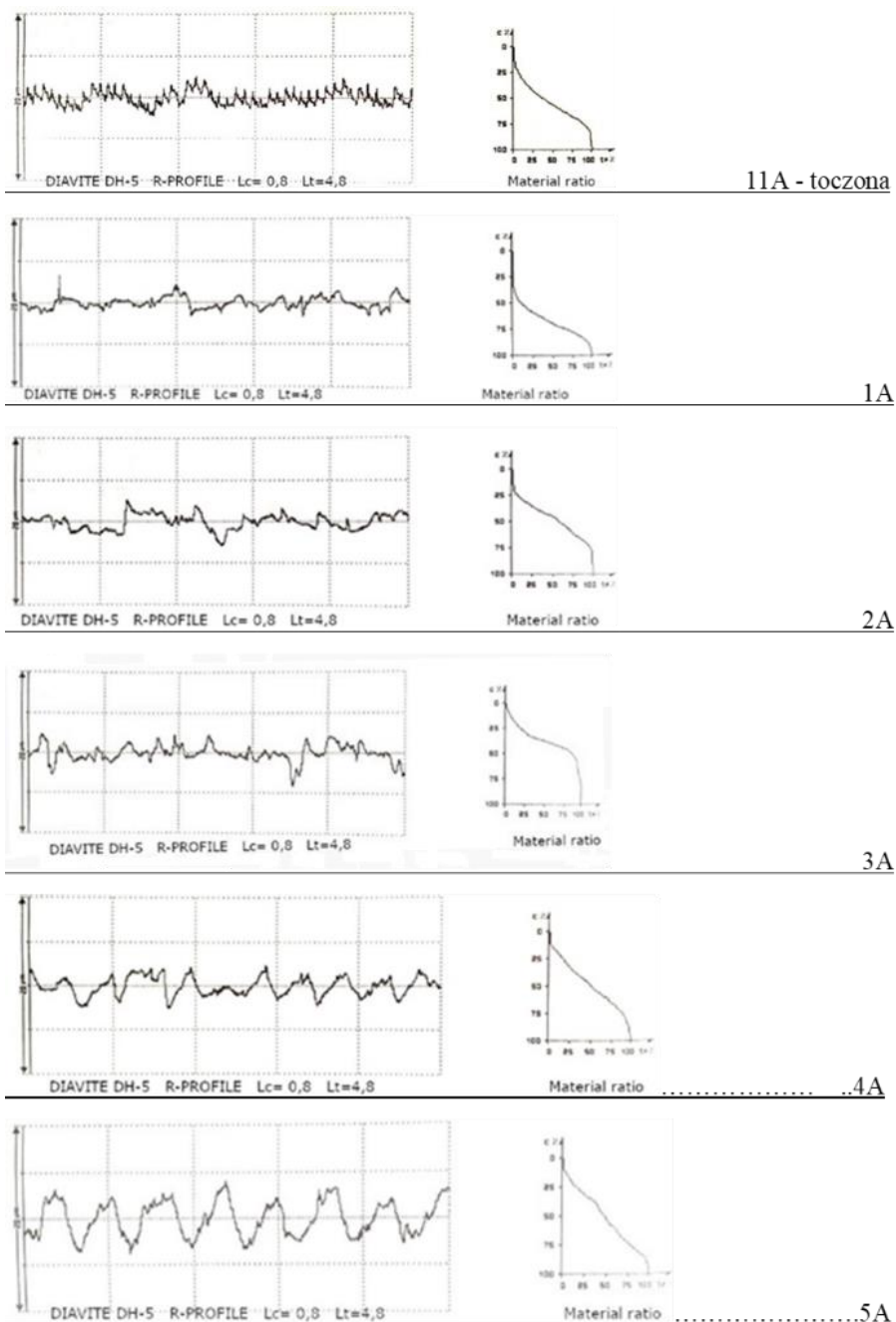
Wyniki obliczeń testu istotności współczynnika korelacji przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Wyniki obliczeń testu istotności współczynnika korelacji liniowej

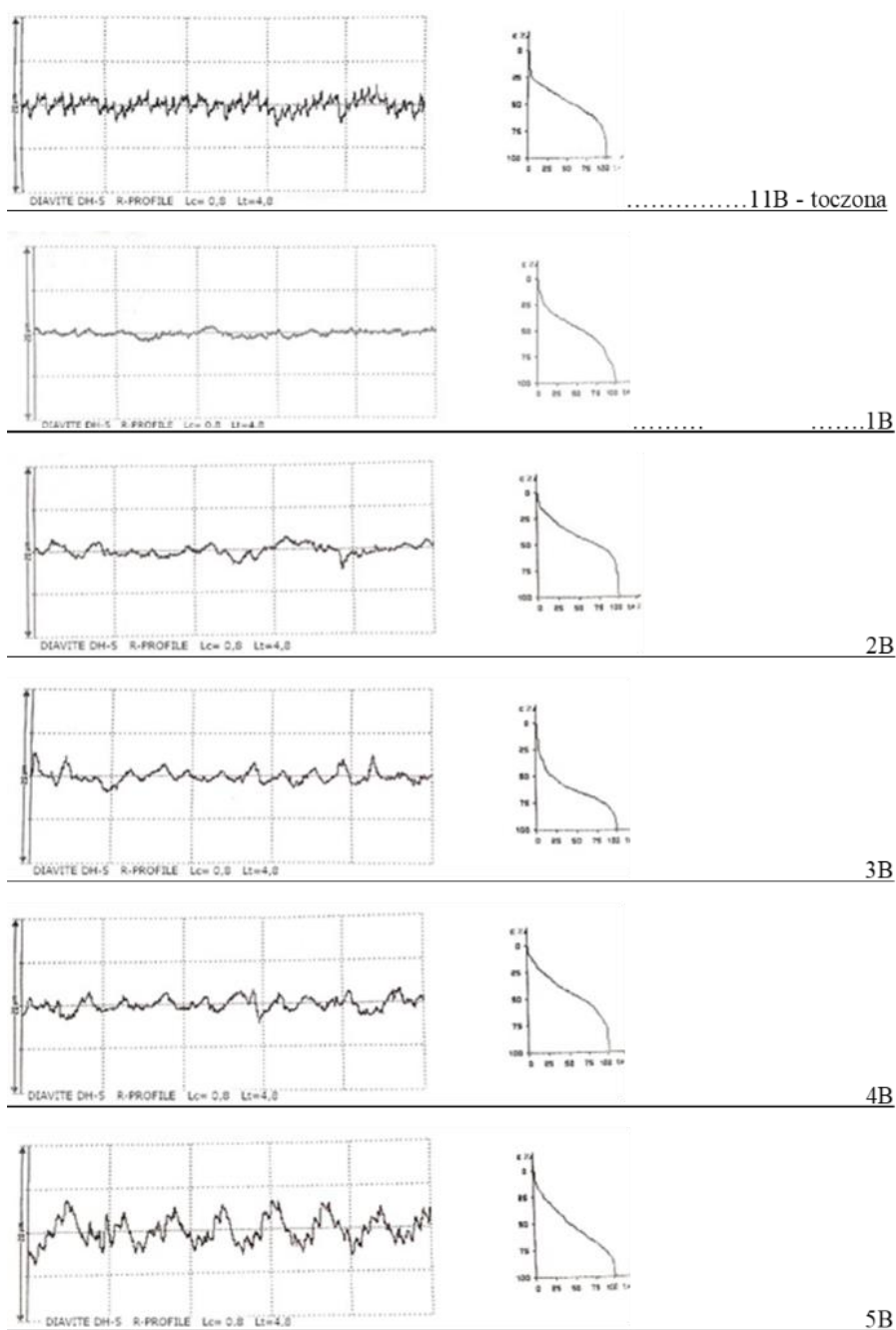
Opis	Wynik obliczeń dla GX2CrNiMoN22-5-3	Wynik obliczeń dla GX2CrNiMoN25-6-3
t_{emp} - statystyka testu istotności	5,240	3,112
n	8	8
α	0,05	0,05
t_{kryt} - wartość krytyczna	2,306	2,306
Obszar krytyczny	$(-\infty; -2,306 > U < 2,306; +\infty)$	$(-\infty; -2,306 > U < 2,306; +\infty)$

Statystyka testu istotności równa $t = 5,240$ należy do obszaru krytycznego, zasadne jest więc odrzucenie hipotezy zerowej na rzecz hipotezy alternatywnej – korelacja jest istotna.

Przykładowe profilogramy chropowatości powierzchni dla próbek referencyjnych oraz po pierwszym przejściu narzędzia nagniatającego wraz z krzywą nośności materiału - zwaną również krzywą Abbotta Firestona - przedstawiono na rysunkach 29 oraz 30.



Rys. 29. Przykładowe profilogramy chropowatości materiału A wraz z krzywymi materiałowymi



Rys. 30. Przykładowe profilogramy chropowatości materiału B wraz z krzywymi materiałowymi

Na podstawie analizy profilogramów oraz danych przedstawionych w tabelach 11, 12 stwierdzić należy, że odpowiednio dobrane parametry realizacji procesu umożliwiają zmniejszenie parametrów chropowatości, jak i wpływają na kształt krzywej udziału materiałowego, co przekłada się na przydatność eksploatacyjną wyrobu. Obróbka nagniataniem może być wykorzystywana, jako obróbka gładkościowa staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3. Przy wybranych parametrach

realizacji procesu możliwym jest uzyskanie nawet 9 klasy chropowatość powierzchni zgodnie z PN-EN ISO 1302:2004 [139].

Interpretacja uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że istnieje dodatnia, bardzo wysoka i wysoka zależność pomiędzy zmienną f_n a parametrem Ra . Zastosowanie wyższych wartości parametru posuwu podczas obróbki nagniataniem przekłada się na uzyskanie wyższych wartości parametru Ra , a w związku z istniejącą zależnością pomiędzy parametrem Ra i Rz , również powoduje wzrost parametru Rz . Znaczny wzrost chropowatości zauważalny jest przy prędkości posuwu 0,5 mm/obr. Parametr chropowatości Ra próbki 5B wynosi 1,17 μm , natomiast próbki 5A wynosi 1,7 μm . Wartości te wskazują, że realizacja procesu NSNT przy tych parametrach jest niezalecana.

Analiza otrzymanych parametrów chropowatości potwierdza możliwość kształtowania właściwości funkcjonalnych powierzchni poprzez proces NSNT. Jak wskazuje się w literaturze [44] parametry chropowatości posiadają istotne związki z właściwościami takimi jak: tarcie, zużycie, zmęczenie. Również o zmianie przydatności eksploatacyjnej, na skutek procesu nagniatania, świadczy zmiana kształtu krzywej nośności materiału. W efekcie procesu nagniatania można uzyskać krzywą o charakterze degresywno-progresywnym. Kształt ten jest korzystniejszy z punktu widzenia tribologii niż kształt degresywny, ponieważ świadczy o większej odporności materiału na zużycie. Uwypuklenie krzywej materiałowej próbek nagniecionych względem próbek toczonych widoczne jest dla próbek 1B, 2B, 8B, 2A, 3A oraz 9A.

3.5.3. Twardość

W tym podrozdziale przedstawiono wyniki pomiaru twardości 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 przy małej sile obciążającej (HV1) na przekroju materiału zrealizowano metodą Vickersa z wykorzystaniem twardościomierza *FM-700* firmy *FutureTech*. Pomiar przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1. Zastosowano nominalną siłę obciążającą równą 9,897 N, czas obciążenia 5 s.

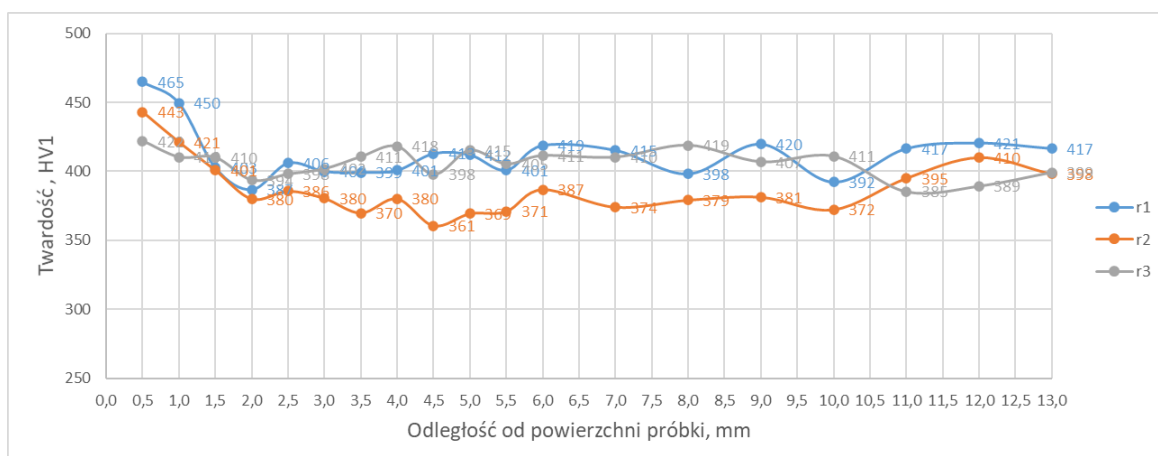
Rysunek 31 przedstawia próbkę z oznaczonymi trzema promieniami (r_1 , r_2 , r_3), wzdłuż których zrealizowano pomiar twardości. Pomiar przeprowadzono od warstwy wierzchniej w kierunku rdzenia. Jedenaście pierwszych punktów pomiarowych

wyznaczono w odstępach równych 0,5 mm, a kolejne w odstępach równych 1 mm między kolejnymi odciskami.



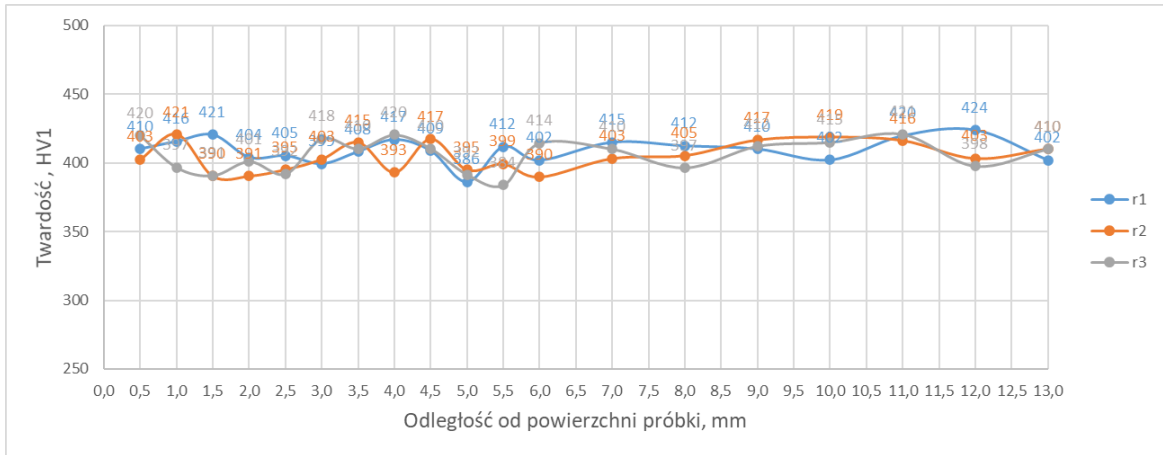
Rys. 31. Próbka z oznaczonymi promieniami, wzdłuż których realizowano pomiar twardości

Rozkład twardości w funkcji odległości od powierzchni dla próbek 11A i 11B (próbki referencyjne) oraz próbek 6A i 6B zaprezentowano na rysunkach 32÷35.

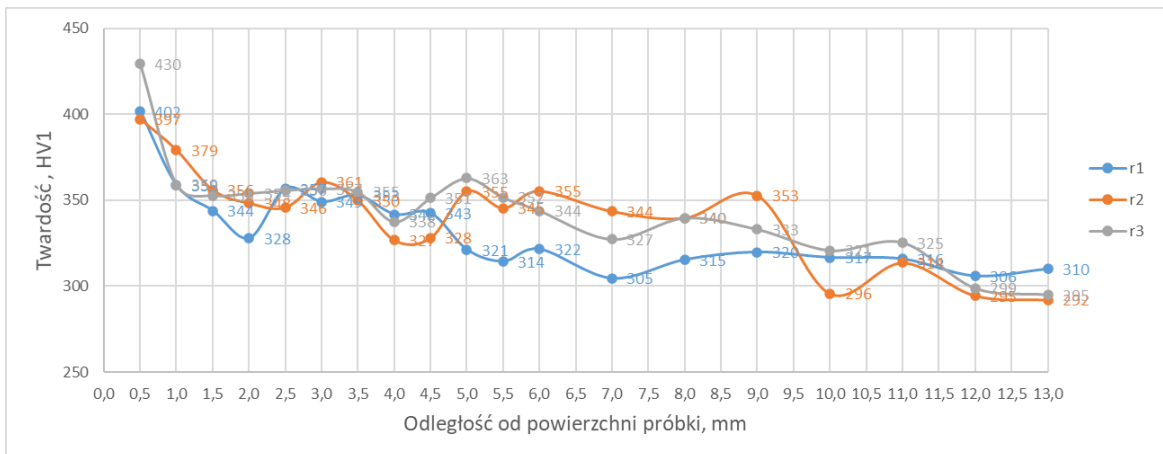


Rys. 32. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 6B

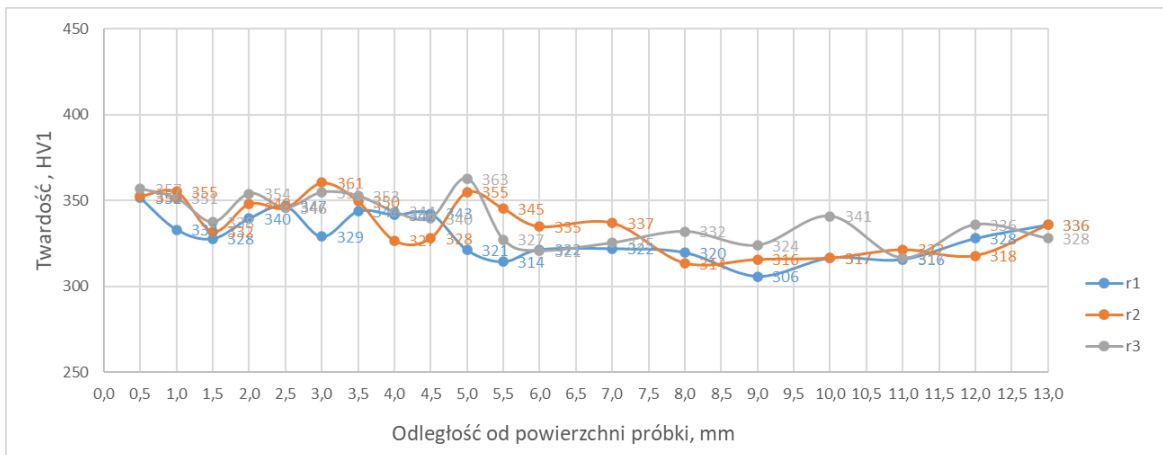
Badania własne



Rys. 33. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 11B



Rys. 34. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 6A



Rys. 35. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 11A

Wyniki pomiaru twardości na przekroju próbek potwierdzają, że w efekcie procesu nagniatania nastąpiło umocnienie w warstwie wierzchniej o zasięgu do około 1 mm.

Pomiar twardości powierzchni zewnętrznej walca przed i po procesie nagniatania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6508-1. Dla pomiarów realizowanych z zastosowaniem twardościomierza *Rockwell HR-150A* zastosowano pomiar w skali C, z siłą wstępną $F_0 = 98,07$ N i siłą główną $F_1 = 1373$ N oraz czasem obciążenia siłą główną 10s. Wartość średniej arytmetycznej z trzech pomiarów twardości dla każdej próbki badanych materiałów przedstawiono w tabelach 15, 16. W celu dokonania oceny wpływu parametrów procesu technologicznego nagniatania na twardość powierzchni określono stopień względnego umocnienia warstwy wierzchniej na podstawie wzoru 3.3 [23].

(3.3)

$$S_u = \frac{HRC_1 - HRC_0}{HRC_0} * 100\%$$

gdzie:

S_u – stopień względnego umocnienia;

HRC_0 – twardość powierzchni przed procesem nagniatania;

HRC_1 – twardość warstwy wierzchniej po procesie nagniatania.

Stopień względnego umocnienia dla wszystkich wariantów próbek przedstawiono w tabelach 15, 16.

Tabela 15. Twardość powierzchni staliwa GX2CrNiMoN25-6-3

staliwo GX2CrNiMoN25-6-3											
Ozn. próbki	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	11A toczona
HRC	31,00	34,83	34,17	34,50	30,00	40,17	29,67	31,83	25,83	27,17	24,92
HV _{przeliczony}	310	345,45	336,36	345,45	301,67	392	301,67	318,33	272,5	279,29	266,25
S_u	24%	40%	37%	38%	20%	61%	19%	28%	4%	9%	0%

Tabela 16. Twardość powierzchni staliwa GX2CrNiMoN22-5-3

staliwo GX2CrNiMoN22-5-3											
Ozn. próbki	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B toczona
HRC	43,83	43,17	42,33	42,17	42,67	48,50	36,50	37,67	37,00	36,67	35,17
HV _{przeliczony}	434,44	423,33	412,22	412,22	423,33	498,57	345,67	372,73	363,64	363,64	345,45
S _u	25%	23%	20%	20%	21%	38%	4%	7%	5%	4%	0%

Wszystkie warianty poddane procesowi NSNT posiadają wyższą twardość względem próbki referencyjnej, przy czym najwyższy stopień umocnienia otrzymano dla próbek 6A (61% wzrost) oraz 6B (38% wzrost). Warianty, które uzyskały najwyższy stopień umocnienia poddane zostały NSNT z najwyższą całkowitą głębokością dosuwu (a_{nc}) wynoszącą 2 mm. Analiza wyników wskazuje, że głównym parametrem wpływającym na stopień umocnienia jest głębokość dosuwu nagniataka. Stosując analogiczne parametry realizacji procesu nagniatania dla różnych gatunków staliwa duplex, nawet przy ich niewielkich różnicach w składzie chemicznym, uzyskany stopień umocnienia jest odmienny. Wskazuje to na konieczność każdorazowego określenia odpowiednich dla każdego gatunku, a nie tylko w oparciu o typ (duplex), parametrów procesu NSNT.

3.5.4. Badania tribologiczne

Badania wpływu procesu nagniatania na odporność na zużycie cierne staliwa duplex typu GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3 zrealizowano przy użyciu testera tribologicznego z zastosowaniem metody *T-05* (typ rolka-klocek). Test realizowano w warunkach tarcia technicznie suchego przy styku liniowym. Węzeł tarciový stanowił badany materiał i jako przeciwpróbka - pierścień o średnicy 35 mm wykonany ze stali łożyskowej 100Cr6 o twardości 58÷63 HRC. Zastosowano następujące parametry badania: obciążenie stałe = 5N, całkowita droga tarcia równa 7,5 km, prędkość obrotowa wynosząca 500 obr/min, ruch ślizgowo-obrotowy. Każdą z próbek poddano 15 cyklowym badaniom.

W celu określenia kinetyki zużycia ściernego całkowitą drogę tarcia podzielono na 15 odcinków po 0,5 km. Ubytek materiału po każdym cyklu badania rejestrowano za pomocą wagi analitycznej *OHAUS PX125D* o dokładności pomiarowej 0,00001 g. Ubytek

masy próbek po cyklu ścierania stanowił miarę odporności na zużycie ścierne. Podczas badania rejestrowano siłę tarcia umożliwiającą wyznaczenie współczynnika tarcia, który został wyliczony zgodnie z wzorem (3.4).

(3.4)

$$\mu = \frac{T}{F_N}$$

gdzie:

μ – współczynnik tarcia;

T – siła tarcia;

F_N – siła obciążenia.

Średnie wartości wraz z wynikami zużycia tribologicznego zamieszczono w tabelach 17 i 18.

