

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

**WYDZIAŁ BUDOWNICTWA,
MECHANIKI I PETROCHEMII**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Paweł Kraśniewski

**Zwiększanie trwałości eksploatacyjnej sworzni łańcuchowych
ze stali 42CrMo4 z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań
inżynierii powierzchni**

**Increasing Durability of Chain Pins Made of 42CrMo4 Steel
With the Use of Modern Solutions Surface Engineering**

**Promotor
Dr hab. Ewa Maria Kasprzycka**

**Promotor pomocniczy
Dr inż. Bogdan Bogdański**

Płock 2021

Autor składa serdeczne podziękowania:

Promotorowi dr hab. Ewie Kasprzyckiej

Opiekunowi naukowemu prof. dr. hab. inż. Jerzemu Smolikowi

Promotorowi pomocniczemu dr. inż. Bogdanowi Bogdańskiemu

za pomoc, wsparcie oraz za okazaną mi życzliwość.

*Dziękuję, że mimo ogromu zajęć zawsze mieli Państwo dla mnie
czas oraz cenne rady, które były nieocenioną pomocą w opracowaniu
niniejszej pracy*

Rodzinie

za wsparcie i wyrozumiałość przez wszystkie lata edukacji

Spis treści

STRESZCZENIE	7
ABSTRACT	8
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	9
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW ANGLOJĘZYCZNYCH	10
1. WPROWADZENIE.....	11
2. STAN WIEDZY	13
2.1. Charakterystyka łańcuchów napędowych	13
2.1.1. Rys historyczny	13
2.1.2. Znaczenie łańcuchów napędowych w przemyśle.....	14
2.1.3. Rodzaje łańcuchów	16
2.1.4. Mechanizmy zużycia drabinkowych łańcuchów rolkowych	20
2.1.5. Metody stosowane dla zwiększania trwałości łańcuchów napędowych	25
2.2. Nowoczesne techniki inżynierii powierzchni stosowane dla zwiększenia trwałości i niezawodności części maszyn	28
2.2.1. Techniki inżynierii powierzchni i ich rozwój	28
2.2.2. Techniki PVD.....	30
2.2.3. Metoda odparowania łukiem elektrycznym – Arc Evaporation.....	33
2.2.4. Właściwości tribologiczne powłok PVD	34
2.3. Powłoki węglowe diamentopodobne.....	36
3. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA.....	40
4. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY.....	42
4.1. Cel i teza pracy	42
4.2. Zakres pracy	43
5. METODYKA BADAŃ	45
5.1. Materiały do badań	45
5.2. Próbkki do badań.....	45
5.3. Sposób wytwarzania powłok.....	47
5.4. Badanie budowy powłok	52
5.4.1. Badanie morfologii, budowy i składu chemicznego i fazowego powłok	52
5.4.2. Badania grubości powłok	54
5.5. Badania chropowatości powłok.....	55
5.6. Pomiary twardości i modułu Younga	56
5.7. Metody oceny adhezji powłok do podłoża stali	58
5.7.1. Badania adhezji metodą wciskania wgłębnika.....	58
5.7.2. Badania adhezji metodą zarysowania	60
5.8. Badania odporności na zużycie ściernie	61

5.9. Badania odporności korozyjnej	63
6. WYNIKI BADAŃ	64
6.1. Budowa powłok	64
6.1.1. Morfologia powierzchni powłok, ich budowa i skład chemiczny	64
6.1.2. Wyniki pomiarów grubości powłok za pomocą kulotestera	74
6.2. Chropowatość powłok	76
6.3. Twardość i moduł Younga	78
6.4. Wyniki badań adhezji	80
6.4.1. Wyniki badań adhezji metodą wciskania wgłębnika	80
6.4.2. Wyniki badań adhezji metodą zarysowania	81
6.5. Wyniki badań odporności na zużycie ściernie metodą kula-tarcza	86
6.6. Wyniki badań odporności na korozję	90
7. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ	92
8. WNIOSKI	97
9. LITERATURA	98
10. SPIS TABLIC	107
11. SPIS RYSUNKÓW	108

STRESZCZENIE

Przedmiotem badań w pracy była ocena możliwości zwiększenia trwałości łańcuchów napędowych stosowanych w przemyśle, za pomocą nowoczesnych rozwiązań inżynierii powierzchni. W badaniach skoncentrowano się nad poprawą właściwości głównego elementu konstrukcyjnego łańcucha – sworznia, który podczas eksploatacji ulega zużyciu ściernemu, co powoduje wydłużanie łańcucha. Przeprowadzono analizę i badania własne czynników niszczących sworznie w łańcuchach napędowych, które wykazały, że głównym czynnikiem niszczącym, w tym przypadku, jest zużycie ściernie. Jako czynnik niszczący, uwzględniono również oddziaływanie korozyjne środowiska. Do badań wybrano powłokę dwuwarstwową, typu W/W-DLC, zbudowaną z dwóch stref: zewnętrznej powłoki diamentopodobnej typu a-C:H:W modyfikowanej wolframem oraz międzywarstwowej z czystego wolframu, osadzonej na powierzchni stali 42CrMo4, metodą Arc PVD (Arc Physical Vapour Deposition). Ponadto, przeprowadzono badania powłoki dwuwarstwowej, typu Cr/Cr-DLC, zbudowanej z zewnętrznej powłoki diamentopodobnej typu a-C:H:Cr modyfikowanej chromem z międzywarstwą z chromu. Dla porównania przeprowadzono badania powłoki jednowarstwowej zbudowanej z czystego chromu, typu Cr, osadzonej metodą Arc PVD. W badaniach budowy powłok zastosowano następujące metody: mikroskopię skaningową (SEM+EDS+BSE), rentgenowską analizę fazową, pomiary grubości powłok za pomocą kulotestera. Badania chropowatości powłok wykonano za pomocą profilografu. Badania właściwości mechanicznych powłok, obejmujące pomiar twardości i modułu Younga, wykonano za pomocą Nano-Hardness Testera. Adhezję warstw do podłoża stali określono metodą wciskania wgłębnika Rockwella oraz za pomocą testu zarysowania. Właściwości tribologiczne warstw określano metodą kula-tarcza. Odporność na korozję określono metodami elektrochemicznymi. Wykazano, że odporność na zużycie ściernie powłok typu W/W-DLC jest bardzo dobra, w odróżnieniu od odporności na ścieranie powłok typu Cr/Cr-DLC oraz powłok typu Cr. Ponadto powłoki typu W/W-DLC wykazują odporność na korozję w środowisku zawierającym jony chlorkowe. Tym samym udowodniono tezę przyjętą w pracy, że zwiększenie trwałości sworzni, stanowiących główny element konstrukcyjny łańcuchów napędowych, stosowanych powszechnie w przemyśle, można uzyskać przez wytworzenie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem, typu W/W-DLC, osadzonej metodą Arc PVD dwuetapowo, najpierw przez nałożenie czystego wolframu na powierzchnię stali, a następnie powłoki DLC typu a-C:H:W.

Słowa kluczowe: obróbka PVD, powłoka DLC, właściwości tribologiczne, korozja

ABSTRACT

The subject of research in the work was to assess the possibility of increasing the durability of drive chains used in industry, using modern surface engineering solutions. The research focused on improving the properties of the main structural element of the chain - the pin, which undergoes abrasive wear during operation, which causes the chain to elongate. An analysis and own tests of the factors destroying pins in drive chains were carried out, which showed that the main destructive factor, in this case, is abrasive wear. The corrosive effect of the environment was also taken into account as a destructive factor. A two-layer coating, W/W-DLC type, consisting of two zones: an external diamond-like coating, type a-C: H: W modified with tungsten, and pure tungsten interlayer, deposited on the surface of 42CrMo4 steel, using the Arc Physical Vapor Deposition method, was selected for the tests. In addition, tests were carried out on a two-layer Cr/Cr-DLC type coating made of an external diamond-like coating of the a-C:H:Cr type modified with chromium with a chromium interlayer. For comparison, tests of a single-layer coating made of pure chromium, type Cr, deposited by the Arc PVD method were carried out. The following methods were used in the research on the structure of the coatings: scanning microscopy (SEM+EDS+BSE), X-ray phase analysis, coating thickness measurements with a coulometer. The roughness of the coatings was tested using a profilograph. The tests of the mechanical properties of the coatings, including the measurement of hardness and Young's modulus, were performed using the Nano-Hardness Tester. The adhesion of the layers to the steel substrate was determined by the Rockwell indentation method and by the scratch test. The tribological properties of the layers were determined by the ball-disk method. Resistance to corrosion was determined by electrochemical methods.

It has been shown that the abrasion resistance of W/W-DLC coatings is very good, in contrast to the abrasion resistance of Cr/Cr-DLC coatings and Cr coatings. In addition, W/W-DLC coatings show corrosion resistance in an environment containing chloride ions. Thus, the thesis adopted in the study was proven that increasing the durability of pins, which are the main structural element of drive chains, commonly used in industry, can be obtained by producing a tungsten-modified diamond-like coating, type W/W-DLC, deposited by the Arc PVD method in two stages, first by applying pure tungsten to the steel surface, and then DLC coating type a-C:H:W.

Keywords: *PVD treatment, DLC coating, tribological properties, corrosion*

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

μ	– współczynnik tarcia [μm]
A	– pole powierzchni odcisku po obciążeniu [μm^2]
E	– moduł Younga [GPa]
F_{max}	– maksymalne obciążenie wgłębnika [mN]
g	– grubość powłoki [μm]
h	– zagłębienie wgłębnika [nm]
h_{max}	– maksymalne zagłębienie wgłębnika [nm]
h_f	– głębokość zagłębienia po zdjęciu obciążenia wgłębnika [nm]
HV	– twardość [Vickers]
I	– natężenie prądu [A]
P	– obciążenie węzła tarcia [N]
p	– ciśnienie [Pa]
R	– promień kuli trącej [mm]
T	– temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
t	– czas [s]
U_{bias}	– napięcie [V]
V	– prędkość poślizgu [m/s]
W_z	– wskaźnik zużycia [$\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{km}$]
Z_{obj}	– zużycie objętościowe materiału próbki [mm^3]
E_{kor}	– potencjał korozji [mV]
I_{kor}	– gęstość prądu korozji [$\mu\text{mA}/\text{cm}^2$]

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW ANGLOJĘZYCZNYCH

Arc PVD (*Arc Evaporation*) – metoda odparowania łukiem elektrycznym

BSE (*Backscattered Electron*) – elektrony wstecznie rozproszone

DLC (*Diamond Like Carbon*) – powłoka diamentopodobna

EB PVD (*Electron Beam Evaporation*) – metoda odparowania wiązką elektronów

EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) – analiza składu chemicznego

GIMS (*Gas Injections Magnetron Sputtering*) – metoda rozpylania magnetronowego z impulsowym wtryskiem gazu

MS (*Magnetron Sputtering*) – rozpylanie magnetronowe

CVD (*Chemical Vapour Deposition*) – chemiczne osadzanie z fazy gazowej

PVD (*Physical Vapour Deposition*) – fizyczne osadzanie z fazy gazowej

SE (*Secondary Electrons*) – elektrony wtórne

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) – skaningowy mikroskopia elektronowa

WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*) – spektroskopia z dyspersją długości fali

1. WPROWADZENIE

Praca dotyczy zwiększenia trwałości łańcuchów napędowych, stosowanych w przemyśle, za pomocą nowoczesnych rozwiązań inżynierii powierzchni. Łańcuchy napędowe, powszechnie wykorzystywane w przemyśle do przenoszenia napędu, pracują w różnych warunkach eksploatacyjnych. W zależności od aplikacji, narażone są na oddziaływanie szeregu czynników powodujących niszczenie elementów składowych łańcuchów podczas eksploatacji, takich jak np. zużycie przez tarcie, wysokie obciążenia rozciągające, czy też oddziaływania korozyjne środowiska¹. Przykład stanowią łańcuchy wykorzystywane w rolnictwie, narażone na osiadanie pyłu pochodzącego z podłoża, czy też łańcuchy wykorzystywane w górnictwie ulegające degradacji wskutek udziału pyłu węglowego w procesach tarcia sprawności. Dynamiczny rozwój przemysłu w ostatnich latach stawia nowe wyzwania co do jakości wytwarzanych części maszyn i urządzeń, w zakresie ich wydajności i wielofunkcyjności, powodując, że nowym rozwiązaniom konstrukcyjnym przekładni łańcuchowych stawiane są coraz większe wymagania w zakresie obciążeń, szybkości i precyzji ruchu, a także trwałości². Sprostanie tym wymaganiom nie jest możliwe przy zastosowaniu tradycyjnych metod obróbki powierzchni elementów łańcuchów, takie jak obróbka cieplno-chemiczna³, np. nawęglanie^{4,5}, chromowanie dyfuzyjne^{6,7}, czy też obróbka galwaniczna, np. chromowanie galwaniczne^{8,9}.

Według danych literaturowych, zapewnienie nowych, nieosiągalnych dotąd właściwości funkcjonalnych części maszyn i urządzeń można uzyskać przez zastosowanie nowoczesnych technik inżynierii powierzchni m.in. technik PVD (ang. Physical Vapour Deposition), realizowanych z udziałem plazmy, przy obniżonym ciśnieniu^{10,11}.

¹Sappok D., Gummer A., Sauer B.: Experimental and analytical wear studies of bush- and rolle chain chains. w: Proceedings of the 5th World Tribology Congress (WTC '13) , Torino, Włochy, 2013

² EU Patent: 13767000.6-1655; BE/01.10.12/BEA201200651; Improved caster wheel assembly of a pickup for an agricultural mahine. 27.09.2013. Autorzy: Dumarey R., Choluj M., Domalewski R., Bucharzewski M., Kraśniewski P., Okrasko A., Szyjkowski Ł., Ziembicki Ł.

³ ASM Handbook, vol. 4, "Steel Heat Treatment". Totten G. E., Howes M.A.H. (EdsInc., New York –Hong-Kong, 1997

⁴Edenhofer B.: Technology, advantages and applications of direct-feed atmospheres for carburizing. Heat Treatment of Metals, 3, 1995, 55–60

⁵ Michalski J.: Nawęglanie, węgloazotowanie, azotowanie – tendencje rozwojowe. IV. Seminarium SECO/WARWICK 2000

⁶ Kasprzycka E.: Chromizing, in: Encyclopedia of Tribology. Wang, Q. Jane and Chung, Yip-Wah (Eds.), Springer-Verlag, New York Inc, Vol. 1, 2013, 382-387

⁷ Młynarczyk A.: Modyfikowanie budowy i właściwości jedno- i wieloskładnikowych dyfuzyjnych warstw węglików chromu, wanadu i tytanu wytwarzanych na stalach metodą proszkową. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005

⁸ Roberge P. R., Handbook of corrosion engineering, Second Edition. McGraw-Hill, USA, 2012

⁹ Poradnik Galwanotechnika. Praca zbiorowa. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 2002

¹⁰ Mazurkiewicz A., Smolik J.: Zaawansowane technologie inżynierii powierzchni wspomagające procesy eksploatacji i wytwarzania, Wydawnictwo ITeE-PIB, Radom 2015

¹¹ Mazurkiewicz A.: Knowledge transfer mechanisms for advanced surface engineering technologies. Heat Treatment and Metals. International Heat Treatment and Surface Engineering, vol.1, no 3, October 2007,108÷113

Wymagania stawiane współczesnym technikom wytwarzania warstw powierzchniowych dotyczą przede wszystkim ich energooszczędności, bezpieczeństwa technicznego oraz braku skażenia naturalnego środowiska człowieka¹². Do takich technik można zaliczyć nowoczesne metody PVD (*Physical Vapour Deposition*), których dynamiczny rozwój nastąpił w ostatnich latach^{13,14}.

Bardzo ważnym warunkiem prawidłowej pracy przekładni łańcuchowej jest stabilność wymiarowa łańcucha, o której decyduje stopień zużycia poszczególnych elementów łańcucha¹⁵. Działanie obciążeń rozciągających przy jednoczesnym zużywaniu się poszczególnych elementów łańcucha w procesie zużycia ściernego powoduje wydłużanie łańcucha. Szczegółowa analiza mechanizmów zużycia łańcuchów, przeprowadzona w niniejszej pracy wykazała, że głównym elementem konstrukcyjnym łańcucha ulegającym zużyciu ściernemu i powodującym wydłużanie łańcucha jest sworzeń.

Przedmiotem badań w pracy była ocena możliwości zwiększenia trwałości eksploatacyjnej sworzni łańcuchowych, przez zastosowanie nowoczesnych rozwiązań inżynierii powierzchni, technik PVD.

Na podstawie szczegółowej analizy właściwości powłok wytwarzanych metodami PVD, do badań wybrano powłoki diamentopodobne DLC (*Diamond-Like Carbon*) oraz powłoki z czystego chromu. Powłoki DLC charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia, wysokim modułem sprężystości, odpornością na kruche pękanie, niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej oraz odpornością na korozję^{16,17}. Z tego też względu są one wykorzystywane w inżynierii powierzchni jako materiał stosowany w systemach tribologicznych o niskim współczynniku tarcia i dużej odporności na zużycie przez tarcie¹⁸.

¹² Prawo ochrony środowiska. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r. (Dz. U. Nr 62, poz. 627, 2001)

¹³ Wendler B. G.: Functional coatings by PVD or CVD methods. Wyd. Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute (ITeE – PIB), Radom 2011

¹⁴ Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Edited by: D.M. Mattox, Elsevier, 2010

¹⁵ Sappok D., Gummer A., Sauer B.: Experimental and analytical wear studies of bush- and rolle chain chains, Proceedings of the 5th World Tribology Congress (WTC '13), Torino, Włochy, 2013

¹⁶ Donnet C., Erdemir A. (Ed.): Tribology of Diamond-like Carbon Films - Fundamentals and Applications, Springer, New York, 2008

¹⁷ Madej M.: Właściwości systemów tribologicznych z powłokami diamentopodobnymi. Monografia 46. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2013

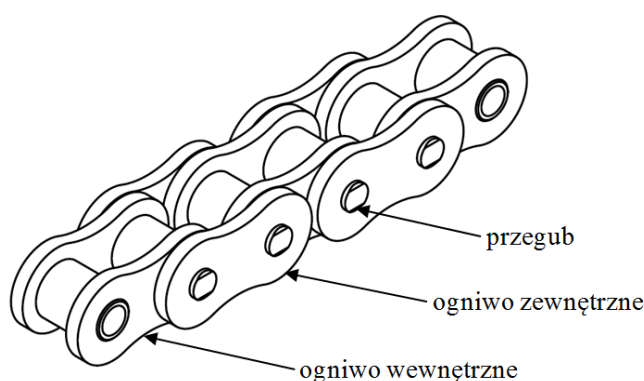
¹⁸ Hauert R.: An overview on tribological behaviour of diamond-like carbon in technical and medical applications. Tribology International 37, 2004, 991-1003

2. STAN WIEDZY

2.1. Charakterystyka łańcuchów napędowych

2.1.1. Rys historyczny

Łańcuch drabinkowy zwany również ciągnem jest powszechnie stosowanym środkiem do przenoszenia ruchu i znajduje swoje zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu. Jest on złożony z szeregu podobnych do siebie elementów zwanych ogniwami, połączonych ze sobą przegubowo przy pomocy sworzni, tworzących jedną całość, dając jednocześnie dużą zmienność kształtu w jednej płaszczyźnie (Rys.1) ^{19,20}.



Rys. 1. Widok łańcucha drabinkowego

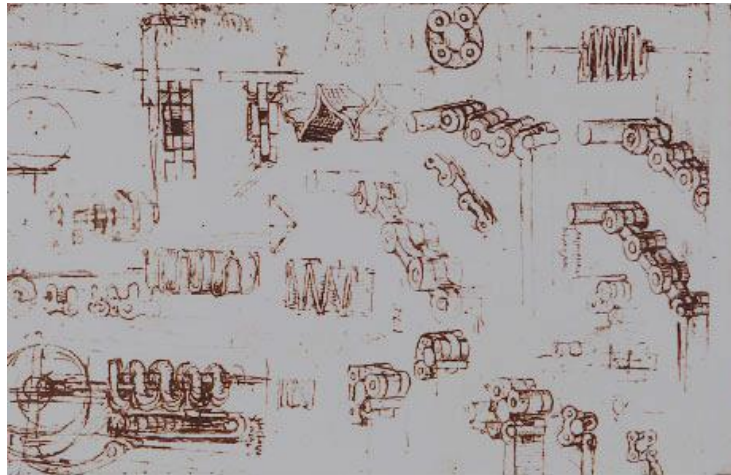
/Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Wynalazcą drabinkowego łańcucha rolkowego był Hans Renold w roku 1880. Natomiast pierwsze szkice łańcucha drabinkowego sięgają XVI wieku i zostały wykonane przez Leonarda Da Vinci, wg. którego, łańcuch miał służyć wyłącznie jako ciągnio, bez opasywania napędowych elementów roboczych. Zbudowany był wyłącznie z płytek bocznych połączonych ze sobą poprzecznymi sworzniami. Szkice łańcucha drabinkowego wykonane przez Leonarda Da Vinci pokazano na rysunku 2. Pod koniec XIX wieku, nastąpił znaczący rozwój konstrukcji łańcucha drabinkowego, w wyniku którego Francuz o imieniu Gull uzyskał patent na łańcuch do wykorzystania w rowerze. Łańcuch ten o nazwie „*Gull Chain*” wciąż używany jest w tej aplikacji. Jeszcze w XIX wieku dokonano kolejnej zmiany w konstrukcji łańcucha drabinkowego. W celu zwiększenia jego trwałości zastosowano dodatkową tuleję spełniającą funkcję łożyska ślizgowego o dużej powierzchni współpracy ze sworzniem, chroniąc w ten sposób sworzeń przed punktowym zużyciem przez wycieranie ²¹.

¹⁹ Pedersen S.L.: Model of Contact between rollers and sprockets in chain-drive systems. Archive of Applied Mechanics, 74 (7) 2005, 489-508

²⁰ Potrykus J.: Poradnik Mechanika. Wyd. REA-SJ 2020

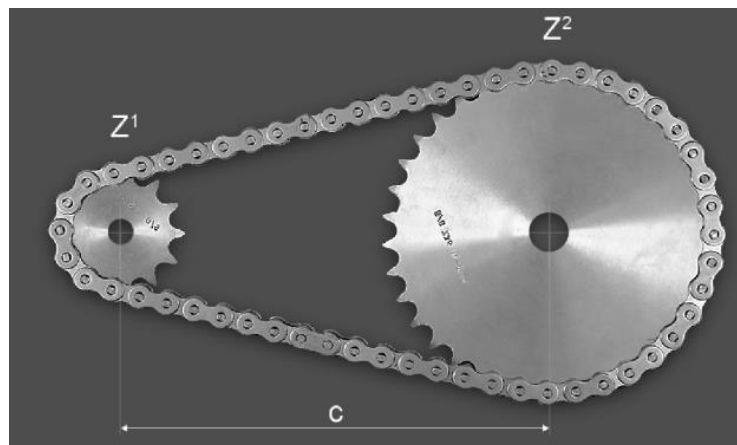
²¹ The Complete Guide to Chain. Kogyo Chosaki Publishing Co., Ltd. p. 240, www.chain-guide.com



Rys. 2. Pierwsze szkice łańcucha wykonane przez Leonarda Da Vinci

/Źródło: The Complete Guide to Chain, Kogyo Chosaki /www.chain-guide.com/

Łańcuchy drabinkowe współpracują z kołami łańcuchowymi, tworząc elementarną przekładnię łańcuchową, będącą podstawowym zespołem przenoszenia ruchu obrotowego o zadanym obciążeniu, prędkości i na określoną odległość. Rysunek 3 przedstawia typowy przykład zastosowania łańcucha drabinkowego w elementarnej przekładni łańcuchowej o przełożeniu $i=z_2/z_1$ i odległości osi kół c , stosowanej powszechnie w maszynach i urządzeniach przemysłowych.



Rys. 3. Schemat typowej przekładni łańcuchowej: z^1 – ilość zębów koła napędowego, z^2 – ilość zębów koła napędzanego, c – odległość osi kół

/Źródło: Opracowanie własne na podstawie „Mały poradnik mechanika”, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1994/

2.1.2. Znaczenie łańcuchów napędowych w przemyśle

Przekładnie łańcuchowe, obok przekładni pasowych oraz linowych, należą do najbardziej rozpowszechnionych przekładni cięgnowych i spełniają bardzo ważną rolę w przemyśle. W

wielu aplikacjach są one niezastąpione, ze względu na swoje podstawowe cechy, takie jak możliwość przenoszenia ruchu na dużą odległość, przenoszenie dużych obciążeń oraz działanie przy dużych prędkościach obrotowych i praktycznie znikomej wrażliwości na zmiany temperatury, którymi to cechami nie dysponują np. przekładnie hydrauliczne. Dodatkowo przekładnie łańcuchowe charakteryzują się znacznie prostszą budową oraz niższą ceną w porównaniu np. z wymienionymi już układami hydraulicznymi. W porównaniu z przekładniami pasowymi przekładnia łańcuchowa pracuje bez poślizgu, zachowując stałe przełożenie przy stosunkowo dużej sprawności, sięgającej 98% . W przekładniach łańcuchowych nie jest również konieczne wstępne napięcie cięgna, które przekłada się na dodatkowe obciążenie elementów składowych przekładni, takich jak wały i łożyska.