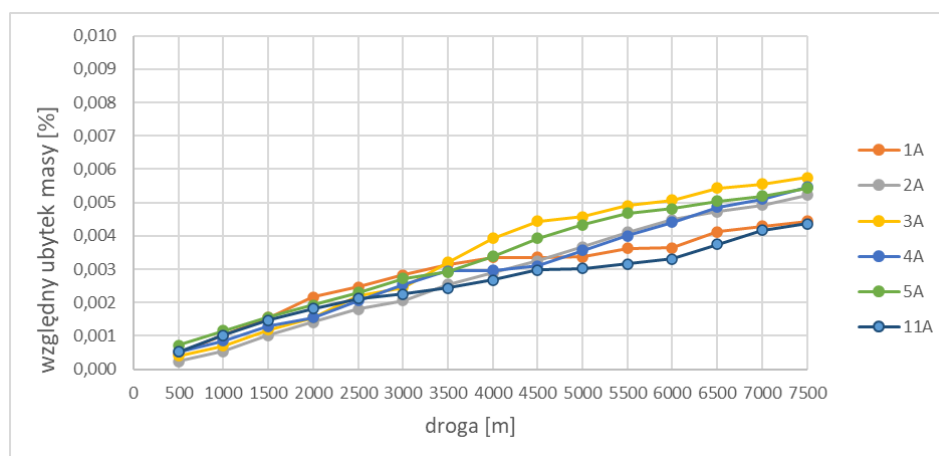
Tabela 17. Zużycie tribologiczne próbek materiału GX2CrNiMoN22-5-3 na drodze 7,5 km oraz współczynnik tarcia

GX2CrNiMoN22-5-3				
Nr próbki	Masa początkowa próbki, g	Ubytek masy, g	Procentowy ubytek masy, %	Współczynnik tarcia - μ
1B	1,69270	0,00347	0,00205	0,24 ± 0,06
2B	1,68439	0,00301	0,00179	0,28 ± 0,02
3B	2,00179	0,00402	0,00201	0,20 ± 0,02
4B	1,84420	0,00601	0,00326	0,22 ± 0,02
5B	1,53016	0,00690	0,00451	0,33 ± 0,08
6B	1,78863	0,00612	0,00342	0,28 ± 0,09
7B	1,82705	0,00895	0,00490	0,22 ± 0,10
8B	1,75310	0,00760	0,00434	0,20 ± 0,03
9B	1,64583	0,00820	0,00498	0,25 ± 0,07
10B	1,81676	0,00576	0,00317	0,24 ± 0,05
11B	1,49480	0,00626	0,00419	0,22 ± 0,09

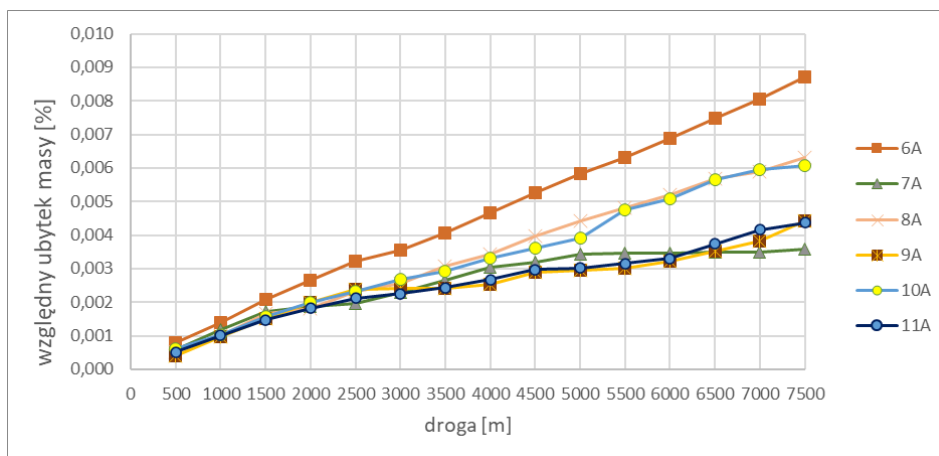
Tabela 18. Zużycie tribologiczne próbek materiału GX2CrNiMoN25-6-3 na drodze 7,5 km oraz współczynnik tarcia

GX2CrNiMoN25-6-3				
Nr próbki	Masa początkowa próbki, g	Ubytek masy, g	Procentowy ubytek masy, %	Współczynnik tarcia - μ
1A	1,65753	0,00733	0,00442	$0,20 \pm 0,04$
2A	2,01502	0,01049	0,00521	$0,23 \pm 0,02$
3A	1,80198	0,01033	0,00573	$0,20 \pm 0,16$
4A	1,95513	0,01064	0,00544	$0,30 \pm 0,10$
5A	1,83251	0,00993	0,00542	$0,40 \pm 0,08$
6A	1,63530	0,01419	0,00868	$0,17 \pm 0,07$
7A	1,96350	0,00701	0,00357	$0,20 \pm 0,02$
8A	1,79632	0,01129	0,00629	$0,18 \pm 0,12$
9A	1,83237	0,00806	0,00440	$0,20 \pm 0,01$
10A	1,89758	0,01150	0,00606	$0,22 \pm 0,15$
11A	1,84392	0,00803	0,00435	$0,23 \pm 0,06$

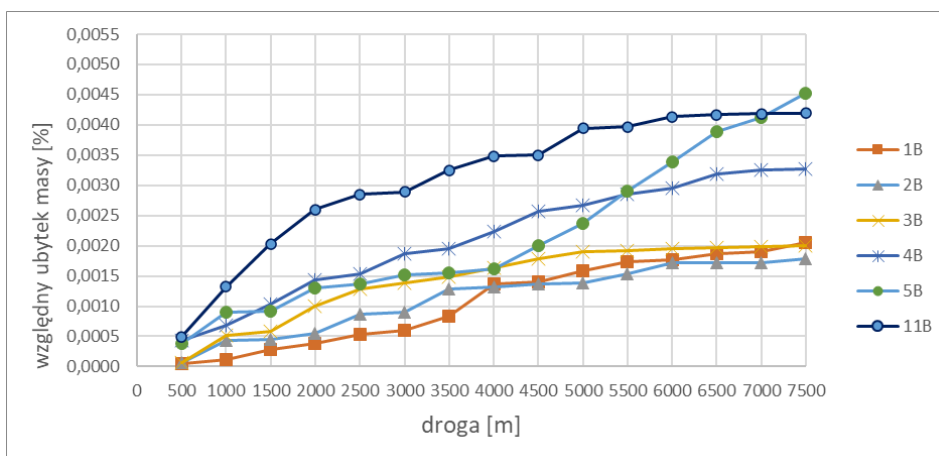
Otrzymany współczynnik tarcia utrzymywał się na zbliżonym poziomie dla wszystkich wariantów, jedynie przy próbkach 5A oraz 5B, które posiadają najwyższy parametr chropowatości (5A – Ra 1,7 μ m), (5B – Ra 1,17 μ m) widoczny był wzrost jego wartości. Charakterystyki badanych materiałów w postaci zależności względnego ubytku masy od drogi tarcia przedstawiono na rysunkach 36÷39.



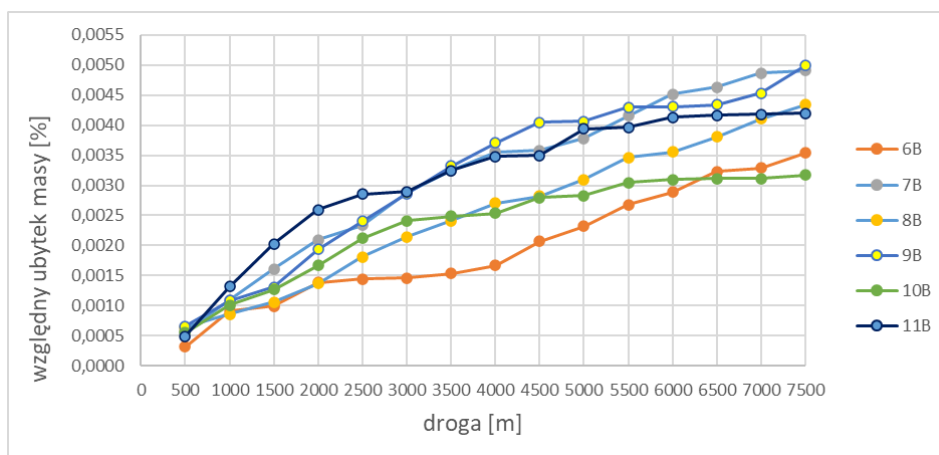
Rys. 36. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek: 1A; 2A; 3A; 4A; 5A; 11A - materiał GX2CrNiMoN25-6-3



Rys. 37. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek: 6A; 7A; 8A; 9A; 10A; 11A - materiał GX2CrNiMoN25-6-3

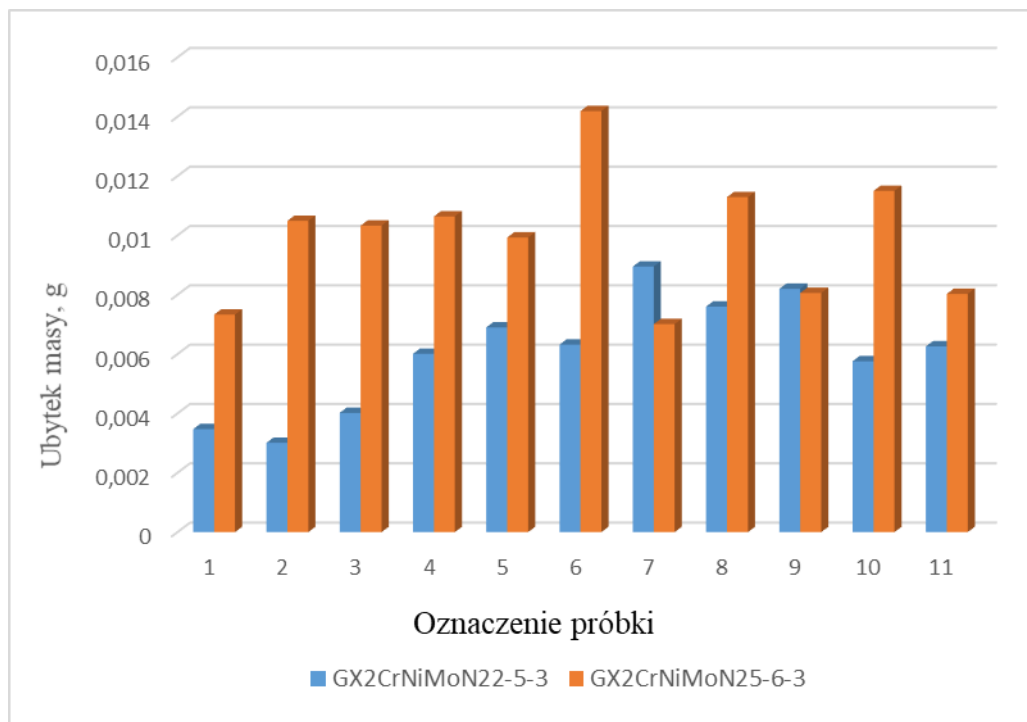


Rys. 38. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek: 1B; 2B; 3B; 4B; 5B; 11B materiału GX2CrNiMoN22-5-3



Rys. 39. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek: 6B; 7B; 8B; 9B; 10B; 11B materiału GX2CrNiMoN22-5-3

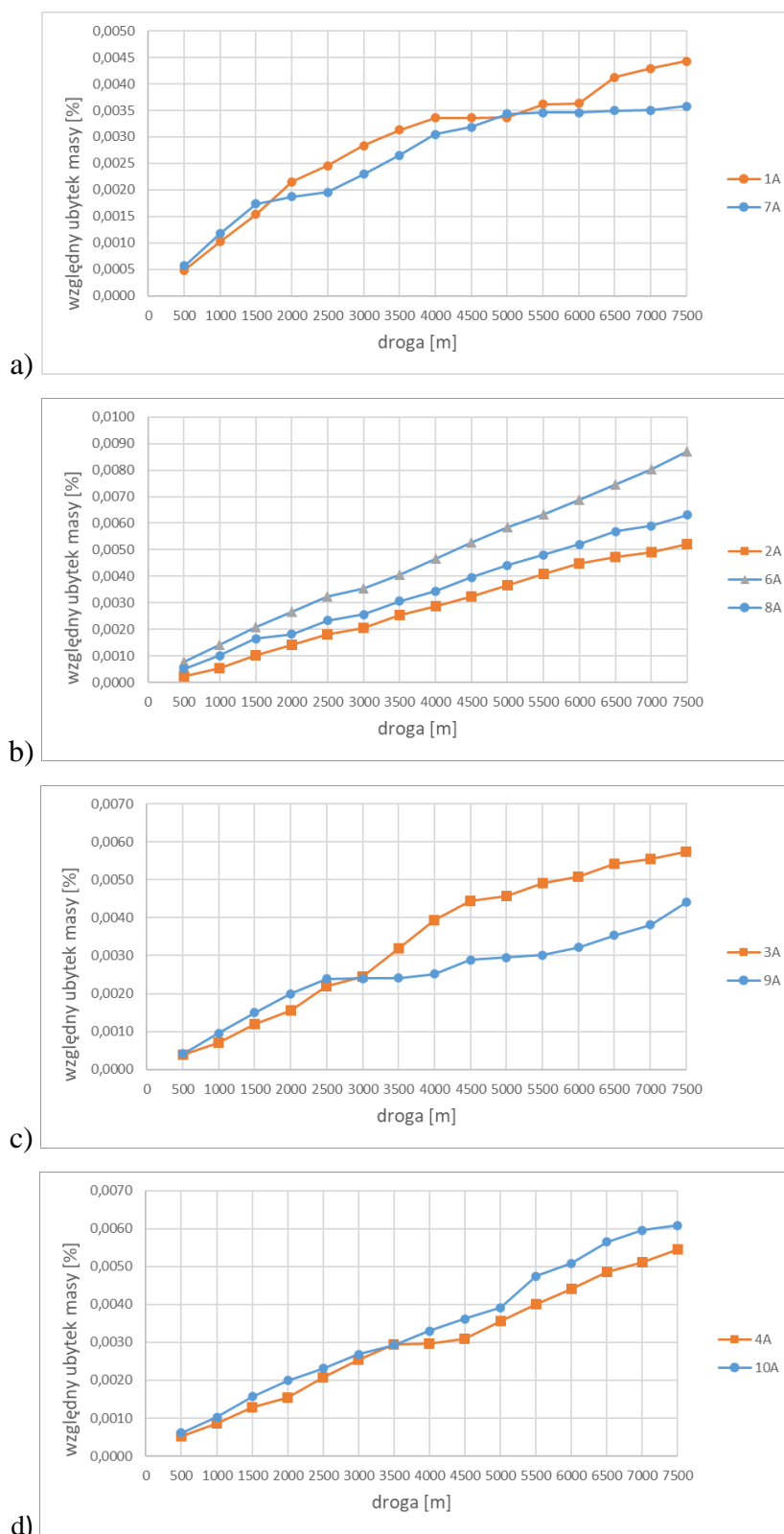
Efekt zużywania ściernego badanych próbek stanowił ubytek masy oraz trwałe zmiany powierzchni związane ze zużyciem tribologicznym. Na rysunku 40 przedstawiono porównanie całkowitego ubytku masy poszczególnych próbek 1÷11 staliwa A i B.



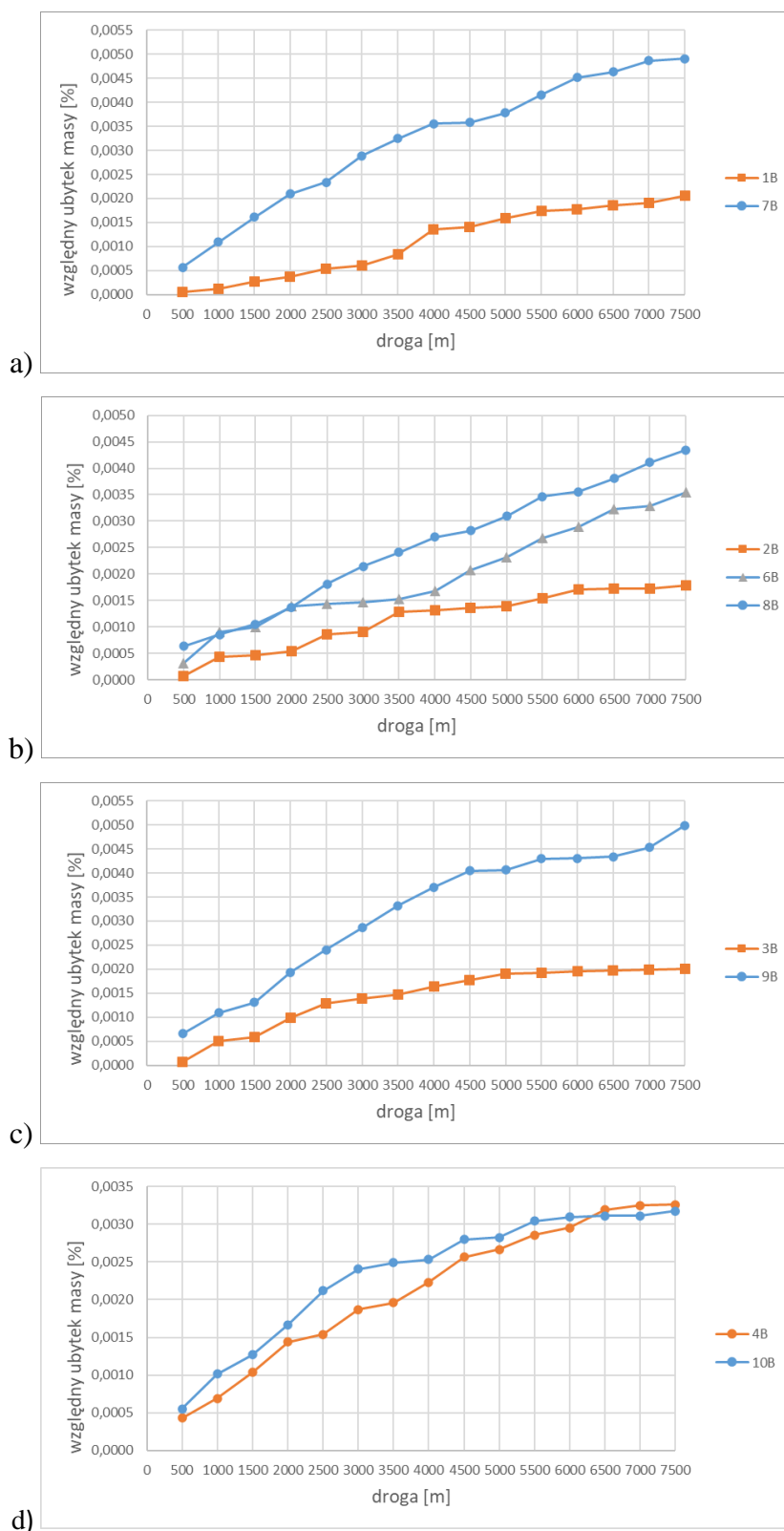
Rys. 40. Porównanie ubytku masy próbek 1 ÷ 11 staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3

Wyniki wskazują, iż zastosowanie procesu nagniatania może korzystnie wpływać na właściwości tribologiczne badanych materiałów, jednak efekt zależy od parametrów realizacji procesu. Mniejszy (względem próbki referencyjnej) sumaryczny ubytek masy po 15 cyklach odnotowano dla wariantów 1A, 7A, 9A oraz 1B ÷ 4B oraz 6B i 10B. Charakterystyka zużycia tribologicznego badanych materiałów wskazuje, że najwyższy ubytek masy posiadały próbki 6A i 7B.

Mając na uwadze, iż wskazania literaturowe oraz badania własne autorki potwierdzają zależność pomiędzy parametrem posuwu nagniatania a chropowatością, nadto związek struktury geometrycznej powierzchni z zużyciem ściernym, na rysunkach 41, 42 przedstawiono zestawienie krzywych względnego ubytku masy od drogi tarcia dla próbek o tym samym posuwie nagniatania. Przy czym zestawiane próbki różniły się między sobą parametrami dosuwu nagniataka i ilością przejść narzędzia nagniatającego, co może wyjaśniać różnice względnego ubytku masy.



Rys. 41. Wykresy procentowego ubytku masy w funkcji drogi dla próbek nagniatanych przy tym samym parametrze posuwu – materiał GX2CrNiMoN25-6-3 (a - próbki 1A, 7A; b – próbki 2A, 6A, 8A; c – próbki 3A, 9A; d – próbki 4A, 10A)



Rys. 42. Wykresy procentowego ubytku masy w funkcji drogi dla próbek nagniatanych przy tym samym parametrze posuwu – materiał GX2CrNiMoN22-5-3 (a - próbki 1B, 7B; b – próbki 2B, 6B, 8B; c – próbki 3B, 9B; d – próbki 4B, 10B)

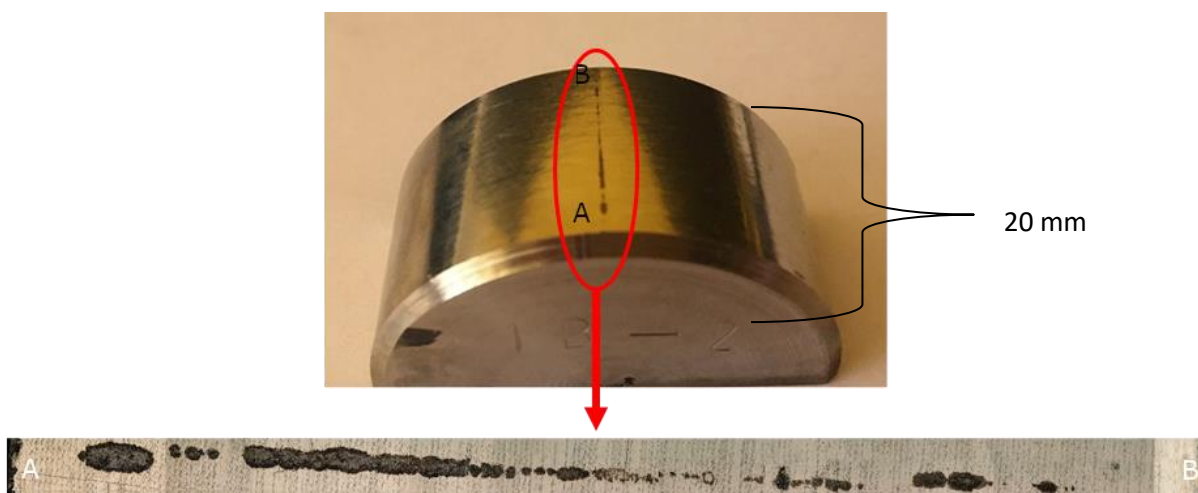
Wykresy przedstawione na rysunku 41 prezentują porównanie przebiegu zużycia ściernego w czasie 15 cykli badania dla poszczególnych wariantów, które były nagniatane przy tej samej wartości posuwu. Rysunek 41a charakteryzuje właściwości tribologiczne próbek 1A oraz 7A. Na podstawie ubytku masy po badaniu tribologicznym oraz przy uwzględnieniu pozostałych (ponad wielkość posuwu) parametrów realizacji procesu nagniatania można wskazać, że przy posuwie 0,1 mm/obr korzystniej kształtują się właściwości tribologiczne przy całkowitym dosuwie wynoszącym 1 mm, ale osiąganym poprzez dwa przejścia narzędzia nagniatającego, jak to miało miejsce dla próbki 7A. Przy posuwie wynoszącym 0,2 mm/obr, jak dla próbek porównywanych na rysunku 41b, najgorsze właściwości tribologiczne otrzymano dla wariantu 6A, który posiadał najwyższy ubytek masy, odbiegający znacząco od pozostałych wariantów. Była to próbka, która jako jedyna poddana została nagniataniu przy całkowitym dosuwie nagniataka równym 2 mm. Przy posuwie wynoszącym 0,3 mm/obr analogicznie, jak dla posuwu 0,1 mm/obr korzystniej kształtowane są właściwości tribologiczne dla wariantu, który miał mniejszy dosuw jednostkowy wynoszący 0,5 mm i dwa przejścia narzędzia nagniatającego. Próbki 4A oraz 10A pomimo odmiennej ilości przejść narzędzia nagniatającego posiadały zbliżone właściwości tribologiczne i po 15 cyklach badania miały większy ubytek masy od próbki referencyjnej.

Dla staliwa typu duplex w gatunku GX2CrNiMoN25-6-3 całkowity docisk (a_{nc}) wynoszący powyżej 1 mm niekorzystnie wpływa na właściwości tribologiczne. Prędkość posuwu powyżej 0,4 mm/obr uwidacznia się negatywnym oddziaływaniem na właściwości ściernie i z tego powodu jest niezalecana.

Na rysunku 42 przedstawiono zestawienie krzywych względnego ubytku masy od drogi tarcia dla poszczególnych wariantów próbek staliwa GX2CrNiMoN22-5-3, które były nagniatane z tą samą prędkością posuwu. Analiza wielkości ubytku masy w czasie 15 cykli badania wskazuje, że również dla tego typu staliwa nie zalecane ze względu na właściwości tribologiczne jest realizowanie procesu nagniatania przy posuwie powyżej 0,4 mm/obr, jak dla wariantu 4B i 10B. Obie próbki charakteryzowały się wysokim, zbliżonym ubytkiem masy (pomimo odmiennej ilości przejść narzędzia nagniatającego i wielkości jednostkowego dosuwu). Próbka 1B posiadała wyższe właściwości ściernie niż wariant 7B, który uzyskał najwyższy ubytek masy po pełnym cyklu badania.

3.5.5. Badania zmęczeniowe

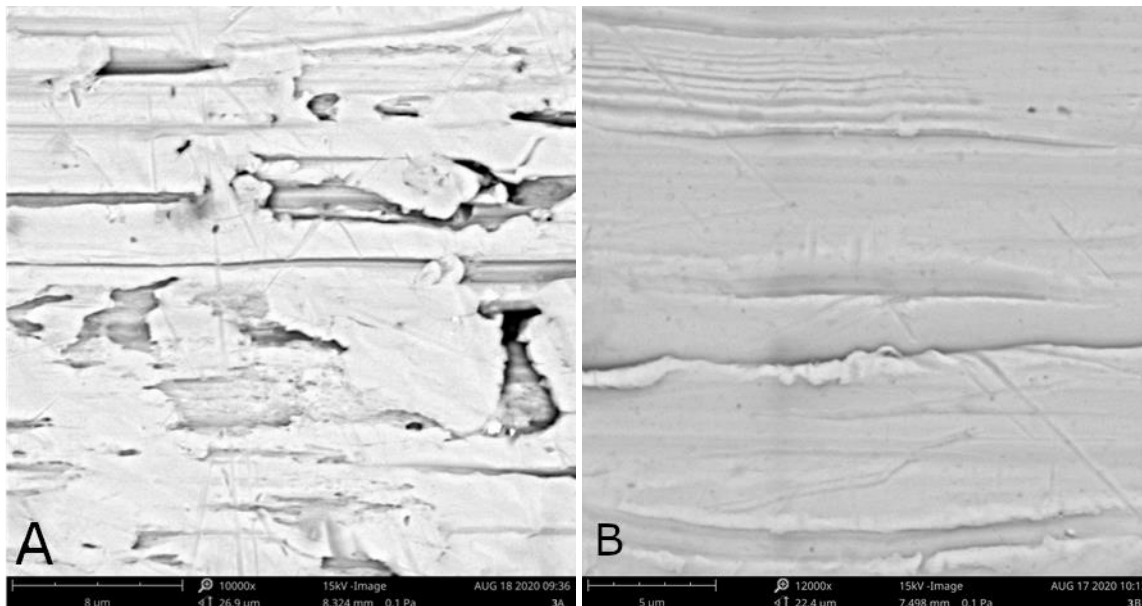
Oceny trwałości zmęczeniowej materiału dokonano w warunkach obciążeń cyklicznych, przyjmując jako kryterium zniszczenia pojawienie się pęknięć lub wykruszeń na powierzchni badanego materiału. Do oceny zmian makro- i mikrostruktury oraz identyfikacji mechanizmu generującego uszkodzenia powstałe na skutek działania obciążeń o przebiegu sinusoidalnym, obszary zużycia poddano obserwacji przy zastosowaniu cyfrowego mikroskopu *KEYENCE VHX-7000* oraz skaningowego mikroskopu *Phenom XL*. Ilościowej oceny uszkodzeń powierzchni, powstałych wskutek rozwoju procesów powodujących zmęczenie materiału i degradację jego właściwości mechanicznych, dokonano poprzez pomiar pola całkowitego zużytej powierzchni. Na rysunku 43 zaprezentowano przykładowy obraz makroskopowy i mikroskopowy (w powiększeniu 250-krotnym) zużytej powierzchni.