Przekładnie łańcuchowe są wykorzystywane jako elementy przenoszenia ruchu w wielu gałęziach przemysłu, w tym m.in.: przemyśle wydobywczym – jako łańcuchy napędowe do transportu urobku, przemyśle budowlanym – jako łańcuchy napędowe przenośników, podnośników, dźwigów, a także w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym jako łańcuchy napędowe wielu złożonych mechanizmów.

Ze względu na stosunkowo prostą konstrukcję łańcuchów, możliwa jest pełna automatyzacja ich produkcji, co istotnie obniża ich cenę i tym samym zwiększa ich dostępność. Do wiodących światowych producentów łańcuchów zalicza się takie firmy, jak: Renold (Anglia)²², Tsubaki (Japonia)²³, Iwis (Niemcy)²⁴, Donghua (Indie)²⁵, TIDC (Indie)²⁶, DIAMOND (USA)²⁷. Większość z nich to prekursorzy w tej dziedzinie z doświadczeniem sięgającym XIX wieku. Są to producenci na skalę globalną, posiadający w swojej ofercie bogaty asortyment zarówno standardowych produktów, jak również rozwiązania wykonywane na specjalne zamówienie.

Pomimo bardzo dużej globalnej konkurencji w tej dziedzinie, bardzo intensywnie rozwija się również sektor krajowych producentów łańcuchów.

²² Renold, Goup Head Office, Trident 2, Trident Business Park, Styland Road Wythenshawe, Manchester M22 5X8, www.renold.com

²³ Tsubaki, www.tsubaki.com

²⁴ Iwis, Albert-Rozhaupter-Str. 53, 81369 Munich, Germany, www.iwis.com

²⁵ Donghua, Parelweg 1, 1812 RS Alkamar, Holland.

²⁶ TIDC India, Post Bag No. 11, M.T.H Road, Ambattur, Chennai – 600 053, Tamin Nadu, India www.tidcindia.in

²⁷ Diamond Head Office, 402 Kentucky Avenue, Indianapolis, Indiana 46225, www.diamondchain.com

Do najbardziej liczących się producentów cięgien łańcuchowych należą: Dolzamet Chojnów ²⁸, Spomasz ²⁹, Komerc ³⁰, Komes-LTD ³¹, oraz Galmet ³². Producenci krajowi również oferują bogaty asortyment łańcuchów zarówno standardowych jak i wykonywanych na specjalne zamówienie. Skala produkcji fabryk krajowych jest jednak znacznie mniejsza niż producentów zagranicznych. Fakt ten ma również dobre strony, szczególnie w przypadku zamówień niestandardowych, gdyż znacznie skraca się termin realizacji zamówienia, spowodowany mniejszą tzw. „bezwładnością” produkcji, co pozwala na szybsze i sprawniejsze realizowanie rozwiązań zastępczych oraz na specjalne zamówienie.

2.1.3. Rodzaje łańcuchów

Wszechstronność zastosowań łańcuchów zmusza producentów do poszukiwania coraz nowszych rozwiązań konstrukcyjnych, jak również do zwiększania trwałości konstrukcji już istniejących na rynku. W technice, a zwłaszcza w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych przenoszenia ruchu w maszynach i urządzeniach, najbardziej rozpowszechnione są trzy rodzaje łańcuchów: pierścieniowe, zwane również pod nazwą ogniowe (Rys. 4a), drabinkowe nazywane również łańcuchami Galla (Rys. 4b) oraz płytkowe, nazywane łańcuchami Fleyer’a (Rys. 4c).

Najbardziej liczną grupę łańcuchów, stosowanych w przekładniach zębatych stanowi grupa łańcuchów drabinkowych, które ze względu na budowę dzielimy na: sworzniowe, tulejkowe oraz rolkowe.

Łańcuchy sworzniowe (Rys.5a) składają się z płytek bocznych oraz sworzni. Łańcuchy tego typu nie są obecnie stosowane na szerszą skalę. Spowodowane jest to małą ich trwałością, wskutek szybkiego zużywania się przegubów, przyczynę czego stanowi zbyt mała powierzchnia robocza między sworzniem, a płytką boczną. Konstrukcję tę wypierają łańcuchy tulejkowe oraz rolkowe.

Łańcuchy tulejkowe (Rys.5b) składają się z płytek, sworzni i tulejek. Stosuje się je w napędach wolnobieżnych i napędach pomocniczych. Nie znajdują zastosowania w napędach głównych, silnie obciążonych, gdyż brak rolki powoduje szybsze zużycie tulejek oraz współpracujących z nimi kół zębatych.

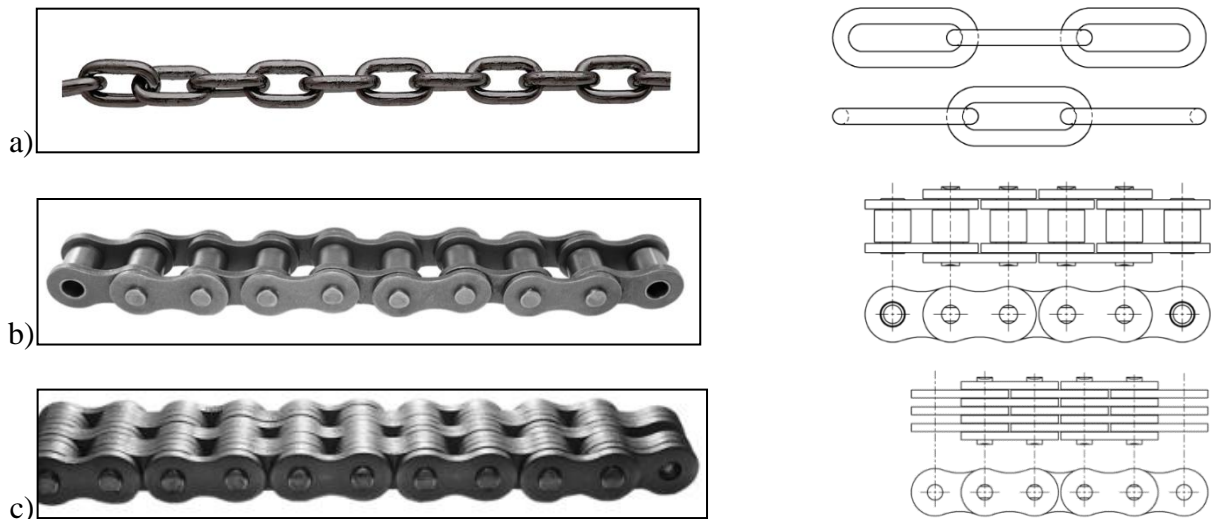
²⁸ Dolzamet Sp. Z o. o., Fabryczna 1, 59-225, Chojnów, www.dolzamet.pl

²⁹ Spomasz Zamość S.A., Szczębrzeska 19, 22-400 Zamość, www.spomasz.biz.pl

³⁰ Komerc, Okrzei 8, 59-225 Chojnów, www.komerc.pl

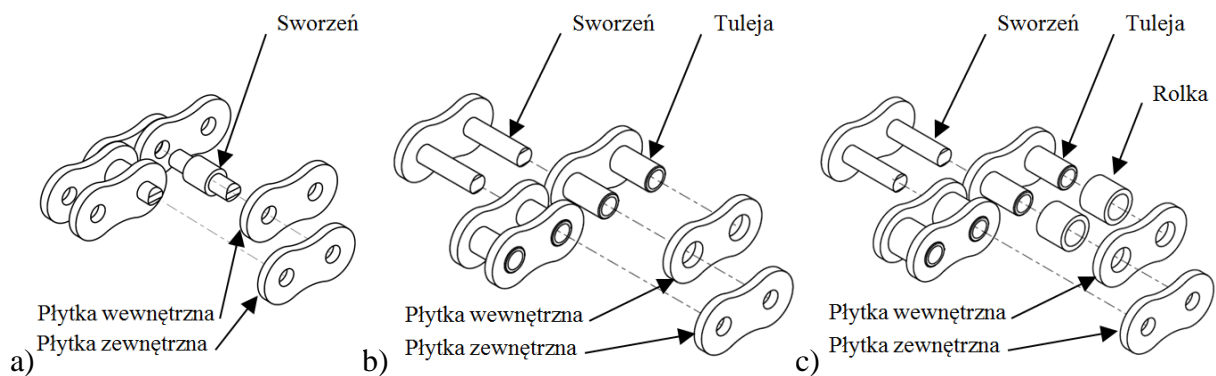
³¹ Komes Sp. Z o. o., Kcyńska Nowe Osiedle 1, 89-200 Szubin, www.komes-ltd.pl

³² www.galmet.nso.pl



Rys. 4. Podstawowe rodzaje ciągów łańcuchowych: a) łańcuch pierścieniowy (ogniowy), b) łańcuch drabinkowy (Galla), c) łańcuch płytkowy (Fleyer'a)

/Źródło: Opracowanie własne na podstawie producent łańcuchów napędowych: Komerc;
www.komerc.pl/



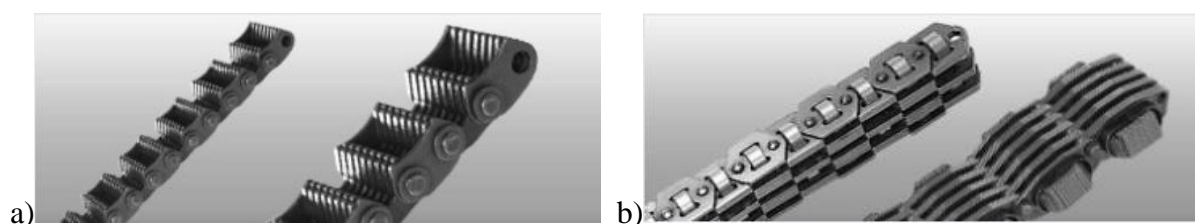
Rys. 5. Różne konstrukcje łańcuchów drabinkowych: a) łańcuch sworzniowy, b) łańcuch tulejkowy, c) łańcuch rolkowy

/Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Łańcuchy rolkowe (Rys.5c) są najczęściej stosowanymi obecnie łańcuchami w mechanicznych układach przenoszenia ruchu obrotowego. Składają się z płytek bocznych, tulei, sworzni oraz dodatkowego elementu, jakim jest rolka. Spełnia ona rolę „łożyska ślizgowego”, dzięki czemu istotnie zmniejsza tarcie pomiędzy elementami łańcucha i kołami zębatymi, zmniejszając w efekcie intensywność zużywania się zarówno łańcucha, jak i kół łańcuchowych.

Oprócz wymienionych trzech typów łańcuchów grupy łańcuchów drabinkowych, które są najbardziej rozpowszechnione na rynku, w konstrukcjach mechanicznych wykorzystywane są również drabinkowe łańcuchy specjalne (rys. 6), w tym m.in.: dedykowane do przekładni bezstopniowych, zębate, ze sworzniami drażonymi, łańcuchy o zwiększonej (specjalnej) podziałce, łańcuchy transportowe. Różnorodność typów łańcuchów świadczy o powszechności ich stosowania, jak również o ich bardzo dużym znaczeniu w konstrukcjach mechanicznych ³³.

Łańcuchy zębate (Rys.6a), inaczej zwane cichobieźnymi składają się z płytek i sworzni. Wewnętrzne płytki mają kształt trapezowy i zazębiają się z zębami kół napędowych. Płytki zewnętrzne pełnią rolę prowadnic. Znalazły zastosowanie w mechanizmach rozrządu silników spalinowych ³⁴. Są alternatywą pasów zębatych, przewyższając je trwałością. Łańcuchy wykorzystywane w przekładniach bezstopniowych (Rys.6b) mają bardzo różne konstrukcje. W najnowszych rozwiązaniach do przeniesienia napędu w przekładniach bezstopniowych (CTV - Continuously Variable Transmissions) stosuje się specjalne elementy rolkowe lub lamelowe o bardzo wysokiej wytrzymałości. Łańcuchy tego typu zastępują pasy klinowe ^{35,36}.



Rys. 6. Łańcuchy specjalne: a) zębate, b) do przekładni bezstopniowych

/Źródło: Producent łańcuchów napędowych: Komerc; www.komerc.pl/

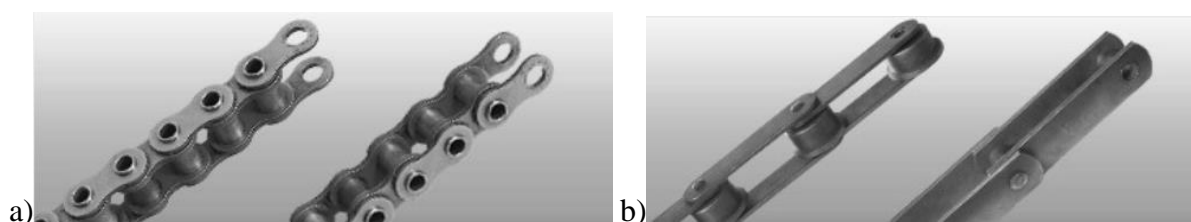
Łańcuch specjalny ze sworzniem drażonym przedstawiony został na rysunku 7a. Łańcuchy tego typu wykorzystywane są przede wszystkim w przenośnikach prętowych, gdzie wykorzystanie drażonych sworzni umożliwia przekładanie prętów w dowolnej konfiguracji. Ten typ łańcucha jest dobrym rozwiązaniem w przypadku konieczności ograniczenia wagi przenośnika. Na rysunku 8 pokazano przykładową konstrukcję łańcucha transportowego. W tym rodzaju łańcuchów wyróżniamy szeroki zakres podziałek oraz różny kształt płytek i rolek, co stwarza szerokie możliwości doboru łańcucha do współpracujących elementów nośnych, jak zabieraki, łopatki, listwy.

³³ www.glowny-mechanik.pl

³⁴ Mulik R. V., Joshi M. M.: Dynamic Analysis of Timing Chain System of a High Speed Three Cylinder Diesel Engine. International Journal of Engineering And Science, vol. 4 (5), 2014

³⁵ Srivastava N., Haque I.,: A review on belt and chain continuously variable transmissions (CTV). Dynamic and control. Journal of Mechanism and Machine Theory, vol. 44, 2009, 19-41

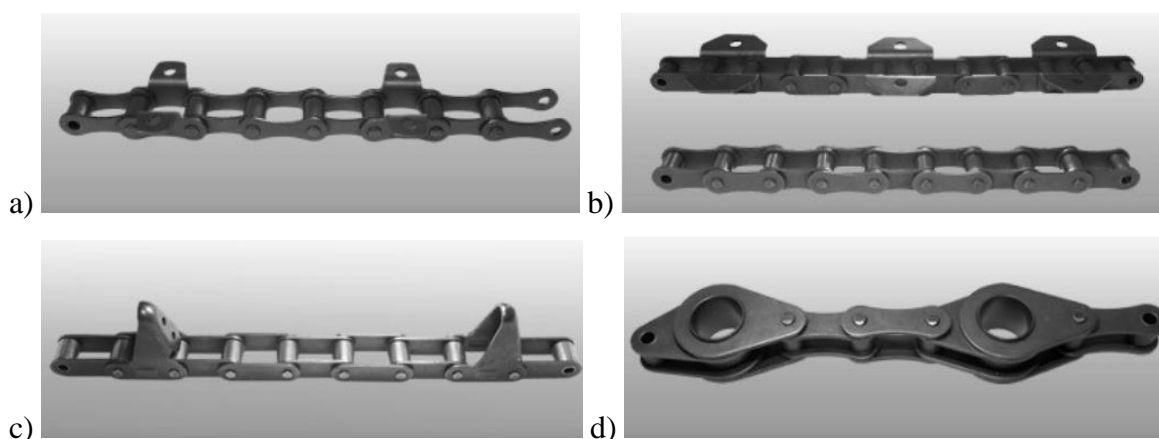
³⁶ Duan C., Hebbale K., Liu F., Yaou J.: Physics-based modeling of a chain continuously variable transmission. Journal of Mechanism and Machine Theory, vol. 44, 2016, 397-408



Rys. 7. Łańcuchy specjalne: a) ze sworzniem drążonym, b) transportowy

Źródło: Producent łańcuchów napędowych: Komerc; www.komerc.pl/

Charakterystyczną grupę łańcuchów stanowią łańcuchy transportowe, wykorzystywane powszechnie w rolnictwie. Do tej grupy łańcuchów należy wiele rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych w maszynach i urządzeniach do prac polowych, hodowli i przetwórstwa (Rys.8a-d). Łańcuchy transportowe charakteryzują się dodatkowymi elementami mocowanymi na długości łańcucha, zwanymi zabierakami, umożliwiającymi montaż różnych podzespołów funkcjonalnych, np. czerpaków, zabieraków, listew, itp.^{37,38}.



Rys. 8. Łańcuchy specjalne rolnicze: a) łańcuch typu S, b) łańcuch typu CA, c) łańcuch do kombajnów zbożowych, d) łańcuch do pras rolniczych

Źródło: Producent łańcuchów napędowych: Komerc; www.komerc.pl/

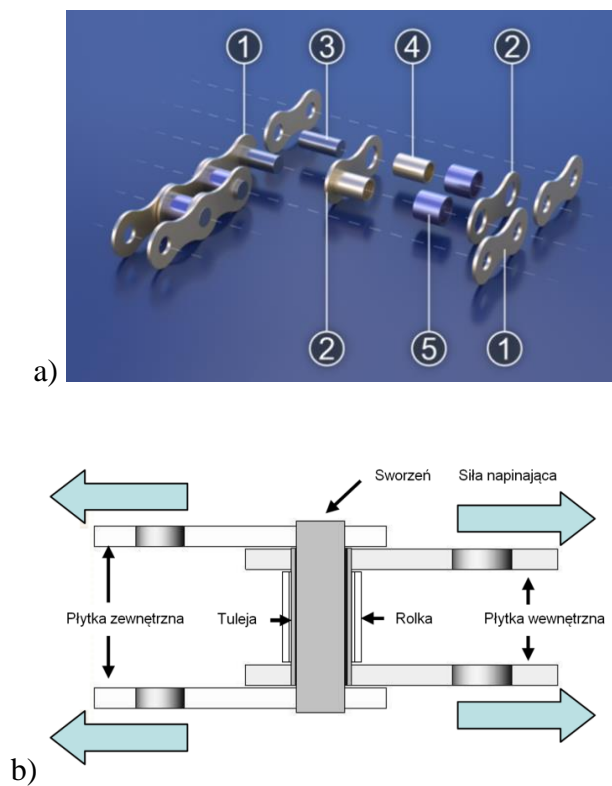
Pomimo dużej różnorodności dostępnych na rynku konstrukcji łańcuchów, do najbardziej popularnych cięgien wykorzystywanych do przenoszenia napędu należą typowe drabinkowe łańcuchy rolkowe, pokazane na rysunku 5c. Stanowią one około 60% wszystkich łańcuchów napędowych i są najchętniej wykorzystywanym elementem do przenoszenia ruchu ze względu na ich dużą trwałość w porównaniu z innymi typami łańcuchów³⁹, jak również dostępność na rynku oraz opanowaną technologię. Jak pokazano na rysunku 9, łańcuch rolkowy

³⁷ Osiński Z.: Podstawy konstrukcji maszyn. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2020

³⁸ Słowiński B.: Inżynieria eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2011

³⁹ www.utrzymanieruchu.pl, 23 lipiec 2013

składa się z płytki zewnętrznej (1), płytki wewnętrznej (2), sworznia (3), tulei (4) oraz rolki (5). Dwie płytki wewnętrzne (2), wraz z dwoma tulejkami (4) oraz dwoma rolkami (5) tworzą ogniwo wewnętrzne łańcucha. Połączenie tulejki z płytkami wewnętrznymi jest realizowane „na wcisk”. Natomiast ogniwo zewnętrzne tworzą dwie płytki zewnętrzne oraz dwa sworznie. Sworznie osadzone są swobodnie w tulejach ogniwa wewnętrznego i następnie zakute w otworach dwóch płytek zewnętrznych. Ogniwo zewnętrzne wraz z wewnętrznym tworzą jeden komplet, który zwielokrotniony tworzy łańcuch napędowy o oczekiwanej długości. Na rysunku 9a pokazano budowę standardowego łańcucha rolkowego, natomiast na rysunku 9b pokazano przekrój wzdłużny pary ogniw.



Rys. 9. Widok łańcucha drabinkowego rolkowego: a) budowa łańcucha: 1-płytki zewnętrzna, 2-płytki wewnętrzna, 3-sworzni, 4-tuleja, 5-rolka, b) przekrój wzdłużny pary ogniw łańcucha

/Źródło: a) www.skf.com; b) Opracowanie na podstawie Noguchi S., Yoshida H., Nakayama S., Kanada T. „Evaluation of wear between pin and bush in roller chain”, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 3 (4), 2009/

2.1.4. Mechanizmy zużycia drabinkowych łańcuchów rolkowych

Bardzo ważnym warunkiem prawidłowej pracy przekładni łańcuchowej jest stabilność wymiarowa łańcucha, o której decyduje stopień zużycia poszczególnych elementów łańcucha.

Analizując proces eksploatacji drabinkowego łańcucha rolkowego wyróżnia się trzy podstawowe mechanizmy zużycia ⁴⁰:

- zerwanie;
- wydłużenie przez rozciąganie;
- wydłużenie przez ścieranie.

Zerwanie łańcucha występuje wówczas jeśli układ przekroczy krytyczne obciążenia dla danego ciągu lub nastąpi zmęczenie materiału spowodowane cyklami jednostronnie tętniącymi ^{41,42,43,44}. Dzieje się to przeważnie w przypadku kiedy układ nie jest zabezpieczony przeciążeniowo odpowiednimi sprzęgłami. W tym przypadku istnieje możliwość naprawy łańcucha poprzez wymianę uszkodzonych elementów. Typowy widok łańcucha uszkodzonego w efekcie zerwania pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Zerwana płytką wewnętrzną łańcucha

/Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Wydłużenie przez rozciąganie to proces, któremu podlegają płytki boczne wskutek ich niedostatecznej wytrzymałości na rozciąganie, przez co zmienia się podziałka łańcucha i następuje wydłużenie całego łańcucha. Wydłużanie się płytek występuje głównie, gdy łańcuch pracuje pod dużym obciążeniem, graniczącym z krytycznym. Efekt rozciągnięcia nie jest widoczny bezpośrednio na łańcuchu, lecz dopiero po pomiarach lub zamontowany kole łańcuchowym o wymiarach nominalnym (Rys. 11). Następstwem rozciągania płytki może być jej zerwanie i awaryjne uszkodzenie łańcucha^{45,46}.

⁴⁰ Saito R., Noda N., Sano Y.: Newly Developed Wear Testing Machine Having Sufficient Reproducibility Useful for Investigating Roller Chains. The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ International), vol. 60, (10), 2020, 2255-2265

⁴¹ Zgłoszenie reklamacyjne nr 30151034910300062140AI7120, 27.10.2015 CNH Industrial Polska Sp. Z o. o. Otołińska 25, 09-410 Płock, Polska

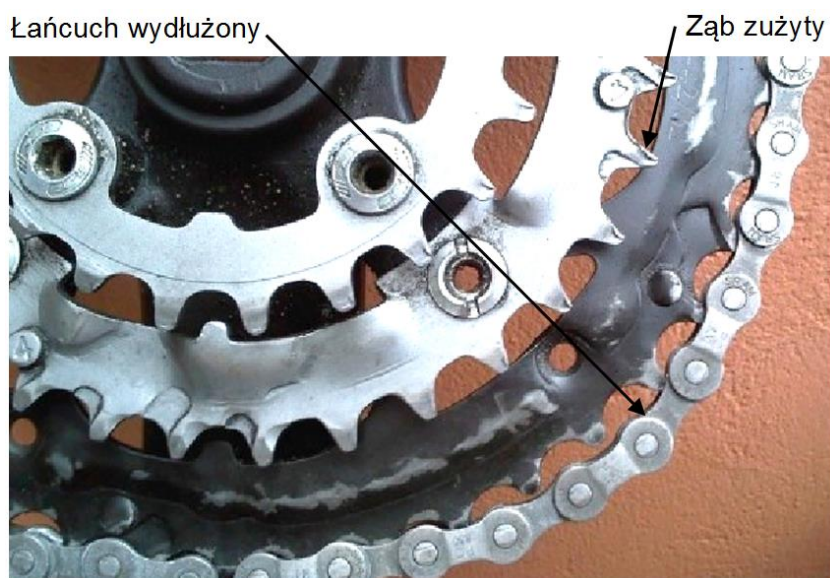
⁴² Zgłoszenie reklamacyjne nr 20150028718000062150AF4020, 05.11.2015 CNH Industrial America LLC, 200 George Delp Road, New Holland PA 17557

⁴³ Saito R., Noda N., Sano Y., Song J., Minami T., Birou Y., Miyagi A., Huang Y.: Fatigue Strength Analysis and Fatigue Damage Evaluation of Roller Chain. Journal of Metals 8, 2018, 847-853

⁴⁴ Jagtap M. D. Gaikwad B. D., Pawar P. M.: Study of Roller Conveyor Chain Strip under Tensile Loading. International of Modern Engineering Research 4 (5), 2014, 651-662

⁴⁵ Noguchi S., Nnagasaki K., Nakayama S., Kanada T., Hishino T., Ohtani T.: Static Stress Analysis of Link Plate of Roller Chain using Finite Element Method and Some Design Proposals for Weight Saving. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 3 (2), 2009, 125-132

⁴⁶ Tushar D., Prashant M., Bhaskar D.: FEA Based Study of Effect of Radial Variation of Outer Link in A Typical Roller Chain Link Assembly. International Journal of Mechanical and Industrial Engineering 1 (4), 2012, 2231-6477



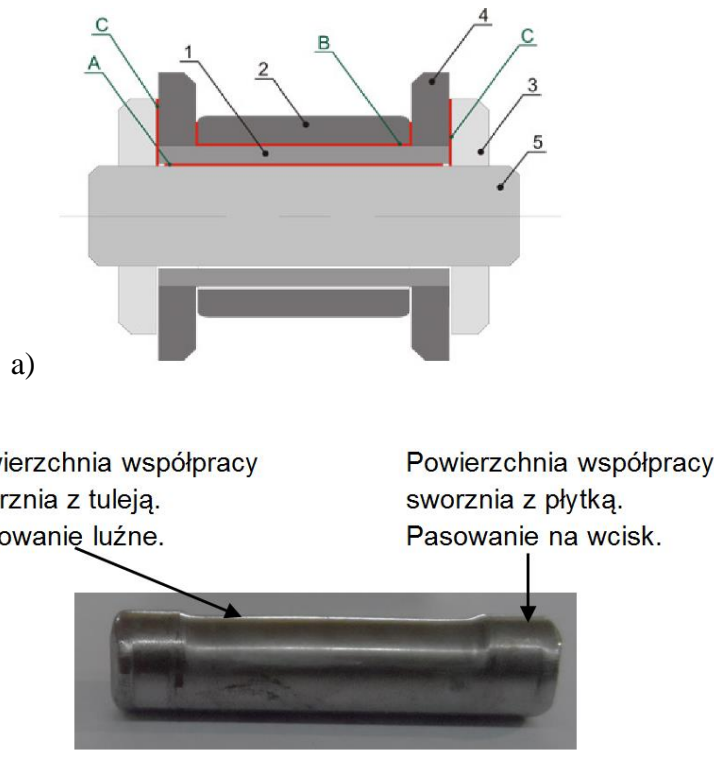
Rys. 11. Zużycie zębów wieńca koła zębatego w wyniku współpracy z wydłużonym łańcuchem
 /Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Wydłużenie łańcucha przez ścieranie następuje w wyniku zużycia ściernego powierzchni współpracy sworzni i tulei łańcucha^{47,48,49}. Ten rodzaj wydłużania ma największy wpływ na zmiany geometryczne łańcucha. Zużycie sworzni łańcucha występuje głównie na powierzchni współpracy sworzni i tulei, tj. powierzchni oznaczonej (A) na rysunku 12a. Widok efektów procesu zużycia ściernego w typowym sworzniu łańcuchowym, pokazano na rysunku 12b.