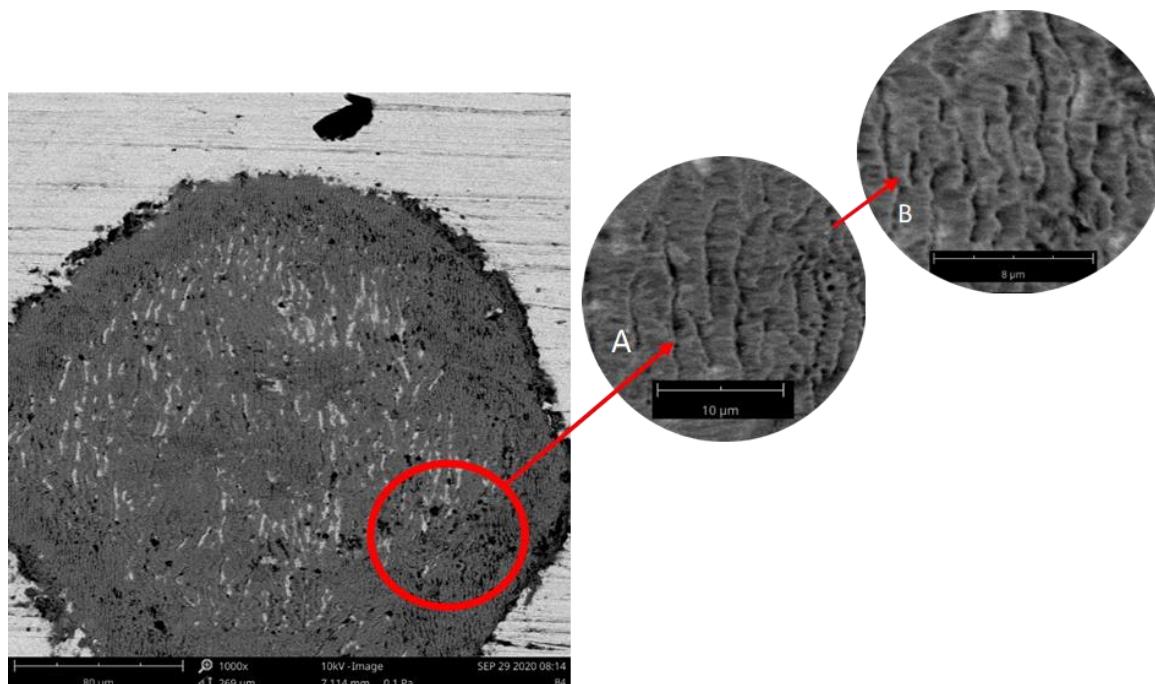
Rys. 43. Przykładowa powierzchnia po próbie zmęczenia stykowego - obraz makroskopowy oraz powiększenie 250x - KEYENCE VHX-7000

Pod wpływem długotrwałych obciążeń cyklicznych na powierzchni badanego materiału zaobserwowano ekstruzje - rysunek 44. Na podstawie badań własnych autorki oraz danych literaturowych [104] ustalono, że na powierzchni materiału widoczne są oznaki poziomego przemieszczenia całych obszarów zawartych między pasmami poślizgu, których rozwój związany może być z rozwijaniem szczelin zmęczeniowych – rysunek 45. Uszkodzenia w postaci mikropęknięć i wykruszeń zobrazowano na rysunkach 46÷50.

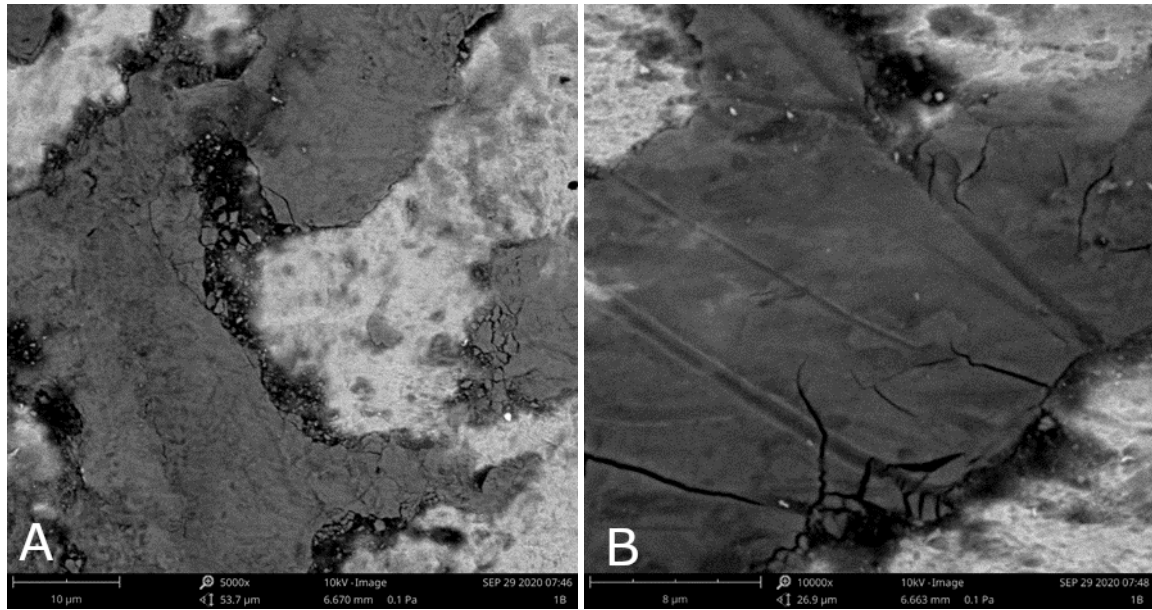
W związku z dużą ilością danych, w celu zachowania przejrzystości niniejszej dysertacji, zaprezentowano wyłącznie przykładowe obrazy powierzchni materiału po próbie zmęczenia.



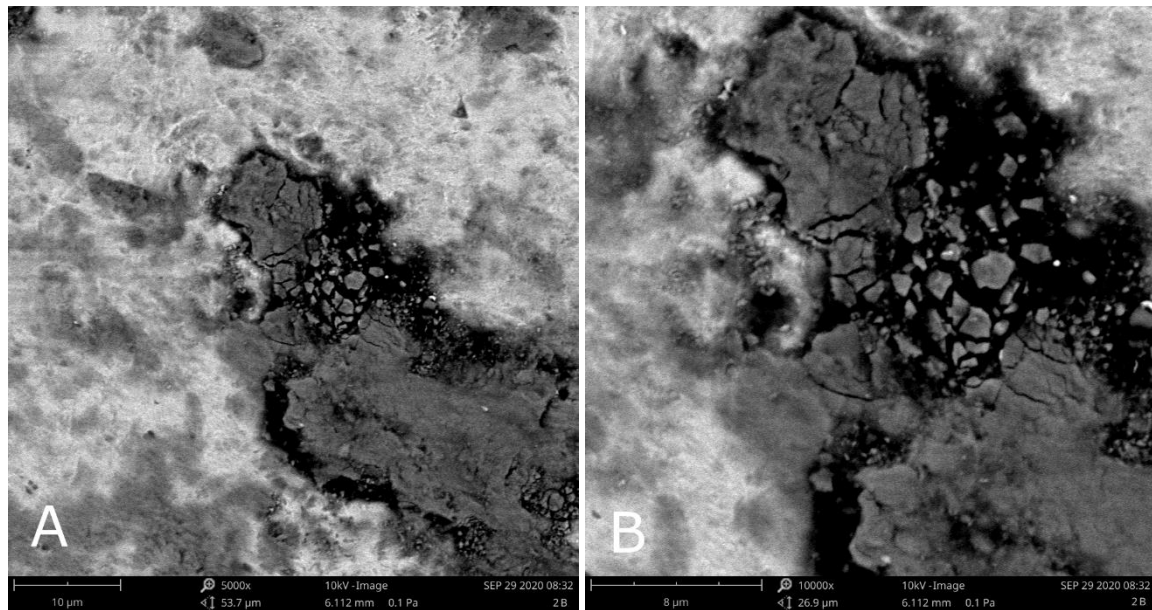
Rys. 44. Ekstruzje powstałe na powierzchni badanego materiału w wyniku działania zmiennego obciążenia: A – próbka 3A, pow. 10000x; B – próbka 3B, pow. 12000x, skaningowy mikroskop Phenom XL



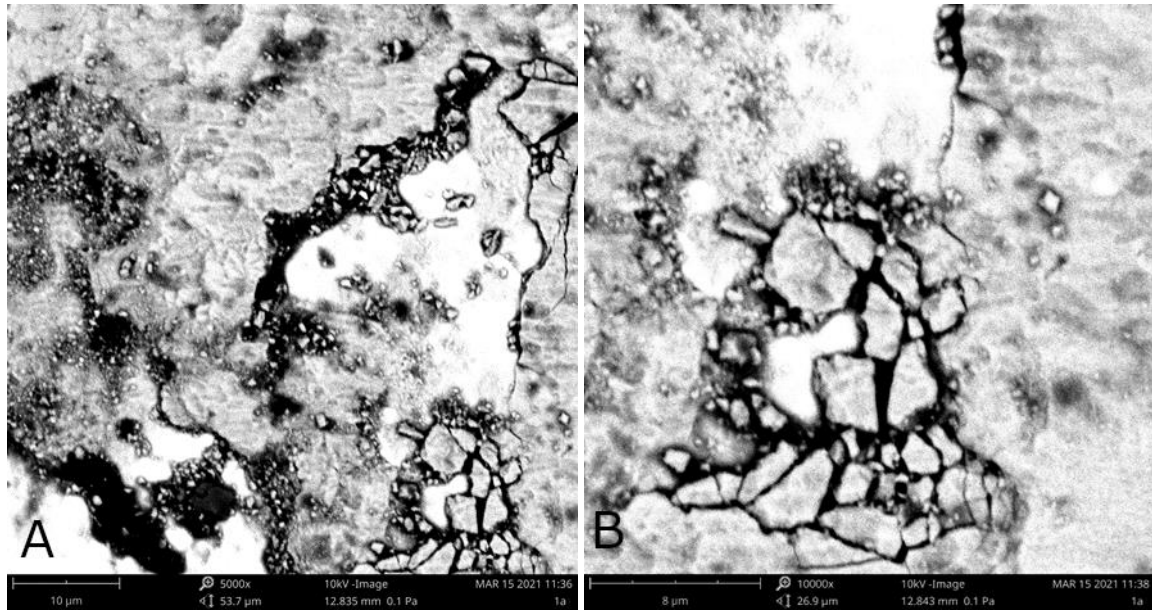
Rys. 45. Okresowe przesunięcia na powierzchni badanego materiału powstałe w wyniku działania zmiennego obciążenia – próbka 4B; A - pow. 5000x; B – pow. 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL



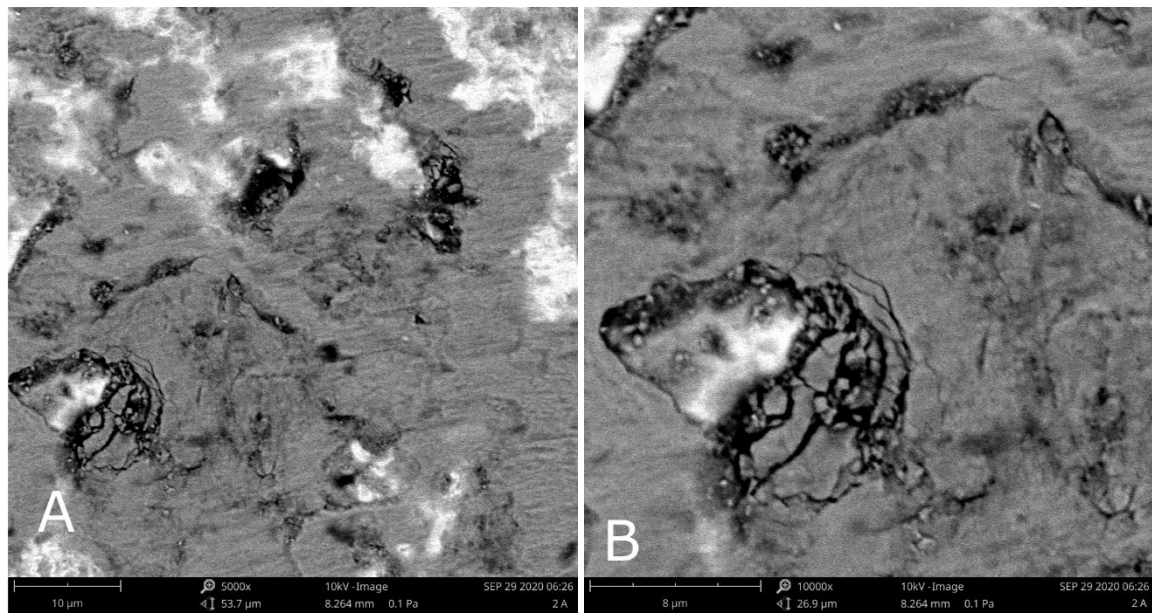
Rys. 46. Mikropęknięcia i wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 1B; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL



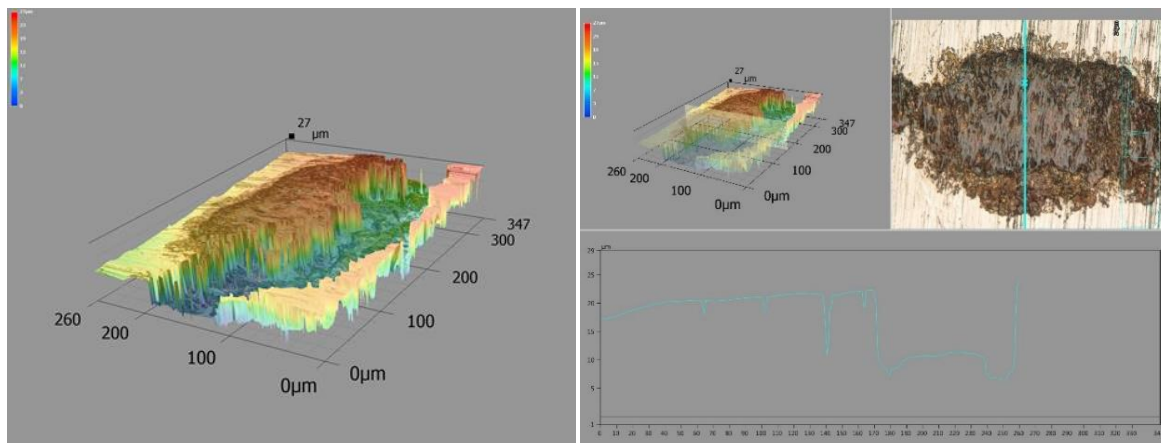
Rys. 47. Mikropęknięcia i wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 2B; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL



Rys. 48. Mikropęknięcia i wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 1A; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL

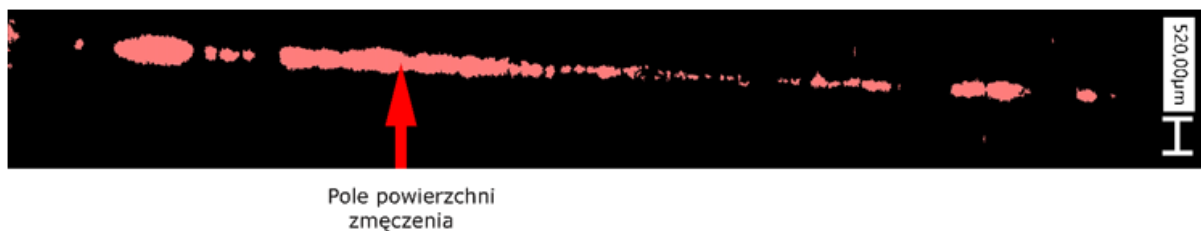


Rys. 49. Wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 2A; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL



Rys. 50. Obraz 3D przykładowego wykruszenia na powierzchni badanego materiału – próbka 2B, mikroskop cyfrowy KEYENCE VHX-7000

Do oceny miary uszkodzeń poszczególnych próbek materiału A i B przyjęto, jako kryterium zniszczenia przez zmęczenie stykowe, pole powierzchni degradacji materiału. Pomiar przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu cyfrowego *KEYENCE VHX-7000* oraz oprogramowania *Analizator VHX 7000-970F*. Przykładowy obraz z realizacji pomiarów przedstawiono na rysunku 51.



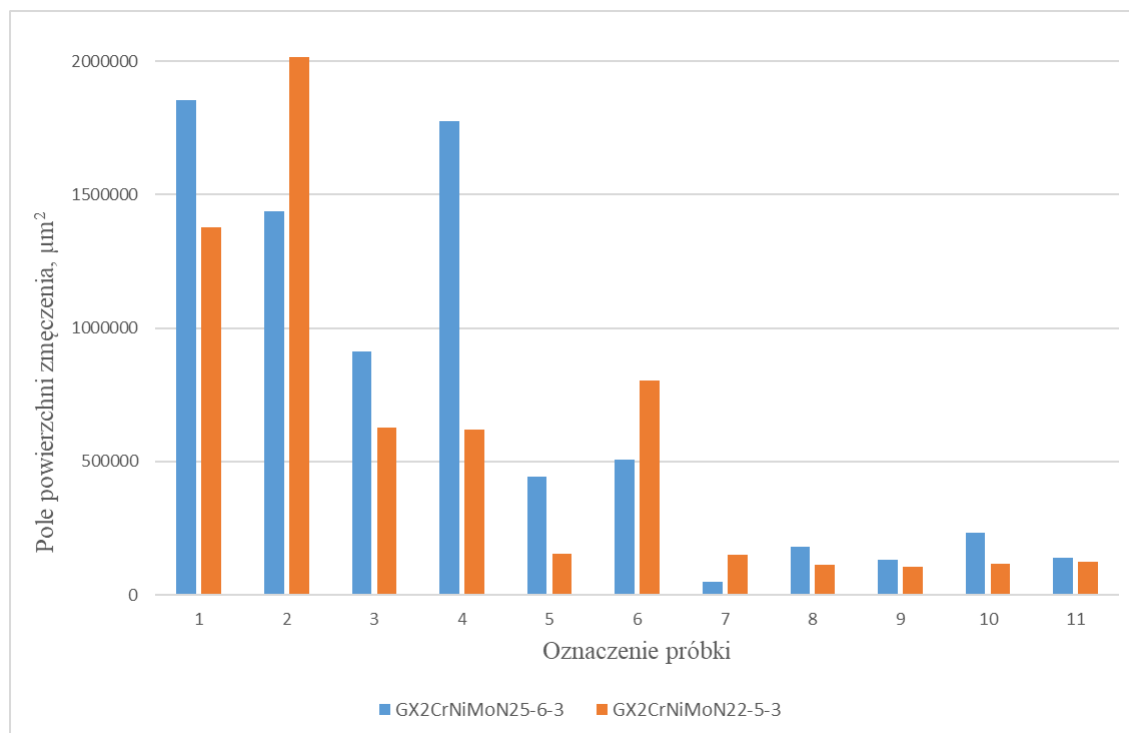
Rys. 51. Przykładowe pole powierzchni zmęczenia zarejestrowane przy użyciu oprogramowania Analizator VHX 7000-970F

Uzyskane wyniki pomiarów pola powierzchni zmęczenia zaprezentowano w tabeli 19. Mając na uwadze uzyskane dane wskazać należy, że na odporność zmęczeniową istotny wpływ ma zarówno skład chemiczny materiału, jak i parametry realizacji procesu nagniatania.

Tabela 19. Zestawienie wyników pomiaru pola powierzchni zżęczenia materiału

Oznaczenie	Pole powierzchni zżęczenia S_z , μm^2	
	GX2CrNiMoN25-6-3 (materiał - A)	GX2CrNiMoN22-5-3 (materiał - B)
1	1854794,90	1377780,64
2	1436624,84	2014994,78
3	911701,91	627757,07
4	1773595,96	619450,29
5	443967,38	15670,95
6	505390,70	801301,52
7	47868,03	148919,95
8	179572,88	114302,17
9	132680,02	103821,11
10	232648,91	117234,11
11	138581,38	123544,25

Celem ułatwienia analizy wyniki przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 52. Poniższy wykres przedstawia porównanie pola powierzchni zużytej poszczególnych próbek.



Rys. 52. Wykres porównujący pole powierzchni zużytej poszczególnych próbek materiału A i B

Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, iż obróbka nagniataniem staliwa duplex GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3 umożliwia kształtowanie odporności na zmęczenie stykowe. Zastosowane parametry obróbki nagniataniem mają wpływ na charakter oraz zakres zmian powstałych podczas próby zmęczeniowej. W zależności od zastosowanych parametrów realizacji procesu nagniatania istnieje możliwość poprawy, jak również pogorszenia trwałości materiału. W związku z powyższym, tak istotnym jest właściwy dobór parametrów do rzeczywistych warunków pracy. W odniesieniu do zastosowanych parametrów eksperymentu, w sposób istotny o finalnym efekcie obróbki nagniataniem, decyduje głębokość dosuwu nagniataka a_n . Korzystniejsze efekty otrzymano dla próbek, które miały mniejszą głębokość pojedynczego przejścia narzędzia nagniatającego, wynoszącą 0,5 mm (dosuw całkowity 1mm i dwa przejścia narzędzia nagniatającego). W przypadku zastosowania głębokości dosuwu nagniataka równego 1 mm i jednego przejścia narzędzia nagniatającego właściwości zmęczeniowe obu materiałów uległy pogorszeniu względem próbki referencyjnej.

W celu wskazania relacji pomiędzy zmienną niezależną a_n a zmienna zależną S_z przeprowadzono analizę korelacji liniowej Pearsona. Wartość współczynnika korelacji zmiennych obliczono na podstawie wzoru 4.1 i przedstawiono w tabeli 20 [138].

Tabela 20. Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy zmienną a_n a polem powierzchni zmęczenia

Staliwo	Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy zmienną a_n a S_z	Siła i kierunek zależności
GX2CrNiMoN22-5-3	$r = 0,62$	korelacja wysoka - zależność znaczna, kierunek dodatni
GX2CrNiMoN25-6-3	$r = 0,74$	korelacja wysoka - zależność znaczna, kierunek dodatni

W celu weryfikacji istotności statystycznej współczynnika korelacji liniowej określono test istotności współczynnika korelacji. Poniżej przedstawiono hipotezy:

Hipoteza zerowa (H_0): $\rho = 0$

Hipoteza alternatywna (H_1): $\rho \neq 0$

Obliczono statystykę testową testu istotności korelacji, korzystając ze wzoru (4.2). Wyniki obliczeń testu istotności współczynnika korelacji przedstawiono w tabeli 21.

Tabela 21. Wyniki obliczeń testu istotności współczynnika korelacji liniowej

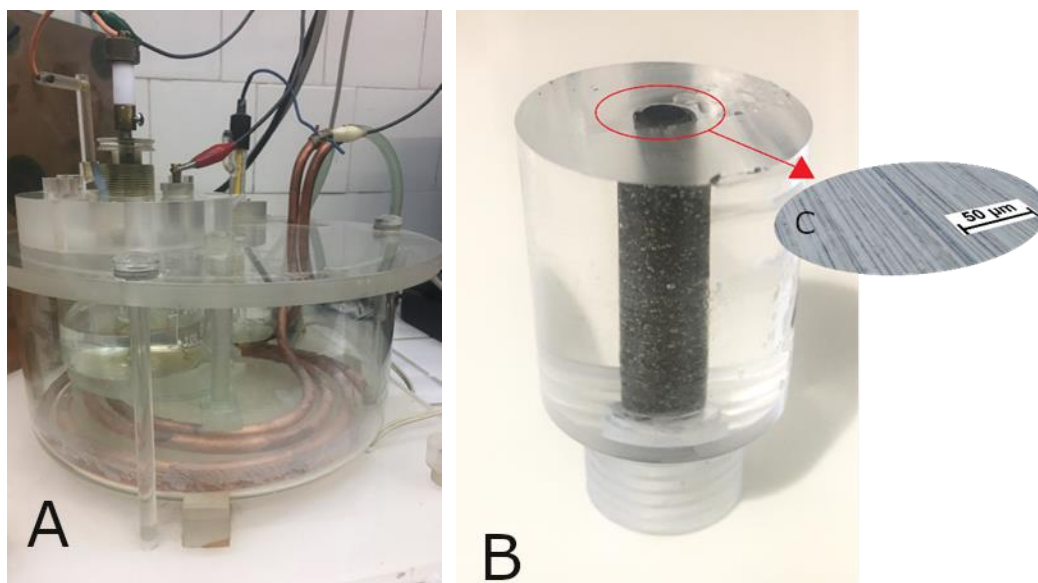
Opis	Wynik obliczeń dla GX2CrNiMoN22-5-3	Wynik obliczeń dla GX2CrNiMoN25-6-3
t_{emp} - statystyka testu istotności	2,435	3,112
n	8	8
α	0,05	0,05
t_{kryt} - wartość krytyczna	2,306	2,306
Obszar krytyczny	$(-\infty; -2,306 > U < 2,306; +\infty)$	$(-\infty; -2,306 > U < 2,306; +\infty)$

Statystyka testu istotności równa $t_{emp} = 2,435$ dla GX2CrNiMoN22-5-3, oraz $t_{emp} = 3,112$ dla GX2CrNiMoN25-6-3 należy do obszaru krytycznego. Uzasadnione jest zatem odrzucenie hipotezy zerowej na rzecz hipotezy alternatywnej – korelacja jest istotna.

Otrzymane wyniki analizy statystycznej potwierdzają wysoką zależność pomiędzy głębokością dosuwu nagniatka a_n a właściwościami eksploatacyjnymi związanymi z odpornością zmęczeniową.

3.5.6. Odporność na korozję

W celu ustalenia wpływu procesu nagniatania na odporność korozyjną materiałów A i B przeprowadzono badania elektrochemiczne z zastosowaniem metody potencjodynamicznej. Testy laboratoryjne w warunkach przyspieszonej korozji wykonano w układzie elektrochemicznym trójelektrodowym, przy użyciu zestawu do badań elektrochemicznych wraz z oprogramowaniem *CHI618A Electrochemical Analyzer*. Elektrode stanowił materiał w postaci walców o średnicy 3 mm zainkludowany żywicą epoksydową w oprawkach wykonanych z poliwęglanu. Elektrode pomocniczą stanowiła elektroda platynowa, a elektrodą odniesienia była elektroda kalomelowa. Jako medium zastosowano syntetyczny roztwór wody morskiej w stężeniu 1% i pH równym 8. Na rysunku 53 przedstawiono urządzenie elektrochemiczne oraz przykładową próbkę do badania odporności na korozję.