⁴⁷ Noguchi S., Yoshida H., Nakayama S., Kanada T.: Evaluation of wear between pin and bush in roller chain. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 3 (4), 2009, 512-520

⁴⁸ Zgłoszenie reklamacyjne nr 30151034591900062140AI8060, 23.10.2015 CNH Industrial Polska Sp. z o. o. Otołńska 25, 09-410 Płock, Polska

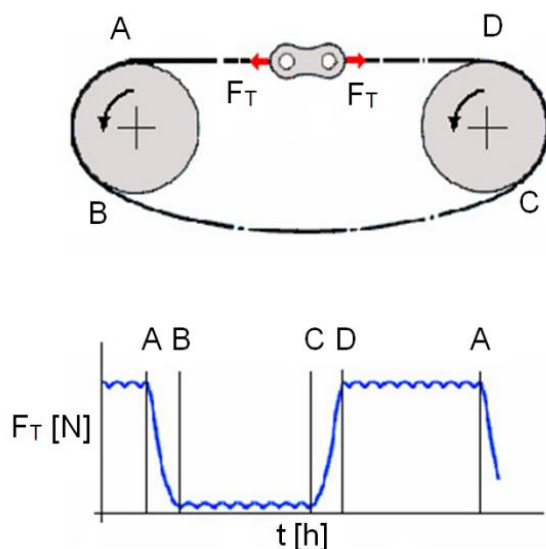
⁴⁹ Zgłoszenie reklamacyjne nr 20150026086500062150AF8080, 19.10.2015 CNH Industrial America LLC, 200 George Delp Road, New Holland PA 17557



Rys. 12. Przekrój łańcucha drabinkowego rolkowego (a): 1) tuleja, 2) rolka, 3) płytka zewnętrzna, 4) płytka wewnętrzna, 5) sworzień, A) Powierzchnia współpracy sworznia z tuleją, B) powierzchnia współpracy rolki z tuleją, C) powierzchnia współpracy płytki zewnętrznej z wewnętrzną oraz widok zużytego sworznia w wyniku zużycia ściernego (b)

/Źródło: a) Mechanizmy przeniesienia napędu; Brammer; www.brammer.pl, b) Opracowanie własne/

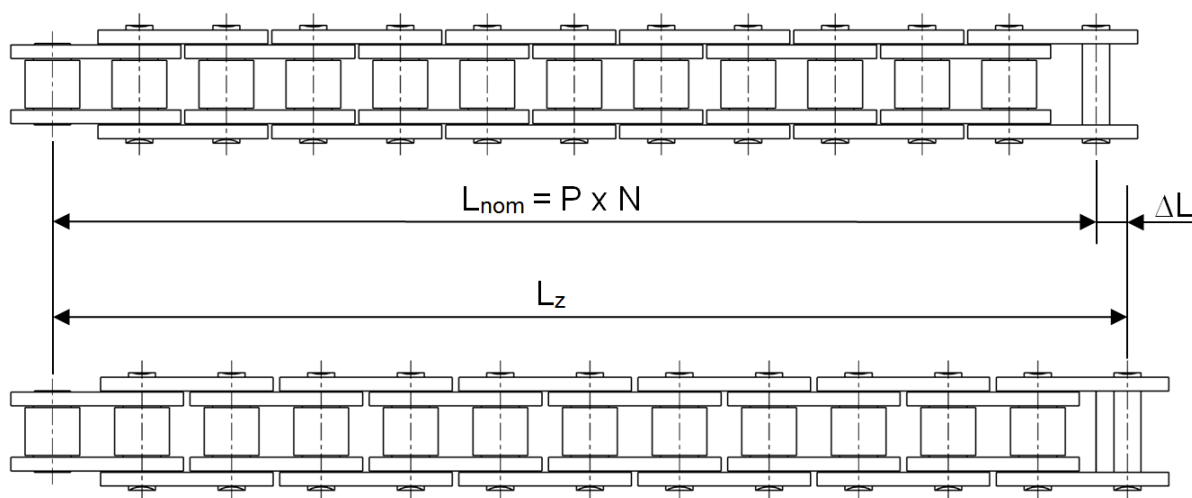
Na rysunku 13 pokazano schemat przekładni łańcuchowej oraz typowy przebieg zmiennych obciążeń rozciągających, działających na łańcuch podczas jednego cyklu, tj. pełnego obrotu łańcucha. Działanie obciążeń rozciągających przy jednoczesnym zużywaniu się poszczególnych elementów łańcucha w procesie zużycia ściernego powoduje wydłużanie łańcucha. Głównym elementem konstrukcyjnym łańcucha ulegającym zużyciu ściernemu i powodującym wydłużanie łańcucha jest sworzień współpracujący z wewnętrzną powierzchnią tulei. Z doświadczenia zebranego na podstawie obsługi serwisowej łańcuchów drabinkowych rolkowych należy zauważyć, że pomimo współpracy sworznia i tulei w identycznych warunkach, zużycie sworznia następuje zdecydowanie szybciej niż tulei. Dzieje się to za sprawą, iż sworzień ze względu na swoją konstrukcję, a dokładniej ograniczoną średnicę, musi zachować odpowiednią ciągliwość, tzn. odporność uderzeniową ze względu na działające obciążenie poprzeczne, powodujące jego zginanie. Sworzień musi być odpowiednio miękki (ciągliwy), aby nie ulec pęknięciu.



Rys. 13. Schemat obciążeń łańcucha napędowego: F_T [N] - siła, t [h] - czas pracy

/Źródło: www.autodesc.com/

Zakres dopuszczalnego wydłużenia łańcucha przedstawia się procentową zmianą długości łańcucha w stosunku do wymiarów nominalnych. Jest to iloczyn podziałki P i ilości ogniw N . Żeby wynik był miarodajny zalecany jest pomiar 30-40 ogniw (Rys.14).



Rys. 14. Weryfikacja wydłużenia łańcucha: ΔL – wydłużenie, L_{nom} – nominalna długość łańcucha, P – podziałka, N – liczba ogniw, L_z – zmierzona długość

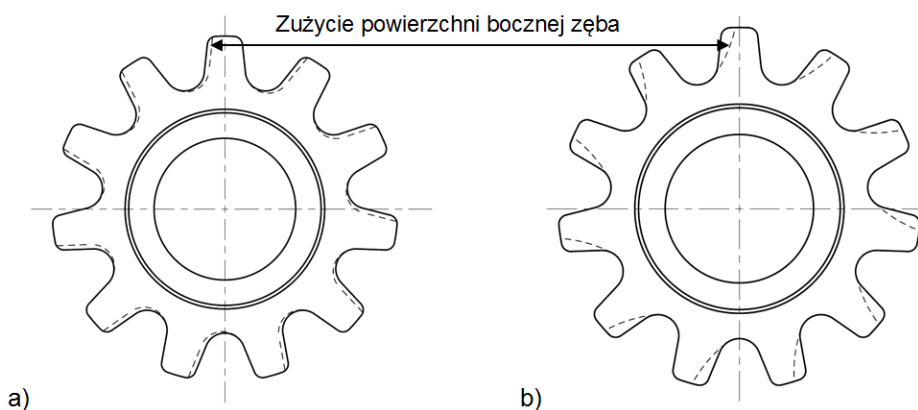
/Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Dopuszczalne wydłużenie łańcucha wyznaczone jest wg. wzoru (1). Wydłużenie łańcucha nie może przekraczać następujących wartości wyrażonych w procentach ΔL [%]:

$$\Delta L = \frac{L_z - L_{nom}}{L} \times 100\% \quad (1)$$

- $\Delta L \leq 3\%$ dla przekładni zwykłych;
- $\Delta L \leq 2\%$ dla przekładni wysoko wydajnych;
- $\Delta L \leq 1\%$ dla przekładni specjalnych, (np. pozycjonowanie).

Praca łańcucha wydłużonego negatywnie wpływa na współpracujące z nim koła łańcuchowe. Zużyty łańcuch, którego ogniwa są wydłużone nie układa się odpowiednio w dnie wrębu zęba i uderza w górną część zwaną głową zęba (Rys.15). Następuje przyspieszone zużywanie się zębów i powstają wyłobienia w górnej części zęba. Oprócz przyspieszonego ścierania się zębów, łańcuch przedwcześnie uderzając w głowę zęba powoduje zwiększone drgania⁵⁰, co wpływa niekorzystnie na jakość pracy przekładni, a także na trwałość jej elementów, tj. koło oraz łańcuch.



Rys. 15. Zużycie koła zębatego: a) prawidłowe – w wyniku współpracy z łańcuchem o nominalnej podziałce, b) nieprawidłowe – w wyniku współpracy z łańcuchem wydłużonym

/Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Szczegółowa analiza mechanizmów zużycia drabinkowych łańcuchów rolkowych, wykazała, że głównymi elementami konstrukcyjnymi, narażonymi podczas eksploatacji na zniszczenie wskutek zużycia ściernego, są sworznie łańcuchów napędowych. Nie bez znaczenia jest też wpływ oddziaływania korozyjnego środowiska, w którym eksploatowane są łańcuchy⁵¹.

2.1.5. Metody stosowane dla zwiększania trwałości łańcuchów napędowych

Łańcuchy napędowe, w związku z tym, że są powszechnie wykorzystywanym elementem do przenoszenia napędu pracują w różnych warunkach eksploatacyjnych. W zależności od

⁵⁰ Liu S., Hayek S., Chen F.: On the impact intensity of vibrating axially moving roller chains. Journal of Vibration and Acoustics 114, 1992, 397-401.

⁵¹ Sappok D., Gummer A., Sauer B.: Experimental and analytical wear studies of bush- and roller chain chains. Proceedings of the 5th World Tribology Congress (WTC '13), Torino, Włochy, 2013.

aplikacji narażone są na różne czynniki zewnętrzne, wpływające negatywnie na trwałość elementów składowych łańcucha, w tym intensyfikujących proces zużycia ściernego sworzni łańcuchowych. Łańcuchy wykorzystywane w rolnictwie narażone są m.in. na osiadanie pyłu pochodzącego z podłoża, natomiast łańcuchy wykorzystywane w górnictwie narażone są na duży udział pyłu węglowego w procesach tarcia.

Poniżej przedstawiono typowy proces obróbki poszczególnych elementów łańcucha drabinkowego rolkowego ⁵².

1. Płytki zewnętrzne i wewnętrzne poddawane są obciążeniom rozciągającym. Najczęściej wykonywane są ze stali węglowych (45, 55) lub stali stopowych (35HM, 40H), a następnie poddawane obróbce cieplnej w celu uzyskania twardości w zakresie 38 – 49 HRC ⁵³.
2. Sworznie wytwarzane są głównie ze stali stopowej (40HM), a następnie poddawane obróbce cieplnej (hartowanie + odpuszczanie) ~~na wskroś~~, w celu uzyskania twardości w zakresie 47 – 52 HRC oraz dużej odporności na zużycie ściernie, a także podwyższonej wytrzymałości rdzenia na zginanie i obciążenia udarowe. Następnie sworznie są szlifowane, co dodatkowo polepsza ich odporność na zużycie ściernie.
W szczególnych przypadkach, gdy łańcuchy pracują w warunkach dużego zapylenia, bez możliwości zastosowania jakiegokolwiek układu smarowania, w tzw. łańcuchach „*heavy duty*”, wykorzystuje się elementy składowe wykonane ze stali stopowych poddane obróbce cieplnej, a następnie pokrywane powłoką galwaniczną tzw. twardego chromu. Grubość powłoki twardego chromu galwanicznego, o twardości ok. 1000 HV, osadzanego metodą elektrochemiczną, zawiera się na ogół w przedziale 5 ÷ 200 μm ⁵⁴.
3. Tuleja łańcucha w odróżnieniu od sworznia nie jest narażona na zginanie, a dominującym procesem jej zużycia jest zużycie ściernie, spowodowane naciskami powierzchniowymi w kontakcie ze sworzniem. Tuleje łańcuchów są walcowane i zwijane na zimno, co zapewnia dokładność wykonania, która jest szczególnie ważna w przypadku średnicy zewnętrznej i wewnętrznej. Następnie tuleje poddawane są procesowi utwardzania powierzchniowego przez nawęglanie oraz poddawane obróbce cieplnej w celu uzyskania twardości ok. 60 HRC. Ostatnim etapem procesu

⁵² Katalog Produktów: SKF, Wyd. 6772 PL, 2008

⁵³ Htun M. S., Kyaw S. T., Lwin K. T.: Effect of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Spring Steel. *Journal of Metals, Materials and Minerals* 8 (2), 2008, 191-197

⁵⁴ K. Dermentzis, A. Christoforidis, E. Valsamidou: Removal of nickel copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation, *Int. J. Environ* 1, 2011, 697–710

wykonywania tulei jest szlifowanie średnicy wewnętrznej, w celu polepszenia odporności na zużycie ściernie oraz poprawy geometrii ⁵⁵.

4. Rolki, podobnie jak tuleje łańcucha, poddaje się procesowi nawęglania, a następnie obróbce cieplnej w celu uzyskania odpornej na ścieranie warstwy wierzchniej o twardości ok. 62 HRC ^{56,57}.

Omawiając stan wiedzy w zakresie zwiększania trwałości łańcuchów napędowych, należy pamiętać również, że istotnym elementem procesu ich eksploatacji, znacząco wpływającym na polepszenie trwałości, jest smarowanie ⁵⁸. Wyróżniamy kilka typów smarowania. Najprostszym jest smarowanie ręczne. Polega ono na ręcznym smarowaniu łańcucha środkiem smarnym przy pomocy pędzla, cyklicznie w zależności od warunków eksploatacji. Smarowanie takie odbywa się okresowo, zatem łańcuch często nie jest wystarczająco zabezpieczony. Smarowanie ręczne jest w efekcie najprostszym, ale zarazem najmniej wydajnym sposobem smarowania.

Innym, zdecydowanie lepszym sposobem smarowania jest smarowanie ciągłe, które polega na ciągłym dostarczaniu płynnego środka smarnego poprzez spływanie grawitacyjne lub smarowanie wymuszone w wyniku zastosowania pompy. W tym przypadku wymaga się stosowania środków smarnych biodegradowalnych, gdyż zazwyczaj środek smarny ulega rozbryzgowi podczas kontaktu z łańcuchem i osiada na podłożu. Rozwiązanie takie powszechnie stosuje się w maszynach mobilnych, m.in. rolniczych oraz budowlanych. Środek smarny w tym przypadku pełni również funkcję oczyszczającą, wypłukując zanieczyszczenia zewnętrzne oraz cząstki stałe powstałe we współpracy elementów łańcucha z kołami zębatymi, które znacząco przyczyniają się do zużycia łańcucha, pełniąc rolę ścierniwa.

Najbardziej skutecznym systemem smarowania jest smarowanie zanurzeniowe, w którym łańcuch jest częściowo zanurzony w płynnym środku smarnym oraz pracując w układzie zamkniętym i odizolowany jest od zanieczyszczeń zewnętrznych. W tym przypadku warunki pracy łańcucha są bardzo dobre i nie występują zanieczyszczenia zewnętrzne, a środek smarny oprócz funkcji smarnych wypłukuje wyłącznie cząstki stałe powstałe we współpracy elementów łańcucha z kołami zębatymi. Takie systemy smarowania stosuje się w urządzeniach stacjonarnych.

⁵⁵ Dobrzański L., Hajduczek E., Marciniak J., Nowosielski R.: Obróbka cieplna materiałów narzędziowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Skrypty uczelniane nr 1024 cz. I i II, Gliwice, 1982

⁵⁶ Adamek A., Gorockiewicz R., Korecki M.: Nawęglanie próżniowe stali specjalnych i wysokostopowych, Materiały X Seminarium Grupy SECO/Warwick pt. Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Łagów, 2006

⁵⁷ Clark A. D., Northwood D. O., Bowers R. J., Sun X., Bauerle P.: Comparison of Austempering and Quench-and-Tempering Processes for Carburized Automotive Steels. SAE International Journal of Materials and Manufacturing 6 (2), 2013, 146-153

⁵⁸ B. Wilson „Roller chain lubrication” Industrial Lubrication and Tribology, Emeraldinsight 48, 1996

Dynamiczny rozwój opracowań konstrukcyjnych w zakresie maszyn i urządzeń, w których wykorzystywane są przekładnie łańcuchowe oraz wzrost oczekiwań użytkowników w zakresie ich wydajności i wielofunkcyjności, zwiększa wymagania dotyczące jakości wykonania łańcuchów oraz ich trwałości i niezawodności. Bardzo duże możliwości w zakresie zwiększania trwałości i niezawodności części maszyn stwarzają nowoczesne techniki inżynierii powierzchni.

2.2. Nowoczesne techniki inżynierii powierzchni stosowane dla zwiększenia trwałości i niezawodności części maszyn

2.2.1. Techniki inżynierii powierzchni i ich rozwój

Właściwości użytkowe elementów części maszyn i narzędzi zależą od możliwości przenoszenia obciążeń mechanicznych przez cały przekrój materiału, ale również od struktury i właściwości warstw powierzchniowych, gdyż w większości przypadków niszczenie materiałów podczas eksploatacji rozpoczyna się w warstwie wierzchniej materiału ^{59, 60}. Zagadnienia dotyczące inżynierii powierzchni, związane z metodami poprawy właściwości użytkowych powierzchni materiałów konstrukcyjnych stanowiły przedmiot szeregu opracowań ^{61, 62, 63}. Na początku XX wieku rozwinęło się szereg różnych technologii zwiększania trwałości powierzchni materiałów konstrukcyjnych podczas eksploatacji, takich jak np. galwanotechnika ⁶⁴, czy też natryskiwanie cieplne ⁶⁵. Następnie rozwinęły się różne technologie obróbki cieplno-chemicznej ⁶⁶, np. nawęglania ⁶⁷, azotowania ^{68, 69}, chromowanie dyfuzyjne ^{70, 71}, borowanie dyfuzyjne ⁷², realizowane metodami proszkowymi, kąpielowymi, gazowymi itp. Opracowano

⁵⁹ Burakowski T., Wierchoń T.: Surface Engineering of Metals, Principles, Equipment, Technologies. CRC Press Boca Raton, London, New York, Washington D. C. 1999

⁶⁰ Dobrzański L. A.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe, WNT, Warszawa 2006

⁶¹ Mittemeijer E. J., Somers M., A. J., Thermochemical Surface Engineering of Steels. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering: Number 62, Elsevier 2015

⁶² Burakowski T.: Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni. Wyd. ITeE- PIB, Radom 2004

⁶³ Kasprzycka E.: Wybrane technologie w inżynierii powierzchni. W książce: Inżyniera Materiałów Konstrukcyjnych, Wyd. PW, Płock 2008, 101-126

⁶⁴ Socha J., Weber J. A., Podstawy elektrolitycznego osadzania stopów metali. Wyd. IMP, Warszawa 2001

⁶⁵ Handbook of Thermal Spray Technology. Edited by: J.R. Davis. ASM International 2004

⁶⁶ Handbook of Heat Treating of Irons and Steels, Volume 4D. Edited by: Dossett J., Totten G. E., ASM International 2014

⁶⁷ Moszczyński A.: Nawęglanie gazowe stali. WNT, Warszawa 1983

⁶⁸ Kasprzycka E., Tacikowski J.: Gas nitriding, Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. Rafael Colás and George Totten (Eds.), Taylor & Francis Group, New York 2016, vol. 5, 2399-2406

⁶⁹ Małdziński L., Tacikowski J.: Concept of an economical and ecological process of gas nitriding of steel. Härterei-Technische Mitteilungen 61, 2006, 296-302

⁷⁰ Kasprzycka E.: Antykorozyjne warstwy dyfuzyjne wytwarzane z par metali (Cr, Ti) przy obniżonym ciśnieniu. Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Precyzyjnej. Seria: Monografie IMP, Warszawa 2002

⁷¹ Bogdański B., Kasprzycka E., Kraśniewski P.: Tribological characterizations of chromized carbide layers produced by the pack powder method at low pressure, Tribology 3, 2015, 9-19

⁷² Pertek –Owsianna A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymanych w procesie borowania gazowego. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Seria: Rozprawy, Poznań 2001

również metody wytwarzania warstw kompozytowych, wieloskładnikowych, warstw typu duplex łączących m.in. obróbkę galwaniczną z obróbką dyfuzyjną^{73,74}, itp.

Intensywny rozwój metod obróbki powierzchniowej nastąpił jednak dopiero w latach 80-tych XX wieku, dzięki rozwojowi wiedzy w zakresie syntetyzowania materiałów ze środowiska plazmy⁷⁵. Powstało wtedy szereg nowoczesnych technologii wytwarzania powłok za pomocą odparowania łukiem elektrycznym⁷⁶, odparowania wiązką elektronową⁷⁷, rozpylania magnetronowego⁷⁸, umożliwiających wytwarzanie m.in. powłok wielowarstwowych, gradientowych, itp. Opracowano nowoczesne technologie hybrydowe, polegające na łączeniu różnych technologii dla uzyskania warstwy wierzchniej o właściwościach użytkowych nieosiągalnych przez oddzielne zastosowanie pojedynczych technologii obróbki powierzchniowej⁷⁹. Rozwój technologii hybrydowych, w ostatnich latach, umożliwił wytwarzanie warstw i powłok funkcjonalnych, tj. przeznaczonych dla spełniania określonych funkcji w procesie eksploatacji, np. przeciwdziałania mechanizmom zużycia ściernego oraz projektowanie i wytwarzanie powłok/warstw o bardzo złożonej budowie, przeznaczonych do pracy w bardzo ciężkich warunkach procesowych, gdy podczas eksploatacji występuje jednocześnie kilka czynników powodujących degradację warstwy wierzchniej. Przykładem mogą być warstwy hybrydowe opracowane przez J. Smolika⁸⁰, np. warstwa azotowana/powłoka CrN, otrzymywana w kolejnych procesach: azotowania gazowego, połączonego z następną obróbką – osadzaniem powłoki z azotku chromu metodą łukowo-próżniową PVD, charakteryzująca się m.in. wysoką odpornością na obciążenia mechaniczne, udary cieplne oraz zużycie przez tarcie. Warstwy te znalazły zastosowanie w przemyśle dla zwiększania eksploatacyjnej trwałości matryc kuźniczych wykonywanych ze stali do pracy na gorąco.

Nowoczesne techniki inżynierii powierzchni, wykorzystujące środowisko plazmy, można podzielić na dwie główne grupy, tj.: grupę metod chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD – *Chemical Vapour Deposition*), w których wykorzystywane są reakcje chemiczne oraz

⁷³ Burakowski T., Development of surface engineering, Journal of Materials Protection, 1999, s.103-109

⁷⁴ Kasprzycka E.: Composite layers produced on the titanium and the cobalt base in vacuum titanizing process. Problemy Maszynostrojenia i Automatyzacji 4, 2005, 93-96

⁷⁵ Thornton J.A.: High rate thick film growth, Annual Review of Materials Science 7,1977,239-245

⁷⁶ J. Vetter J.: Vacuum arc coatings for tools: potential and application, Surface and Coatings Technology 76,1995, 719-724.