Rys. 53. Urządzenie elektrochemiczne - A oraz próbka do badań odporności na korozję - B wraz z przykładową mikrostrukturą powierzchni przed badaniem korozyjnym - C, powiększenie 200x

W celu wyznaczenia charakterystyki korozyjnej zarejestrowano krzywe potencjodynamiczne oraz parametry korozyjne, które zostały przedstawione w tabelach 22, 23.

Tabela 22. Charakterystyka korozyjna staliwa GX2CrNiMoN25-6-3

Oznaczenie próbki	Potencjał korozji E_{kor} , V	Początek obszaru pasywacji E_F , V	Potencjał transpasywacji E_{tp} , V	Gęstość prądu pasywacji I_{pas} , A/cm ²
1A	-0,730	-0,528	1,044	-0,0004997
2A	-0,769	-0,658	0,915	-0,0003870
3A	-0,815	-0,629	0,958	-0,0004610
4A	-0,839	-0,701	-0,203	-0,0005994
5A	-0,923	-0,838	0,737	0,0005660
6A	-0,854	-0,714	-0,299	-0,0005174
7A	-0,871	-0,829	-0,261	-0,0005190
8A	-0,874	-0,772	0,281	-0,0005319
9A	-0,871	-0,782	-0,168	-0,0005046
10A	-0,974	-0,864	0,638	-0,0005540
11A	-0,847	-0,745	0,410	-0,0005210

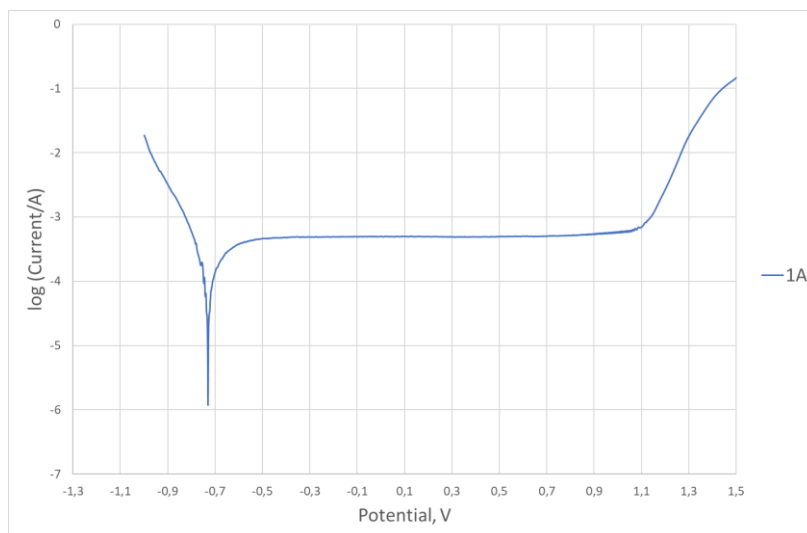
Tabela 23. Charakterystyka korozyjna staliwa GX2CrNiMoN22-5-3

Oznaczenie próbki	Potencjał korozji E_{kor} , V	Początek obszaru pasywacji E_F , V	Potencjał transpasywacji E_{tp} , V	Gęstość prądu pasywacji I_{pas} , A/cm ²
1B	-0,747	-0,481	0,458	-0,0004742
2B	-0,725	-0,578	0,527	-0,0004339
3B	-0,789	-0,738	-0,215	-0,0008083
4B	-0,839	-0,832	0,456	-0,0005287
5B	-0,896	-0,806	-0,204	-0,0006946
6B	-0,752	-0,671	-0,268	-0,0004551
7B	-0,961	-0,752	0,447	-0,0005541
8B	-0,917	-0,644	0,396	-0,0005632
9B	-0,829	-0,624	0,188	-0,0007604
10B	-0,968	-0,923	-0,338	-0,0005470
11B	-0,872	-0,808	-0,148	-0,0005298

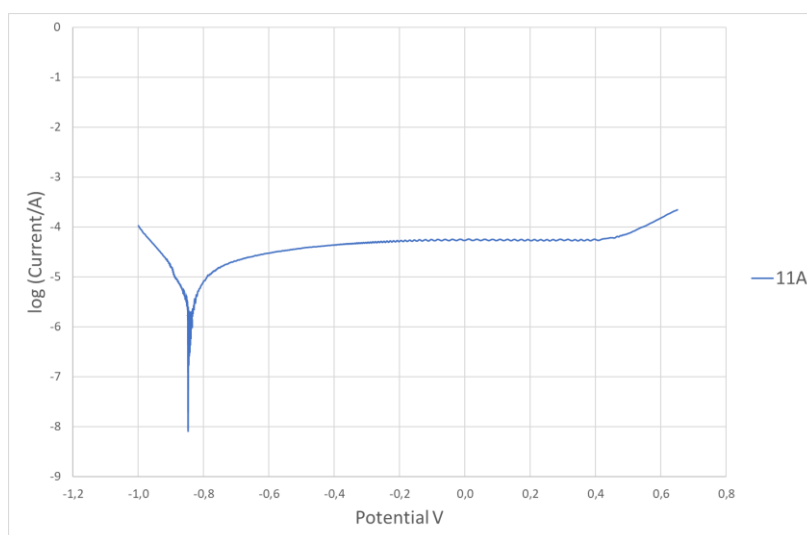
Potencjał korozji wszystkich próbek materiału GX2CrNiMoN25-6-3 mieścił się w zakresie od -0,974 V do -0,730 V, natomiast dla materiału GX2CrNiMoN22-5-3 w zakresie od -0,968 V do -0,725 V. Na krzywych potencjodynamicznych można zaobserwować oczekiwany obszar pasywacji w zakresie potencjałów od -0,864 V do 1,044 dla materiału GX2CrNiMoN25-6-3 oraz od -0,923 V do 0,527 V dla materiału GX2CrNiMoN22-5-3. Analiza krzywych polaryzacji wskazuje, że oba materiały posiadają niewielki zakres aktywnego roztwarzania i charakteryzują się wyraźnym zakresem pasywacji. Obszar pasywacji dowodzi, że badane materiały w środowisku wody morskiej wytwarzają na powierzchni stabilną warstwę produktów korozji, co jest zjawiskiem oczekiwanym (szybkość roztwarzania w zakresie pasywnym jest mniejsza) i typowym dla tego typu materiału (wysoka zawartość chromu w stopie). Przyjmując za kryterium oceny przesunięcie krzywej polaryzacji w kierunku dodatnim i zmniejszenie gęstości prądu pasywacji można wskazać, że proces nagniatania może korzystnie wpływać na właściwości korozyjne staliwa duplex, choć pozytywny wpływ procesu zidentyfikowano wyłącznie dla trzech zestawień parametrów materiału GX2CrNiMoN25-6-3 (próbki 1A, 2A, 3A) oraz dwóch staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 (próbki 1B, 2B). Dla wskazanych

próbek wydłużeniu uległ również obszar pasywacji względem próbek referencyjnych. Wzrost potencjału korozyjnego przy jednoczesnym obniżeniu gęstość prądu pasywacji świadczy o zwiększeniu odporności korozyjnej próbek.

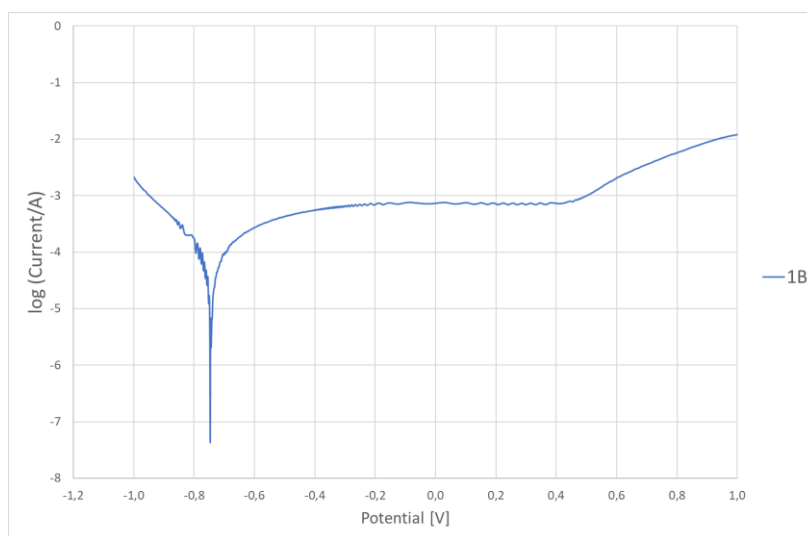
Przykładowe krzywe potencjodynamiczne uzyskane dla wybranych próbek przedstawiono na rysunkach 54÷57.



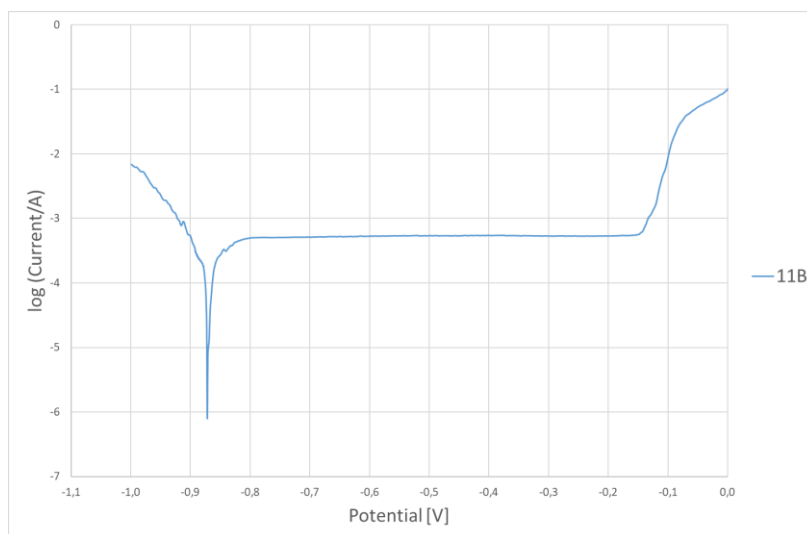
Rys. 54. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 1A



Rys. 55. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 11A (toczona)

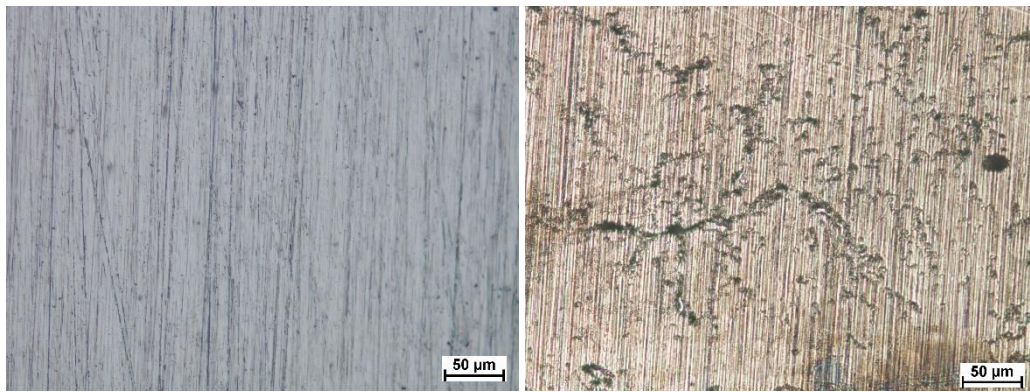


Rys. 56. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 1B



Rys. 57. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 11B (toczona)

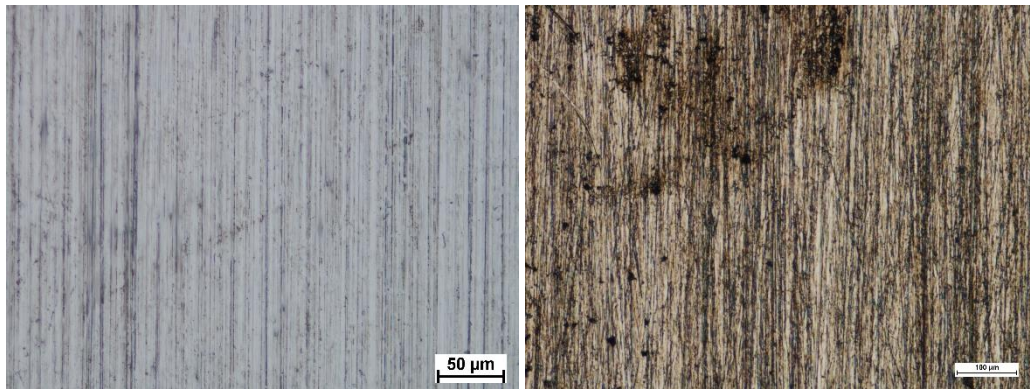
Przed i po badaniu elektrochemicznym dokonano oceny powierzchni badanych materiałów, uzyskane obrazy przedstawiono na rysunkach 58÷79.



a)

b)

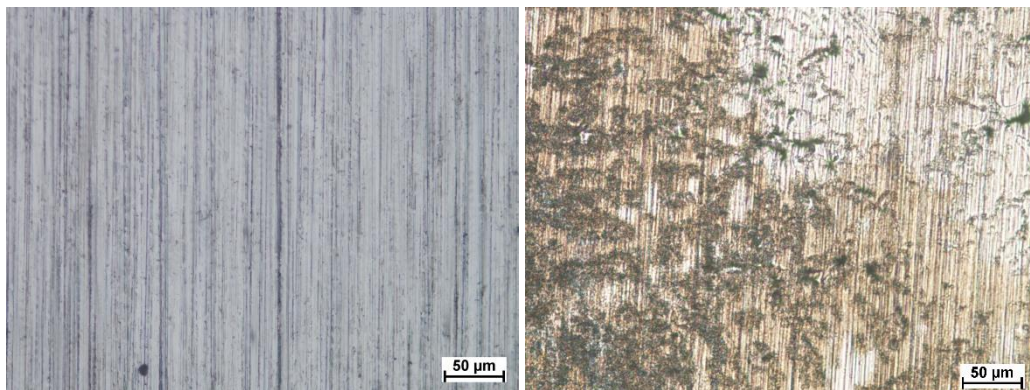
Rys. 58. Mikrostruktura próbki 1A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

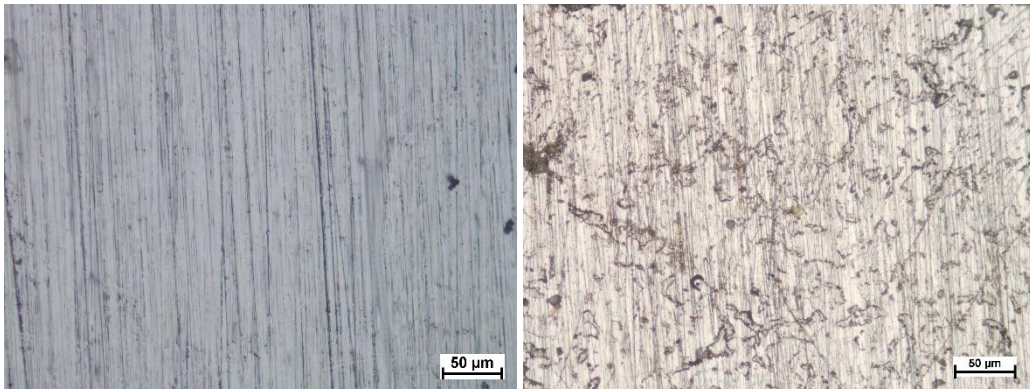
Rys. 59. Mikrostruktura próbki 2A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

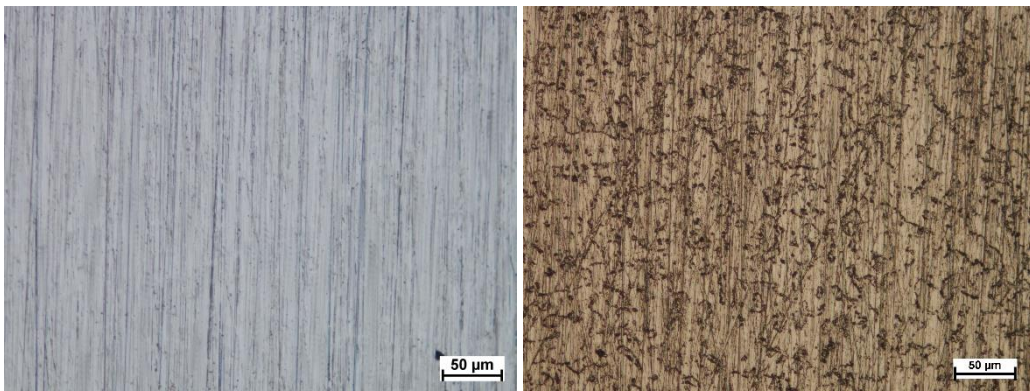
Rys. 60. Mikrostruktura próbki 3A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

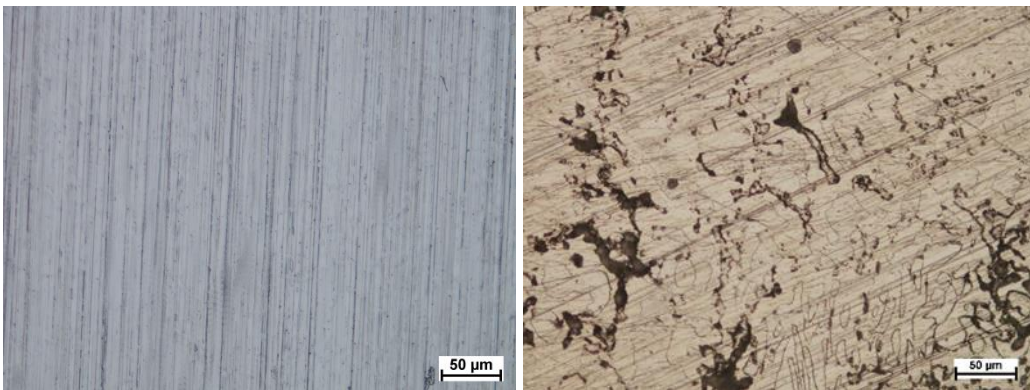
Rys. 61. Mikrostruktura próbki 4A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

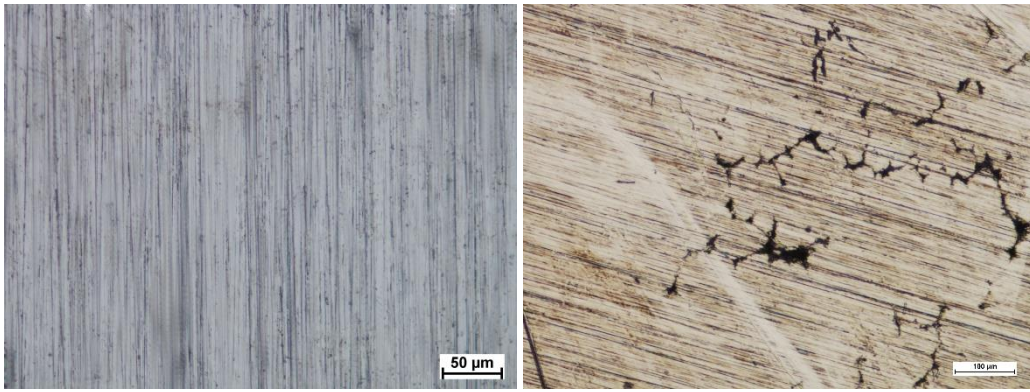
Rys. 62. Mikrostruktura próbki 5A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

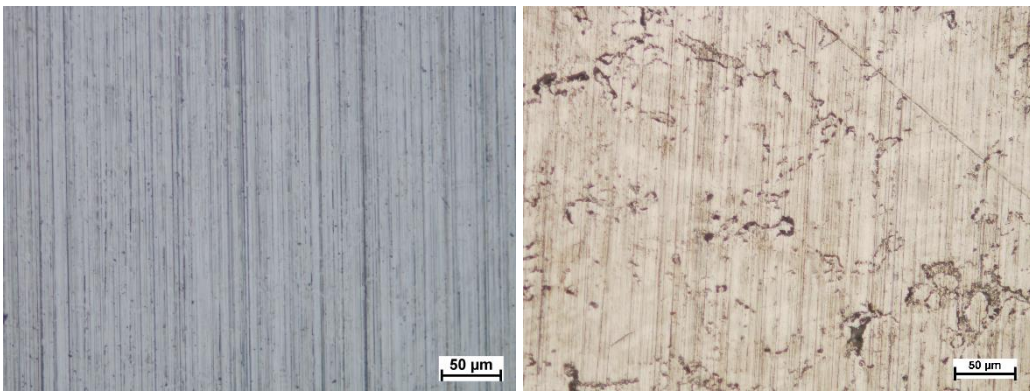
Rys. 63. Mikrostruktura próbki 6A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

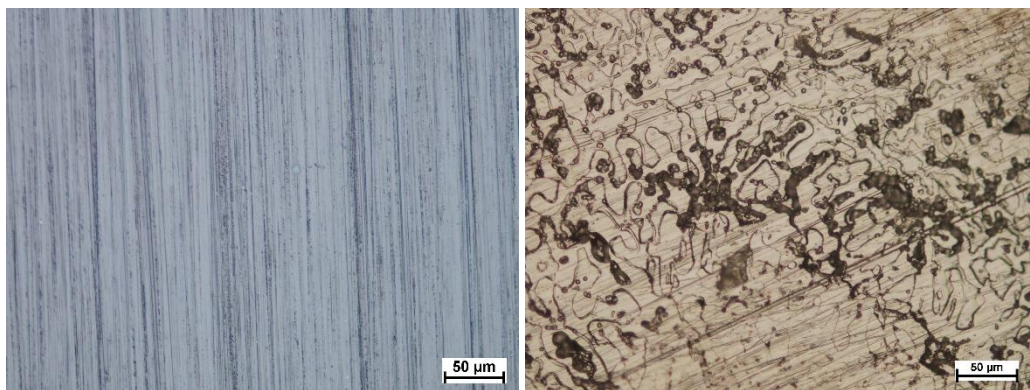
Rys. 64. Mikrostruktura próbki 7A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

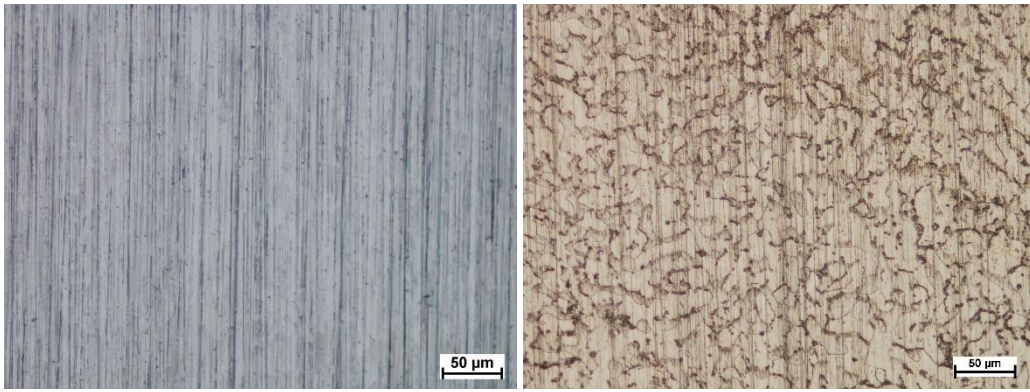
Rys. 65. Mikrostruktura próbki 8A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

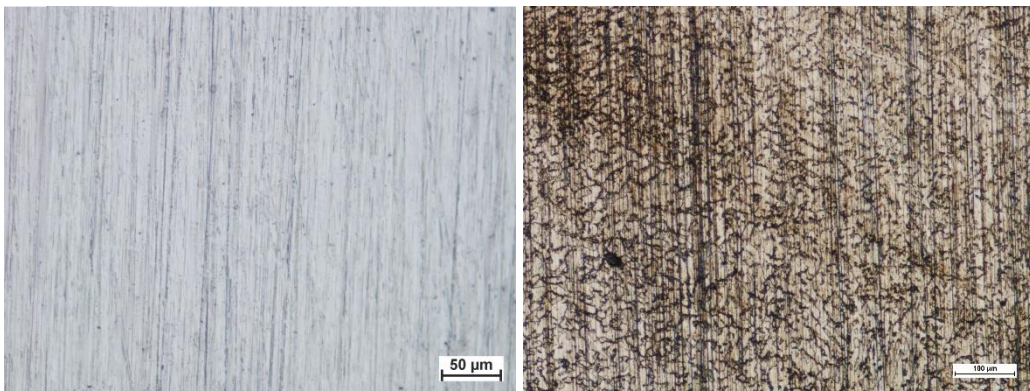
Rys. 66. Mikrostruktura próbki 9A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

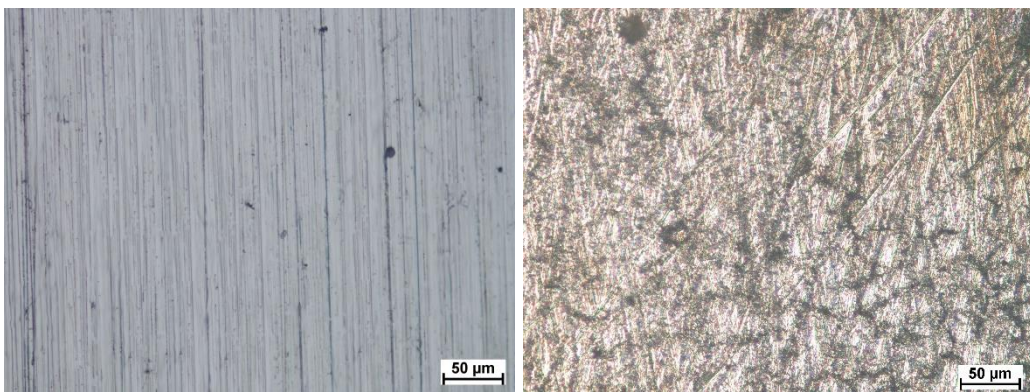
Rys. 67. Mikrostruktura próbki 10A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