⁷⁷ Burakowski T.: Wiązka elektronowa i możliwości jej wykorzystania do poprawy własności powierzchni”, Mechanik 8, 1992, 9-12

⁷⁸ Miernik K.: Działanie i budowa magnetronowych urządzeń rozpylających. Wyd. ITeE Radom 1997

⁷⁹ Smolik J.: Hybrydowe technologie inżynierii powierzchni. Wyd. ITeE-PIB 2016

⁸⁰ Smolik J.: Rola warstw hybrydowych typu warstwa azotowana /powłoka PVD w procesie zwiększania trwałości matryc kuźniczych, Monografia, Wyd. ITeE-PIB Radom 2007

grupę metod fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD – *Physical Vapour Deposition*), w których przede wszystkim wykorzystywane są zjawiska fizyczne⁸¹.

W metodach PVD, krystalizujące z plazmy pary metali lub związki, w warunkach próżni ($10 \div 10^{-5}$ Pa), są osadzane na zimnym lub podgrzanym podłożu (w zakresie od 20 do 500°C), co pozwala na pokrywanie podłoża zahartowanego i odpuszczonego, bez obawy spadku twardości w procesie osadzania powłoki (na skutek wzrostu temperatury).

Należy podkreślić, że technologie próżniowe zalicza się do technologii wysoko zaawansowanych i czystych ekologicznie.

Metody PVD, realizowane z udziałem środowiska plazmy, zalicza się do najczęściej stosowanych technik wytwarzania twardych powłok przeciwzużyciowych⁸².

2.2.2. Techniki PVD

Dotychczas opracowano wiele modyfikacji i odmian technik PVD, rys. 16. Metody te wykorzystują różne zjawiska fizyczne, zachodzące w warunkach próżni, wśród których można wyróżnić następujące etapy⁸³:

- I) wytworzeniu par metali i stopów stanowiących substraty powłoki, np. przez erozję źródła par, wskutek:
 - odparowania termicznego substratu, niestopionego (np. w postaci drutu) lub stopionego (w tyglu oporowo, indukcyjnie, elektronowo, łukowo lub laserowo),
 - sublimacji w warunkach wyładowania łukowego, ciągłego lub impulsowego,
 - rozpylania (ang. Sputtering –S) metalu lub związku w stanie stałym
 - jonowego (ang. Ion Sputtering – IS) (katodowe lub anodowe) – rozpylanie elektrody ujemnej (katody) lub dodatniej (anody) pod wpływem bombardowania jonami o przeciwnym znaku
 - magnetronowego (ang. Magnetron Sputtering – MS) - rozpylanie elektrody w wyładowaniu jarzeniowym anormalnym w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym w celu zwiększenia koncentracji plazmy wyładowania jarzeniowego i jej zlokalizowania w bezpośrednim sąsiedztwie magnetronu
- II) jonizacji elektrycznej gazów i par metali poprzez intensyfikację procesu za pomocą: wyładowania jarzeniowego, stałych lub zmiennych pól elektrycznych, pól

⁸¹ Dobrzański L.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. WNT, Gliwice-Warszawa 2002

⁸² Kupczyk M.: Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwzużyciowymi. Wyd. Politechnika Poznańska, Poznań 2009

⁸³ Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995

- magnetycznych, dodatkowych źródeł emisji elektronów, podgrzewania podłoża w celu wykorzystania dyfuzji dla uzyskania lepszego połączenia powłoki z podłożem.
- III) kondensacji i krystalizacji składników plazmy (cząstek, atomów, jonów), na stosunkowo zimnym podłożu.

Zachodzące procesy często są wspomagane fizycznie a także chemicznie.

Metody osadzania powłok PVD wspomagane plazmą noszą nazwę PA PVD (Plasma Assisted PVD).

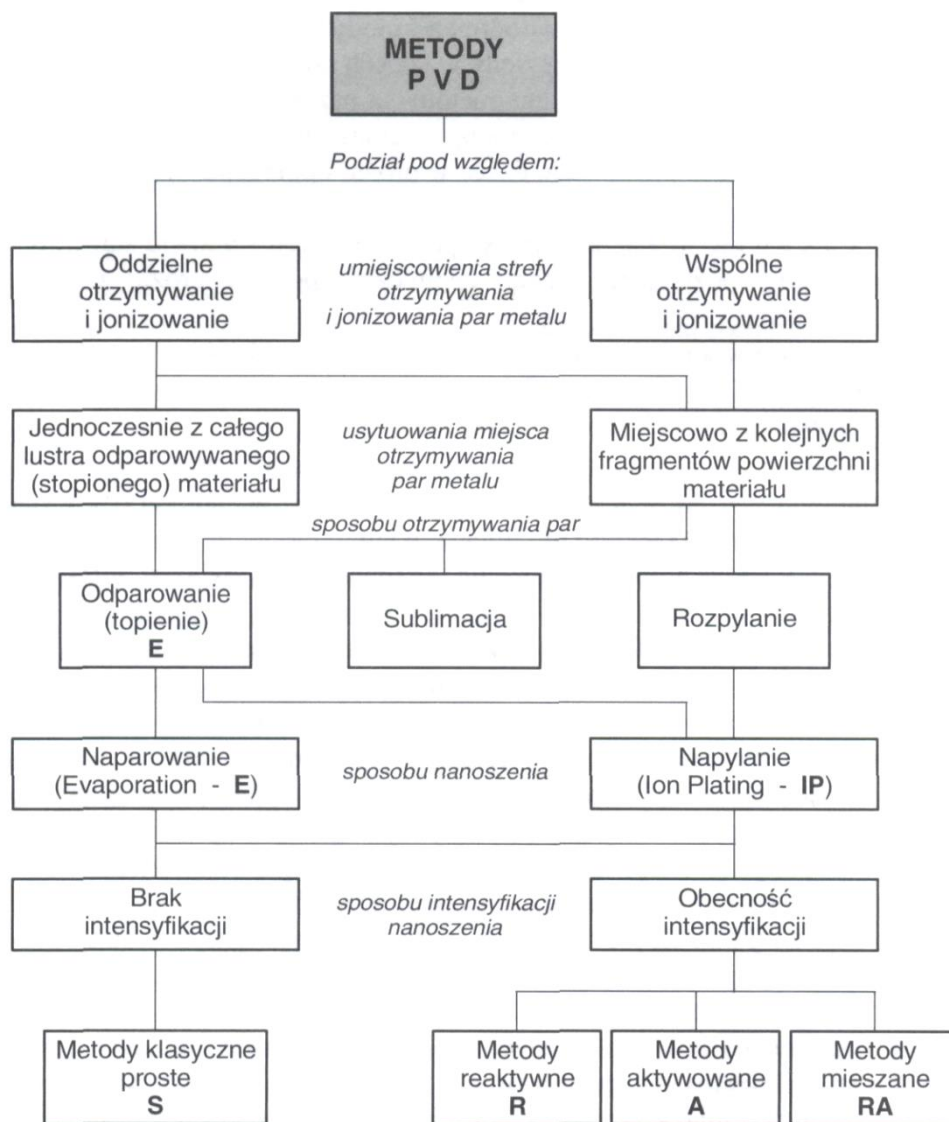
Metody PVD dzieli się często na 2 grupy przyjmując za podstawę podziału brak (*metody proste*, ang. *Simple* - S) lub istnienie intensyfikacji procesu osadzania (*metody wspomagane*, ang. *Assisted*, z zaznaczeniem - w jaki sposób):

- reaktywne (ang. *Reactive* - R) - poprzez stosowanie gazów reaktywnych (np. N₂, węglowodorów, O₂, NH₃, C₂H₂) umożliwiających, w wyniku reakcji chemicznych z parami metali, uzyskiwanie odpowiednio twardego związku powłokowego (np. TiN, VC, Al₂O₃) na powierzchni podłoża.
- aktywowane (ang. *Activated* - A) - poprzez zwiększenie stopnia jonizacji gazów i par metali metodami fizycznymi oraz poprzez podgrzewanie lub polaryzację podłoża; do nazwy metody dodaje się wtedy sposób aktywowania, np. dodatkowa elektroda (ang. *Bias* - B), katoda lub anoda wnekowa (ang. *Hollow-Cathode* - HC, *Hollow-Anode* - HA), pole magnetyczne (ang. *Magnetron-M*),

W tablicy 1 podano najczęściej stosowane substraty do wytwarzania powłok technikami PVD, rodzaje wytwarzanych powłok i ich niektóre właściwości (twardość, temperatura topnienia, przewodność cieplna).

W procesach PVD można wytwarzać powłoki zbudowane z azotków (TiN, ZrN), węglików (TiC, ZrC, HfC, TaC, NbC, VC), tlenków (TiO₂, Al₂O₃) oraz powłoki diamentopodobne DLC (Diamond Like Carbon)⁸⁴. Powłoki te odznaczają się bardzo dobrymi właściwościami eksploatacyjnymi w węzłach tribologicznych. Posiadają one wysokie wartości, małą przewodność cieplną, odporność temperaturową (tabl. 1) oraz są odporne na korozję.

⁸⁴ Mazurkiewicz A., Smolik J.: Advanced technologies of surface engineering. Wyd. ITeE-PIB Radom 2009



Rys. 16. Podział metod PVD osadzania powłok.

/Źródło: Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995./

Substratami do wytwarzania powłok metodami PVD są metale przejściowe (np. Ti, V, Zr, Cr, Mo, W, Nb) oraz gazy reaktywne (np. azot N₂, acetylen C₂H₂, metan CH₄ oraz tlen O₂.) lub pary (np. boru, krzemu)⁸⁵. Ponadto wykorzystywane są często gazy obojętne (np. argon), które nie stanowią składnika powłok.

Tablica 1. Ważniejsze substraty i powłoki osadzone metodami PVD oraz ich właściwości*

⁸⁵ Mazurkiewicz A., Smolik J.: Zaawansowane technologie inżynierii powierzchni wspomagające procesy eksploatacji i wytwarzania. Wydawnictwo ITeE-PIB, Radom 2015

Substraty		Rodzaj powłoki i jej właściwości			
Materiał odparowany lub rozpylany	Gaz reaktywny	Powłoka	Twardość [HV]	Temperatura topnienia [°C]	Przewodność cieplna [J/(cm·s·K)]
Ti	N ₂	TiN	2100÷2400	2950	0,289
Zr	N ₂	ZrN	1600÷1900	2980	0,109
Ti	C ₂ H ₂	TiC	2800÷3800	3070÷3180	0,172÷0,35
Zr	C ₂ H ₂	ZrC	2600	3445÷3530	0,205
Hf	C ₂ H ₂	HfC	2700	3890	0,063
Ta	C ₂ H ₂	TaC	1550÷1800	3780÷3985	0,22
Nb	C ₂ H ₂	NbC	1800÷2400	3480÷3610	0,142
V	C ₂ H ₂	VC	2800÷2900	2650÷2830	0,043
Ti	O ₂	TiO ₂	1100	1867	-
Al	O ₂	Al ₂ O ₃	1800÷2500	2047	0,301
-	CH ₄	DLC	1250÷1650	-	1,0

**/ wg.: Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT. Warszawa 1995./*

W metodach PVD wykorzystywane są różne zjawiska fizyczne do pozyskiwania substratów osadzanych powłok, w tym m.in.:

- odparowanie łukiem elektrycznym – Arc Evaporation (Arc PVD);
- rozpylanie magnetronowe – Magnetron Sputtering (MS);
- odparowanie wiązką elektronów – Electron Beam Evaporation (EB PVD).

W praktyce przemysłowej, najczęściej wykorzystywana jest metoda odparowania łukiem elektrycznym.

2.2.3. Metoda odparowania łukiem elektrycznym – Arc Evaporation

W metodzie odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD wykorzystuje się plazmowe źródła łukowe, wyposażone w katody z materiału, który stanowić będzie substrat wytwarzanej powłoki⁸⁶. Prąd łuku, skoncentrowany na powierzchni katody, powoduje lokalne przegrzanie materiału, jego odparowanie i jonizację oraz utworzenie strumienia plazmy, kierowanego przez działanie pól elektrycznych i magnetycznych, w kierunku materiału podłoża, na którym następuje kondensacja i wzrost powłoki. Procesy Arc PVD charakteryzują się dużą koncentracją jonów, elektronów i wzbudzonych atomów⁸⁷. Dzięki temu krystalizacja w środowisku plazmy jest procesem bardziej korzystnym niż krystalizacja z gazu niezjonizowanego, gdyż jony w plazmie, jak już wspomniano, mogą być sterowane zewnętrznym polem elektrycznym lub

⁸⁶ Mazurkiewicz A., Smolik J.: The innovative direction of hybrid technologies development and implementations in surface engineering area. Archives of Metallurgy and Materials 57(3), 2012, 657-664

⁸⁷ Martin P.J., Bendavid A.: Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition. Thin Solid Films 394, 2001, 1-6

magnetycznym. W efekcie powłoka osadzana w środowisku plazmy charakteryzuje się znacznie większą gęstością oraz lepszą adhezją do podłoża, w porównaniu do powłok osadzanych z gazu niezjonizowanego.

Adhezja powłoki do podłoża jest bardzo istotnym parametrem określającym właściwości powłok nakładanych w procesach Arc PVD. Wpływ na adhezję cienkich powłok do podłoża materiału ma przede wszystkim mikrostruktura materiału podłoża, ale także metoda wytwarzania powłoki. Uzyskanie dużej czystości podłoża zapewnia dobrą adhezję materiału powłokowego do materiału podstawowego. W metodzie Arc PVD, dzięki zastosowaniu wysokonapięciowej polaryzacji podłoża, źródła plazmy łukowej mogą być wykorzystane do trawienia jonowego powierzchni, w celu jej oczyszczenia dla polepszenia adhezji powłoki. Stanowi to dużą zaletę tej metody. Dla polepszenia adhezji powłok do podłoża stali, często oprócz trawienia jonowego jej powierzchni, stosuje się osadzanie cienkiej podpowłoki z czystego metalu, np. chromu (Cr)⁸⁸, azotku tytanu lub azotku chromu (TiN lub CrN), lub wręcz osadza się powłoki dwuwarstwowe, w których międzywarstwę stanowi materiał o bardzo dobrej adhezji do podłoża⁸⁹. Obecność międzywarstwy wpływa na polepszenie adhezji oraz również kompensuje naprężenia wewnętrzne.

2.2.4. Właściwości tribologiczne powłok PVD

Jak już wspomniano, metody PVD, realizowane z udziałem środowiska plazmy, zalicza się do najczęściej stosowanych technik wytwarzania twardych powłok przeciwzużyciowych. W tablicy 2 podano przykłady właściwości tribologicznych różnych par trących typu powłoka PVD/stal⁹⁰. Współczynniki tarcia wyznaczone dla tych par zawierają się w granicach 0,10-0,85 μm .

Na uwagę w tablicy 2 zasługuje bardzo niski współczynnik powłok diamentopodobnych DLC modyfikowanych wolframem (powłoki typu a-C:H:W), rzędu 0,05÷0,15 μm .

⁸⁸ Kasprzycka E.: Properties of tool steel with Cr/CrN type hybrid coatings, obtained by PVD method. Archives of Metallurgy and Materials. 64 (1), 2019, 293-301

⁸⁹ Bayon R., Nevshupa R., Zubizarreta C., Ruiz de Gopegui U., Barriga J., Igartua A.: Characterisation of tribocorrosion behaviour of multilayer PVD coatings, Analytical and Bioanalytical Chemistry 396 (2010) 2855-2862.

⁹⁰ Münz W.D.: Continuous hard coating. Metall Progress 8, 1987,65-68

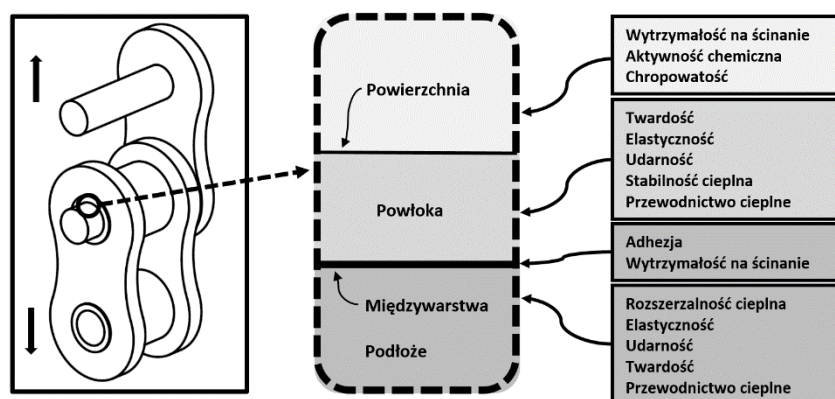
Tablica 2. Właściwości tribologiczne różnych par trących*

Para trąca powłoka/stal		Współczynnik tarcia [μ m]
TiN	stal chromowa 100Cr6	0,44
(TiAl)N	stal chromowa 100Cr6	0,58
(TiAlV)CN	stal nawęglana	0,12
(TiAlV)N	stal chromowa 100Cr6	0,44
WN	stal chromowa 100Cr6	0,85
TiC	stal chromowa 100Cr6	0,20
WC	stal chromowa 100Cr6	0,10
a-C:H:W**	stal chromowa 100Cr6	0,05÷0,15

*/wg. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, WNT. Warszawa 1995./

** a-C:H:W - powłoka DLC modyfikowana wolframem wg Madej M., Ozimina D., Pająk M.: *Właściwości powłok węglowych uzyskiwanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej*. *Mechanik*, 4, 2015, 151-156

Stan stereometryczny powierzchni trących, a zwłaszcza chropowatość powierzchni, ma istotny wpływ na zużycie tribologiczne, gdyż przy dużych nierównościach powierzchni wierzchołki nierówności zaczepiają o siebie i powodują szybkie zużycie ściernie, cieplne i adhezyjne. Na rysunku 17 podano wykaz czynników determinujących właściwości tribologiczne układu areologicznego, stanowiącego warstwę wierzchnią materiału z osadzoną powłoką, sporządzony przez Holmberga^{91,92}.



Rys. 17. Czynniki determinujące właściwości tribologiczne powłoki

/Źródło: Holmberg K., Ronkainen H., Matthews M.: *Tribology of thin coatings*. *Ceram. Int.*, 26, 2000, 787–795/

Powłoki zapobiegające zużyciu przez tarcie powinny spełniać następujące warunki⁹³:

- zmniejszać zużycie,

⁹¹ Holmberg K., Ronkainen H., Matthews M.: *Tribology of thin coatings*. *Ceram. Int.*, 26, 2000, 787–795

⁹² Madej M., Ozimina D., Pająk M.: *Właściwości powłok węglowych uzyskiwanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej*. *Mechanik*, 4, 2015, 151-156

⁹³ Madej M.: *The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings*. *Wear* 317, 2014, 179-187

- zapobiegać i redukować bezpośredni styk elementów metalowych,
- ułatwiać ruch styczny poprzez redukcję sił tarcia,
- powodować rozkład sił normalnych na możliwie największym obszarze nominalnej powierzchni styku,
- tłumić drgania i ruchy oscylacyjne.

Reasumując, powłoki zapobiegające zużyciu przez tarcie powinny charakteryzować się przede wszystkim wysoką twardością, odpornością na ścinanie, zginanie, pękanie oraz dobrą adhezją do podłoża.

Takie właściwości mają powłoki węglowe diamentopodobne DLC modyfikowane wolframem (powłoki DLC typu a-C:H:W), tabl. 2. Dobre właściwości tribologiczne wykazują również powłoki diamentopodobne modyfikowane chromem (powłoki DLC typu a-C:H:Cr)⁹⁴.

2.3. Powłoki węglowe diamentopodobne

Ze względu na uzyskiwaną strukturę powłoki węglowe można podzielić na dwie grupy: powłoki zawierające wodór, tzw. a-C:H określane w literaturze jako *hydrogenated amorphous carbon films*. Drugą grupę stanowią natomiast powłoki nie zawierające wodoru, tzw. a-C (*non-hydrogenated amorphous carbon films*)^{95,96}. Powłoki a-C otrzymywane są zazwyczaj w procesie wspomaganego plazmą rozpylania lub odparowania tarczy grafitowej (rozpylanie magnetronowe⁹⁷, rozpylanie łukowe⁹⁸, ablacja laserowa⁹⁹).

Natomiast metody wytwarzania powłok a-C:H bazują na dekompozycji węglowodorów i należą najczęściej do grupy metod PACVD^{100,101}. Występowanie wodoru w powłokach węgla determinuje ich właściwości. W efekcie występowania wiązań C-H osłabiona zostaje sieć węgla co powoduje, że twardość takich materiałów jest mniejsza niż twardość węglików i azotków metali przejściowych stosowanych powszechnie jako twarde powłoki przeciwzużyciowe. W zależności od parametrów procesu wytwarzania powłok węglowych zawartość wodoru w tych materiałach może się zmieniać od ułamków procenta do

⁹⁴ Vercamen K.: A comparative study of state-of-the-art diamond-like carbon films, *Surface and Coatings Technology* 133-134, 2000, 466-472

⁹⁵ Cheng Y.H. et al: On the deposition mechanism of a-C:H films by plasma enhanced chemical vapor deposition, *Surface and Coatings Technology* 135, 2000, 27-33

⁹⁶ Angus J.C.: Diamond and diamond-like films, *Thin Solid Films* 216, 1992, 126-133

⁹⁷ Richter F.: Preparation and properties of amorphous carbon and hydrocarbon films, *Thin Solid Films* 212, 1992, 245-250.

⁹⁸ Whang K.W., Tae H.S.: The properties of diamond-like carbon films prepared by r.f. discharges, *Thin Solid Films* 204, 1991, 49-58

⁹⁹ Schultrich B., Scheibe H.-J., Drescher D., Ziegele H.: Deposition of superhard amorphous carbon films by pulsed vacuum arc deposition, *Surface and Coatings Technology* 98, 1998, 1097-1101

¹⁰⁰ Cheng Y.: Influence of deposition parameters on the internal stress in a-C:H films, *Surface and Coatings Technology* 111, 1999, 141-147

¹⁰¹ Mitura S., Haś Z., Gorokhovskiy V.: The system for depositing hard diamond-like films onto complex-shaped machine elements in an r.f. arc plasma, *Surface and Coatings Technology* 47, 1991, 106-112

kilkudziesięciu procent^{102,103}, co determinuje na ich skład fazowy. W skład struktury fazowej Powłoki węglowe mogą zawierać trzy różne fazy: diament, grafit lub grupy polimerowe $CH_{n=1,2,3}$ ¹⁰⁴, a ich wzajemny udział determinuje właściwości powłok. Na szczególną uwagę zasługują w tym przypadku takie właściwości jak: moduł Younga (E), charakteryzujący stan wiązań w badanym materiale oraz gęstość (ρ), które pozwalają jednoznacznie identyfikować poszczególne grupy powłok węglowych. Przykładowe właściwości różnych powłok węglowych pokazano w tabelicy 3.

Tablica 3. Przykładowe właściwości różnych powłok węglowych*

Materiał	Twardość	Moduł Younga	Gęstość
a-C:H	10÷15 GPa	E=100÷300 GPa	$\rho < 2,40 \text{ g/cm}^{-3}$
a-C	$\approx 40 \text{ GPa}$	E=300÷800 GPa	$\rho = 2,40 \div 3,30 \text{ g/cm}^{-3}$
diament	$\approx 900 \text{ GPa}$	E>800 GPa	$\rho > 3,30 \text{ g/cm}^{-3}$

*/wg Donnet C., et al.: Surface and Coatings Technology 120-121 (1999) 548/

Istotne różnice w składzie fazowym powłok węglowych znajdują odzwierciedlenie w terminologii stosowanej przez niektórych autorów, którzy uwzględniając dominującą z faz różnicują powłoki węglowe dodatkowo na: *diamond-like a-C:H films*, *graphite-like a-C:H films* oraz *polymer-like a-C:H films*.

W większości przypadków skład fazowy powłok węglowych jest złożony, zawiera zarówno węgiel w postaci diamentu, grafitu jak również fazy polimerowe węgla. Z tego też powodu w literaturze bardzo często wszystkie powłoki komponowane na bazie węgla określa się mianem powłok DLC – *Diamond Like Carbon*.

Powłoki typu a-C:H, wytwarzane na drodze dekompozycji węglowodorów, są tańsze i łatwiejsze technicznie do realizacji w porównaniu z powłokami typu a-C. Analiza danych literaturowych dotyczących procesu tarcia powłok DLC wskazuje, że powłoki a-C:H zawierające wodór charakteryzują się znacznie niższym współczynnikiem tarcia w stosunku do materiałów współpracujących, niż powłoki typu a-C. Przykładowe różnice w wartościach współczynnika tarcia dla powłok a-C oraz a-C:H pokazano w tabelicy 4.