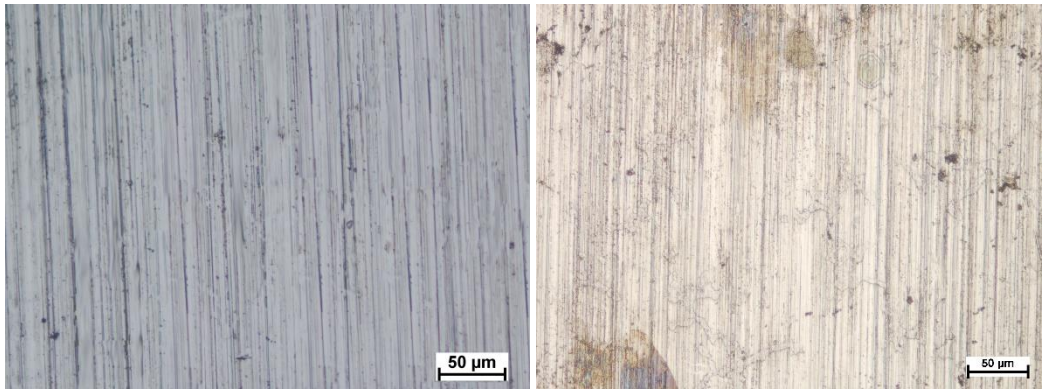
Rys. 68. Mikrostruktura próbki 11A a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

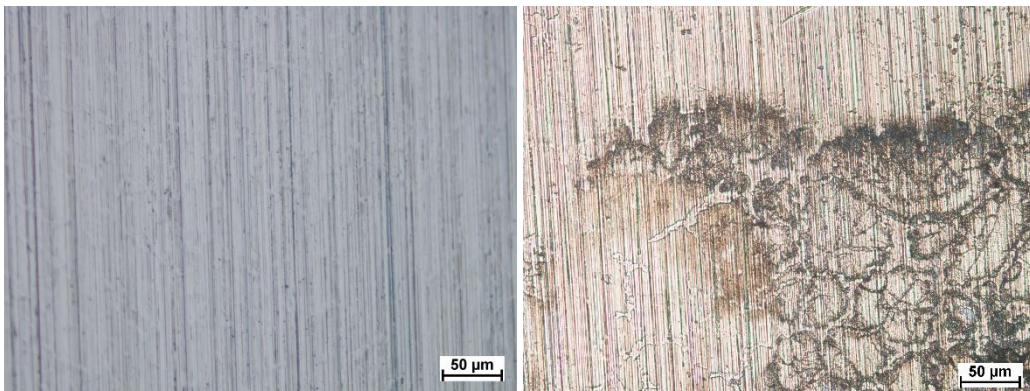
Rys. 69. Mikrostruktura próbki 1B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

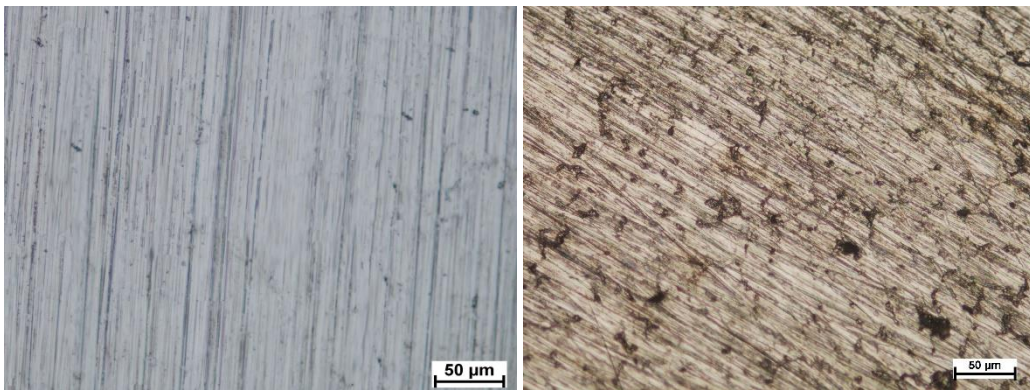
Rys. 70. Mikrostruktura próbki 2B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

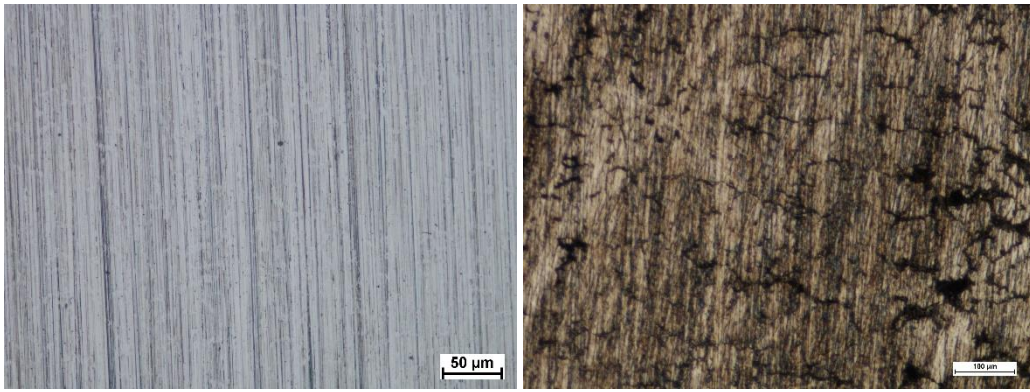
Rys. 71. Mikrostruktura próbki 3B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

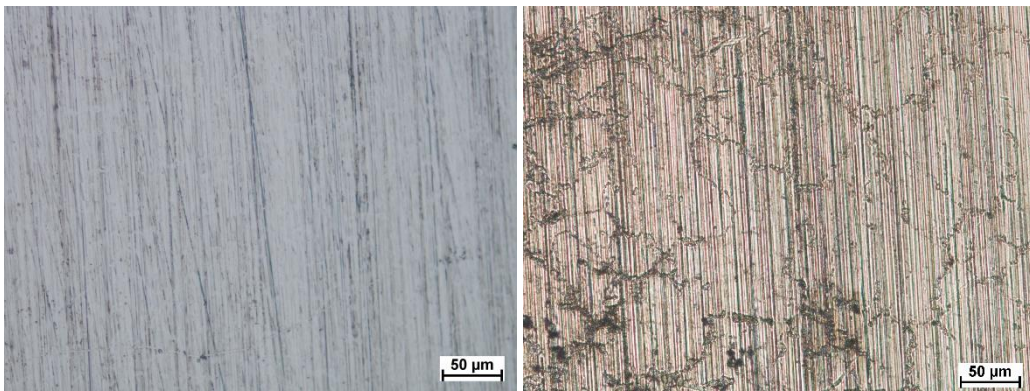
Rys. 72. Mikrostruktura próbki 4B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

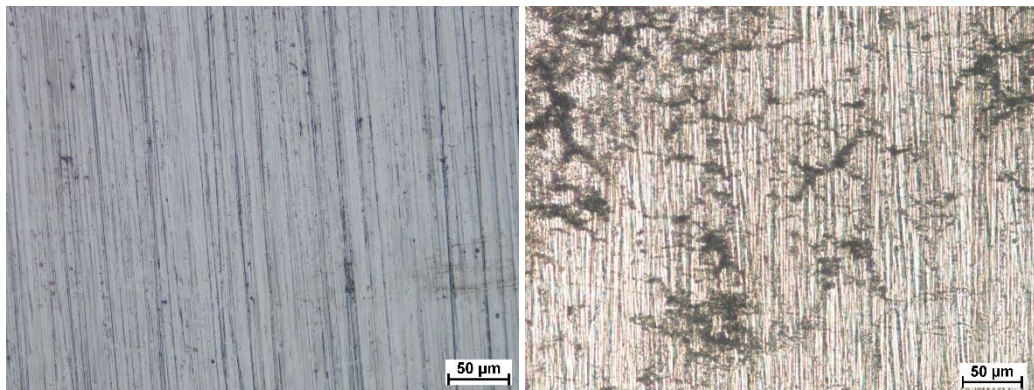
Rys. 73. Mikrostruktura próbki 5B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

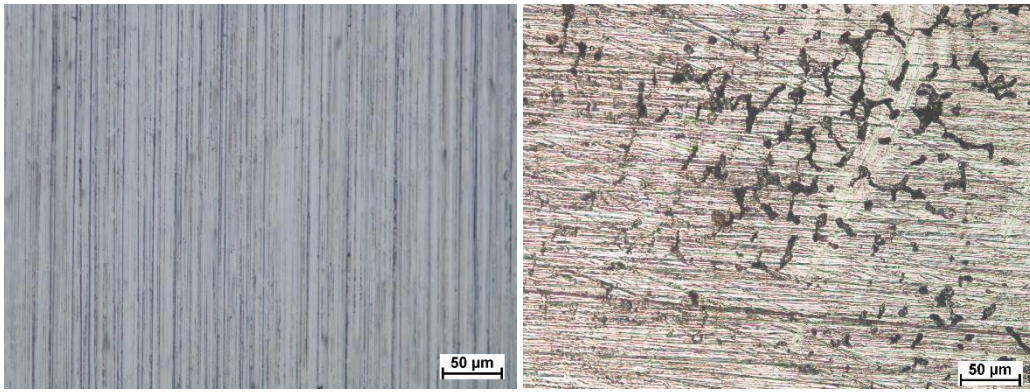
Rys. 74. Mikrostruktura próbki 6B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

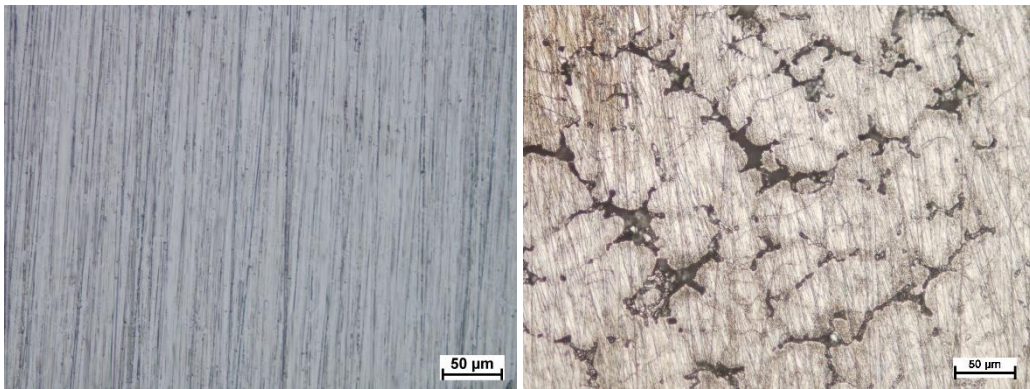
Rys. 75. Mikrostruktura próbki 7B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

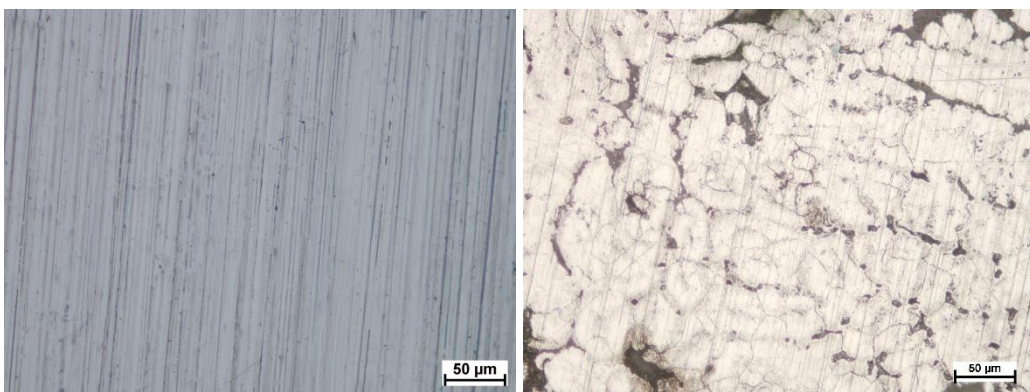
Rys. 76. Mikrostruktura próbki 8B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

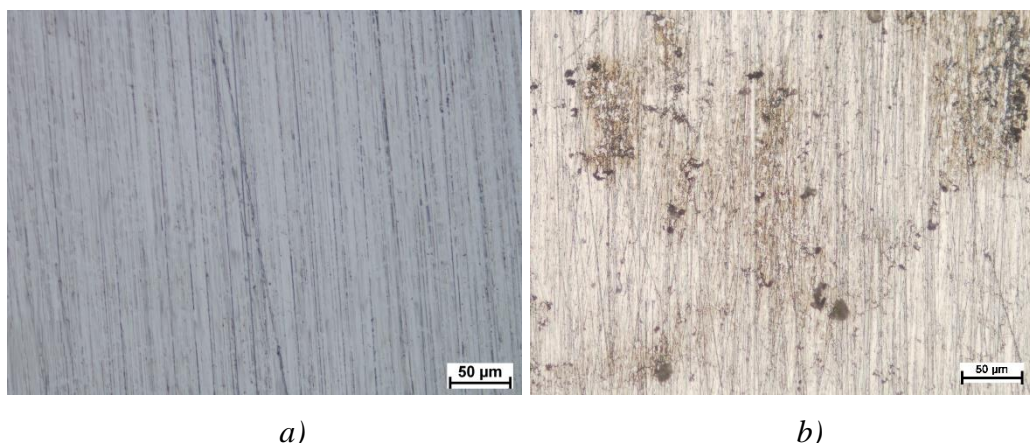
Rys. 77. Mikrostruktura próbki 9B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



a)

b)

Rys. 78. Mikrostruktura próbki 10B a) przed i b) po badaniu korozyjnym



Rys. 79. Mikrostruktura próbki 11B a) przed i b) po badaniu korozyjnym

Z przeprowadzonych badań wynika, iż w środowisku 1% roztworu wody morskiej i pH równym 8 materiał w stanie wyjściowym - próbka 11A w stosunku do 1A, 2A, 3A oraz odpowiednio 11B do 1B, 2B charakteryzuje się krótszym obszarem pasywacji i posiada gorszą charakterystykę korozyjną (wyższą gęstość prądu pasywacji oraz niższy potencjał korozji). Ocena powierzchni próbek po badaniu korozyjnym wskazuje wyraźnie na jej międzykrystaliczny charakter. Zarówno staliwo A, jak i B cechuje bardzo zbliżony proces korozyjny. Korzystne efekty nagniatania w tym aspekcie otrzymano przy zastosowaniu niskich wartości posuwu oraz przy jednym przejściu narzędzia obróbkowego. Parametry chropowatości przy niskim posuwie zmniejszają się, co korzystnie wpływa na odporność korozyjną i jednocześnie potwierdza wskazania literatury podkreślające, że im gładsza powierzchnia tym wyższa odporność korozyjna [141]. Dwufazowa struktura badanych materiałów, która sama z siebie, ze względu na różnicę w budowie krystalograficznej faz, powoduje występowanie naprężeń i sprzyja korozji międzykrystalicznej. W przypadku staliwa duplex dzięki odpowiednio dobranemu składowi chemicznemu materiał ten cechuje się bardzo dobrą odpornością korozyjną, o czym świadczą liczne publikacje [1, 16, 141]. Jednak obszary o wyższych naprężeniach są zawsze punktami uprzywilejowanymi do inicjacji korozji. Przykładem takiego stanu rzeczy są wydzielenia faz międzymetalicznych o niekoherentnej z osnową budowie. Podobny efekt będzie obserwowany w przypadku procesu nagniatania w szczególności przy tych wariantach, gdzie następuje rozbudowa powierzchni poprzez wzrost chropowatości. Wraz ze wzrostem wysokości profilu chropowatości zwiększa się nierównomierność naprężeń w WW, co nakłada się dodatkowo na naprężenia generowane przez mikrostrukturę. Stąd z punktu widzenia odporności korozyjnej, tak istotnym jest uzyskanie wysokiej gładkości powierzchni przy niewielkiej prędkości posuwu.

3.6. Analiza wyników badań

Technika kształtowania warstwy wierzchniej metodami obróbki nagniataniem, będąca jedną ze starszych, znanych metod obróbki powierzchniowej, w ostatnim czasie „została zapomniana”. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy upatrywać w dominującym rozwoju technik wytwarzania nowoczesnych powłok (metod fizycznych osadzania powłok z fazy gazowej PVD; metod chemicznych osadzania powłok z fazy gazowej CVD; metod hybrydowych - wykorzystujących charakterystyczne cechy poszczególnych metod, m.in. CVD i PVD oraz konwencjonalnej obróbki ciepłno-chemicznej). Jednak na uwagę zasługuje fakt, że nie zawsze uzasadnione ekonomicznie jest stosowanie kosztocłonnych procesów nanoszenia powłok, co przy zwiększających się wymaganiach konsumentów sprawia, że proces nagniatania ponownie cieszy się rosnącym zainteresowaniem.

Obróbkę nagniataniem można skutecznie stosować w celu kształtowania właściwości warstwy wierzchniej odlewów. Zrealizowane badania potwierdzają, iż zastosowanie tego procesu może korzystnie kształtować właściwości funkcjonalne staliwa duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3. Transformacja WW przebiega wewnątrz materiału, jak i na jego powierzchni. Zjawiska zachodzące w materiale podczas procesu nagniatania kształtują warstwę wierzchnią staliwa wpływając na cechy użytkowe w warunkach eksploatacji.

Przeprowadzona ocena mikrostruktury potwierdziła, że stan warstwy wierzchniej po NSNT charakteryzuje się zgniotem. W wyniku procesu ziarna zostały spłaszczone i nastąpiło ich równoległe wydłużenie w kierunku powierzchni i ruchu narzędzia. Na skutek oddziaływań kinematycznych procesu uformowano powierzchnie wykazującą cechy jednokierunkowości – ślady obróbki są równoległe do siebie. Zmianie uległy parametry profilu chropowatości (tabela 11, 12). Przy zastosowaniu odpowiednich parametrów realizacji procesu nagniatania możliwym było zmniejszenie parametru chropowatości Rz i Ra do 8, 9 klasy dokładności. Średni odstęp między wzniesieniami profilu zmniejsza się wraz z obniżeniem parametrów posuwu, co zweryfikowano na podstawie pomiarów parametru RSm. Po przeprowadzonych badaniach doświadczalnych, przy zastosowanych parametrach technologicznych NSNT powierzchni walcowych zewnętrznych, można wskazać zależność pomiędzy wskaźnikiem zmniejszenia parametru Ra (K_{Ra}) i posuwem, analogicznie występuje zależność pomiędzy wskaźnikiem zmniejszenia parametru Rz (K_{Rz}) i posuwem. Uzyskane dane potwierdzają zależność wskazywaną w literaturze [42], iż wraz ze wzrostem posuwu nagniatania zmniejsza się

wartość wskaźników zmian parametrów chropowatości, a największe wskaźniki zmniejszenia parametrów chropowatości K_{Rz} i K_{Ra} występują dla niskich prędkości posuwu. Zależność parametrów potwierdza analiza matematyczna korelacji liniowej Pearsona, której wskazania dowodzą bardzo wysokiej i wysokiej korelacji o kierunku dodatnim pomiędzy posuwem a parametrem Ra chropowatości. Struktura geometryczna powierzchni ma wyraźne przełożenie na właściwości funkcjonalne takie jak: wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie tribologiczne i korozję. W szczególności TWW wpływa na przebieg zużywania – jego mechanizm, intensywność oraz skutki, co w konsekwencji przekłada się na trwałość eksploatacyjną.

Wyniki badań laboratoryjnych twardości, zaprezentowane w rozdziale 3.5.3., wskazują, że na skutek procesu nagniatania staliwa duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3 uzyskano zamierzony efekt w postaci umocnienia. Zaobserwowano wzrost twardości w WW dla każdej z próbek, przy czym otrzymano różny stopień umocnienia dla poszczególnych wariantów. Próbki 6A ($s_u = 61\%$) i 6B ($s_u = 38\%$) uzyskały najwyższy wzrost twardości oraz cechowały się jednocześnie zbliżonym parametrem Ra chropowatości do próbki referencyjnej i nieznacznie zmniejszoną wysokością profilu chropowatości określaną parametrem Rz .

Badania wpływu procesu nagniatania na odporność na zużycie ściernie badanych materiałów wskazują, że proces ten może korzystnie kształtować właściwości tribologiczne. Współczynnik tarcia utrzymywał się na zbliżonym poziomie dla wszystkich próbek, jedynie przy wariantach 5A i 5B, które posiadają najwyższy parametr chropowatości (5A – Ra 1,7 μ m; 5B – Ra 1,17 μ m) widoczny był wyraźny wzrost. Efekt zużywania ściernego badanych próbek stanowił ubytek masy oraz trwałe zmiany powierzchni związane z zużyciem tribologicznym. Zestawienie całkowitego ubytku masy poszczególnych próbek (rysunek 40) wskazuje, że wyższymi właściwościami tribologicznymi (mniejszym ubytkiem masy względem próbki referencyjnej) charakteryzowały się próbki 1A, 7A, 9A oraz od 1B do 6B i 10B. Wskazania literaturowe [3, 35, 46] oraz badania własne autorki potwierdzają zależność pomiędzy parametrem posuwu nagniatania a chropowatością, a nadto związek struktury geometrycznej powierzchni ze zużyciem ściernym. Próbki, które miały najmniejszy ubytek masy, czyli 7A i 2B nagniatane były przy niskich wartościach posuwu: 0,1 mm/obr – 7A; 0,2 mm/obr – 2B oraz cechowały się niższym parametrem Ra i Rz od próbki referencyjnej. Dla materiału GX2CrNiMoN25-6-3 całkowity docisk (a_{nc}) wynoszący powyżej 1 mm niekorzystnie wpływa na właściwości tribologiczne, ponieważ lepszy efekt uzyskiwano

przy całkowitym docisku poniżej tej wartości. Również prędkość posuwu powyżej 0,4 mm/obr uwidacznia się negatywnym wpływem na właściwości ściernie i z tego powodu jest niezalecana.

Realizując badania laboratoryjne trwałości zmęczeniowej, jako kryterium miary zużycia przyjęto pole powierzchni zużytej próbek. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, iż obróbka nagniataniem staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN22-5-3 oraz GX2CrNiMoN25-6-3 umożliwia kształtowanie ich odporności na zmęczenie stykowe. W zależności od zastosowanych parametrów realizacji procesu nagniatania istnieje możliwość poprawy bądź pogorszenia trwałości zmęczeniowej materiału. Zaobserwowane pogorszenie właściwości zmęczeniowych jest tym bardziej cenne, gdyż określa zakres zalecanych parametrów obróbki. Poprawę odporności zmęczeniowej po procesie NSNT uzyskano dla próbek 7A, 8A, 9A oraz 5B, 8B, 9B, 10B. Wykazano, że parametrem istotnie wpływającym na efekt procesu - w aspekcie odporności zmęczeniowej - jest głębokość dosuwu nagniataka - a_n . Korzystniejsze efekty obróbki nagniataniem, otrzymano dla próbek, które miały mniejszą głębokość dosuwu nagniataka wynoszącą 0,5 mm i dwa przejścia narzędzia nagniatającego. W przypadku zastosowania jednostkowej głębokości dosuwu nagniataka równej 1 mm właściwości zmęczeniowe obu materiałów ulegały pogorszeniu względem próbki referencyjnej.

Istotne znaczenie dla oceny właściwości eksploatacyjnych, w szczególności badanych materiałów ma ich odporność korozyjna, bowiem może ona wpływać na właściwości mechaniczne i bezpieczeństwo użytkowania. Ostatecznym efektem korozji może być zniszczenie korozyjne, powodujące niezdatność całego układu technicznego do funkcjonowania. Przeprowadzone testy laboratoryjne w warunkach przyspieszonej korozji wykazały, że potencjał korozji wszystkich próbek materiału GX2CrNiMoN25-6-3 mieścił się w zakresie od -0,974 V do -0,730 V, natomiast dla materiału GX2CrNiMoN22-5-3 w zakresie od -0,968 V do -0,725 V. Na krzywych potencjodynamicznych można zaobserwować oczekiwany obszar pasywacji w zakresie potencjałów od -0,864 V do 1,044 dla staliwa A oraz od -0,923 V do 0,527 V dla staliwa B, co wskazuje na wyższą odporność korozyjną materiału A, a wynika z wyższej zawartości chromu. Analiza krzywych polaryzacji wskazuje, że oba materiały posiadają niewielki zakres aktywnego roztwarzania i charakteryzują się wyraźnym zakresem pasywacji. Obszar pasywacji dowodzi, że w środowisku wody morskiej wytwarzają one na powierzchni stabilną warstwę produktów korozji, co jest zjawiskiem oczekiwanym (szybkość roztwarzania w zakresie pasywnym jest mniejsza) i typowym dla tego typu materiału (wysoka zawartość

chromu w stopie). Przyjmując za kryterium oceny odporności korozyjnej przesunięcie krzywej polaryzacji w kierunku dodatnim i zmniejszenie gęstości prądu pasywacji można wskazać, że proces nagniatania może korzystnie wpływać na właściwości korozyjne staliwa duplex, choć jego pozytywny wpływ zidentyfikowano wyłącznie dla trzech zestawień parametrów materiału GX2CrNiMoN25-6-3 (próbki 1A, 2A, 3A) oraz dwóch staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 (próbki 1B, 2B). Wzrost potencjału korozyjnego przy jednoczesnym obniżeniu gęstość prądu pasywacji świadczy o lepszej odporności korozyjnej próbek względem próbek odniesienia. W literaturze przedmiotu można spotkać się z różnym stanowiskiem w zakresie korzystnego bądź negatywnego [13, 142÷144] oddziaływania nagniatania na właściwości korozyjne stali duplex. Również badania własne autorki potwierdzają dwojaką możliwość rezultatu procesu. Zmiany w odporności korozyjnej poszczególnych próbek mogą wynikać z różnej chropowatości badanych materiałów, jak i stopnia umocnienia. Jak podkreśla Burakowski [144] wzrost parametrów chropowatość powierzchni osłabia odporność korozyjną ze względu na zwiększenie rzeczywistej powierzchni styku korodującego elementu. Zasadniczy wpływ na intensywność zużycia korozyjnego mają wysokościowe parametry chropowatości oraz promień krzywizny wgłębień mikronierówności. Istotną, jednak negatywną rolę przypisuje się zgniotowi w warstwach przypowierzchniowych, który sprzyjać może tworzeniu się mikroogniw korozyjnych. Znaczący wpływ posiada również środowisko korozyjne, co podkreśla się w literaturze między innymi [14]. Z przeprowadzonych badań wynika, iż w środowisku 1% roztworu wody morskiej i pH równym 8 materiał w stanie wyjściowym (próbka 11A) w stosunku do 1A, 2A, 3A oraz odpowiednio 11B do 1B, 2B charakteryzuje się krótszym obszarem pasywacji i posiada gorszą charakterystykę korozyjną (wyższą gęstość prądu pasywacji oraz niższy potencjał korozji). Konkludując można stwierdzić, że parametry NSNT znacząco wpływają na zmianę odporności korozyjnej w środowisku wody morskiej.

Na podstawie wyników zrealizowanych badań wykazano, że zastosowanie procesu nagniatania jest uzasadnione technologicznie. Umożliwia ono poprawę jakości oraz właściwości funkcjonalnych, pod warunkiem właściwego doboru parametrów i realizacji procesu. Ponad ocenę technologiczną prezentowanego rozwiązania w celu wykazania potencjału wdrożeniowego niezbędnym jest przeprowadzenie analizy również w aspekcie techniczno-ekonomicznym.

3.7. Ocena potencjału wdrożenia procesu nagniatania do praktyki gospodarczej

Zasadniczą dźwignię rozwoju przedsiębiorstw stanowią inwestycje. Są one obciążone pewnym stopniem ryzyka, jak również stanowią szansę rozwoju. Identyfikacja szans i zagrożeń na wczesnym etapie planowania pozwala uniknąć ryzyka strat. Określenie zasadności realizacji inwestycji wymaga przeprowadzenia wieloaspektowej analizy obejmującej zakres techniczno-ekonomiczny działania dla konkretnego przedsiębiorstwa. Wyniki analiz są niezmiernie istotne i przydatne w celu podejmowania decyzji operacyjnych.

Skuteczne wdrażanie innowacji w przedsiębiorstwie wymaga pokonania barier i przeszkód, stanowi proces zachodzący w warunkach zmiennego otoczenia wewnętrznego oraz zewnętrznego. W literaturze [20] zalecanym jest, aby techniczno-ekonomiczne oceny wdrożeń do warunków przemysłowych realizowane były dla konkretnego podmiotu, bowiem istotne znaczenie odgrywają jego indywidualne cechy i przyjęta strategia działania.

Prospektywną ocenę potencjału wdrożenia procesu technologicznego obróbki nagniataniem odlewów wykonanych ze staliwa duplex zrealizowano na przykładzie przedsiębiorstwa PGO S.A. PIOMA Odlewnia oddział w Piotrkowie Trybunalskim. Zakład wchodzi w skład grupy kapitałowej PGO, która została powołana do życia w 2008 roku, ale zakład produkcyjny PIOMA Odlewnia funkcjonuje już od 1960 r. Jak wskazuje przedsiębiorstwo, jego misją jest kształtowanie nowoczesnego przemysłu, chęć ciągłego doskonalenia, otwartość na zmiany i innowacje oraz budowanie społeczności opartej na wartościach. Dzięki temu podmiot może wprowadzać do komercyjnej działalności unikalne rozwiązania i jeszcze lepiej odpowiadać na rosnące potrzeby partnerów biznesowych. Przedmiotowa odlewnia specjalizuje się w produkcji jednostkowej i krótkoseryjnej wysokiej jakości odlewów staliwnych. Odlewnia posiada możliwości technologiczne wytwarzania innowacyjnych odlewów staliwnych typu duplex, przeznaczonych do zastosowania w ekstremalnych warunkach eksploatacji.

Uzasadnieniem wyboru przedsiębiorstwa PIOMA do realizacji analizy wdrożenia obejmującego nagniatanie staliwa duplex stanowi w szczególności:

- profil działalności odlewni;
- posiadane możliwości technologiczne wytwarzania staliwa duplex;
- doświadczenie w obróbce mechanicznej metali;

- otwartość na innowacje;
- ugruntowana pozycja na rynku umożliwiająca konkurencję z najlepszymi, tak europejskimi, jak i światowymi producentami odlewów i odkuwek.

W oparciu o definicje zawartą w podręczniku Oslo Manual 2018 [117] przedmiotowe rozwiązanie stanowi źródło innowacji procesowej, wynikającej ze zmiany w stosowanej metodzie wytwarzania i związanych z nią ulepszonych właściwości funkcjonalnych produktu. Ze względu na zakres czasowy oraz prognozowane efekty inwestycji, jest ona działaniem operacyjnym, którego główne cele, to:

- modernizacja i rozwój przedsiębiorstwa poprzez rozszerzenie parku maszynowego, wdrożenie nowej technologii produkcyjnej;
- wprowadzenie na rynek ulepszonych wyrobów;
- zdobycie przewagi konkurencyjnej.

Oczekiwane korzyści z wdrożenia projektu upatrywane są w:

- obniżeniu kosztów działalności operacyjnej;
- zwiększeniu sprzedaży produktów;
- zwiększeniu jakości odlewów staliwnych.

Ze względu na cykl życia inwestycji należy ją określić jako krótkoterminową. Jako źródło finansowania inwestycji przyjęto środki własne przedsiębiorstwa. Należy podkreślić, że mając na uwadze planowane, niskie wydatki, krótki okres zwrotu nakładów inwestycyjnych oraz niewielkie ryzyko wynikające z podejmowanych decyzji, przy względnie pełnej znajomości danych, jest to inwestycja taktyczna.

W celu dokonania bezwzględnej oceny zastosowania technologii nagniatania staliwa duplex wykorzystano metodę wielokryterialną, uwzględniającą kryteria: finansowe, rynkowe, technologiczne, zgodność inwestycji ze strategią rozwoju przedsiębiorstwa, jak i posiadane zasoby. Jako dodatkowe kryteria uwzględniono: charakter branży, wiedzę i kompetencje kadry zaangażowanej w proces inwestycyjny, dotychczasowe doświadczenie w realizacji innowacji w przedsiębiorstwie.

Przedmiotową analizę mającą na celu potwierdzenie zasadność wdrożenia procesu nagniatania staliwa duplex do praktyki przedsiębiorstwa, zrealizowano w oparciu o informacje uzyskane od firmy, a dotyczące możliwości produkcyjnych oraz technicznych realizacji procesu nagniatania, posiadanych kompetencji kadry pracowniczej, procesu wytwórczego odlewów ze staliwa duplex (w szczególności czasu i kosztów realizacji

wyrobu finalnego, czasu realizacji poszczególnych operacji technologicznych - w tym wykończeniowych).

Na podstawie zgromadzonych danych ustalono kryteria progowe oraz uzupełniające służące do oceny atrakcyjności inwestycji. Dla każdego z kryterium przypisano odpowiednie wagi, a ich cechom określone liczby punktów. Opracowany scoring model przedstawiono w tabeli 24 (wybrane cechy dla kryterium zostały wyróżnione kursywą).

Tabela 24. Scoring model oceny atrakcyjności wdrożenia

Kryteria oceny atrakcyjności inwestycji					
Kryterium	Opis kryterium	Punkty	Waga kryterium	Punkty po przeliczeniu	Uzyskana liczba punktów
1. Zgodność inwestycji ze strategią przedsiębiorstwa (kryterium progowe)				max. 2	2,0
<i>Pełna zgodność</i>	<i>Bezpośrednio wpisuje się w działania strategiczne.</i>	10	20%	2	
Zgodność w znacznym stopniu	Pośrednio wpisuje się w działania strategiczne.	7		1,4	
Częściowa zgodność	Sprzyja realizacji celów cząstkowych.	5		1,0	
Zgodność w niewielkim stopniu	W niewielkim zakresie sprzyja realizacji celów cząstkowych.	2		0,4	
Brak zgodności	Brak związku z strategią.	0		0	
2. Typ inwestycji					max. 0,25
Rozwojowa	Obejmuje wdrożenie nowych procesów, produktów lub usług.	5	5%	0,25	
<i>Modernistyczna</i>	<i>Obejmuje udoskonalenie funkcjonujących procesów, produktów lub usług.</i>	3		0,15	
Odtworzeniowa	Obejmuje aktualizację funkcjonujących systemów lub produktów.	1		0,05	
3. Zgodność z regulacjami zewnętrznymi					max. 1,5
<i>Pełna</i>	<i>Inwestycja jest w pełni zgodna z regulacjami prawnymi.</i>	10	10%	1,5	
Częściowa	Konieczność uzyskania zgodności z regulacjami.	2		0,3	

cd. Tabeli 24.

4. Efektywność rynkowa				max. 1,5	1,05
Znaczna	Planowany wzrost sprzedaży o 20%	10	10%	1,5	
<i>Akceptowalna</i>	<i>Planowany wzrost sprzedaży o 10%</i>	7		1,05	
Minimalna	Planowany wzrost sprzedaży o 5%	5		0,75	
Brak	Bez wpływu na sprzedaż	1		0,1	
5. Finansowe - OZN (kryterium progowe)					max. 2
<i>Oplącalna</i>	<i>PP < 1 roku</i>	10	20%	2	
Oplącalna w niewielkim stopniu	PP = (1, 2 > lat	5		1	
Neutralna	PP = (2, 3 > lat	2		0,4	
Nieopłącalna	PP > 3 lata	0		0	
6. Finansowe - ocena ryzyka (kryterium progowe)					max. 2
<i>dopuszczalna</i>	<i>Korzyści netto spodziewane w bliskiej perspektywie, PP ≤ 3 lata</i>	10	20%	2	
niedopuszczalna	Korzyści netto niepewne, PP > 3 lata	0		0	
7. Efektywność operacyjna					max. 0,5
<i>Znaczna</i>	<i>Zmniejszenie nakładów przy zwiększeniu poziomu efektów</i>	5	10%	0,5	
Duża	Zmniejszenie nakładów przy zachowaniu poziomu efektów	4		0,4	
Akceptowalna	Stały poziom nakładów przy wzroście poziomu efektów	2		0,2	
Dopuszczalna	Wzrost poziomu nakładów przy znacznym wzroście poziomu efektów	2		0,2	
Nieakceptowalna	Wzrost poziomu nakładów przy spadku efektów	0		0	
8. Innowacyjność					max. 0,25
<i>procesowa</i>	<i>Działanie jest innowacyjne w zakresie procesu</i>	5	5%	0,25	
produktowa	Działanie jest innowacyjne w zakresie produktu	5		0,25	
organizacyjna	Działanie jest innowacyjne w zakresie organizacji	3		0,15	
marketingowa	Działanie jest innowacyjne w zakresie marketingu	3		0,15	
brak	Działanie nie jest innowacyjne	0		0	
<p>Ocena potencjału wdrożenia NSNT do praktyki przedsiębiorstwa: Maksymalna ilość punktów do uzyskania: 10 pkt. Uzyskanie noty „0” przy kryteriach progowych oznacza, że inwestycja jest nieakceptowalna. Inwestycja jest akceptowalna przy spełnieniu kryteriów progowych oraz uzyskaniu minimalnej liczby 6 punktów.</p>					Σ = 9,45

Źródło: opracowanie własne na podstawie [20].

Inwestycja w pełni wpisuje się w działania strategiczne przedsiębiorstwa. Stanowi modernistyczną inwestycję mającą na celu udoskonalenie funkcjonujących procesów i produktów. Jest zgodna z obowiązującymi przepisami, a do jej wdrożenia brak jest konieczności pozyskania dodatkowych pozwoleń. Efektywność rynku szacowana jest na 5 do 10% wzrostu sprzedaży. Przyjęty jako kryterium finansowe, okres zwrotu z nakładów wynosi poniżej roku, co potwierdza opłacalność inwestycji. Ze względu na krótki okres zwrotu nakładów oraz zgodność inwestycji ze strategią przedsiębiorstwa ryzyko inwestycji określono jako dopuszczalne. Analizę okresu zwrotu z inwestycji przedstawiono w podpunkcie 3.7.1. Inwestycja korzystnie kształtuje produktywność poprzez zmniejszenie nakładów przy jednoczesnym wzroście efektów. Ocenę wpływu inwestycji na wybrane wskaźniki produktywności przedstawiono w podpunkcie 3.7.2. Zastosowanie procesu nagniatania staliwa duplex należy zakwalifikować do innowacji procesowej. Przedmiotowa inwestycja przy założonych kryteriach progowych nie uzyskała noty „0”, a ostateczna wyniosła 9,45 pkt. Uzyskany wynik kwalifikuje przedmiotową inwestycję, jako zasadną ekonomicznie do wdrożenia.

3.7.1. Analiza okresu zwrotu nakładów z inwestycji

Jedno z przyjętych kryteriów opłacalności przedsięwzięcia, uwzględnione w analizie wielokryterialnej, stanowił oczekiwany okres zwrotu nakładów z inwestycji *OZN* (ang. *Payback Period*). Dla wdrożenia przedmiotowego rozwiązania ustalono maksymalny oczekiwany czas zwrotu poniesionych nakładów (PP_{max}) na okres 1 roku. W celu określenia przewidywanego czasu, po którym nastąpi zwrot z inwestycji koniecznym było oszacowanie wysokości nakładów inwestycyjnych projektu wdrożenia procesu nagniatania staliwa duplex do praktyki przedsiębiorstwa. Zestawienie nakładów inwestycyjnych wraz z metodą szacowania przedstawiono w tabeli 25.

Tabela 25. Nakłady inwestycyjne projektu oraz metody szacowania

Nakłady inwestycyjne projektu i metody szacowania			
Rodzaj	Nazwa nakładu	Wysokość	Metoda szacowania
Zakup środków trwałych	Wydatek związany z rozbudową parku maszynowego Tokarka model TOP 560X1500	103850,00 zł	Wysokość nakładów oszacowana na podstawie przeprowadzonej analizy rynku, analizy ofert i cenników otrzymanych od potencjalnych dostawców. Przyjęte wartości odpowiadają stawkom rynkowym.
Zakup środków trwałych	Wydatek związany z zakupem narzędzi nagniatających- model SKUV20-03295-001-RH25	5635,08 zł (po przeliczeniu kursu Euro czerwiec 2021 r.)	Wysokość nakładów oszacowana na podstawie przeprowadzonej analizy rynku, analizy ofert i cenników otrzymanych od potencjalnych dostawców. Przyjęte wartości odpowiadają stawkom rynkowym.
Zakup środków trwałych	Wibroizolatory do posadowienia i wypoziomowania maszyny	1550,00 zł	Wysokość nakładów oszacowana na podstawie przeprowadzonej analizy rynku, analizy ofert i cenników otrzymanych od potencjalnych dostawców. Przyjęte wartości odpowiadają stawkom rynkowym.
Zakup środków trwałych	Odczyt cyfrowy położenia narzędzia w dwóch osiach X, Z	13100,00 zł	Wysokość nakładów oszacowana na podstawie przeprowadzonej analizy rynku, analizy ofert i cenników otrzymanych od potencjalnych dostawców. Przyjęte wartości odpowiadają stawkom rynkowym.
Usługa obca	Dostawa urządzenia, instalacja oraz szkolenie personelu	2500,00 zł	Wysokość nakładów oszacowana na podstawie przeprowadzonej analizy rynku, analizy ofert otrzymanych od potencjalnych dostawców oraz analiz informacji zawartych na stronach internetowych potencjalnych dostawców usługi. Przyjęta wartość odpowiada stawkom rynkowym.

cd. Tabeli 25.

Wynagrodzenia	Płatności z tytułu wynagrodzeń związanych z wdrożeniem projektu	4884,00 zł	Wysokość nakładów oszacowano na podstawie sumy iloczynów czasu realizacji i stawki godzinowej pracowników oddelegowanych do działania. Wysokość wynagrodzenia ustalono na podstawie konsultacji branżowej. Przyjęte wartości odpowiadają stawkom rynkowym.
Usługa obca	Konsultacje technologiczne – doradcy zewnętrzni	10 000,00 zł	Wysokość nakładów oszacowano na podstawie własnej wiedzy branżowej. Przyjęta wartość odpowiada stawkom rynkowym.
Całkowite nakłady inwestycyjne		141 519, 08 zł	Wysokość całkowitych nakładów stanowi sumę poszczególnych nakładów inwestycyjnych.

Szacowane nakłady inwestycyjne niezbędne do wdrożenia planowanej inwestycji wynoszą 141 519,08 zł i obejmują zakup środków trwałych, dostawę i instalację urządzenia, szkolenie personelu z zakresu obsługi, płatności z tytułu wynagrodzeń oraz zewnętrzne konsultacje technologiczne.

Na podstawie danych z przedsiębiorstwa dotyczących dotychczasowej podaży i popytu na staliwo duplex założono, że rocznie wytworzone zostanie około 15.5 tony odlewów, które będą poddane nagniataniu. Przy takich prognozach oszacowano kwartalne wartości przepływów pieniężnych netto wraz z skumulowanymi przepływami pieniężnymi z wdrożenia - dla dwóch wariantów cenowych produktu:

- **wariant 1** – uwzględniający zachowanie ceny wyrobu gotowego na niezmiennym poziomie – tabela 26, strategia cenowa opierająca się na założeniu osiągnięcia przewagi konkurencyjnej poprzez zaoferowanie klientom wyrobu o wyższej wartości dobra przy niezminionej cenie;
- **wariant 2** – uwzględniający wzrost ceny wyrobu o 5% - tabela 27, strategia cenowa opierająca się na wzroście atrakcyjności produktu oraz intensywnych działaniach informacyjnych nabywców o walorach produktu, co umożliwia jednoczesny wzrost ceny o 5 % bez spadku popytu.

Tabela 26. Przepływy pieniężne z realizacji projektu w okresie 1 roku, przy zachowaniu ceny

Przepływy pieniężne z realizacji projektu - wariant 1		
kwartał	Wartość przepływu pieniężnego	Skumulowane przepływy pieniężne
I.	33 600,00	33 600,00
II.	67 200,00	100 800,00
III.	33 600,00	134 400,00
IV.	33 600,00	168 000,00

Tabela 27. Przepływy pieniężne z realizacji projektu w okresie 1 roku, przy wzroście ceny o 5%

Przepływy pieniężne z realizacji projektu - wariant 2		
kwartał	Wartość przepływu pieniężnego	Skumulowane przepływy pieniężne
I.	40 100,00	40 100,00
II.	80 200,00	120 300,00
III.	40 100,00	160 400,00
IV.	40 100,00	200 500,00

W oparciu o szacowaną wysokość nakładów inwestycyjnych wynoszącą 141519,08 zł oraz planowane przepływy pieniężne z inwestycji zaprezentowane w tabelach 26 i 27 wyliczono okres zwrotu nakładów zgodnie z poniższym algorytmem:

(3.1)

$$PP_{w1} = 3 + \frac{141519,08 - 134400,00}{33600,00} = 3,21 \text{ kw.}$$

(3.2)

$$PP_{w2} = 2 + \frac{141519,08 - 120300,00}{40100,00} = 2,52 \text{ kw.}$$

Analiza uzyskanych danych wskazuje, że zwrot nakładów inwestycyjnych dla wariantu I - PP_{w1} , nastąpi w IV kwartale pierwszego roku funkcjonowania technologii, natomiast dla wariantu II - PP_{w2} w III kwartale pierwszego roku funkcjonowania inwestycji.

(3.3)

$$PP_{w1} < PP_{max}$$

(3.4)

$$PP_{w2} < PP_{max}$$

Okres zwrotu nakładów (PP) inwestycyjnych jest mniejszy od przyjętego, najdłuższego okresu zwrotu (PP_{max}) i dla pierwszego wariantu wynosi 3,21 kwartału, dla drugiego wariantu wynosi 2,52 kwartału. Inwestycja jest akceptowalna, ma krótki okres zwrotu nakładów, co stanowi dodatkowy argument jej opłacalności. W związku z przewidywanym szybkim zwrotem nakładów inwestycyjnych istnieje małe ryzyko inwestycyjne, a działanie sprzyja utrzymaniu płynności finansowej.

3.7.2. Analiza wskaźników produktywności

Rozpoczynając analizę produktywności należy wskazać, iż rozważania te są zasadne w sytuacji, gdy produkcja jest celowa, tzn. istnieje zapotrzebowanie na produkt, który będzie miał swojego odbiorcę. Przedsiębiorstwo PIOMA Odlewnia już dziś posiada stałych klientów zamawiających odlewy wykonane z tego materiału, a prognozy rynkowe wskazują na rosnące zapotrzebowanie. Zastosowanie omawianej metody obróbki powierzchni staliwa duplex umożliwia usprawnienie procesu wytwórczego, pozwala ograniczyć koszty operacyjne i zaoferować klientom produkt o podwyższonej jakości, co w konsekwencji przekłada się na rozwój i pozycję rynkową przedsiębiorstwa. W tabeli 28 przedstawiono zestawienie planowanych korzyści wynikających z wdrożenia obróbki nagniataniem staliwa duplex do praktyki przedsiębiorstwa. Implementacja projektu przełoży się na efektywność operacyjną, zysku oraz rynkową, co wykazano w oparciu o informacje uzyskane od przedsiębiorstwa, a dotyczące procesu wytwórczego odlewów ze staliwa duplex (czasu realizacji poszczególnych operacji technologicznych w tym wykończeniowych i kosztów wytworzenia wyrobu finalnego). W ocenie przedsiębiorstwa wdrożenie proponowanego procesu nagniatania, jako alternatywy dla aktualnego sposobu

obróbki wykończeniowej mechanicznej, pozwoli na jej skrócenie o około 2,5 raza. W oparciu o tą wartość możliwe jest wyznaczenie korzyści przedstawionych poniżej.

Tabela 28. Zestawienie planowanych korzyści z wdrożenie innowacyjnego procesu obróbki nagniataniem wyrobów ze staliwa duplex

Planowane korzyści z wdrożenie procesu obróbki nagniataniem		
RODZAJ		KORZYŚCI
Efektywność operacyjna	przychodowa	W zależności od przyjętej strategii cenowej zakładany jest wzrost sprzedaży staliwa duplex od 5% do 10%, co zwiększy przychody przedsiębiorstwa.
	kosztowa	Obniżenie kosztów wytworzenia poprzez: - obniżenie zużycia energii podczas obróbki mechanicznej, wykończeniowej o 60%; - ograniczenie kosztów pracowniczych przypadających na jednostkę wyrobu (poprzez skrócenie czasu pracy operatora przy obróbce wykończeniowej); - obniżenie pracochłonności procesu wytwórczego odlewów duplex o 3%.
	operacyjna	Wzrost wydajności pracy poprzez: - skrócenie cyklu produkcyjnego produktu o około 13%; - spadek jednostkowego kosztu wytworzenia o około 3,6%; - wzrost produktywności poprzez spadek roboczogodzin przypadający na jednostkę wytworzenia o 13%; - obniżenie zużycia energii podczas obróbki wykańczającej o 60%.
Efektywność rynkowa		Zmniejszona kosztochłonność procesu ułatwia pozyskanie nowych klientów, bowiem daje możliwość zaoferowania produktu o podwyższonych właściwościach funkcjonalnych przy korzystnych cenach. Dzięki temu zakładany jest wzrost konkurencyjności przedsiębiorstwa i zwiększenie sprzedaży od 5% do 10%.
Efektywność zysku		Wzrost zysków przedsiębiorstwa wynikający z obniżenia kosztów wytworzenia oraz ze zwiększenia sprzedaży.

Przeprowadzona analiza techniczno-ekonomiczna dowodzi, że zastosowanie nagniatania może przynieść wzrost wydajności pracy, poprzez:

- skrócenie cyklu produkcyjnego wyrobu;
- obniżenie ilości roboczogodzin przypadających na wytworzenie wyrobu;
- obniżenie energochłonności procesu.

Niezbędne elementy systemu wejścia procesu produkcyjnego, przy zastosowaniu nagniatania, ulegają obniżeniu, następuje spadek kosztu jednostkowego wytworzenia przy jednoczesnej możliwości uzyskania produktu wyjściowego o poprawionych właściwościach.

3.8. Konkluzje analizy techniczno-ekonomicznej procesu nagniatania

W celu dokonania oceny potencjału implementacji procesu do praktyki gospodarczej niezbędne było uzyskanie informacji od przedsiębiorstwa, co było możliwe dzięki jego uprzejmości przedsiębiorstwa PGO S. A. PIOMA Odlewnia oddział w Piotrkowie Trybunalskim. Pozyskane dane umożliwiły przeprowadzenie prospektywnej oceny efektywności ekonomicznej NSNT odlewów wykonanych ze staliwa duplex do praktyki przemysłowej. Zastosowany scornig model uwzględniał kryteria: finansowe, rynkowe, technologiczne, zgodność inwestycji ze strategią rozwoju przedsiębiorstwa oraz jego zasoby. Ponadto wzięto pod uwagę charakter branży, wiedzę i kompetencje kadry zaangażowanej w proces inwestycyjny oraz dotychczasowe doświadczenie w realizacji innowacji w przedsiębiorstwie. Prezentowane rozwiązanie uzyskało wysoką notę i zostało zakwalifikowane, jako zasadne do implementacji. Ustalenie wielkości wybranych parametrów, stanowiących kryteria decydujące o atrakcyjności inwestycji, wymagało oszacowania niezbędnych nakładów inwestycyjnych. Wysokość nakładów oszacowana została na podstawie konsultacji branżowej oraz przeprowadzonej analizy rynku, analizy ofert i cenników otrzymanych od potencjalnych dostawców. Przyjęte wartości nakładów odpowiadały stawkom rynkowym, a całkowita wysokość wyniosła 141 519,08 zł. Ustalono, że okres zwrotu nakładów, dla obu wariantów, jest mniejszy od przyjętego, najdłuższego okresu zwrotu (PP_{max}) i dla pierwszego wariantu wynosi 3,21 kwartału, dla drugiego 2,52 kwartału. W związku z przewidywanym szybkim zwrotem nakładów istnieje małe ryzyko inwestycyjne, a działanie sprzyja utrzymaniu płynności finansowej.

Opracowane zestawienie planowanych korzyści, wynikających z wdrożenia obróbki nagniataniem staliwa duplex do praktyki przedsiębiorstwa, uwzględniające efektywność operacyjną, zysku oraz rynkową potwierdza, że dzięki zastosowaniu przedmiotowego procesu możliwym jest obniżenie kosztów wytwarzania przez wzrost produktywności. Zastąpienie obróbki dokładnego roztaczania na tokarce obróbką nagniataniem powoduje:

- obniżenie zużycia energii podczas obróbki mechanicznej wykończeniowej o 60%;
- obniżenie wskaźnika roboczogodzin operatora tokarki przypadających na wykonanie obróbki wykończeniowej jednej sztuki wyrobu o 60%;
- obniżenie pracochłonności procesu wytwórczego staliwa duplex o 3%;
- wzrost wydajności pracy poprzez skrócenie cyklu produkcyjnego odlewu o około 13 %;

- spadek jednostkowego kosztu wytworzenia o 3,6%;
- zmniejszenie roboczogodzin przypadający na jednostkę wytworzenia o 13%;
- obniżenie zużycia energii podczas obróbki wykończeniowej mechanicznej o 60%.