Tablica 4. Przykładowe wartości współczynnika tarcia dla powłok a-C oraz a-C:H

¹⁰² Donnet C.: Diamond-like carbon-based functionally gradient coatings for space tribology, Surface and Coatings Technology 120-121, 1999, 548-554

¹⁰³ Ullmann J., Schulze S., Erben J., Grünwald W., Heger D., Mühling I.: Diamond-like amorphous carbon films prepared by r.f. sputtering in argon: electron-assisted investigations, Thin Solid Films 219, 1992, 109-118

¹⁰⁴ Kudoyarova V.Kh., Hernyshov A.V., Zvonareva T.K., Dzhelepova N.B., Tsolov M.B.: Study of diamond-like carbon films for protective coatings, Surface and Coatings Technology 100-101, 1998, 192-195

Współczynnik tarcia powłok [μm]		Atmosfera	Literatura
a-C	a-C:H		
0,65	0,003÷0,015	N ₂	A.Erdemir, O.L.Eryilmaz, I.B.Nilufer, G.R.Fenske, Surface and Coatings Technology 133-134 (2000) 448
0,30	0,02÷0,07	próżnia	C.Donnet, <i>et al.</i> , Surface and Coatings Technology 120-121 (1999) 548
0,23÷0,25	0,08÷0,35	powietrze	Y.Liu, A.Erdemir, E.I.Meletis, Surface and Coatings Technology 94-95 (1997) 463

Powłoki typu a-C:H charakteryzują się również mniejszą twardością w porównaniu z powłokami azotków lub węglików tj. $\approx 10 \text{ GPa}$ ¹⁰⁵, a także dużą wartością naprężeń ściskających $>3 \text{ GPa}$, co może być przyczyną ich słabej adhezji do niektórych materiałów podłoża i wymaga stosowania warstw przejściowych.

Najbardziej skutecznym kierunkiem modyfikowania właściwości powłok a-C:H wydaje się być ich domieszkowanie metalami (a-C:H:Me). Wykazano, że zawartość około 15% domieszki metalu (np. Ti, Nb, Cr, Mo, W, Co) w powłoce a-C:H zapewnia niską wartość współczynnika tarcia ($\mu_{\text{a-C:H:Me}} < 0,1$) zarówno w atmosferach o dużej wilgotności, jak również w atmosferach czystych¹⁰⁶. Jednocześnie powłoki tego typu charakteryzują się mniejszymi naprężeniami ściskającymi $< 1 \text{ GPa}$ ¹⁰⁷ i wykazują lepszą adhezję do podłoży metalicznych niż powłoki a-C:H. Obecność metalu w procesie formowania powłoki DLC stwarza możliwość powstania w jej strukturze twardych faz węglkowych Me-C¹⁰⁸, a poprzez dodatkowe wprowadzenie azotu do atmosfery procesu, również tworzenia się twardych faz azotkowych Me-N oraz C-N. Skutkiem formowania się twardych faz azotków i węglków w powłokach a-C:H:Me jest wzrost ich twardości. Przykład stanowiąc mogą powłoki diamentopodobne na bazie chromu, typu a-C:H:Cr, które charakteryzują się wysoką twardością (ok. 24 GPa), dobrą adhezją do podłoża oraz dobrymi właściwościami tribologicznymi^{109,110}.

Domieszkowanie powłok DLC metalami (a-C:H:Me) umożliwia ponadto wytwarzanie powłok o małej wartości naprężeń wewnętrznych (naprężeń ściskających) oraz niskiej wartości

¹⁰⁵ Pappas D.L., Hopwood J.: Deposition of diamondlike carbon using a planar radio frequency induction plasma, Journal of Vacuum Science and Technology A12(4) Jul/Aug, 1994, 1576-1579

¹⁰⁶ Donnet C.: Tribochemistry of diamond-like carbon coatings in various environments, Surface and Coatings Technology 68-69, 1994, 626-631

¹⁰⁷ Donet C.: Recent progress on the tribology of doped diamond-like and carbon alloy coatings: a review, Surface and Coatings Technology 100-101, 1998, 180-186

¹⁰⁸ Mack M.: Surface Technology. MediaPRINT Landsberg Germany (1990) ISBN 930038

¹⁰⁹ Pancielejko M., Czyżniewski A., Gilewicz A., Zavalayev V.: Właściwości powłok DLC z podwarstwami na bazie chromu zastosowanych na narzędziach ze stali szybkoobrotowej do obróbki drewna. Inżynieria Materiałowa 6, 2014, 535-538.

¹¹⁰ Grischke M., Bewilogua K., Trojan K., Dimige H.: Application-oriented modifications of deposition processes for diamond-like-carbon-based coatings, Surface and Coatings Technology 74-75, 1995, 739-745.

współczynnika tarcia, zarówno w atmosferach o dużej wilgotności, jak również w atmosferach suchych¹¹¹. Bardzo interesującym rozwiązaniem materiałowym w tym zakresie są powłoki a-C:H domieszkowane wolframem – a-C:H:W (*tungsten-doped hydrogenated amorphous carbon DLC*)^{112,113}. W zależności od zawartości wolframu powłoki a-C:H:W charakteryzują się twardością w zakresie 15 ÷ 25 GPa¹¹⁴, współczynnikiem tarcia ok. $\mu = 0,15$, a także bardzo dużą gładkością $Ra \approx 0,02 \mu\text{m}$. Charakteryzują się one bardzo dobrą adhezją do różnych rodzajów podłoża, a ich odporność cieplna umożliwia ich wykorzystanie do temperatury pracy $\approx 350^\circ\text{C}$. Wyniki badań właściwości powłok a-C:H:W osadzanych na różnych materiałach podłoża, badanych w różnych skojarzeniach testowych, dają podstawę do wykorzystania powłok a-C:H:W w celach przeciwzużyciowych, w wysokoobciążonych węzłach tarcia, w tym również w tarcu ślizgowo-tocznym^{115,116}.

¹¹¹ Dong-Wook Kim: Tribological characteristics of Cr/CrN/a-C:H/W/a-C:H coating under boundary lubrication conditions with glycerol mono-oleate (GMO) and molybdenum dithiocarbamate (MoDTC), *Wear* 342-343, 2015, 107-116.

¹¹² Madej M., Ozimina D: Właściwości tribologiczne powłok DLC, *Tribologia* 3, 2012, 96-102.

¹¹³ Schmid C., Hetzner H., Tremmel S., Hilpert F., Durst K.: Tailored Mechanical Properties and Residual Stresses of a-C:H:W Coatings, *Advanced Materials Research* 996, 2014, 14-21.

¹¹⁴ www.performcoat.com/applications/components/

¹¹⁵ Michalczewski R.: The Rolling Contact Fatigue of PVD Coated Spur Gears, *Key Engineering Materials* 527, 2013, 77-82.

¹¹⁶ Michalczewski R.: Właściwości tribologiczne smarowanych, wysokoobciążonych elementów maszyn pokrytych cienkimi powłokami niskotarciowymi, Monografia: Wydawnictwo ITeE-PIB w Radomiu, ISBN 978-837789-108-7

3. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

Analiza stanu wiedzy w zakresie eksploatacji rolkowych łańcuchów napędowych, przedstawiona w rozdziale 2.1., wykazała, że ich trwałość ma decydujące znaczenie w eksploatacji przekładni łańcuchowych, powszechnie wykorzystywanych w różnych dziedzinach przemysłu, min. przemyśle spożywczym, rolniczym, metalowym, górniczym. Dynamiczny rozwój opracowań konstrukcyjnych w zakresie maszyn i urządzeń, w których wykorzystywane są przekładnie łańcuchowe, spowodował wzrost wymagań dotyczących jakości wykonania łańcuchów napędowych. W szczególności stawiane są coraz większe wymagania w zakresie polepszenia parametrów wytrzymałościowych przekładni łańcuchowych oraz wydłużenia okresu ich stabilnej pracy, bez potrzeby wymiany poszczególnych elementów, a więc wymagania dotyczące zwiększenia ich trwałości i niezawodności. Sprostanie tym wymaganiom nie jest możliwe przy zastosowaniu dotychczas stosowanych tradycyjnych metod obróbki powierzchni elementów łańcuchów, takich jak obróbka cieplno-chemiczna, np. nawęglanie, chromowanie dyfuzyjne, czy też obróbka galwaniczna, np. chromowanie galwaniczne. W świetle danych literaturowych (rozdział 2.2.) bardzo duże możliwości w tym zakresie stwarzają nowoczesne techniki inżynierii powierzchni.

Szczegółowa analiza mechanizmów zużycia rolkowych łańcuchów napędowych, przeprowadzona w niniejszej pracy, wykazała, że głównym elementem konstrukcyjnym łańcucha ulegającym zużyciu ściernemu i powodującym jego wydłużanie, jest sworzeń. W związku z tym, przeprowadzono analizę i badania własne czynników niszczących sworznie w łańcuchach napędowych (rozdział 2.1.4.), które wykazały, że głównym czynnikiem niszczącym, w tym przypadku, jest zużycie ścierne. Jako czynnik niszczący, należy również uwzględnić oddziaływanie korozyjne środowiska, w którym eksploatowane są łańcuchy. Eksploatacja w warunkach zmiennych wymuszeń tribologicznych i korozyjnych powoduje niekorzystne zmiany struktury materiałów, które mogą być przyczyną utraty ich ważnych właściwości mechanicznych.

Analiza stanu wiedzy przeprowadzona w zakresie nowoczesnych technik inżynierii powierzchni (rozdział 2.2.) wykazała, że z racji tego iż procesy niszczenia sworzni koncentrują się w ich warstwie wierzchniej, najbardziej efektywnym działaniem, ograniczającym intensywność ich degradacji, może być odpowiednio zaprojektowana obróbka powierzchniowa. Jednak brak jest danych, dotyczących nowoczesnych technik inżynierii powierzchni w zastosowaniu do zwiększenia trwałości łańcuchów napędowych,

a w szczególności sworzni, narażonych podczas eksploatacji m.in. na zużycie tribologiczne oraz korozję.

Według danych literaturowych, zapewnienie nowych, nieosiągalnych dotąd właściwości funkcjonalnych części maszyn i urządzeń można uzyskać przez zastosowanie nowoczesnych technik PVD, realizowanych z udziałem plazmy, przy obniżonym ciśnieniu. Należy podkreślić, że metody PVD, zalicza się do najczęściej stosowanych technik wytwarzania twardych powłok przeciwzużyciowych, przy czym w praktyce przemysłowej najczęściej stosuje się metodę odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD.

Na podstawie szczegółowej analizy właściwości powłok wytwarzanych metodami PVD (rozdziały 2.2.4. i 2.3.), do badań wybrano powłoki diamentopodobne DLC typu a-C:H:W, bazujące na dekompozycji węglowodorów, modyfikowane wolframem, które charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia, wysokim modułem sprężystości, odpornością na kruche pękanie, niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej oraz odpornością na korozję.

Dla polepszenia adhezji powłoki do podłoża stali, jak wspomniano w rozdziale 2.2.3., oprócz trawienia jonowego jej powierzchni, efektywne jest wytworzenie powłoki dwuwarstwowej, w której międzywarstwa, przylegająca do powierzchni metalu, charakteryzuje się dobrą adhezją do podłoża stali. Obecność międzywarstwy, zgodnie z danymi z literatury, wpływa na zmniejszenie naprężeń ściskających występujących w dwuwarstwowej powłoce, a tym samym na polepszenie jej adhezji do podłoża stali.

Z tego też względu do badań wytypowano powłokę dwuwarstwową: diamentopodobną DLC typu a-C:H:W modyfikowaną wolframem z międzywarstwą z wolframu, oznaczaną w tej pracy jako **W/W-DLC**. Powłokę tą osadzano metodą odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD na powierzchni stali stopowej 42CrMo4, która jest stosowana na sworznie.

Przeprowadzono również badania powłoki dwuwarstwowej: diamentopodobnej DLC typu a-C:H:Cr, modyfikowanej chromem z międzywarstwą z chromu, oznaczaną jako **Cr/Cr-DLC**, która wg danych literaturowych, odznacza się wysoką twardością, dobrą adhezją do podłoża stali oraz dobrymi właściwościami tribologicznymi.

W literaturze brak jest danych dotyczących stosowania powłok dwuwarstwowych, typu W/W-DLC oraz Cr/Cr-DLC, dla polepszenia właściwości łańcuchów napędowych rolkowych, a w szczególności sworzni, stanowiących ich podstawowy element konstrukcyjny. Brak jest również informacji na temat właściwości mechanicznych i tribologicznych tych powłok, uzyskanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej, PVD. Próbę wyjaśnienia niektórych z tych problemów stanowić będzie niniejsza rozprawa.

4. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

4.1. Cel i teza pracy

Celem pracy była analiza możliwości wykorzystania nowoczesnych metod inżynierii powierzchni dla zwiększania trwałości sworzni, stanowiących element rolkowych łańcuchów napędowych, stosowanych powszechnie w przemyśle.

Na podstawie szczegółowej analizy stanu wiedzy, w niniejszej pracy zastosowano nowoczesną metodę odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD, realizowaną z udziałem plazmy, przy obniżonym ciśnieniu, często wykorzystywaną w przemyśle do wytwarzania twardych powłok przeciwzużyciowych.

W oparciu o dane literaturowe, do badań wytypowano powłoki dwuwarstwowe typu W/W-DLC, osadzone metodą odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD na powierzchni stali 42CrMo4, wytwarzane dwuetapowo, przez osadzenie najpierw czystego wolframu na powierzchni stali, a następnie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem DLC typu a-C:H:W.

Ponadto, przeprowadzono badania powłok dwuwarstwowych typu Cr/Cr-DLC, wytwarzanych dwuetapowo, przez osadzenie najpierw czystego chromu na powierzchni stali, a następnie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej chromem DLC typu a-C:H:Cr.

Osadzanie powłok z czystych metali, wolframu lub chromu, na powierzchni stali, jako międzywarstwy w powłokach dwuwarstwowych, kompensuje naprężenia wewnętrzne i polepsza adhezję powłok do podłoża stali.

Dla porównania, przeprowadzono również badania powłok otrzymywanych z czystego chromu (powłok typu Cr), osadzanych metodą Arc PVD, gdyż w niektórych przypadkach, dla zwiększenia trwałości sworzni, stosuje się chrom osadzany za pomocą tradycyjnej obróbki galwanicznej.

Analiza danych literaturowych, przeprowadzona w niniejszej pracy, wykazała, że w przypadku wysokoobciążonych węzłów tarcia, szczególnie dobre właściwości przeciwzużyciowe, mogą mieć powłoki diamentopodobne DLC typu a-C:H:W modyfikowane wolframem.

Z tego też względu sformułowano następująca tezę badawczą pracy:

Zwiększenie trwałości sworzni, stanowiących główny element konstrukcyjny łańcuchów napędowych, stosowanych powszechnie w przemyśle, można uzyskać przez wytworzenie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem, typu W/W-DLC, osadzonej dwuetapowo metodą Arc PVD, najpierw przez nałożenie czystego wolframu na powierzchnię stali, a następnie powłoki DLC typu a-C:H:W.

Należy podkreślić, że technologię Arc PVD zalicza się do technologii wysoko zaawansowanych i czystych ekologicznie.

4.2. Zakres pracy

Cel i teza badawcza niniejszej pracy wyznaczyły jej zakres i sposób realizacji. Zakres pracy obejmował:

- wytworzenie powłok dwuwarstwowych, typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC oraz powłok jednowarstwowych typu Cr, na powierzchni próbek ze stali 42CrMo4, metodą odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD,
- zbadanie budowy powłok,
- zbadanie chropowatości powłok,
- zbadanie twardości i modułu Younga powłok,
- zbadanie adhezji powłok do podłoża stali,
- zbadanie odporności na zużycie ściernie,
- zbadanie odporności na korozję powłok.

Część eksperymentalna pracy wykonana była w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB (ITe-PIB) w Radomiu oraz na Politechnice Warszawskiej.

Budowa powłok, ich morfologia, skład chemiczny oraz pomiary grubości powłok określone były przy wykorzystaniu metod mikroskopii optycznej, elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM+EDS+BSE) oraz rentgenowskiej analizy fazowej. Określano również chropowatość, twardość oraz moduł Younga wytwarzanych powłok. Zbadano adhezję powłok do podłoża metodą wciskania wgłębnika oraz za pomocą testu zarysowania. Badania odporności na zużycie ściernie próbek z powłokami określone były metodą kula-tarcza (ball-on-disc). Odporność na korozję próbek z powłokami oceniano metodami elektrochemicznymi.

W pracy zastosowano nowoczesne metody badań i aparaturę: powłoki wytwarzano metodą odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD na urządzeniu technologicznym typu Standard MZ 383, produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, badania budowy powłok wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego firmy HITACHI TM 3000,

wyposażonego w detektory BSE i EDS. Skład chemiczny powłok badano metodą EDS z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego f-my: Noran Instruments, w który wyposażony jest mikroskop skaningowy Hitachi TM 3000. Rentgenowską analizę fazową wykonano na dyfraktometrze rentgenowskim firmy Bruker D8 ADVANCE. Do pomiaru chropowatości wykorzystano Profilograf Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson. Obserwacje powierzchni próbek wykonano za pomocą mikroskopu cyfrowego KEYENCE VHX 1000. Badania twardości i modułu Younga warstw przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia Nano-Hardness TESTER szwajcarskiej firmy CSM. Test zarysowania wykonano przyrządem typu REVETEST produkcji firmy CSEM. Badania odporności na zużycie ściernie wykonane na tribotesterze typu kula-tarcza (ball – on – disc) firmy DUCOM.

W tabelicy 5 podano zakres badań powłok wytwarzanych metodą Arc PVD na powierzchni stali 42CrMo4.

Tablica 5. Zakres badań wytworzonych powłok

Zakres badań		
Budowa powłok	Właściwości mechaniczne	Właściwości użytkowe
1. Morfologia powierzchni powłok	1. Chropowatości powierzchni	1. Odporności na zużycie ściernie
2. Budowa, skład chemiczny i skład fazowy powłok	2. Twardość i moduł Younga	2. Odporności korozyjna
3. Grubość powłok	3. Adhezja powłok do podłoża stali	

5. METODYKA BADAŃ

5.1. Materiały do badań

W procesach Arc PVD substraty do wytwarzania powłok Cr oraz Cr/Cr-DLC stanowiły jony chromu otrzymywane metodą łukową z katod (targetów) zawierających czysty chrom, o zawartości 99,9% at. Cr. Natomiast do wytwarzania powłok W/W-DLC stosowano targety z czystego wolframu, o zawartości 99,9% at. W. Jako gazy robocze stosowano argon i acetylen o czystości 99,995% at.

Powłoki wytwarzano na stali konstrukcyjnej stopowej do ulepszenia cieplnego 42CrMo4 (40HM wg PN), stosowanej do wyrobu sworzni. Skład chemiczny stali podano w tabelicy 6.

Tablica 6. Skład chemiczny stali

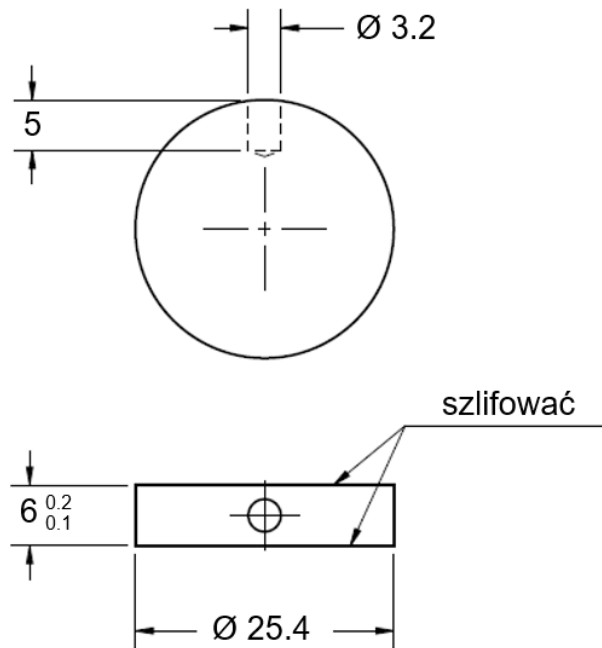
Gatunek stali wg EN 10083-3:2006	Skład chemiczny [%]									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	W
42CrMo4 (40HM wg PN*)	0,41	0,5	0,31	0,030	0,035	1,1	0,2	0,21	0,04	0,1

*PN-89/H-84030/04

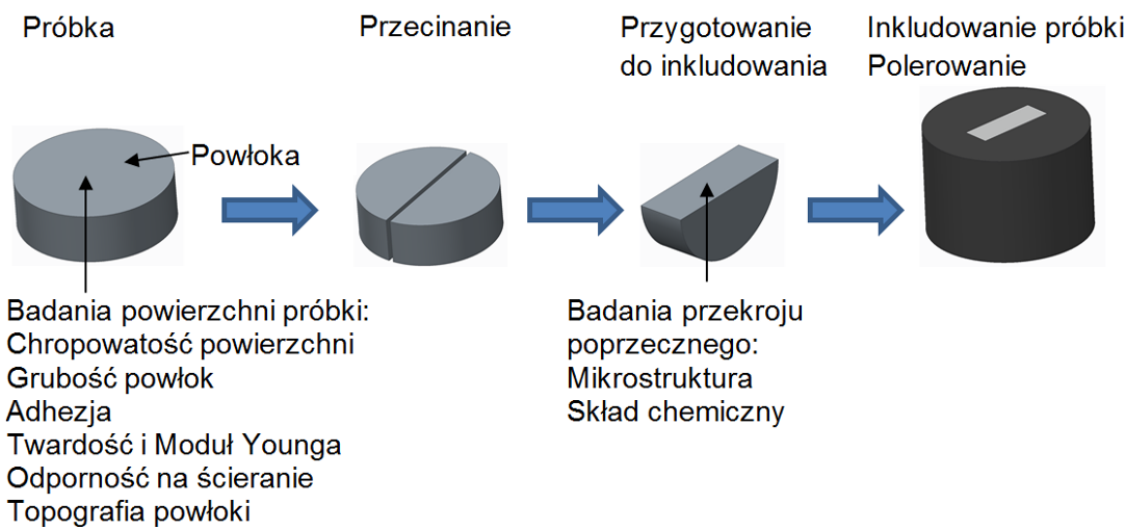
5.2. Próbki do badań

Wybrane do badań powłoki osadzano na próbkach o wymiarach ϕ 25,4x6 mm, wykonanych ze stali 42CrMo4, których powierzchnie czołowe poddano szlifowaniu mechanicznemu, a następnie polerowania z udziałem diamentowych past polerskich do uzyskania parametru chropowatości $R_a = 0,05 \mu\text{m}$. Schemat próbki pokazano na rysunku 18.

Próbki te wykorzystano do badań odporności na zużycie przez tarcie metodą tarcza – kula oraz do badań metalograficznych. Schemat przygotowania zglądów poprzecznych próbek do badań metalograficznych pokazano na rys. 19.



Rys. 18. Schemat próbki krążkowej do badań zużycia przez tarcie oraz do badań metalograficznych
 /Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/



Rys. 19. Schemat przygotowania zglądów poprzecznych próbek do badań metalograficznych
 /Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Dla przeprowadzenia badań metalograficznych próbki przecięto mechanicznie w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni powłoki przy użyciu piły Secotom 50. Następnie połowę próbki inkludowano w żywicy poliestrowej, wykorzystując prasę LaboPress 3. Następnym etapem preparatyki próbek było przygotowanie powierzchni cięcia próbki, czyli szlifowanie mechaniczne zgrubne, a następnie dokładne. Kończącym etapem przygotowania

powierzchni do badań było polerowanie z udziałem diamentowych past polerskich do uzyskania parametru chropowatości $R_a = 0,03 \mu\text{m}$. Procesy szlifowania i polerowania wykonano na polerze RotoPol 11 firmy Struers, z wykorzystaniem past diamentowych. Dla tak przygotowanych próbek przeprowadzono obserwacje mikroskopowe oraz analizę składu chemicznego.

W badaniach były również stosowane inne próbki różniące się wymiarami, kształtem oraz sposobem przygotowania w zależności od ich przeznaczenia, np. do przeprowadzenia badań składu fazowego warstw przy pomocy metody rentgenowskiej analizy fazowej oraz do badań korozyjnych służyły próbki o wymiarach $\varnothing 35 \times 3 \text{ mm}$.

5.3. Sposób wytwarzania powłok

Przedmiot badań w pracy stanowiły trzy rodzaje powłok, osadzanych na powierzchni stali 42CrMo4 metodą odparowania łukiem elektrycznym (Arc-PVD):

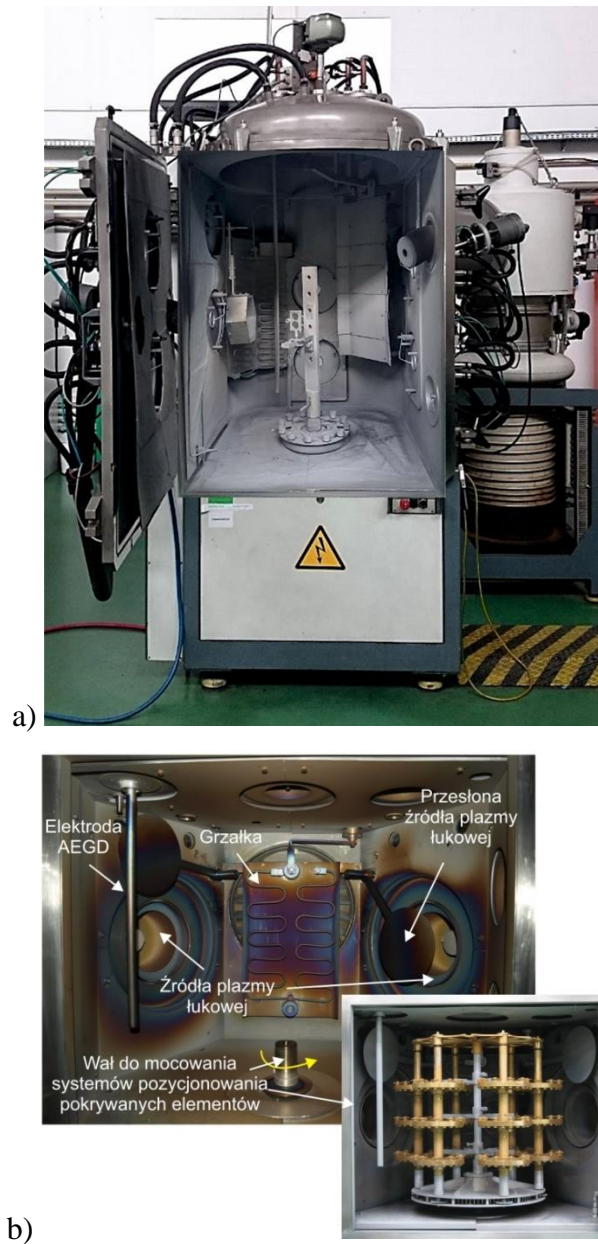
- W/W-DLC - powłoki dwuwarstwowe, wytwarzane przez osadzenie na powierzchni stali czystego wolframu W, a następnie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem W-DLC typu a-C:H:W,
- Cr/Cr-DLC - powłoki dwuwarstwowe, wytwarzane przez osadzenie na powierzchni stali czystego chromu Cr, a następnie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej chromem Cr-DLC typu a-C:H:Cr,
- Cr – powłoki jednowarstwowej, wytwarzanej przez osadzanie na powierzchni stali czystego chromu, typu Cr.