W odniesieniu do efektywności rynkowej i zysku, obniżona kosztochłonność procesu sprzyja pozyskaniu nowych klientów, poprzez możliwość zaoferowania im produktu o podwyższonych właściwościach funkcjonalnych przy korzystnych cenach. Wobec czego spodziewanym efektem wdrożenia jest wzrost przewagi konkurencyjnej i zwiększenie sprzedaży od 5% do 10%.

Bezwzględna ocenę zastosowania technologii nagniatania staliwa duplex zrealizowano wykorzystując metodę wielokryterialną. Ustalono kryteria progowe (zgodność inwestycji ze strategią rozwoju przedsiębiorstwa, okres zwrotu nakładów, ocenę ryzyka inwestycji) oraz uzupełniające, a opracowany scoring model przedstawiono w tabeli 24. W związku z profilem działalności przedsiębiorstwa PIOMA, w tym jego możliwościami produkcyjnymi i przyjętym kierunkiem działań, wskazać można, że proponowane w dysertacji rozwiązanie w pełni wpisuje się w strategię przedsiębiorstwa. Działanie stanowi modernistyczną inwestycję mającą na celu udoskonalenie oferowanych produktów. Jest w pełni zgodne z obowiązującymi przepisami, a do jego wdrożenia brak jest konieczności pozyskiwania dodatkowych pozwoleń. Efektywność rynkowa szacowana jest na wzrost sprzedaży od 5% do 10%. Przyjęte, jako kryterium finansowe okres zwrotu z nakładów wynosi poniżej roku, co potwierdza opłacalność inwestycji. Ze względu na krótki okres zwrotu nakładów oraz zgodność inwestycji ze strategią przedsiębiorstwa ryzyko inwestycji określono jako dopuszczalne. Inwestycja korzystnie kształtuje produktywność poprzez zmniejszenie nakładów przy jednoczesnym wzroście efektów. Zastosowanie procesu nagniatania staliwa duplex należy zakwalifikować, jako innowację procesową. Przedmiotowa inwestycja nie uzyskała noty „0” przy założonych kryteriach progowych oraz otrzymała ostateczną notę wynoszącą 9,45 punktów. Uzyskany wynik kwalifikuje inwestycję, jako zasadną ekonomicznie do wdrożenia.

W aspekcie technicznym nie istnieją przeszkody uniemożliwiające zastosowanie procesu w warunkach komercyjnych, niezbędne środki materialne są ogólnodostępne. Jedyną barierę wejścia na rynek stanowić może niski poziom wiedzy klientów o możliwości kształtowania – poprzez NSNT – właściwości funkcjonalnych materiałów lanych, w tym staliwa duplex. Wobec czego wskazanym jest przed wdrożeniem omawianej technologii przeprowadzenie odpowiednich działań o charakterze informacyjnym.

Wobec powyższego, mając na uwadze pozytywne wyniki analizy techniczno-ekonomicznej (zrealizowanej dla przedsiębiorstwa PIOMA) procesu, zasadnym jest implementowanie go do warunków przemysłowych. Projekt w postaci wdrożenia technologii nagniatania staliwa duplex należy uznać za stanowiący odpowiedź na potrzeby rynku oraz wychodzący naprzeciw zapotrzebowaniu praktyki produkcyjnej.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy, konsultacji z przedsiębiorstwami przemysłowymi oraz w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań sformułowano cele pracy o charakterze studialnym i utylitarnym. Podjęta tematyka badawcza jest uzasadniona zarówno względami poznawczymi, jak i praktycznymi. Niniejsza dysertacja prezentuje rozważania dotyczące zasadności zastosowania znanej metody obróbki WW, dotychczas nie stosowanej wobec przedmiotowego materiału, to jest nagniatania statycznego naporowego tocznego. Istotną zaletą omawianej metody jest możliwość realizacji procesu na uniwersalnych obrabiarkach. Poprzez nagniatanie kształtować można jakość wyrobu, która bezpośrednio przekłada się na określone właściwości funkcjonalne.

Staliwo duplex należy do grupy materiałów nierdzewnych i posiada wysoki potencjał eksploatacyjny oraz możliwości wtórnego wykorzystania. Zastosowanie NSNT bezmiedziowych gatunków staliwa duplex posiada potencjalne zastosowanie w obszarze produkcji elementów maszyn i urządzeń oraz wyrobów gotowych, od których wymagane są określone właściwości mechaniczne, jak i wysoka wytrzymałość na korozję (przemysł wydobywczy ropy naftowej, poligrafia, branża petrochemiczna, energetyka, instalacje odsalania wody morskiej, przemysł okrętowy).

Autorka niniejszej dysertacji zidentyfikowała lukę badawczą w postaci niewielkiej ilości pozycji literaturowych, które w sposób kompleksowy poruszają wpływ procesu technologicznego nagniatania na właściwości staliwa duplex typu GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3, a które mogłyby stanowić uzasadnienie do zastosowania obróbki w warunkach przemysłowych. Wiadomym jest, że ocena potencjału wdrożenia technologii powinna obejmować nie tylko aspekty techniczno-technologiczne, ale również skutki ekonomiczne. Ocena efektywności ekonomicznej działania stanowi istotne kryterium uzasadniające bądź negujące zasadność wdrożenia. W celu wykonania oceny potencjału aplikacyjnego technologii nagniatania staliwa duplex do warunków przemysłowych, przeprowadzono analizę techniczno-ekonomiczną wielokryterialną rozwiązania dla wybranego przedsiębiorstwa.

Zaplanowany i zrealizowany zakres pracy oraz otrzymane wyniki pozwoliły na osiągnięcie założonego celu rozprawy i weryfikację postawionej hipotezy.

Przeprowadzone badania empiryczne pozytywnie weryfikują hipotezę:

„Zastosowanie obróbki nagniataniem bezmiedziowego staliwa duplex jest uzasadnione technologicznie i ekonomicznie, umożliwia poprawę jakości oraz właściwości funkcjonalnych wyrobu gotowego w związku z tym posiada potencjał implementacji do praktyki przemysłowej”, oraz udzielają odpowiedzi na sformułowane pytania problemowe.

Zrealizowane badania – makrostruktury, mikrostruktury, twardości, odporności na korozję, odporności tribologicznej, odporności zmęczeniowej – potwierdziły, że proces nagniatania można skutecznie stosować w celu kształtowania warstwy wierzchniej staliwa duplex typu GX2CrNiMoN22-5-3, GX2CrNiMoN25-6-3. Odpowiednio dobrane parametry procesu NSNT umożliwiają poprawę właściwości funkcjonalnych materiału, co stanowiło problem badawczy niniejszej dysertacji. Jak wskazują uzyskane wyniki przedstawione w rozdziale 3.5. na efekt nagniatania wpływa również skład chemiczny. Niewielkie różnice w zawartości kluczowych pierwiastków stopowych w badanych materiałach oraz ich niejednorodna struktura powodują, że obserwowany jest nieco inny efekt.

Badania mikrostruktury potwierdziły, że na skutek realizacji procesu nagniatania wytworzono warstwę wierzchnią, której mikrostruktura była odmienna od struktury rdzenia materiału. W efekcie siły docisku, materiał odkształcił się plastycznie czego uwidocznieniem jest zmiana orientacji kierunkowej ziarn. Struktura materiału po obróbce nagniataniem w WW jest rozdrobniona, a ziarna są spłaszczone w kierunku powstałych odkształceń tworząc teksturę zgniotu. Mikrostruktura rdzenia badanego materiału wskazuje charakterystyczną dla materiałów odlewanych wyraźną strukturę dendrytyczną. Nie zaobserwowano w strukturze wydzielenia fazy Sigma, co świadczy o prawidłowym przeprowadzeniu procesu przesycania. Procentowy udział poszczególnych faz w strukturze (feryt-austenit), określony na podstawie komputerowej analizy obrazu wynosił około 45-55%, co stanowi oczekiwaną wartość.

Efektom procesu nagniatania było wystąpienie zjawiska umocnienia powierzchniowego. Badania opisane w rozdziale 3.5.3. potwierdziły wzrost twardości na skutek realizacji procesu nagniatania. Wszystkie warianty próbek uzyskały wzrost umocnienia w WW, najwyższy zaobserwowano dla próbek 6A ($s_u = 61\%$) i 6B ($s_u = 38\%$). Zauważono istotną korelację twardości z dosuwem nagniatania, im większy dosuw, przy jednym przejściu narzędzia nagniatającego, tym wyższy stopień umocnienia.

W celu określenia powiązania jakości technologicznej ukształtowanej w procesie nagniatania WW z jakością eksploatacyjną, ocenie poddano parametry geometryczne powierzchni w zakresie chropowatości. Na skutek oddziaływań kinematycznych procesu uformowała się powierzchnia rzeczywista charakteryzująca się jednokierunkowością. Ślady obróbki były równoległe do siebie. W efekcie zjawisk zachodzących podczas procesu nagniatania zmianie uległy parametry profilu chropowatości. Proces nagniatania umożliwił zmniejszenie parametru chropowatości Ra do 8 i 9 klasy dokładności. Stan geometryczny powierzchni istotnie wpływa na właściwości funkcjonalne, takie jak:

- wytrzymałość na zmęczenie mechaniczne stykowe;
- odporność na zużycie ściernie;
- odporność na korozję.

Właściwości ukształtowane w efekcie TWW wpływają na przebieg zużycia – jego mechanizm, intensywność oraz skutki, co w konsekwencji przekłada się na trwałość elementu.

Kolejnymi etapami realizacji planu badawczego, zmierzającymi do rozwiązania celu badawczego, były:

- badania odporności na zużycie ściernie (rozdział 3.5.4.);
- badania odporności na zmęczenie stykowe (rozdział 3.5.5.);
- badania odporności korozyjnej (rozdział 3.5.6.).

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdzają, że poprzez NSNT staliwa duplex można kształtować właściwości użytkowe materiału. W zależności od zastosowanych parametrów istnieje możliwość poprawy, bądź pogorszenia badanej właściwości materiału. Projektując proces należy więc mieć na uwadze żądane koincydencje uzyskanych właściwości funkcjonalnych wyrobu gotowego.

Kolejnym etapem niezbędnym do osiągnięcia założonego celu badawczego w obszarze oceny potencjału wdrożenia omawianej technologii była realizacja oceny techniczno-ekonomicznej, zaprezentowana w rozdziale 3.7. Ewaluację zasadności implementacji rozwiązania zrealizowano we współpracy z zakładem PGO S.A. PIOMA Odlewnia oddział w Piotrkowie Trybunalskim. Bezwzględną ocenę techniczno-ekonomiczną zastosowania technologii nagniatania staliwa duplex przeprowadzono w oparciu o metodę wielokryterialną.

Opracowany scoring model uwzględniał kryteria progowe tj.:

- zgodność inwestycji ze strategią rozwoju przedsiębiorstwa;

- okres zwrotu nakładów;
- ocenę ryzyka inwestycji.

Nadto ustalono kryteria uzupełniające ujęte w tabeli 24. W oparciu o przeprowadzoną analizę pogłębioną o zakładane korzyści z wdrożenia w sferze efektywności operacyjnej, zysku i rynkowej wskazano, że wdrożenie NSNT posiada wysoki potencjał aplikacyjny. Przeprowadzone szacunki w zakresie efektywności wykorzystania zasobów wejściowych procesu (energii, materiałów, pracy ludzkiej, czasu) potwierdzają, że przy zastosowaniu technologii nagniatania staliwa duplex, jako alternatywy dla dotychczas stosowanej obróbki wykończającej, możliwość osiągnięcia założeń jakościowych przy jednoczesnym obniżeniu kosztów procesu podstawowego.

Należy mieć na uwadze, że zrealizowana ocena ekonomiczna wdrożenia procesu nie jest uniwersalna, lecz zgodnie z zaleceniami literatury [20], została wykonana dla określonego podmiotu. W dużym stopniu uniwersalnym rozwiązaniem jest zastosowana procedura oceny opłacalności inwestycji w postaci opracowanego modelu wielokryterialnego, gdyż może być on adaptowany i wykorzystany do oceny innych inwestycji.

Konkludując, zaproponowana w dysertacji metoda obróbki nagniatania staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3 jest uzasadniona ekonomicznie i technologicznie. Umożliwia poprawę jakości oraz właściwości funkcjonalnych wyrobu gotowego przy jednoczesnym obniżeniu kosztów wytwarzania.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie wykonanej analizy literatury oraz badań własnych sformułowano poniższe wnioski i stwierdzenia:

1. Potwierdzona została hipoteza pracy, iż zastosowanie NSNT bezmiedziowego staliwa duplex jest uzasadnione technologicznie i ekonomicznie, umożliwia poprawę jakości oraz właściwości funkcjonalnych wyrobu gotowego w związku z tym posiada potencjał implementacji do praktyki przemysłowej.
2. NSNT staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3 dla wszystkich zastosowanych parametrów prowadzi do powierzchniowego odkształcenia plastycznego materiału. Struktura po procesie charakteryzuje się zgniotem, ziarna są spłaszczone i równoległe wydłużone w kierunku powierzchni i ruchu narzędzia nagniatającego.
3. Niejednorodna, dwufazowa struktura badanych materiałów, odlewów, nie ogranicza możliwości uzyskania powierzchni wolnej od pęknięć, nieciągłości, oberwań oraz innych wad powierzchniowych po procesie NSNT.
4. NSNT staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3 umożliwia kształtowanie struktury geometrycznej powierzchni, a odpowiednio dobrane parametry procesu umożliwiają uzyskanie nawet 9 klasy chropowatości.
5. Istnieje wyraźny związek pomiędzy parametrem Ra chropowatości a prędkością posuwu NSNT – im wyższa prędkość posuwu, tym wyższe parametry chropowatości, a parametrem granicznym jest 0,5 mm/obr.
6. Otrzymane wyniki badania twardości potwierdzają, że w efekcie procesu NSNT we wszystkich wariantach występuje zjawisko powierzchniowego umocnienia materiału. Zasadniczo wyższy stopień umocnienia występuje przy zastosowaniu wyższej jednostkowej głębokości dosuwu nagniataka ($a_n = 1$ mm).
7. Zastosowanie NSNT staliwa typu duplex w gatunku GX2CrNiMoN25-6-3, może korzystnie wpływać na właściwości tribologiczne, czego przykładem jest wariant 7A. Jednak całkowity docisk (a_{nc}) wynoszący powyżej 1 mm niekorzystnie wpływa na właściwości tribologiczne. Również prędkość posuwu powyżej 0,4 mm/obr uwidacznia negatywne oddziaływanie na właściwości ścierne i z tego powodu jest niezalecana.

Najwyższy współczynnik tarcia $\mu = 0,4$ otrzymano dla próbki 5A, która posiadała najwyższy parametr $Ra = 1,7 \mu\text{m}$.

8. Zastosowanie NSNT staliwa typu duplex w gatunku GX2CrNiMoN22-5-3, może korzystnie wpływać na właściwości tribologiczne, czego przykładem jest wariant 2B. Również dla tego typu staliwa niezalecane, ze względu na właściwości tribologiczne, jest realizowanie procesu nagniatania przy posuwie powyżej 0,4 mm/obr, jak dla wariantu 4B i 10B. Najwyższy współczynnik tarcia $\mu = 0,33$ otrzymano dla próbki 5B, która posiadała najwyższy parametr $Ra = 1,17 \mu\text{m}$.
9. Zastosowanie NSNT staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3 może pozytywnie kształtować odporność na zmęczenie mechaniczne stykowe, jak dla próbek 7A, 9B. Przy zastosowanych parametrach wykazano, iż na otrzymane efekty wpływ ma dosuw nagniataka, dla $a_n = 0,5 \text{ mm}$ przy dwóch przejściach osiągnięto najlepszy rezultat.
10. Zastosowanie NSNT staliwa typu duplex w gatunkach GX2CrNiMoN25-6-3, GX2CrNiMoN22-5-3 może korzystnie wpływać na jego właściwości korozyjne. Przeprowadzone badania odporności korozyjnej potwierdzają wzrost potencjału korozyjnego próbek 1A, 2A, 3A, 1B, 2B przy jednoczesnym obniżeniu gęstości prądu pasywacji.
11. Projektując technologię NSNT staliwa typu duplex należy uwzględnić, podczas doboru parametrów realizacji procesu, gatunek staliwa duplex.

Spis rysunków

Rys. 1. Schemat zmian strukturalnych materiału w procesie nagniatania.....	16
Rys. 2. Najważniejsze właściwości warstwy wierzchniej materiału.....	17
Rys. 3. Schemat wpływu procesu technologicznego nagniatania na kształtowanie wyjściowych właściwości materiału	19
Rys. 4. Przykładowa mikrostruktura duplex, traw. $Mi21Fe$	25
Rys. 5. Techniczna koncepcja produktywności.....	40
Rys. 6. Podział czynników produktywności.....	41
Rys. 7. Schemat blokowy zakresu badań	48
Rys. 8. Profilometr stykowy DIVIDE DH-5	50
Rys. 9. Mikroskop optyczny Nikon Eclipse MA-200 wraz z zestawem komputerowym ..	51
Rys. 10. Twardościomierze: a) Vickers FM-700; b) Rockwell HR-150A.....	52
Rys. 11. Stanowisko badawcze wykorzystane do oceny wytrzymałości zmęczeniowej - A, fotografia zamocowania próbki do badania – B.....	53
Rys. 12. Mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000	53
Rys. 13. Mikroskop elektronowy Phenom XL wraz z zestawem komputerowym.	54
Rys. 14. Tester tribologiczny - A oraz waga analityczna - B.....	55
Rys. 15. Urządzenie elektrochemiczne.....	56
Rys. 16. Przygotowanie odlewu do badań (A - rozgrzany materiał w tyglu; B - zalewanie grafitowej formy odlewniczej; C, D - stygnący odlew)	57
Rys. 17. Nagniatak krążkowy NK-01 (1) z możliwością stosowania wymiennych elementów w postaci krążka (2) przeznaczony do nagniatania statycznego naporowego tocznego (NSNT) powierzchni walcowych zewnętrznych (3).....	58
Rys. 18. Przykładowe próbki w kształcie walca, staliwo duplex w gatunku GX2CrNiMoN25-6-3 po procesie nagniatania.....	59
Rys. 19. Przykładowe walce ze staliwa duplex serii 2205 w gatunku GX2CrNiMoN22-5-3 po procesie nagniatania	59
Rys. 20. Mikrostruktura warstwy wierzchniej staliwa GX2CrNiMoN25-6-3 po procesie NSNT, powiększenie A - 200x, B - 100x, mikroskop świetlny	62
Rys. 21. Mikrostruktura warstwy wierzchniej staliwa GX2CrNiMoN22-5-3 po procesie NSNT, powiększenie a) 200x, b) 100x, mikroskop świetlny	62
Rys. 22. Przykładowe mikrostruktury rdzeni badanych odlewów; a), d) powiększenie 100x; b), c) powiększenie 200x; mikroskop świetlny	63

Rys. 23. Obraz mikrostruktury badanego materiału z widocznym zasięgiem warstwy wierzchniej po procesie nagniatania; KEYENCE VHX-7000	64
Rys. 24. Przykładowa struktura geometryczna powierzchni po NSNT; a – obraz 3D; b - obraz 2D- światło spolaryzowane monochromatyczne, c) obraz 2D- światło spolaryzowane – mapa kolorów	65
Rys. 25. Wykres parametru Ra dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B	67
Rys. 26. Wykres parametru Rz dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B	68
Rys. 27. Wykres wskaźnika zmniejszenia parametru Rz chropowatości (K_{Rz}) dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B.....	68
Rys. 28. Wykres wskaźnika zmniejszenia parametru Ra chropowatości (K_{Ra}) dla wszystkich wariantów próbek materiału A i B.....	69
Rys. 29. Przykładowe profilogramy chropowatości materiału A wraz z krzywymi materiałowymi	72
Rys. 30. Przykładowe profilogramy chropowatości materiału B wraz z krzywymi materiałowymi.....	73
Rys. 31. Próbka z oznaczonymi promieniami, wzdłuż których realizowano pomiar twardości.....	75
Rys. 32. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 6B.....	75
Rys. 33. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 11B.....	76
Rys. 34. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 6A.....	76
Rys. 35. Wykres twardości w funkcji odległości od powierzchni – próbka 11A.....	76
Rys. 36. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek:	80
Rys. 37. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek:	81
Rys. 38. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek:	81
Rys. 39. Wykres procentowego ubytku masy w funkcji drogi próbek:	81
Rys. 40. Porównanie ubytku masy próbek 1 ÷ 11 staliwa GX2CrNiMoN22-5-3.....	82
Rys. 41. Wykresy procentowego ubytku masy w funkcji drogi dla próbek nagniatanych przy tym samym parametrze posuwu – materiał GX2CrNiMoN25-6-3 (a - próbki 1A, 7A; b – próbki 2A, 6A, 8A; c – próbki 3A, 9A; d – próbki 4A, 10A)	83
Rys. 42. Wykresy procentowego ubytku masy w funkcji drogi dla próbek nagniatanych przy tym samym parametrze posuwu – materiał GX2CrNiMoN22-5-3 (a - próbki 1B, 7B; b – próbki 2B, 6B, 8B; c – próbki 3B, 9B; d – próbki 4B, 10B).....	84
Rys. 43. Przykładowa powierzchnia po próbie zmęczenia stykowego - obraz makroskopowy oraz powiększenie 250x - KEYENCE VHX-7000	86

Rys. 44. Ekstruzje powstałe na powierzchni badanego materiału w wyniku działania zmiennego obciążenia: A – próbka 3A, pow. 10000x; B – próbka 3B, pow. 12000x, skaningowy mikroskop Phenom XL	87
Rys. 45. Okresowe przesunięcia na powierzchni badanego materiału powstałe w wyniku działania zmiennego obciążenia – próbka 4B; A - pow. 5000x; B – pow. 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL	87
Rys. 46. Mikropęknięcia i wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 1B; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL.....	88
Rys. 47. Mikropęknięcia i wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 2B; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL.....	88
Rys. 48. Mikropęknięcia i wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 1A; A - powiększenie 5000x; B - powiększenie 10000x, skaningowy mikroskop Phenom XL.....	89
Rys. 49. Wykruszenia powstałe na powierzchni badanego materiału - próbka 2A;	89
Rys. 50. Obraz 3D przykładowego wykruszenia na powierzchni badanego materiału – próbka 2B, mikroskop cyfrowy KEYENCE VHX-7000	90
Rys. 51. Przykładowe pole powierzchni zmęczenia zarejestrowane przy użyciu oprogramowania Analizator VHX 7000-970F.....	90
Rys. 52. Wykres porównujący pole powierzchni zużytej poszczególnych próbek materiału A i B	91
Rys. 53. Urządzenie elektrochemiczne - A oraz próbka do badań odporności na korozję - B wraz z przykładową mikrostrukturą powierzchni przed badaniem korozyjnym - C, powiększenie 200x	94
Rys. 54. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 1A	96
Rys. 55. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 11A (toczona).....	96
Rys. 56. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 1B	97
Rys. 57. Krzywa potencjodynamiczna uzyskana dla próbki 11B (toczona).....	97
Rys. 58. Mikrostruktura próbki 1A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	98
Rys. 59. Mikrostruktura próbki 2A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	98
Rys. 60. Mikrostruktura próbki 3A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	98
Rys. 61. Mikrostruktura próbki 4A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	99
Rys. 62. Mikrostruktura próbki 5A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	99

Rys. 63. Mikrostruktura próbki 6A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	99
Rys. 64. Mikrostruktura próbki 7A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	100
Rys. 65. Mikrostruktura próbki 8A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	100
Rys. 66. Mikrostruktura próbki 9A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	100
Rys. 67. Mikrostruktura próbki 10A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	101
Rys. 68. Mikrostruktura próbki 11A a) przed i b) po badaniu korozyjnym	101
Rys. 69. Mikrostruktura próbki 1B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	101
Rys. 70. Mikrostruktura próbki 2B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	102
Rys. 71. Mikrostruktura próbki 3B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	102
Rys. 72. Mikrostruktura próbki 4B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	102
Rys. 73. Mikrostruktura próbki 5B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	103
Rys. 74. Mikrostruktura próbki 6B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	103
Rys. 75. Mikrostruktura próbki 7B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	103
Rys. 76. Mikrostruktura próbki 8B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	104
Rys. 77. Mikrostruktura próbki 9B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	104
Rys. 78. Mikrostruktura próbki 10B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	104
Rys. 79. Mikrostruktura próbki 11B a) przed i b) po badaniu korozyjnym	105

Spis tabel

Tabela 1. Klasyfikacja obróbki nagniataniem ze względu na przyjęte kryteria.....	17
Tabela 2. Zalety i wady obróbki nagniataniem w aspektach technologicznym, jakości produktu oraz ekonomicznym [opracowanie własne na podstawie 9, 11, 17, 31, 46, 47]..	21
Tabela 3. Gatunki stali i staliwa typu duplex wraz z zawartością pierwiastków w % masowych oraz PREN [1]	23
Tabela 4. Wpływ wybranych pierwiastków stopowych na właściwości stali i staliwa duplex [opracowanie własne na podstawie 1, 4÷7, 42, 53, 57, 59÷61].....	26
Tabela 5. Gatunki staliwa austenityczno-ferrytycznego wraz z charakterystyką składu chemicznego wg PN-EN 10283:2019 (zawartość pierwiastków w % masowych) [61].....	28
Tabela 6. Właściwości mechaniczne staliwa duplex w temperaturze pokojowej według PN-EN 10283:2019 [61].....	29
Tabela 7. Wybrane wskaźniki produktywności, sposoby ich wyrażania oraz przykłady działań na rzecz wzrostu produktywności [opracowanie własne na podstawie 102, 107, 109, 110].....	42
Tabela 8. Skład chemiczny badanego staliwa wraz z odniesieniem do normy PN-EN 10283:2019, % masowy.....	57
Tabela 9. Parametry nagniatania próbek ze staliwa duplex z serii GX2CrNiMoN25-6-3..	60
Tabela 10. Parametry nagniatania próbek ze staliwa duplex z serii GX2CrNiMoN22-5-3	61
Tabela 11. Parametry chropowatości powierzchni po obróbce powierzchniowej nagniataniem staliwa GX2CrNiMoN25-6-3	66
Tabela 12. Parametry chropowatości powierzchni po obróbce powierzchniowej nagniataniem staliwa GX2CrNiMoN22-5-3	67
Tabela 13. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona.....	70
Tabela 14. Wyniki obliczeń testu istotności współczynnika korelacji liniowej.....	71
Tabela 15. Twardość powierzchni staliwa GX2CrNiMoN25-6-3.....	77
Tabela 16. Twardość powierzchni staliwa GX2CrNiMoN22-5-3.....	78
Tabela 17. Zużycie tribologiczne próbek materiału GX2CrNiMoN22-5-3 na drodze 7,5 km oraz współczynnik tarcia	79
Tabela 18. Zużycie tribologiczne próbek materiału GX2CrNiMoN25-6-3 na drodze 7,5 km oraz współczynnik tarcia	80
Tabela 19. Zestawienie wyników pomiaru pola powierzchni zmęczenia materiału	91