W razie potrzeby, dla poprawy właściwości podłoża stali przeprowadzono obróbkę cieplną (hartowanie $840^\circ\text{C}/0,5\text{h}$ i odpuszczanie $340^\circ\text{C}/2\text{h}$).

Osadzanie powłok na powierzchni próbek ze stali 42CrMo4, wykonano w urządzeniu technologicznym typu Standard MZ 383, produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu, wykorzystując technikę odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD. Urządzenie wyposażone jest w źródła łukowe o średnicy katod wynoszącej $\varnothing 80 \text{ mm}$, ponadto w nowoczesny system zasilania, system polaryzacji podłoża, jak również system monitorowania temperatury podłoża oraz ciśnienia gazów roboczych, rys. 20.

Konstrukcja wewnętrzna komory zapewnia strefę procesową o kształcie walca i wymiarach: średnica $\varnothing = 500 \text{ mm}$ i wysokość $h = 800 \text{ mm}$. Urządzenie wyposażone jest w pompę turbomolekularną Leybold Turbo VAC MAG W 2800C, która utrzymuje stabilną szybkość pompowania w zakresie ciśnień $10^{-5} \text{ Pa} < p < 10 \text{ Pa}$. System dozowania atmosfery gazowej f-my MKS Instruments zapewnia kontrolę przepływu gazów procesowych i kontrolę

ciśnienia. Urządzenie wyposażone jest w mechanizm umożliwiający obrót pokrywanych elementów.



Rys. 20. Urządzenie typu Standard produkcji ITeE - PIB w Radomiu do wytwarzania powłok metodą Arc PVD: a) widok ogólny, b) widok wnętrza komory roboczej i mechanizmu obrotowego

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/

Przed procesami osadzania powłok próbki poddawano procesowi mycia chemicznego w trichloroetylenie, z wykorzystaniem myjki typu UMO-50-1000, zgodnie z parametrami podanymi w tablicy 7.

Tablica 7. Parametry oczyszczania chemicznego próbek w trichloroetylenie w myjce ultradźwiękowej typu UMO 50 1000

Nr etapu	Nazwa etapu	Parametry etapu
I	Mycie zanurzeniowe	t = 8 min, temperatura 85°C
II	Mycie zanurzeniowe	t = 8 min, temperatura 50°C, ultradźwięki
III	Mycie zanurzeniowe	t = 8 min, temperatura 85°C
IV	Mycie w parach	t = 8 min

Przed rozpoczęciem każdego procesu, próbki wstępnie nagrzewano w komorze próżniowej, przy wykorzystaniu grzałek oporowych, do temperatury 300°C, przy ciśnieniu $5,0 \cdot 10^{-3}$ Pa.

Osadzanie powłok typu W/W-DLC

Procesy wytwarzania powłok typu W/W-DLC zrealizowano z wykorzystaniem źródeł plazmy łukowej wyposażonych w katody wolframowe oraz w elektrostatyczne separatory fazy kropelkowej. Proces wytwarzania powłoki W/W-DLC poprzedzono etapem trawienia jonowego jonami wolframu w celu oczyszczenia pokrywanego podłoża oraz jego nagrzania do temperatury $\approx 400^\circ\text{C}$. Procesy osadzania powłok przeprowadzono w dwóch etapach:

- 1 – osadzanie powłoki z czystego wolframu w atmosferze argonu, w celu kompensacji naprężeń wewnętrznych i polepszenia adhezji powłoki do podłoża,
- 2 – osadzanie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem W-DLC typu a-C:H:W w atmosferze stanowiącej mieszaninę acetylenu C_2H_2 i argonu.

Parametry procesu nakładania powłok typu W/W-DLC metodą Arc PVD podano w tablicy 8.

Tablica 8. Parametry osadzania powłok typu W/W-DLC metodą Arc PVD

Ciśnienie w komorze p [Pa]	Przepływ gazów roboczych [ml/min.]		Napięcie polaryzacji podłoża U_{BIAS} [V]	Natężenie prądu źródła I_z [A]	Natężenie prądu katody I_{AEGD} [A]	Temperatura T [°C]	Czas t [min.]
	pC ₂ H ₂	pAr					
Trawienie AEGD							
$5 \cdot 10^{-3}$	-	185	-300		100	300	25
Trawienie podłoża jonami W ⁺							
$5 \cdot 10^{-1}$	-	185	-750 ÷ -900	120	-	400	5
Osadzanie powłoki W							
$5 \cdot 10^{-1}$	-	185	-50	120	-	380	10
Osadzanie powłoki W-DLC							
$8 \cdot 10^{-1}$	45	180	-100	120	-	380	60

Osadzanie powłok typu Cr/Cr-DLC

Procesy wytwarzania powłok typu Cr/Cr-DLC zrealizowano z wykorzystaniem źródeł plazmy łukowej wyposażonych w katody z czystego chromu oraz w elektrostatyczne separatory fazy kropelkowej. Proces wytwarzania powłoki Cr/Cr-DLC poprzedzono etapem trawienia jonowego jonami chromu w celu oczyszczenia pokrywanego podłoża oraz jego nagrzania do temperatury $\approx 212^\circ\text{C}$. Procesy osadzania powłok przeprowadzono w dwóch etapach:

1 – osadzanie powłoki z czystego chromu w atmosferze argonu, w celu kompensacji naprężeń wewnętrznych i polepszenia adhezji powłoki do podłoża,

2 – osadzanie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej chromem Cr-DLC typu a-C:H:Cr w atmosferze stanowiącej mieszaninę acetyleny C₂H₂ i argonu.

Parametry procesu nakładania powłok typu Cr/Cr-DLC metodą Arc PVD podano w tablicy 9.

Tablica 9. Parametry osadzania powłok typu Cr/Cr-DLC metodą Arc PVD

Ciśnienie w komorze p [Pa]	Przepływ gazów roboczych [ml/min.]		Napięcie polaryzacji podłoża U_{BIAS} [V]	Natężenie prądu źródła I_z [A]	Natężenie prądu katody I_{AEGD} [A]	Temperatura T [°C]	Czas t [min.]
	pC ₂ H ₂	pAr					
Trawienie AEGD							
$5 \cdot 10^{-3}$	-	155	-300		100	300	25
Trawienie podłoża jonami Cr+							
$5 \cdot 10^{-3}$		155	-750 ÷ -900	60	-	212	5
Osadzanie powłoki Cr							
$5 \cdot 10^{-3}$		155	-50	60	-	212	30
Osadzanie powłoki Cr-DLC							
$8 \cdot 10^{-3}$	45	155	-100	60	-	255	90

Osadzanie powłok typu Cr

Procesy wytwarzania powłok z czystego chromu typu Cr zrealizowano z wykorzystaniem źródeł plazmy łukowej wyposażonych w katody z czystego chromu oraz w elektrostatyczne separatory fazy kropelkowej. Parametry technologiczne procesów osadzania powłok typu Cr metodą Arc PVD podano w tablicy 10.

Proces wytwarzania powłok Cr poprzedzono etapem trawienia jonowego jonami chromu w celu oczyszczenia pokrywanego podłoża oraz jego nagrzania do temperatury $\approx 400^\circ\text{C}$. Następnie osadzano powłoki z chromu stosując atmosferę czystego argonu.

Tablica 10. Parametry osadzania powłok typu Cr metodą Arc PVD

Ciśnienie w komorze p [Pa]	Przepływ gazów roboczych [ml/min.]		Napięcie polaryzacji podłoża U_{BIAS} [V]	Natężenie prądu źródła I_z [A]	Natężenie prądu katody I_{AEGD} [A]	Temperatura T [°C]	Czas t [min.]
	pC ₂ H ₂	pAr					
Trawienie AEGD							
$5 \cdot 10^{-3}$	-	178	-300		100	300	25
Trawienie podłoża jonami Cr⁺							
$5 \cdot 10^{-1}$	-	178	-750 ÷ -900	70	-	400	5
Osadzanie powłoki Cr							
$5 \cdot 10^{-1}$	-	178	-50	70	-	380	90

5.4. Badanie budowy powłok

5.4.1. Badanie morfologii, budowy i składu chemicznego i fazowego powłok

Badania budowy powłok typu W/W-DLC, typu Cr/Cr-DLC oraz typu Cr, osadzonych na powierzchni stali 42CrMo4 metodą Arc PVD, obejmowały: analizę morfologii powierzchni powłok, analizę poprzecznych zglądów metalograficznych próbek z powłokami oraz jakościową analizę składu chemicznego oraz fazowego powłok. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej, gdyż rozdzielczość mikroskopii elektronowej jest znacznie większa niż w mikroskopii świetlnej, co umożliwia uzyskiwanie znacznie większych powiększeń, nawet do kilkuset tysięcy razy. Ponadto mikroskopy skaningowe charakteryzują się dużą głębią ostrości, dzięki czemu umożliwiają obserwowanie z dużą ostrością próbek o rozwiniętej powierzchni.

Rentgenowską analizę fazową powierzchni próbek z powłokami wykonano na dyfraktometrze rentgenowskim firmy Bruker D8 ADVANCE przy użyciu filtrowanego promieniowania Cu K α ($\lambda = 0.154056$ nm) w temperaturze pokojowej. Warunki zapisów były następujące: napięcie – 40 kV, prąd – 40 mA, kąt 2 Θ od 15° do 100°.

Elektronowa mikroskopia skaningowa – *Scanning Electron Microscopy (SEM)*, wykorzystuje zjawiska będące wynikiem oddziaływania wiązki elektronowej z powierzchnią analizowanej próbki ¹¹⁷.

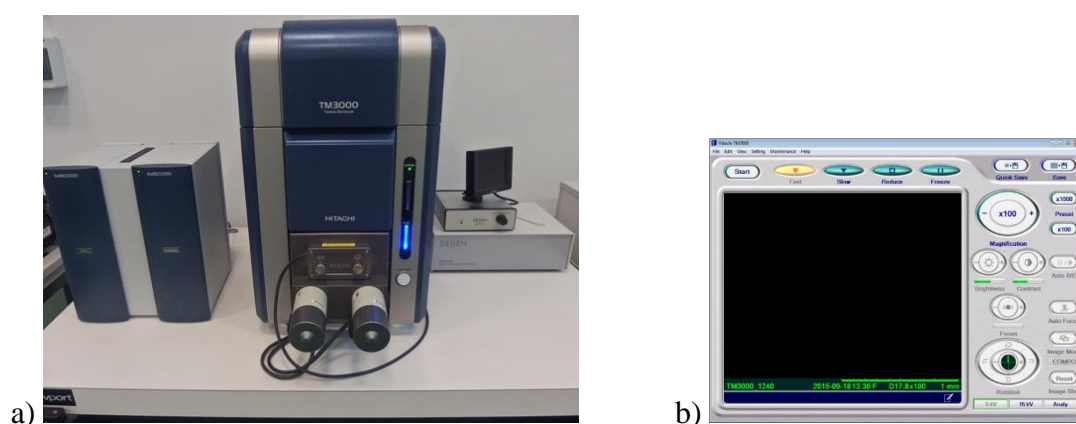
W wyniku oddziaływania wiązki elektronów z próbką, z bombardowanej powierzchni emitowane są różne rodzaje elektronów, które wykorzystuje się następnie do tworzenia obrazu oraz analizy składu chemicznego, w tym:

- elektrony wtórne – *Secondary Electrons (SE)*, które są emitowane z materiału powłoki w wyniku zderzeń elektronów wiązki pierwotnej z atomami materiału próbki,
- elektrony wstecznie rozproszone BSE – *Backscattered Electron (BSE)*, które są elektronami padającej wiązki i uległy sprężystemu odbiciu od powierzchni badanej próbki.

Badania wykonano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego firmy HITACHI TM 3000, wyposażonego w detektory BSE i EDS, rys. 21.

Mikroskop Hitachi TM 3000 umożliwia badanie powierzchni próbek w zakresie powiększeń od 50x do 30000x. Maksymalne wymiary próbek umieszczanych w urządzeniu to: $\phi \leq 70\text{mm}$, $h \leq 50\text{mm}$. Skład chemiczny powłok badano metodą EDS z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego f-my: Noran Instruments, w który wyposażony jest mikroskop skaningowy Hitachi TM 3000.

Schemat przygotowania złądów poprzecznych próbek z powłokami do badań metalograficznych pokazano na rys. 19 (rozdział 5.2.).



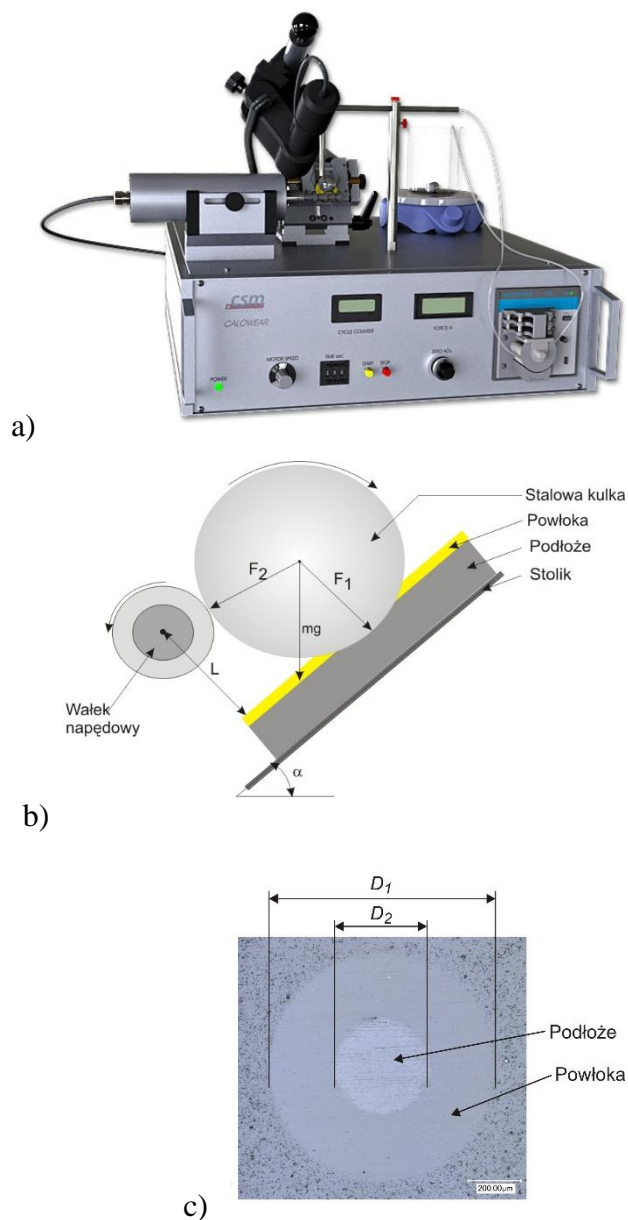
Rys. 21. Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) Hitachi TM 3000: a) widok ogólny, b) widok panelu sterowania

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITEE-PIB w Radomiu /

¹¹⁷ Barbacki A., Mikroskopia elektronowa, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003

5.4.2. Badania grubości powłok

Badania grubości powłok, wytworzonych metodą Arc PVD, wykonano metodą kulotestu, wykorzystując w tym celu tester tribologiczny Callowear firmy CSM. Urządzenie kulotester do pomiaru grubości cienkich powłok, schemat realizacji testu oraz widok wytartego krateru, pokazano na rysunku 22.



Rys. 22. Pomiar grubości cienkich powłok: a) kulotester, b) schemat węzła tarcia, c) krater wytarcia
/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/

Metoda pomiaru polegała na wytarciu, przez obracającą się kulę, krateru w próbce, pokrytej powłoką, a następnie analizie geometrycznej śladu wytarcia. Warunkiem wykonania prawidłowego pomiaru jest aby głębokość krateru była większa niż grubość badanej powłoki.

Analizę śladów wytarcia przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu VHX1000E firmy Keyence (rys. 23), który umożliwia prowadzenie obserwacji mikroskopowych w zakresie powiększeń 50 – 5000 oraz wykonywanie pomiarów w płaszczyźnie X-Y z dokładnością do 1 μm .



Rys. 23. Mikroskop cyfrowy firmy Keyence VHX-1000E wykorzystywany do obserwacji i pomiarów odcisków

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/

Grubość badanych powłok wyznaczono na podstawie zależności (1):

$$g = \sqrt{R^2 - \frac{(D_2)^2}{4}} - \sqrt{R^2 - \frac{(D_1)^2}{4}} \quad (1)$$

gdzie:

R – promień kuli trącej [mm],

g – grubość powłoki [μm],

D₁, D₂ – odpowiednio: zewnętrzna i wewnętrzna średnica śladu wytarcia [μm].

5.5. Badania chropowatości powłok

Dla oceny stanu powierzchni powłok w pierwszej kolejności przeprowadzono badania chropowatości. Do pomiaru chropowatości wykorzystano Profilograf Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson (Rys. 24) wyposażony w głowicę pomiarową o rozdzielczości 0,8 nm. Pomiar realizowany był z wykorzystaniem czujnika laserowego, który przesuwiał się wzdłuż

powierzchni badanej próbki. Maksymalna liczba zebranych punktów może wynosić ok. 1 600 000. Zakres prędkości pomiarowych wynosił od 0,1 do 2 mm/s.



Rys. 24. Profilograf Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/

Profilograf posiada oprogramowanie, które umożliwia zarówno analizę 2D (profile), jak i 3D (topografia), a także pozwala na wyznaczenie parametrów chropowatości i parametrów falistości.

Podczas badań mierzone były trzy parametry chropowatości:

- R_a [μm] - średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości,
- R_z [μm] - średnia arytmetyczna wartości bezwzględnych wysokości pięciu najwyższych wzniesień profilu chropowatości i głębokości pięciu najniższych wgłębień profilu chropowatości w przedziale odcinka elementarnego,
- R_t [μm] - całkowita wysokość profilu chropowatości.

Dla każdej z badanych powierzchni wykonano 3 pomiary, a następnie wyznaczono wartości średnie z tych pomiarów.

5.6. Pomiary twardości i modułu Younga

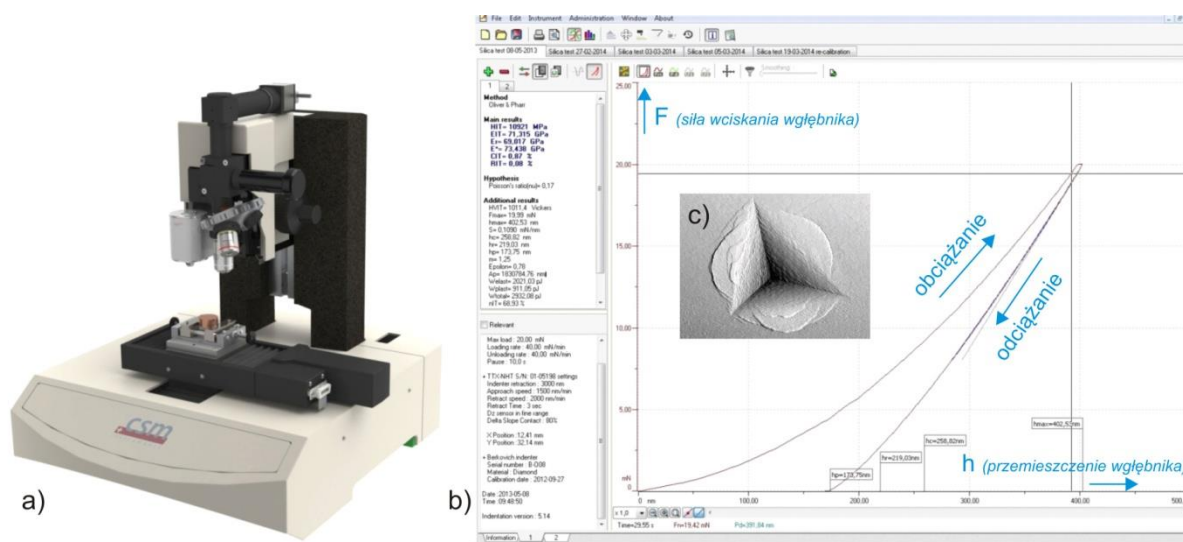
Pomiary twardości oraz modułu Younga próbek z powłokami typu W/W-DLC, typu Cr/Cr-DLC oraz typu Cr, osadzonymi na powierzchni stali 42CrMo4 metodą Arc PVD, wykonano za pomocą Nano-Hardness Testera TX NHT2 szwajcarskiej firmy CSM, wyposażonego we wgłębnik typu Berkovich, o kącie wierzchołka 65° , mikroskop optyczny i

zmotoryzowany stolik w osiach X i Y. Widok ogólny urządzenia oraz przykładowy widok śladu odcisku w badanej powłoce, pokazano odpowiednio na rysunku 25.

Urządzenie charakteryzuje się następującymi parametrami pomiarowymi:

- zakres obciążeń: $0,05 \div 500$ [mN];
- maksymalne zagłębienie wgłębnika: 200 [μm];
- dokładność pomiaru siły obciążenia: $0,04$ [mN];
- dokładność pomiaru zagłębienia: $0,04$ [nm].

Wykonując pomiary twardości oraz modułu Younga cienkich powłok metodami penetracyjnymi, stosuje się zasadę zgodnie z którą, odkształcenia plastyczne wynikające z działania penetratora nie powinny przekraczać 10% grubości powłoki ¹¹⁸.



Rys. 25. Pomiar twardości oraz modułu Younga: a) widok NanoHardness Testera, b) zależność przemieszczenia wgłębnika w funkcji obciążenia, c) widok odcisku wgłębnika typu Berkovich w badanej powłoce ¹¹⁹

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/

Metoda pomiaru twardości polega w tym przypadku, na analizie sprężystych oraz plastycznych wartości odkształceń badanego materiału, które następują w wyniku działania wgłębnika o znanej geometrii i obciążenia o ustalonej wartości. Po osiągnięciu zadanego obciążenia jest ono stopniowo zmniejszane do całkowitego odprężenia badanego materiału w obszarze penetracji ¹²⁰.

Podczas wykonywania pomiaru rejestrowana jest zmiana zagłębienia wgłębnika w funkcji obciążenia działającego na wgłębnik, a następnie sporządzany jest wykres zależności

¹¹⁸ Bujak J.: Właściwości powłok (Ti,Al,Cr)N wytwarzanych metodą łukowo-próżniową, Problemy Eksploatacji, 2 (2011) 81

¹¹⁹ Online: <http://www.csm-instruments.com>

¹²⁰ Handbook on Instrumented Indentation, Certified ISO9001, CSM Instruments SA, Rue de la Gare 4, CH-2034 Peseux

przemieszczenia wglębnika w funkcji jego obciążenia F ¹²¹ (Rys.25b). Na podstawie znanej geometrii wglębnika oraz znanej głębokości jego zagłębienia h , możliwe jest wyznaczenie powierzchni odcisku A (Rys.25c). Pomiar twardości HV realizowany jest automatycznie, zgodnie z zależnością (2):

$$HV = F_{max} / A \quad (2)$$

Wyznaczanie modułu Younga realizowane jest również automatycznie na podstawie zależności (3) zaproponowanej przez Hintermann'a¹²²:

$$\left(\frac{dF}{dP}\right) = D \cdot E_r \cdot (2\pi)^{0.5} \quad \text{gdzie: } \frac{1}{E_r} = \frac{(1 - \nu^2)}{E} + \frac{(1 - \nu_0^2)}{E_0} \quad (3)$$

gdzie: E – moduł Younga [GPa] badanego materiału,
 E_i – moduł Younga [GPa] materiału wglębnika,
 E_r – zredukowany moduł sprężystości [GPa],
 ν – współczynnik Poissona badanego materiału,
 ν_i – współczynnik Poissona materiału wglębnika,
 D – długość przekątnej wglębnika Vickersa,
 (dF/dP) – nachylenie krzywej AB

Badania twardości i modułu Younga powłok przeprowadzono uwzględniając wyniki pomiarów grubości powłok wykonanych zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 5.4.2.

5.7. Metody oceny adhezji powłok do podłoża stali

Adhezja powłoki do podłoża zależy od wielu różnych czynników, m.in.: od rodzaju materiału próbki i podłoża, chropowatości i czystości powierzchni podłoża, a także od stanu naprężeń w powłoce¹²³. Ocenę adhezji powłok do podłoża stali badano za pomocą dwóch metod: metodą wciskania wglębnika oraz testu zarysowania.

5.7.1. Badania adhezji metodą wciskania wglębnika

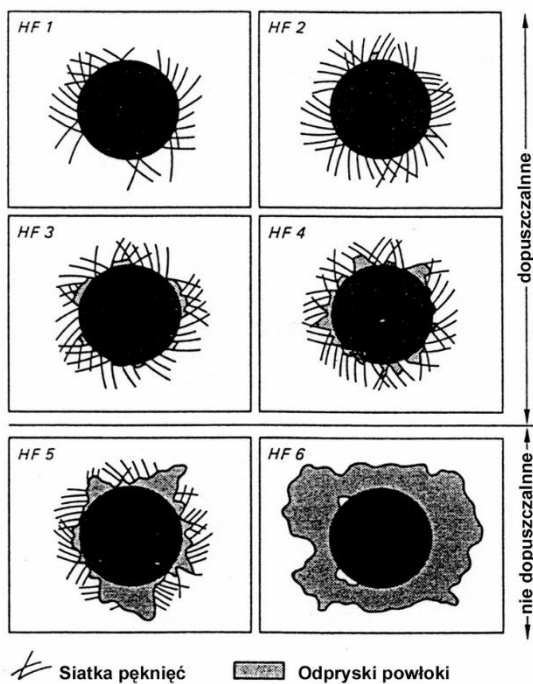
Badanie adhezji tą metodą polegało na prostopadłym wciskaniu wglębnika Rockwella w badaną powłokę ze stałą siłą działającą na wglębnik. Powstałe w ten sposób uszkodzenia

¹²¹ Pharr M., Oliver W. C., Brotzen F. R., On the generality of the relationship between contact stiffness, contact area and Elastic moduli during indentation, *Jurnal Materials. Research*, 7 (1992)

¹²² H.E.Hintermann, Fresenius J., Characterization of surface coatings by the scratch Adhesion test and by indentation measurements *Anal. Chem.* (1993), 346, 45-52

¹²³ Mittal K.L.: Adhesion measurement of thin films. *Electrocomponent Science and Technology*, 1976

poddawane były obserwacjom mikroskopowym w celu oceny formy i intensywności zniszczenia powłoki w obszarze penetracji. Na skutek zagłębiania się wgnętnika w powłokę tworzyły się pęknięcia obwodowe oraz promieniowe, które poddawano obserwacjom za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego TM 3000 firmy Hitachi, rys. 21. Na podstawie obserwacji mikroskopowych formy i intensywności zniszczeń badanej powłoki oceniano jej adhezję do podłoża stali, stosując sześciostopniową skalę wzorców¹²⁴ pokazanych na rysunku 26.



Rys. 26. Formy zniszczenia powłoki występujące w badaniu adhezji metodą wciskania wgnętnika

/Źródło: Vidakis N., Antoniadis A., Bilalis N.: The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 481–485/

Metoda oceny adhezji powłok do podłoża na podstawie formy i intensywności zniszczeń powstających w wyniku wciskania wgnętnika jest metodą porównawczą, w której przyjmuje się, że uszkodzenia w powłoce odpowiadające wzorcom HF1-HF4 świadczą o poprawnej adhezji powłoki do podłoża. Natomiast występowanie ubytków powłoki w obszarze otaczającym odcisk, odpowiadające wzorcom HF5-HF6, są dowodem niewystarczającej adhezji powłoki do podłoża. Odciski na próbkach z osadzonymi powłokami wykonywano za pomocą twardościomierza firmy EMCO-TEST M4R075.

¹²⁴ Vidakis N., Antoniadis A., Bilalis N.: The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, Journal of Materials Processing Technology 143–144 (2003) 481–485

5.7.2. Badania adhezji metodą zarysowania

Metoda testu zarysowania¹²⁵ (scratch test) charakteryzuje się krótkim czasem pomiaru, dużą powtarzalnością oraz łatwością interpretacji otrzymanych wyników. Badanie adhezji metodą testu zarysowania polega na przesuwaniu wgłębnika po analizowanej powierzchni ze wzrastającą siłą jego nacisku w kierunku prostopadłym do powierzchni próbki. Dla oceny adhezji, wybrano urządzenie REVETEST f-my CSM pokazane na rysunku 27. Urządzenie wyposażone jest w: głowicę pomiarową z wgłębnikiem Rockwell'a, mikroskop optyczny z systemem obrazowania video wysokiej rozdzielczości, czujnik emisji akustycznej, czujnik głębokości penetracji, czujnik siły tarcia i siły normalnej, zmotoryzowany programowalny stolik w osiach X-Y. W metodzie tej sferyczna końcówka wgłębnika rysuje powierzchnię badanej próbki ze stałą prędkością przy wzrastającej sile obciążającej, aż do momentu utraty adhezji przez powłokę w obszarze rysy. W trakcie testu zarysowania rejestrowane są m.in. emisja akustyczna (AE) i współczynnik tarcia (μ) w funkcji siły obciążającej wgłębnik (F_n). Dodatkowo wygląd zarysowanej powierzchni można obserwować za pomocą mikroskopu optycznego lub skaningowego mikroskopu elektronowego.

Badanie przeprowadzono dla następującego zakresu charakterystycznych parametrów:

- zakres siły obciążającej wgłębnik (siła normalna) 1-200 N,
- zakres pomiaru siły stycznej (siły oporu materiału) 1-200 N,
- szybkość narastania siły normalnej 40 ÷ 400 N/min,
- maksymalna długość rysy – 20 mm,
- rozdzielczość pomiaru przemieszczenia - 10 μ m

Badania wykonywane były na próbkach ze stali 42CrMo4 z powłokami DLC typu W/W-DLC, typu Cr/Cr-DLC oraz próbkach z powłokami z czystego chromu, typu Cr. Na każdej badanej próbce wykonywano trzy zarysowania.

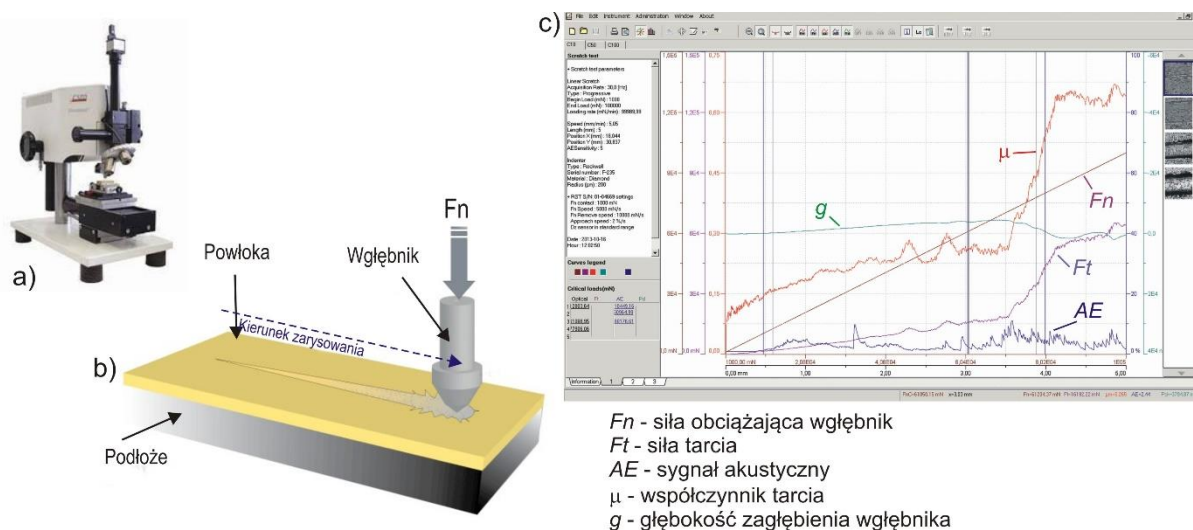
Ocenę wartości siły krytycznej przeprowadzono w oparciu o zapisy zmian sygnałów emisji akustycznej (AE) i siły stycznej (F_n) oraz wyniki obserwacji mikroskopowych, które pozwalały na lokalizację pierwszych uszkodzeń wywołanych utratą adhezji warstwy powierzchniowej z materiałem podłoża a także naruszenie jej kohezji oraz ocenę charakteru uszkodzeń.

Na podstawie analizy trzech wymienionych sygnałów wyznaczano trzy wartości obciążenia wgłębnika, charakteryzujące adhezję badanej powłoki do podłoża:

¹²⁵ Sekler J., Steinmann P.A, Hinterman H. E.: The scratch test different critical load determination techniques. Surface and Coatings Technology 36, 1998, 519-529

- F_{c1} przy którym generowane są pęknięcia w badanej powłoce,
- F_{c2} przy którym następuje lokalna utrata adhezji powłoki w obszarze rysy oraz na jej brzegu
- F_{c3} przy którym następuje usunięcie powłoki z całej powierzchni zarysowania.

Miarę adhezji powłoki do podłoża stanowi siła krytyczna F_{c3} , tzn. najmniejsza siła normalna powodująca całkowitą utratę adhezji powłoki z podłożem.



Rys. 27. Pomiar adhezji metodą zarysowania (scratch-test): a) widok urządzenia REVETEST f-my CSM, b) widok zarysowania, c) zależność zmian sygnałów F_t -siła tarcia, AE - emisji akustycznej, μ -współczynnika tarcia w funkcji siły obciążającej wgłębnik F_n .

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów firmy CSM Instruments oraz materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/

5.8. Badania odporności na zużycie ścierne

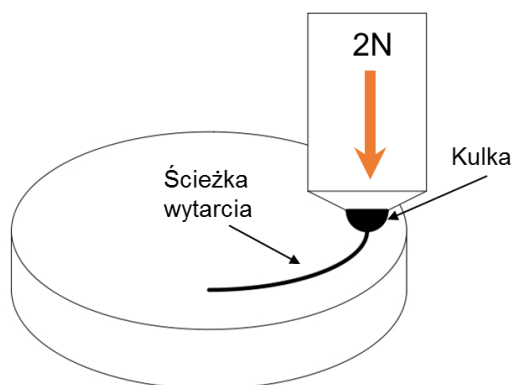
Badania odporności na zużycie ścierne powłok wykonano metodą kula tarcza (ball-on-disc) wykorzystując do tego celu tester tribologiczny firmy DUCOM-CM, pokazany na rys. 28.

Metoda ta polega na wytarciu w próbce pokrytej badaną powłoką, ścieżki o głębokości mniejszej od grubości powłoki, a następnie na geometrycznej analizie powstałego śladu wytarcia. W trakcie testu nieruchoma kulka dociskana jest siłą P do poruszającej się w ruchu oscylacyjnym tarczy pokrytej badaną powłoką. Skojarzenie wężła tarcia w metodzie kula-tarcza (ball-on-disc) pokazano na rysunku 29.



Rys. 28. Tester tribologiczny ball – on – disc firmy DUCOM

/Źródło: Opracowanie na podstawie materiałów wewnętrznych ITeE-PIB w Radomiu/



Rys. 29. Schemat węzła tarcia w metodzie ball-on-disc

/Źródło: Opracowanie na podstawie badań własnych/

Przeciwpróbka montowana jest na sztywnym elemencie, który stanowi beztarciowy przekaźnik siły. Współczynnik tarcia jest określany podczas testu poprzez pomiar odkształcenia sprężystego ramienia dociskającego kulę trącą. Współczynnik zużycia próbki jest wyliczany z objętości materiału wytartego podczas testu. Na podstawie wyznaczonej średniej objętości wytarcia obliczany jest wskaźnik zużycia z zależności:

$$W_z = \frac{Z_{obj}}{P \cdot S} \left[\frac{mm^3}{N \cdot \text{cykle}} \right]$$

gdzie:

Z_{obj} – zużycie objętościowe [mm^3],

P – obciążenie węzła tarcia [N],

S – ilość cykli [cykle]

Badania wykonano w warunkach tarcia technicznie suchego w temperaturze pokojowej, dla skojarzenia: kulka z Al_2O_3 tarcza ze stali pokryta badaną powłoką przy zastosowaniu następujących parametrów testów:

- średnica kulki $\varnothing = 6\text{mm}$,
- obciążenie $P = 5\text{N}$, ilość cykli $S = 9000$,
- częstotliwość cykli $f = 5\text{Hz}$,
- promień łuku $r = 8\text{mm}$.

Do każdego testu stosowano nową kulę trącą. W celu określenia intensywności zużycia ślady wytarcia poddane zostały obserwacjom na mikroskopie optycznym firmy KEYENCE. Profile oraz pomiary objętości śladów wytarcia wykonano na profilometrze.

5.9. Badania odporności korozyjnej

Elektrochemiczne badania korozyjne próbek ze stali 42CrMo_4 z powłokami wytworzonymi metodą Arc PVD prowadzono w roztworze $0,5\text{ M NaCl}$ ($\text{pH} = 6,3$), za pomocą zestawu Autolab (galwanostat + potencjostat: GPSTAT 20), umożliwiającego pomiary potencjometryczne i woltamperometryczne (oprogramowanie GPES) Elektrode odniesienia stanowiła nasycona elektroda kalomelowa (NEK), zaś elektrodę pomocniczą - siatka platynowa. Pole powierzchni badanego materiału wynosiło 1 cm^2 . Pomiary prowadzono przy temperaturze $22\pm 2^\circ\text{C}$ w nieodpowietrzonych roztworach. Dla każdego rodzaju powłok prowadzono pomiary na trzech próbkach, przy czym dla porównania określano również parametry korozyjne stali stanowiącej podłoże dla wytwarzanej powłoki. Badania potencjometryczne polegały na rejestracji zmian potencjału korozyjnego próbek przez 90 min ich ekspozycji w roztworze korozyjnym.

Wartości potencjału próbek określano w stosunku do potencjału nasyconej elektrody kalomelowej przy temperaturze pomiarów. Pomiary potencjometryczne wykazały, że w roztworze $0,5\text{ M NaCl}$ potencjał korozyjny badanych próbek ustalał się na ogół po 30 min.

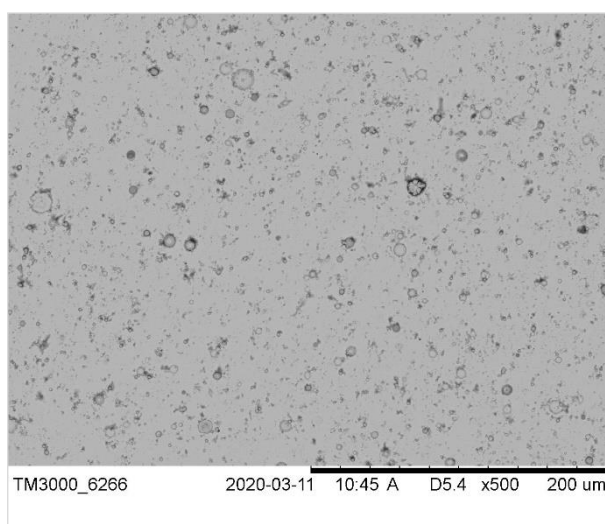
Badania woltamperometryczne próbek polegały na rejestracji zależności prądowo-potencjałowej krzywych polaryzacji metodą quasipotencjostatyczną - "schodkową" przy szybkości zmian potencjału 1 mV/s i skoku potencjału 10 mV . Wyznaczano również gęstość prądu korozji (szybkość korozji) na podstawie analizy danych polaryzacyjnych w pobliżu potencjału korozyjnego, uwzględniając korektę na omowy spadek potencjału.

6. WYNIKI BADAŃ

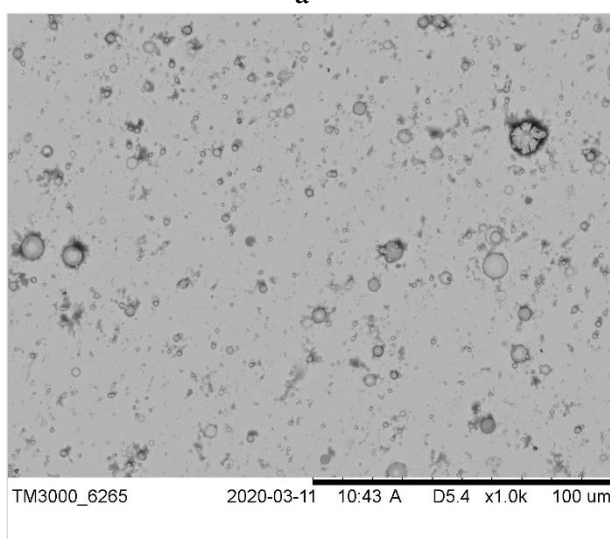
6.1. Budowa powłok

6.1.1. Morfologia powierzchni powłok, ich budowa i skład chemiczny

Analizę morfologii powierzchni powłok oraz ich budowy wykonano z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego TM 3000 HITACHI. Dla każdej z badanych powłok wykonano obserwacje powierzchni oraz przekroju poprzecznego w reżimie elektronów wstecznie rozproszonych SEM+BSE (BSE – *Backscattered Electron*). Obrazy skaningowe powierzchni próbek z powłokami typu W/W-DLC, typu Cr/Cr-DLC oraz typu Cr, osadzonymi na powierzchni stali 42CrMo4 metodą Arc PVD, pokazano na rys. 30-32.

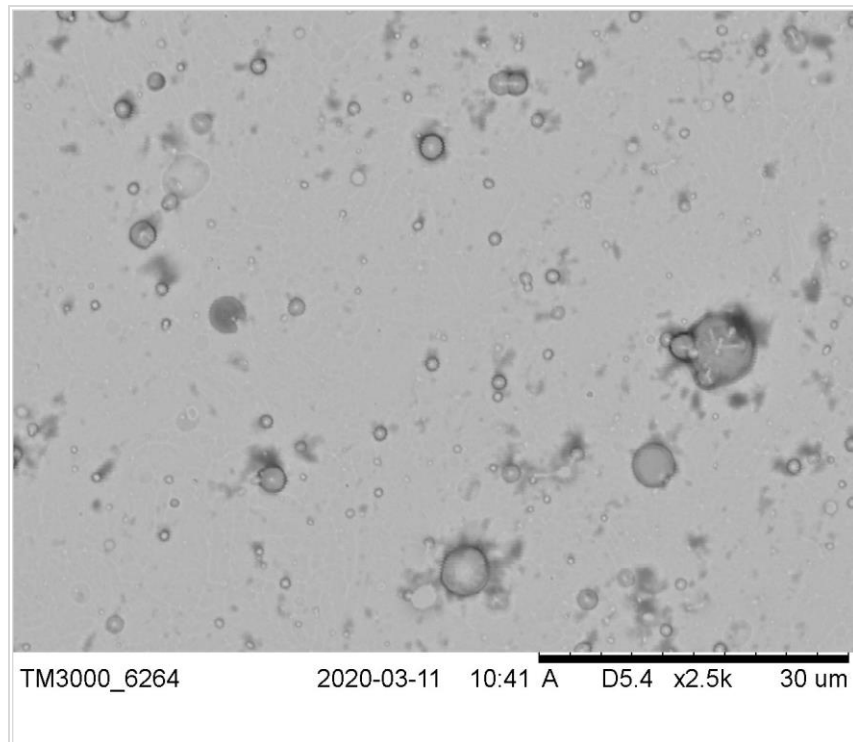


a

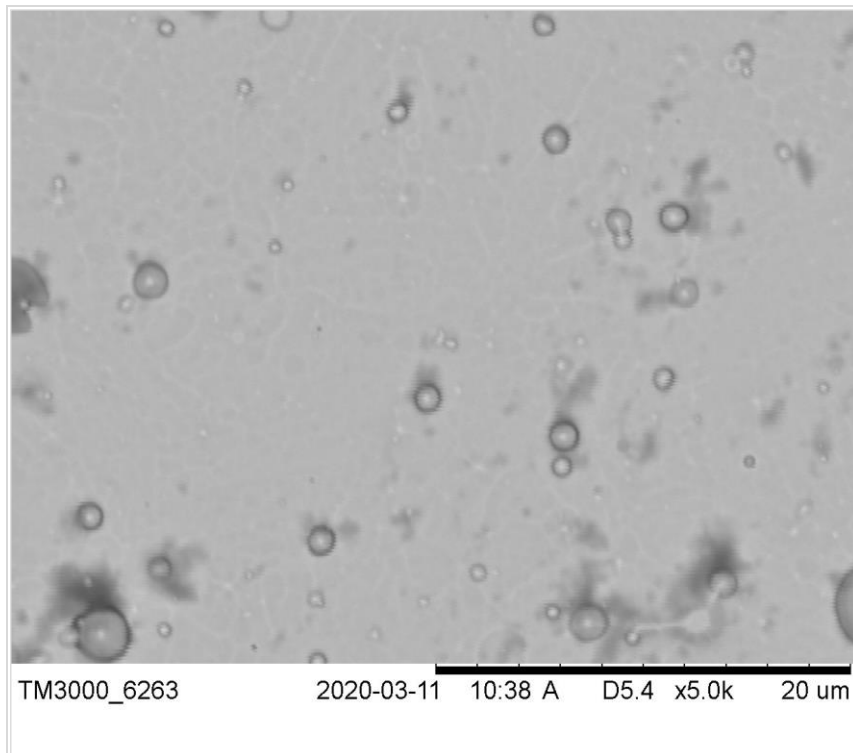


b

Rys. 30. a i b. Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką W/W-DLC, pow.: a – 500x, b – 1000x

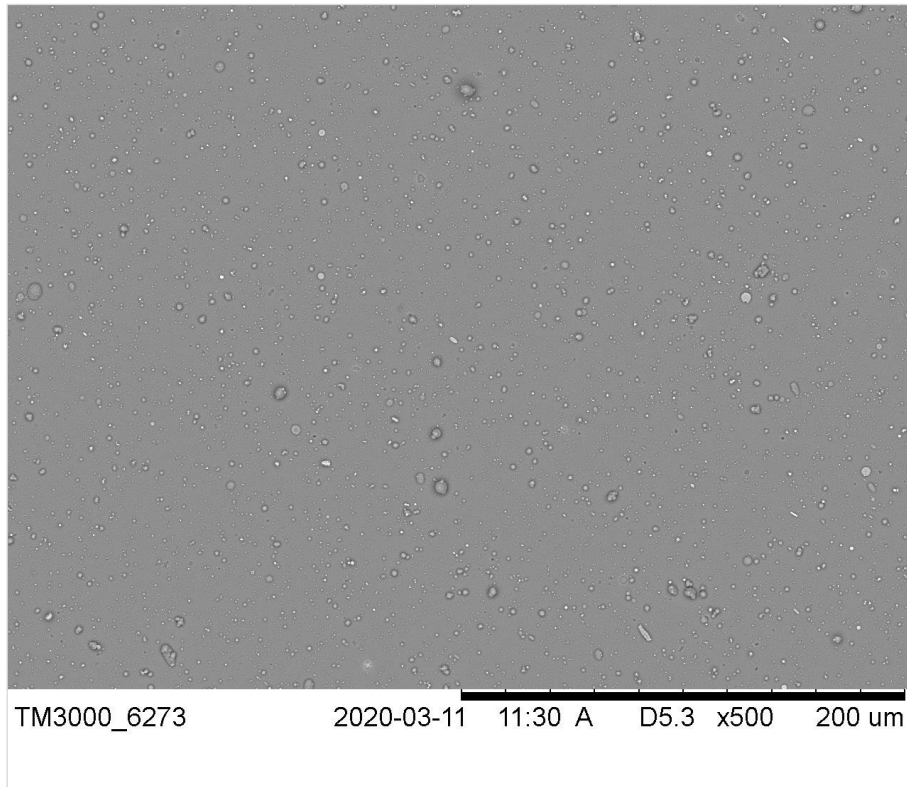


c

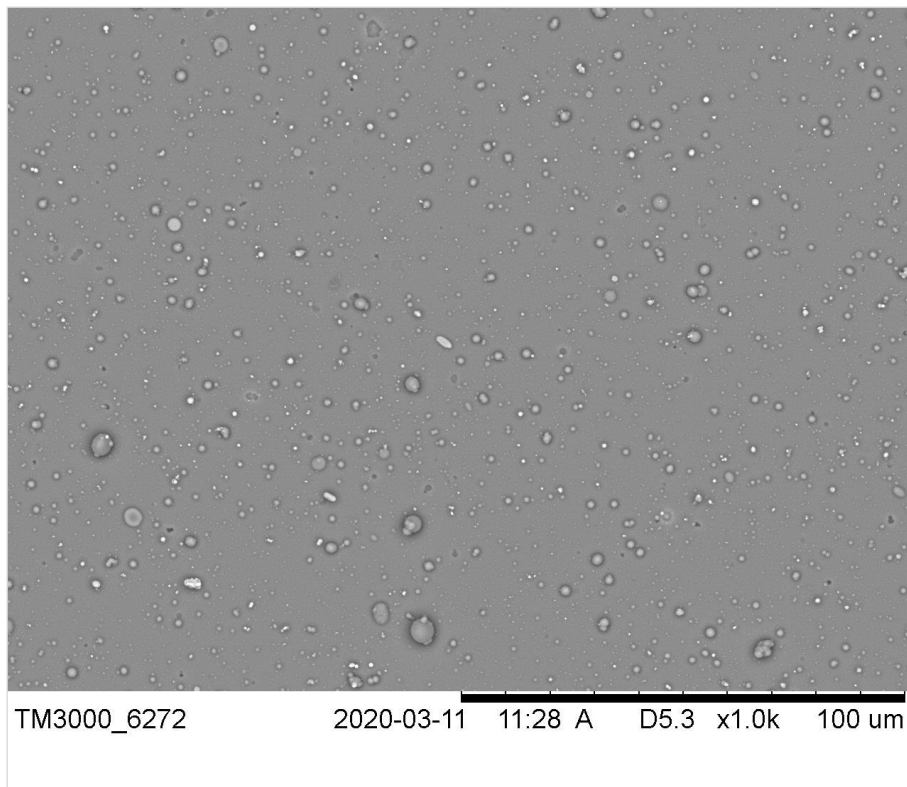


d

Rys. 30. c i d. Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką W/W-DLC, pow.: c – 2500x, d – 5000x