Spis tabel

Tabela 20. Współczynnik korelacji liniowej pomiędzy zmienną a_n a polem powierzchni zmęczenia	92
Tabela 21. Wyniki obliczeń testu istotności współczynnika korelacji liniowej.....	93
Tabela 22. Charakterystyka korozyjna staliwa GX2CrNiMoN25-6-3.....	94
Tabela 23. Charakterystyka korozyjna staliwa GX2CrNiMoN22-5-3.....	95
Tabela 24. Scoring model oceny atrakcyjności wdrożenia	112
Tabela 25. Nakłady inwestycyjne projektu oraz metody szacowania.....	115
Tabela 26. Przepływy pieniężne z realizacji projektu w okresie 1 roku, przy zachowaniu ceny.....	117
Tabela 27. Przepływy pieniężne z realizacji projektu w okresie 1 roku, przy wzroście ceny o 5%	117
Tabela 28. Zestawienie planowanych korzyści z wdrożenie innowacyjnego procesu obróbki nagniataniem wyrobów ze staliwa duplex	119

LITERATURA

1. Practical Guidelines for Fabrication of Duplex Stainless Steels. International Molybdenum Association, London 2014 r.
2. L. A. Dobrzański, Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, wydanie II, WNT, Warszawa, 2006, s. 59-79.
3. Z. Stradomski: Mikrostruktura w zagadnieniach zużycia staliw trudnościeralnych, Częstochowa 2010 r.
4. G. Stradomski, M. Nadolski, Z. Stradomski: The Microstructure of Thin-walled GX2CrNiMoN25-6-3 Cast Steel Made by Centrifugal Casting [w] Archives of Foundry Engineering 3/2015, 77-82.
5. D. Dyja, Z. Stradomski, S. Stachura: Ocena możliwości sterowania mikrostrukturą staliwa ferrytyczno-austenitycznego GX2CrNiMoCu25-6-3-3 [w] Archiwum odlewnictwa, 2006, rocznik 6, Nr 18 (1/2).
6. D. Dyja: Możliwości sterowania strukturą staliw ferrytyczno-austenitycznych w aspekcie poprawy właściwości tribologicznych, praca doktorska, WIPMiFS, Częstochowa 2006 r.
7. H. Mazurkiewicz: Wpływ miedzi na strukturę i własności korozyjne staliwa wysokostopowego chromowo-niklowego i chromowego, praca doktorska, AGH, Kraków.
8. L. A. Dobrzański, M. Osojca: Struktura i własności stali duplex typu X2CrNiMoN22-5-3* [w] Achievements in Mechanical and Materials Engineering, 2003 r., s. 263-266.
9. R. Patyk, A. Kułakowska, Ł. Bohdal: Ekologiczne, ekonomiczne i eksploatacyjne aspekty stosowania obróbki nagniataniem [w] Rocznik Ochrona Środowiska tom 16, Koszalin 2014, s. 351-362.
10. R. Knosala: Inżynieria Produkcji, Kompendium wiedzy, PWE 2017 r.
11. T. Dyl: Numeryczna i eksperymentalna analiza procesu nagniatania z wykorzystaniem teorii sprężystości i plastyczności, Gdynia 2014 r.
12. J. K. Senatorski: Podnoszenie tribologicznych właściwości materiałów przez obróbkę cieplną i powierzchniową, Warszawa 2003 r.
13. T. Dyl: Nagniatanie powierzchni płaskich elementów części maszyn okrętowych [w] Zeszyty naukowe Akademii morskiej w Gdyni nr 71, Gdynia 2011 r.

14. L. A. Dobrzański, A. D. Dobrzańska-Danikiewicz: Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich, Open Access Library, Volume 5, 2011 r.
15. L. A. Dobrzański: Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych, Gliwice 2009 r.
16. A. Ossowska, J. Łabanowski: Wpływ nagniatania na właściwości stali duplex stosowanych na element instalacji chemicznych, Materiały i Technologie, 2005 nr 3, s. 141–146.
17. J. Jasińska, G. Stradomski: Podstawy technologii nagniatania - przegląd technologiczny [w] 42 Studencka Konferencja Naukowa: Potencjał Innowacyjny w Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów (red.) Staniewska Ewa, Częstochowa, 2018 s. 511-514.
18. W. Przybylski: Technologia obróbki nagniataniem, WNT, Warszawa 1987 r.
19. K. Czechowski, W. Polowski, I. Wrońska, J. Wszolek, D. Toboła, J. Kalisz: Wykończeniowa obróbka nagniataniem tocznym i ślizgowym, Obróbka Metalu, 2012 nr 1, s. 34-41.
20. W. Rogowski: Rachunek efektywności inwestycji. Wyzwania teorii i praktyki, Wyd. Nieoczywiste, 2018 r.
21. R. Starosta, T. Dyl: Obróbka powierzchniowa, Gdynia 2008 r.
22. T. Dyl: Ballizing process impact on the geometric structure of the steel tubes, Solid State Phenomena, vol. 199, 2013, 384-389.
23. T. Dyl: Wpływ odkształcenia względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości i stopień umocnienia warstwy powierzchniowej po obróbce nagniataniem, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, Gdynia 2009, s. 100-104.
24. T. Dyl: Nagniatanie powierzchni płaskich elementów części maszyn okrętowych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 71, Eksploatacja Urządzeń Okrętowych, Gdynia 2011, 38-48.
25. T. Dyl: The Simulation Spreading Process of Steel Tubes Hollow, Solid State Phenomena 165, 2010, s. 3-18.
26. T. Dyl, K. Dolny: The influence of the burnishing on technological quality of elements of part shipping machines, Jurnal of Kones Powertrain and Transport, vol. 17, no. 2, 2010, 89-95.
27. T. Dyl: Wpływ gniotu względnego na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni powłok z faz między metalicznych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 60, Wyd. AM, Gdynia 2009, 94-99.

28. T. Dyl: Wpływ nagniatania na umocnienie elementów części maszyn okrętowych, Zeszyty Akademii Morskiej w Gdyni, nr 64, Wyd. AM, Gdynia 2010, 36-42.
29. T. Dyl, J. Jaroński: Wykorzystanie technologii nagniataniem do regeneracji elementów części maszyn okrętowych, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 178A, Gdynia 2009, 67-72.
30. L. Kukielka: Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym narzędziem, Wyd. Uczelniane Wyższej Szkoły inżynierskiej, Koszalin 1994 r.
31. W. Przybylski: Technologia obróbki nagniataniem, WNT, Warszawa 1987 r.
32. W. Przybylski: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, Gdańsk 2005 r.
33. S. Patyk, R. Błaszczków, L. Kukielka: Wpływ modułu umocnienia materiału, współczynnika tarcia i głębokości nagniatania tocznego na wartości i rozkład nacisków kontaktowych [w]: Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, (red.) W. Przybylski, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005 r.
34. A. Nakonieczny, I. Pokorska, J. Tacikowski, L. Stobierski i in.: Powierzchniowa obróbka plastyczna materiałów twardych, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, vol. 30, nr 1, 2010, 135-142.
35. B. Ściborski: Wybrane problemy nagniatania tocznego stali twardych ceramiką na tokarce CNC [w] Inżynieria Maszyn, r18 z 2, 2013r., str. 32-44.
36. K. Czechowski, W. Polowski, I. Wrońska, J. Wszolek: Wykończeniowa obróbka nagniataniem tocznym i ślizgowym [w] Obróbka Metalu, nr 1, 2012, 34-41.
37. K. Przybyłowicz: Metaloznawstwo, WNT Warszawa 1996, s. 273.
38. W. Przybylski: Nagniatanie powierzchni cylindrycznych, płaskich i kształtowych na tokarkach, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005 r.
39. L. A. Dobrzeński: Podstawy metodologii projektowania materiałowego, Gliwice 2009
40. O. H. Wyatt, D. Dew-Hughes: Wprowadzenie do inżynierii materiałowej, WNT, Warszawa 1978 r.
41. M. Blicharski: Inżynieria materiałowa, WNT, Warszawa 2017 r.
42. T. Dyl, D. Rydz, G. Stradomski: Nagniatanie staliwa typu duplex w aspekcie zwiększenia twardości i zmniejszenia chropowatości powierzchni, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni nr 10, Gdynia 2017 r.
43. B. Nowicki: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni, WNT, Warszawa, 1991 r.

44. W. Grzesik: wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn [w] *Mechanik* 8-9/2015, s. 587-593.
45. W. Zielecki: Modyfikowanie właściwości technologicznych i użytkowych stali wiązką laserową i elektronową, rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 1993 r.
46. A. Charchalis, W. Labuda: Wpływ nagniatania na poprawę właściwości eksploatacyjnych wałów pomp wodnych silników okrętowych, *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, nr 1, 2011r., s. 13-18.
47. A. Kułakowska, R. Patyk, Ł. Bohdal, P. Kołduński, J. Chodór: Wybrane aspekty ekoinnowacyjnej obróbki nagniataniem [w] *Rocznik Ochrona Środowiska, Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska*, Tom 18, 2016r., s. 478-492.
48. K. Czechowski, J. Kalisz: Wybrane aspekty procesu nagniatania [w] *Mechanik* nr 5-6/2015r., s. 452-455.
49. LIN Y. C., WANG S. W., LAI H.-Y., 2004, The relationships between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process, *Int J Adv Manuf Technol*, 23, s. 666-671.
50. J. Jasińska, G. Stradomski: Wpływ wybranych parametrów procesu nagniatania staliwa duplex GX2CrNiMoN22-5-3 na chropowatość powierzchni [w] A. Jakubus, A. Perec, J. Kostrzewa, (red.), *Technologie przyszłości. Inżynieria wytwarzania i konstrukcje maszyn*, Gorzów Wielkopolski 2021, s. 85-108.
51. G. Stradomski: Oddziaływanie morfologii fazy sigma na kształtowanie właściwości stali i staliwa duplex, Częstochowa 2016 r.
52. B. Kalandyk, R. Zapała, M. Starowicz: The Effect of Si and Mn on Microstructure and Selected Properties of Cr-Ni Stainless Steels, *Archives of Foundry Engineering*, Volume 17, Issue 1/2017, s. 192-196.
53. G. Stradomski, J. Jasińska, K. Laber, S. Sawicki: Wydzielanie się fazy sigma w trakcie odkształcania na gorąco stali duplex X2CrNiMoN25-7-4 [w] *Hutnik - wiadomości hutnicze*, t. 85, 2018, nr 2, s. 54-57.
54. G. Stradomski: The role of Carbon in the Mechanism of Ferritic-Austenitic Cast Steel Solidification, *Archives of Foundry Engineering*, Volume 14, Issue 3/2014 r.
55. H. Sieurin, R. Sandstrom: Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Materials Science and Engineering A*, vol. 444, 2007, s. 271-276.

56. M. Pohl, O. Storz, T. Glogowski: Effect of intermetallic precipitation on the properties of duplex stainless steel. *Materials Characterization* 58, 2007, s. 65-71.
57. M. Sozańska, J. Michalska: Qualitative and quantitative analysis of σ and χ phases in 2205 duplex stainless steel. *Materials Characterization* vol. 56, 2006, s. 355-362.
58. T. Koseki, T. Matsumiya, W. Yamada, T. Ogawa: Numerical modeling of solidification and subsequent transformation of Fe-Cr-Ni alloys. *Metalurgical and Materials Transactions A*, Volume 25, Issue 6, 1994, s. 1309-1321.
59. K. Ohsasa, S. Nakaue, M. Kudoh: Analysis of Solidification Path of {Fe-Cr-Ni} Ternary Alloy. *ISIJ International* vol. 35, nr 6, 1995, s. 625-636.
60. Z. Stradomski, D. Dyja: Characterization of Solidification and Solid State Transformation in Duplex Cast Steel: Thermo-Calc Investigation. *Archives of foundry engineering*, vol. 7, Issue 3, 2007, s. 269-272.
61. Hofmann von Eckhart, Roberto Dos Santos: Steuerung der Erstarrungs-morphologie austenitisch-ferritischer Superduplex-Stähle, *Giesserei* 91, 01/2004, s. 18-28.
62. N. Suutala, T. Takalo, T. Moiso: Ferritic-austenitic solidification mode in austenitic stainless steel welds. *Metallurgical Transactions A*, vol. 11A, 1980, s. 717-725.
63. K. Rajasekhart, C.S. Harendranath, R. Raman, S.D. Kulkarni: Microstructural evolution during solidification of austenitic stainless steel weld metals: a color metallographic and electron microprobe analysis study. *Materials Characterization*, vol. 38, 1997, s. 53-65.
64. H. Bhadeshia, S.A. David, J.M. Vitek: Solidification Sequences in Stainless Steel Dissimilar Alloy Welds. *Materials Science and Technology*, vol.7, 1991, s. 50-61.
65. C. J. Long, W.T. DeLong: The ferrite content of austenitic stainless steel weld metal. *Welding Research Supplement*, vol. 52, 1973, s. 281-297.
66. Y. H. Park, Z. H. Lee: The effect of nitrogen and heat treatment on the microstructure and tensile properties of 25Cr-7Ni-1.5Mo-3W-xN duplex stainless steel castings. *Materials Science and Engineering A* 297, 2001, s. 78-84.
67. H. Sieurin, R. Sandstrom: Austenite reformation in the heat-affected zone of duplex stainless steel 2205. *Materials Science and Engineering A*, 418, 2006, s. 250-256.
68. M. A. Martorano, C. F. Tavares, A. F. Padilha: Predicting Delta Ferrite Content in Stainless Steel Casting. *ISIJ International*, vol. 52, n.6, 2012, s. 1054-1065.
69. W. Wołczyński: Effect of the back-diffusion onto doublet structure formation and solute redistribution within alloys solidifying directionally, with or without

- Convection. Polish Academy of Sciences, Institute of Metallurgy and Materials Science, Kraków 2002.
70. G. Xia, C. Bernard, S. Ile, C. Fuerst: A Study about the Influence of Carbon Content in the Steel on the Casting Behavior. *Steel Research International*, vol. 82, issue 3, 2011, s. 230-236.
71. A. Grill, J. K. Brimacombe: Influence of carbon content on rate of heat extraction in the mould of a continuous-casting machine. *Ironmaking and Steelmaking*, 3(2), 1976, s. 76-79.
72. L. A Zabdyr: *Strategia CALPHAD*, IMIM PAN, Kraków 2005 r.
73. V. Shankar, T. P. S. Gill, S. L. Mannan, S. Sundaresan: Solidification cracking in austenitic stainless steel welds. *Sādhanā*, vol. 28, parts 3&4, 2003, s. 359-382.
74. M. Matthews: Properties of duplex austenitic ferritic stainless steels. *Metal & Mater. Technol*, vol. 14, nr 5, 1982, s. 205.
75. Z. Stradomski, S. Stachura, D. Dyja, A. Zyska: Technologiczne problemy wytwarzania masywnych odlewów ze staliwa duplex w aspekcie optymalizacji procesu produkcyjnego [w] *Archiwum odlewnictwa 17*, PAN, Katowice 2005 r.
76. J. Głownia, D. Szczypkowski, B. Kalandyk, J. Górniok, S. Sobuła: Niskowęglowe staliwo ferrytyczno-austenityczne (F-A) na odlewy pomp. *Przegląd Odlewnictwa: miesięcznik naukowo-techniczny, Stowarzyszenie Techniczne Odlewników Polskich*, Kraków, t. 58, nr 12, 2008, s. 616-621.
77. J. Głownia, J. Banaś, M. Paszek, M. Brzeziński, T. Rutkowski, J. Bujas: Pompy dla górnictwa ze staliwa ferrytyczno-austenitycznego. *Przegląd Odlewnictwa* 6, 1992, s. 213-217.
78. S. H. Jeon, S.T. Busby: *Cast Stainless Steel Aging Research Plan*. Materials Science & Technology Division Oak Ridge National Laboratory, 2013 r.
79. G. Stradomski, Z. Stradomski, D. Denis-Brewczyńska: The change of solidification mechanizm of ferritic-austenitic cast steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2014, s. 58-64.
80. R. N. Gunn: *Duplex stainless steel*. London-Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.199.
81. D. Bartocha: Wytop staliwa dwufazowego sposobem odzyskowym [w] *Archives of foundry engineering* 3/2014 r.

82. B. Kalandyk: Characteristics of microstructure and properties of castings made from ferritic-austenitic steel. Archives of Foundry Engineering. Katowice-Gliwice (in Polish) 2012.
83. Patent nr 228538 na wynalazek pt: Sposób odśrodkowego odlewania wyrobów małowagabarytowych ze staliwa ferrytyczno-austenitycznego, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 6.04.2018 r.
84. G. Stradomski: Wpływ struktury pierwotnej stali duplex GX2CrNiMoN25-6-3 oraz GX2CrNiMoCuN25-6-3-3 na jej plastyczność [w] Hutnik – Wiadomości hutnicze t. 82, 2015, nr 1, str. 122-125.
85. PN-EN10283:2019 Odlewy ze staliwa odpornego na korozję.
86. M. Kułakowski, K. Rokosz: Stopowe stale austenityczne, ferrytyczne i duplex używane w transporcie [w] Autobusy, 7-8/2017r., s. 357-362.
87. Nowacki: Stal duplex w konstrukcjach spawanych. WNT, Warszawa 2013 r.
88. J. Nowacki: Stal duplex i jej spawalność. Przegląd spawalnictwa 10-2008, s. 34-44.
89. J. Nowacki: Stal duplex i jej spawalność. WNT, Warszawa 2009 r.
90. B. Kalandyk, J. Kasińska, A. Skrzypczyk: Surfacing 24Cr-5Ni-2.5Mo Duplex Steel Castings by TIG. Archives of Foundry Engineering, Volume 18, Issue 2/2018, s. 15 -20.
91. https://www.worldstainless.org/files/issf/Education/Polish/Module_11_Zrownowazony_rozwoj_stali_nierdzewnych.pdf, odczyt z dnia 1.06.2021 r.
92. J. Tybulczyk, J. Piotrowski: Foresight technologiczny. Przewidywanie rozwoju Odlewnictwa z uwzględnieniem jego znaczenia dla gospodarki. Część I. Analiza foresightu światowego, Odlewnictwo-Nauka i Praktyka, Zeszyt Specjalny 3, Instytut Odlewnictwa, Kraków 2004 r.
93. <http://pioma-odlewnia.com.pl/kontakt/>: odczyt z dnia 20.12.2021 r.
94. <http://www.loa.com.pl/kontakt.html>: odczyt z dnia 20.12.2021 r.
95. https://gzut.pl/odlewnia/#odlewy_ze_staliwa: odczyt z dnia 20.12.2021 r.
96. A. Kułakowska, R. Patyk, Ł. Bohdal: Zastosowanie obróbki nagniataniem w tworzeniu ekologicznego produktu [w] Rocznik Ochrona Środowiska , tom 16, 2014, s. 323-335.
97. A. Kułakowska: Problems of surface preparation under burnishing rolling in aspect of product quality. Steel Research International, 2010 vol. 81/9, s. 218–221.
98. M. Gornowicz, K. Romaniuk, G. Szczubelek: Ekonomia Produkcji, UWM, Olsztyn 2014 r.

99. W. Janik, A. Paździor, M. Paździor: Analiza ekonomiczna działalności przedsiębiorstwa. Politechnika Lubelska, 2017 r.
100. A. Poznańska, A. Mikrut: Wybrane metody oceny efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych. Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie, 1(12)/2009 r.
101. R. Kata: Społeczne aspekty w rachunku efektywności inwestycji komunalnych. *Finanse Komunalne*, 2014, nr 11, s. 5-13.
102. M. Szafrąński: Elementy ekonomiki jakości w przedsiębiorstwach, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007 r.
103. J. Schumpeter: Teoria rozwoju gospodarczego, PWN, Warszawa 1960, s. 140.
104. P. Kotler: Marketing. Analiza, planowanie, wdrażanie i kontrola, Felberg, Warszawa 1999, s. 322.
105. P. R. Whitfield: Innowacje w przemyśle. PWE, Warszawa 1979, s. 29.
106. J. Penc: Strategie zarządzania i ich realizacja-zarządzanie strategiczne, Placet, Warszawa 1995, s. 67.
107. S. Kwiatkowski: Społeczeństwo innowacyjne, PWN, Warszawa 1990, s. 38.
108. S. Kasprzyk: Innowacje, od koncepcji do produkcji, Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1980, s. 26.
109. P. Hildreth, C. Kimble: Knowledge Networks: innovation Through Communities of Practice, Idea Group Publishing, London 2004, s. 81.
110. A. Hargadon, R. I Sutton: Building Innovation Factory, Harvard Business Review, vol. 78 nr 3, 2000, s. 157-166.
111. E. Mansfield: Industrial Research and Technological Innovation, w.w. Northon, New York 1968, s. 83.
112. M. A. West, J.L. Farr: Innovation at work, Wiley, Chichester, 1990 r.
113. N. King, M.A. West: Experience of Innovation at Work [w] Journal of Managerial Psychology, vol. 2, nr 3, 1987 r.
114. A. H. Jasiński: Innowacje i transfer techniki w procesie transformacji, Difin, Warszawa 2006 r.
115. E. Stawasz: Innowacje a mała firma, Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 1999, s.18.
116. M. Brzeziński (red): zarządzanie innowacjami technicznymi i organizacyjnymi, wyd. Difin, Warszawa 2001, s. 20.
117. OECD/Eurostat (2018), Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific,

- Technological and Innovation Activities, OECD Publishing, Paris/Eurostat, Luxembourg.
118. <https://www.oecd.org/science/inno/2367614.pdf>, odczyt z dnia 12.12.2021 r.
119. A. Z. Nowak, T. Zalega: Makroekonomia, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2015 r.
120. Z. Korzeb (red.): Comparative analysis of the conditions of banking operation inside and outside the Euro area. The examples of Poland and Spain, Delta Publica-tiones 2017 r.
121. K. Piotrowska: Innowacja jako przedmiot rachunkowości. Identyfikacja procesu innowacyjnego, Zeszyty Naukowe PTE, Kraków 2014 r.
122. P. Felis: Metody i procedury oceny efektywności inwestycji rzeczowych przedsiębiorstw. Wyd. Wyższej Szkoły Ekonomiczno-Informatycznej, Warszawa 2005 r.
123. M. Szafrński: Elementy ekonomiki jakości w przedsiębiorstwach, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2007 r.
124. A. Koliński: Przegląd metod i technik oceny efektywności procesu produkcyjnego [w] Logistyka-nauka, 5/2011.
125. S. Lis (red.): Vademecum produktywności, Placet, Warszawa 1999 r.
126. R. Dzik, S. Marciniak: Możliwości wykorzystania zespolonej metody oceny efektywności w obszarze ochrony środowiska [w]: Gąsiorowski L. (red.): Zarządzanie produkcją, Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Warszawa 2008 r.
127. M. Romanowski, K. Nadolny, B. Bałasz: Metody analityczne w ocenie efektywności procesów produkcyjnych, wydanie internetowe:
http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2018/T1/2018_t1_322.pdf,
odczyt z dnia 26.08.2020 r.
128. E. Skrzypek: Jakość i efektywność, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2000 r.
129. R. Dzik, E. Gąsiorowska: Metody oceny efektywności procesu produkcyjnego [w] Logistyka-nauka, 4/2015 r.
130. A. Kosieradzka: Zarządzanie produktywnością w przedsiębiorstwie, C.H. Beck, Warszawa, 2012 r.
131. D. Waters: Zarządzanie operacyjne. Towary i Usługi, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2007 r.

132. R. Piętowska-Laska: Doskonalenie produktywności we współczesnych przedsiębiorstwach. *Economy and Management*, 2/2012 r.
133. L. Koziół: Istota i ocena produktywności [w] L. Koziół (red.). *Prace z zakresu zarządzania. Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie*, z. 5, Tarnów 2004 r.
134. M. E. Porter: *The Competitive Advantage of Nations*, The Free Press, A Division of Macmilan, New York 1990 r.
135. B. Kalandyk: The characteristics of two-phase 22Cr-6Ni-2Mo-1,5Cu cast steel. *Archives of Foundry Engineering*, Volume 8, Issue 4/2008, s. 61-64.
136. PN-EN ISO 4288:2011 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa - Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni.
137. J. Greń: *Statystyka matematyczna, modele i zadania*, PWN, Warszawa 1974 r.
138. T. Warchała: *Matematyczne metody planowania doświadczeń*, Częstochowa, 1978 r.
139. PN-EN ISO 1302:2004 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Oznaczenie struktury geometrycznej powierzchni w dokumentacji technicznej wyrobu.
140. S. Kocanda: *Zmęczenie niszczeniowe metali*, WNT, Warszawa 1978 r.
141. T. Możaryn, M. Wójtowicz, A. Strąk: Korozja i zabezpieczanie konstrukcji stalowych, Stale odporne na korozję [w] *Przegląd budowlany* 9/2016, s. 45-50.
142. K. Czechowski, J. Kalisz: Wybrane aspekty procesu nagniatania [w] *Mechanik* 5-6/2015, s. 452-455.
143. A. Ossowska, J. Łabanowski: *Wpływ nagniatania na właściwości stali duplex stosowanych na elementy instalacji chemicznych*, 2005 r.
144. T. Burakowski: *Areologia. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2013 r.