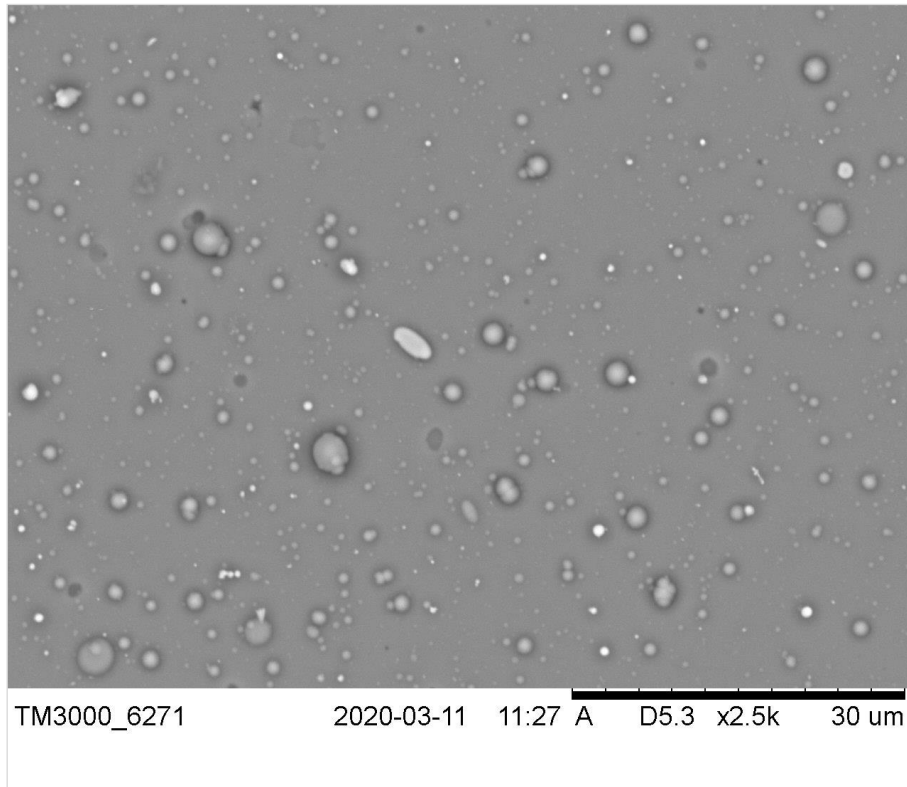


a)

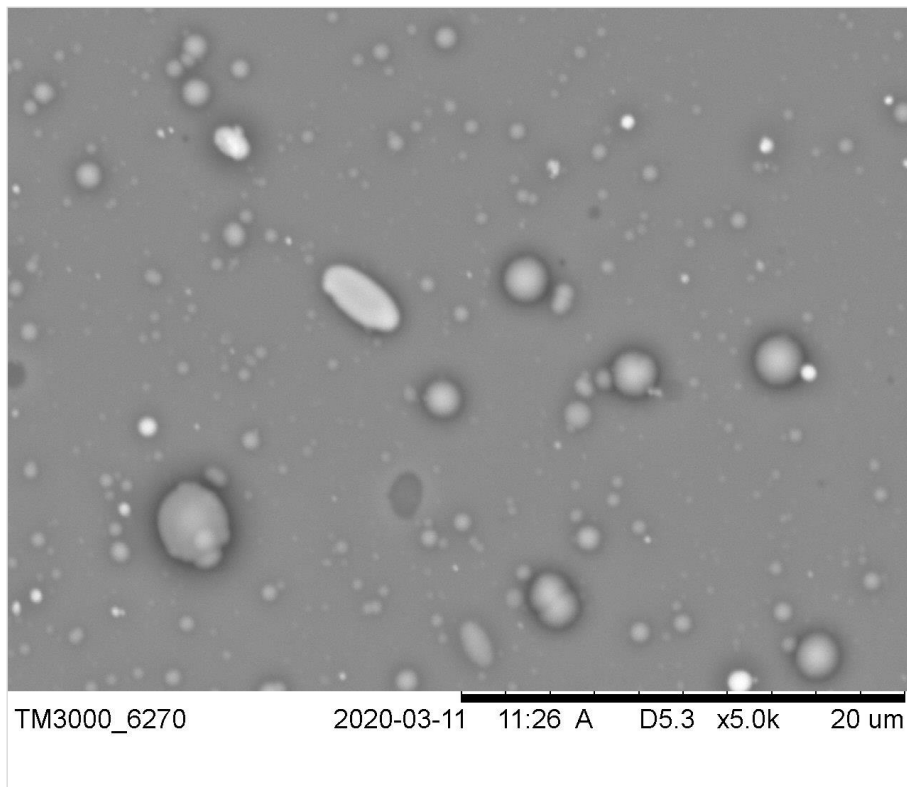


b)

Rys. 31. a i b. Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką Cr/Cr-DLC, pow.: a – 500x, b – 1000x

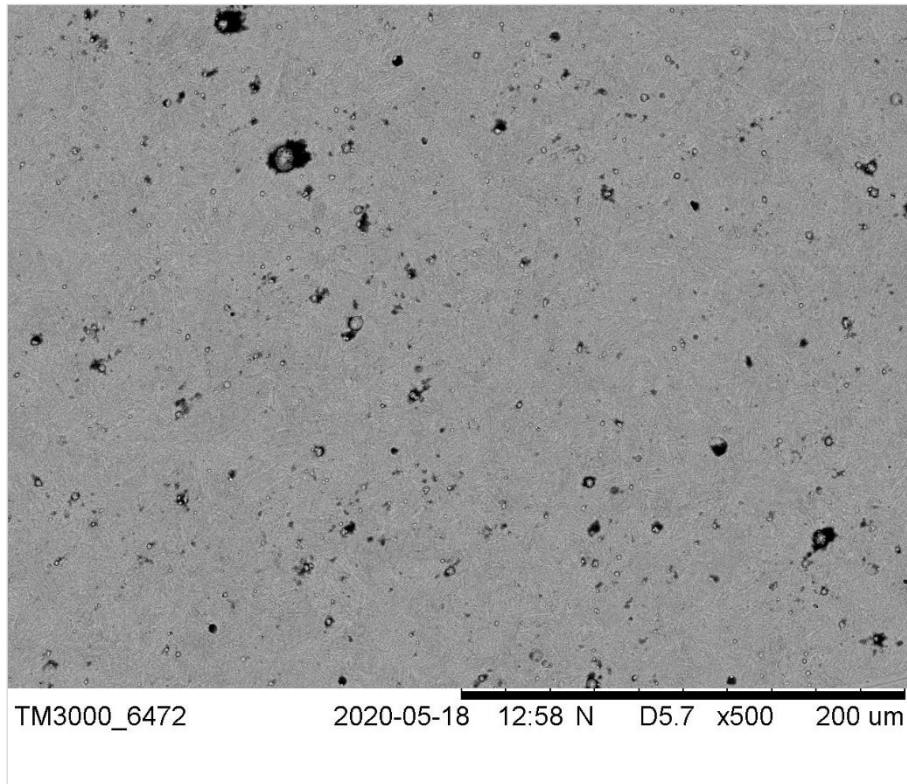


c)

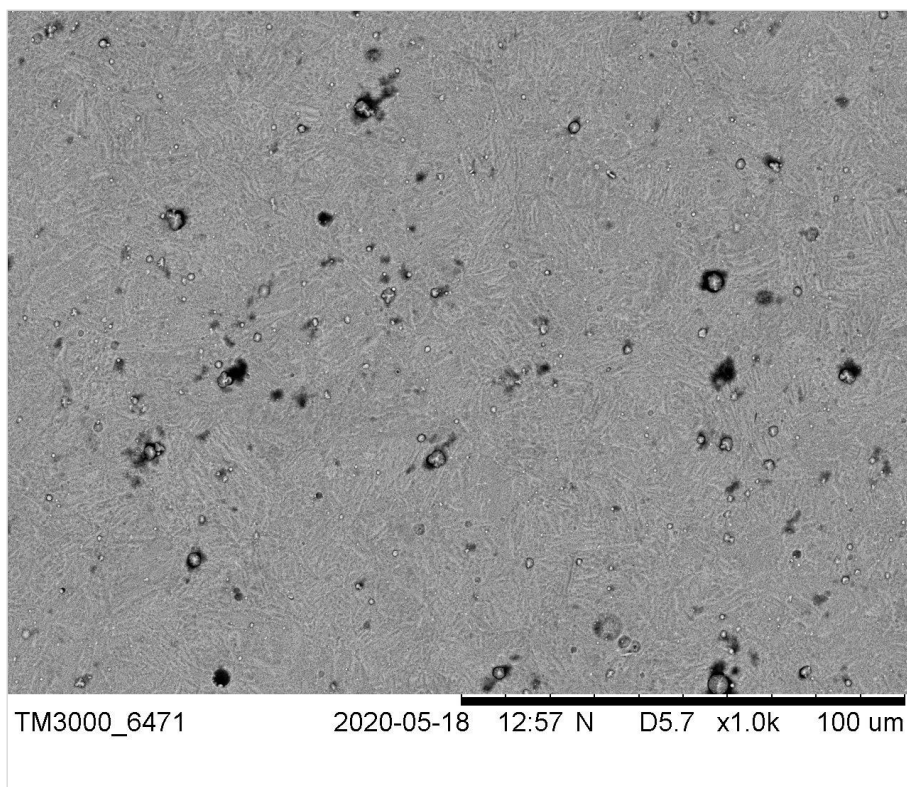


d)

Rys. 31. c i d. Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką Cr/Cr-DLC, pow.: c – 2500x, d – 5000x

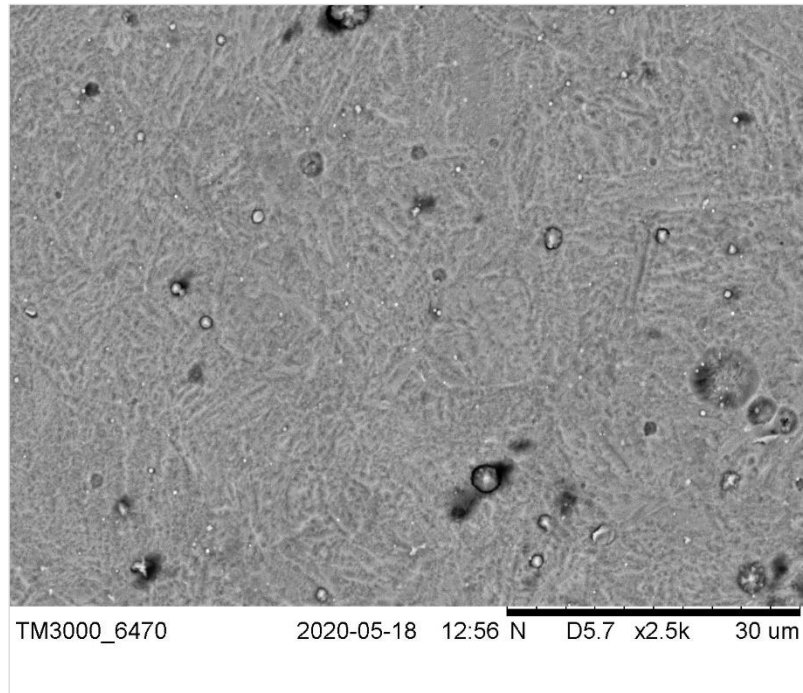


a)

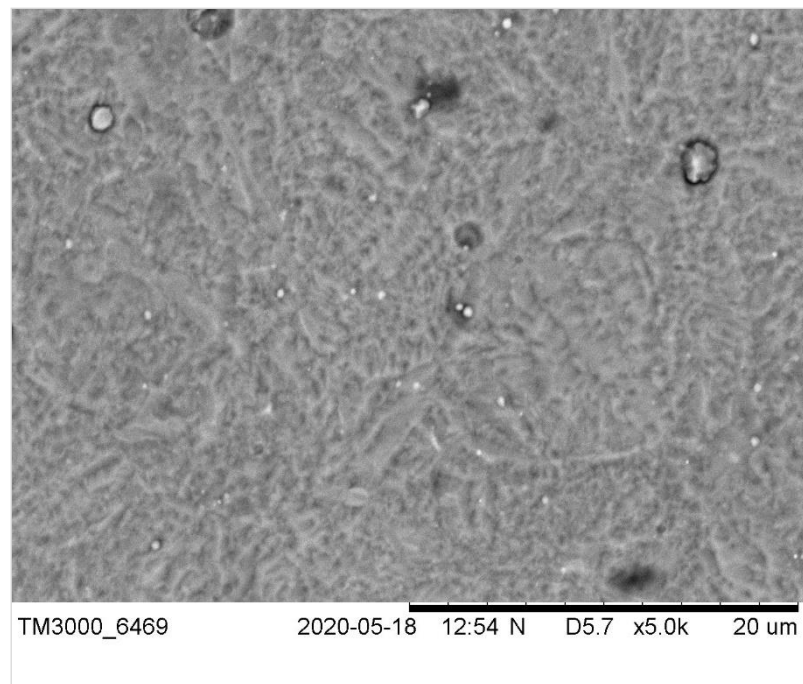


b)

Rys. 32. a i b. Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką typu Cr, pow.: a – 500x, b – 1000x



c)



d)

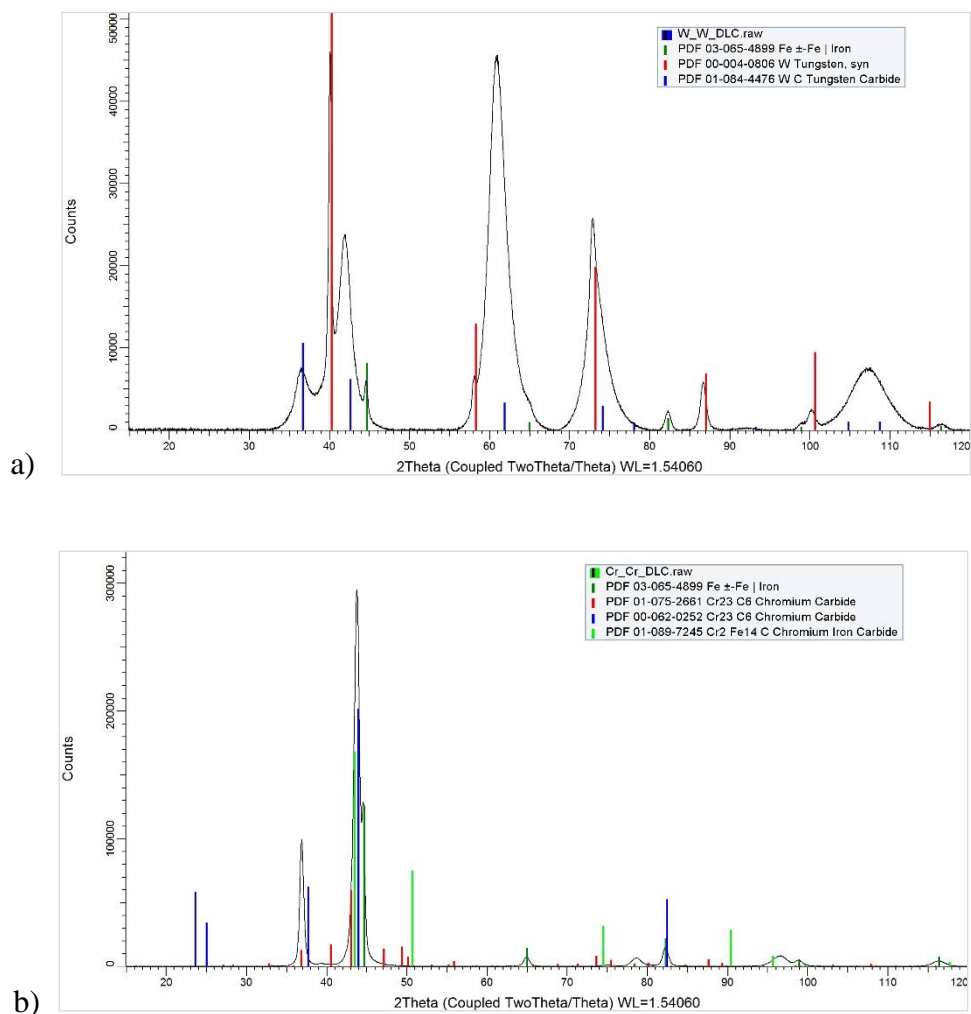
Rys. 32. c i d. Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką typu Cr, pow.: c – 2500x, d – 5000x

Analiza morfologii powierzchni próbek z badanymi powłokami, wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (Hitachi TM 3000), wykazała obecność jednorodnej, bardzo drobnej struktury, z niewielką ilością fazy kropelkowej, charakterystycznej dla metody Arc PVD – odparowania łukiem elektrycznym.

Najmniejszą ilość fazy mikrokrópekowej zaobserwowano na powierzchni powłoki czystego chromu typu Cr (Rys. 32). W przypadku powłoki DLC domieszkowanej chromem Cr/Cr-DLC (Rys. 31) zaobserwowano znacznie większy udział mikrokropki o podobnej średnicy.

Największy udział fazy mikrokropelkowej zaobserwowano w przypadku powłoki DLC domieszkowanej wolframem W/W-DLC. Obserwowane mikrokrople na powierzchni tej powłoki charakteryzowały się również znacznie większą średnicą (Rys. 30).

Rentgenowska analiza fazowa powierzchni próbek ze stali 42CrMo4 z osadzonymi powłokami, wykazała obecność wolframu oraz węglika wolframu WC w przypadku powłok W/W-DLC, jak również obecność chromu oraz węglików chromu, głównie Cr₂₃C₆, dla powłok typu Cr/Cr-DLC (rys. 33). W powłokach wytworzonych z czystego chromu stwierdzono obecność chromu.

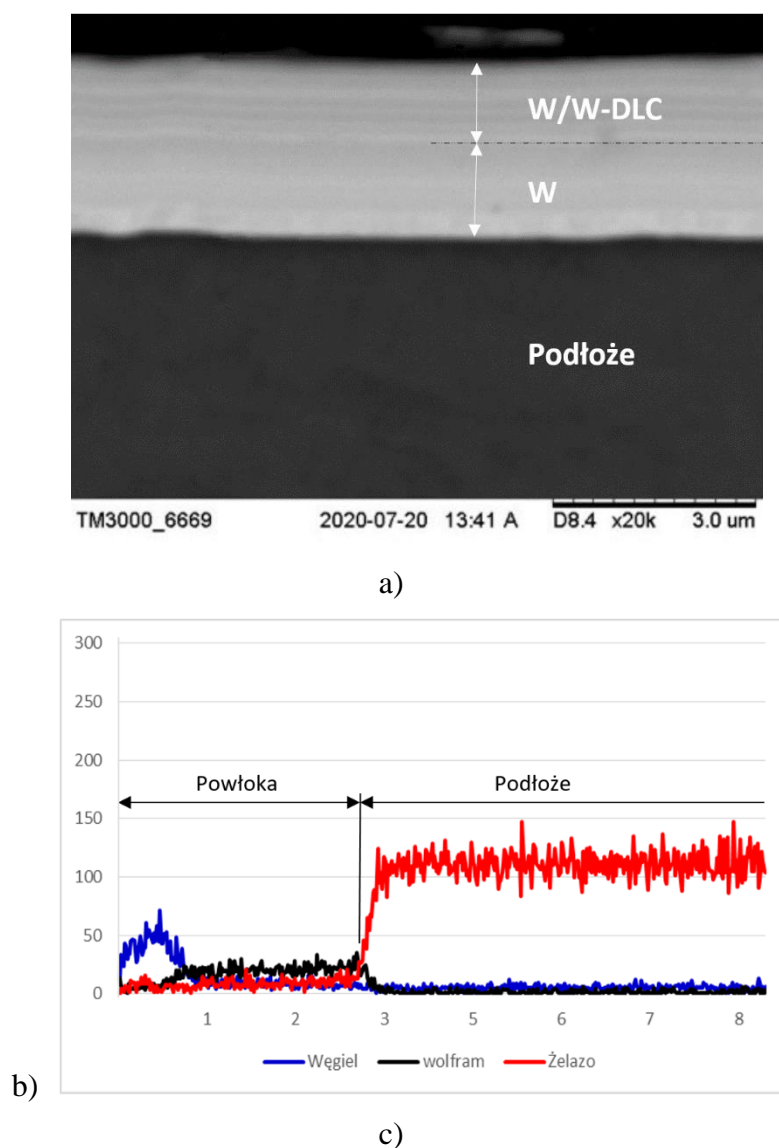


Rys. 33. Dyfraktogramy rentgenowskie z powierzchni próbek ze stali 42CrMo4 z powłokami diamentopodobnymi typu: a – W/W-DLC, b – Cr/Cr-DLC

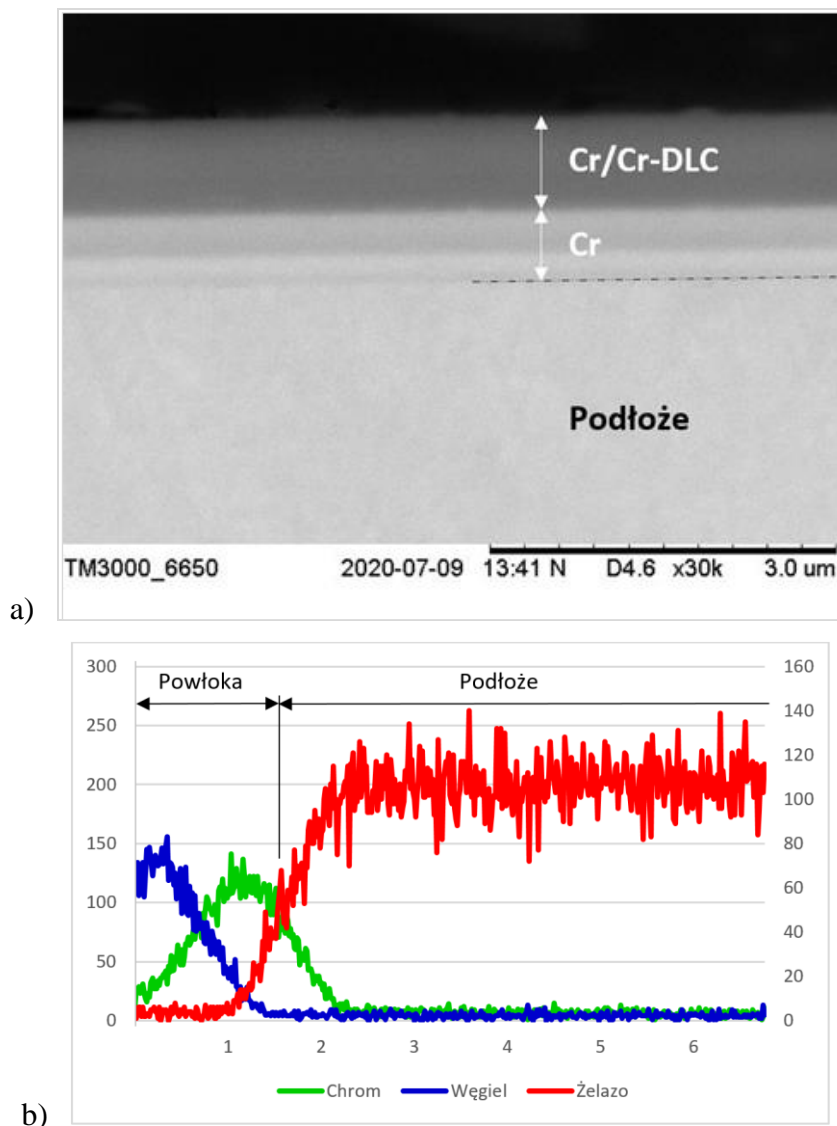
Badania budowy powłok oraz ich składu chemicznego, za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM+EDS), przeprowadzono na poprzecznych zglądach metalograficznych próbek. Dla przygotowania zglądów poprzecznych próbek, do obserwacji za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego, próbki poddano preparatyce pokazanej

schematycznie na rysunku 19, którą omówiono w rozdziale 5.2. Skład chemiczny powłok badano metodą EDS z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego f-my: Noran Instruments, w który wyposażony jest mikroskop skaningowy Hitachi TM 3000.

Wyniki obserwacji budowy wewnętrznej badanych powłok typu W/W-DLC, Cr/Cr-DLC i Cr oraz liniową analizę rozkładu pierwiastków w powłokach, pokazano na rysunkach 34-35. Celem tych obserwacji było uzyskanie informacji o rozkładzie pierwiastków w powłokach w funkcji ich grubości oraz potwierdzenie założonej struktury dwuwarstwowej powłok typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC.



Rys. 34. Obraz mikroskopowy SEM przekroju poprzecznego powłoki W/W-DLC (a) oraz analiza liniowa rozkładu pierwiastków w powłoce (b)

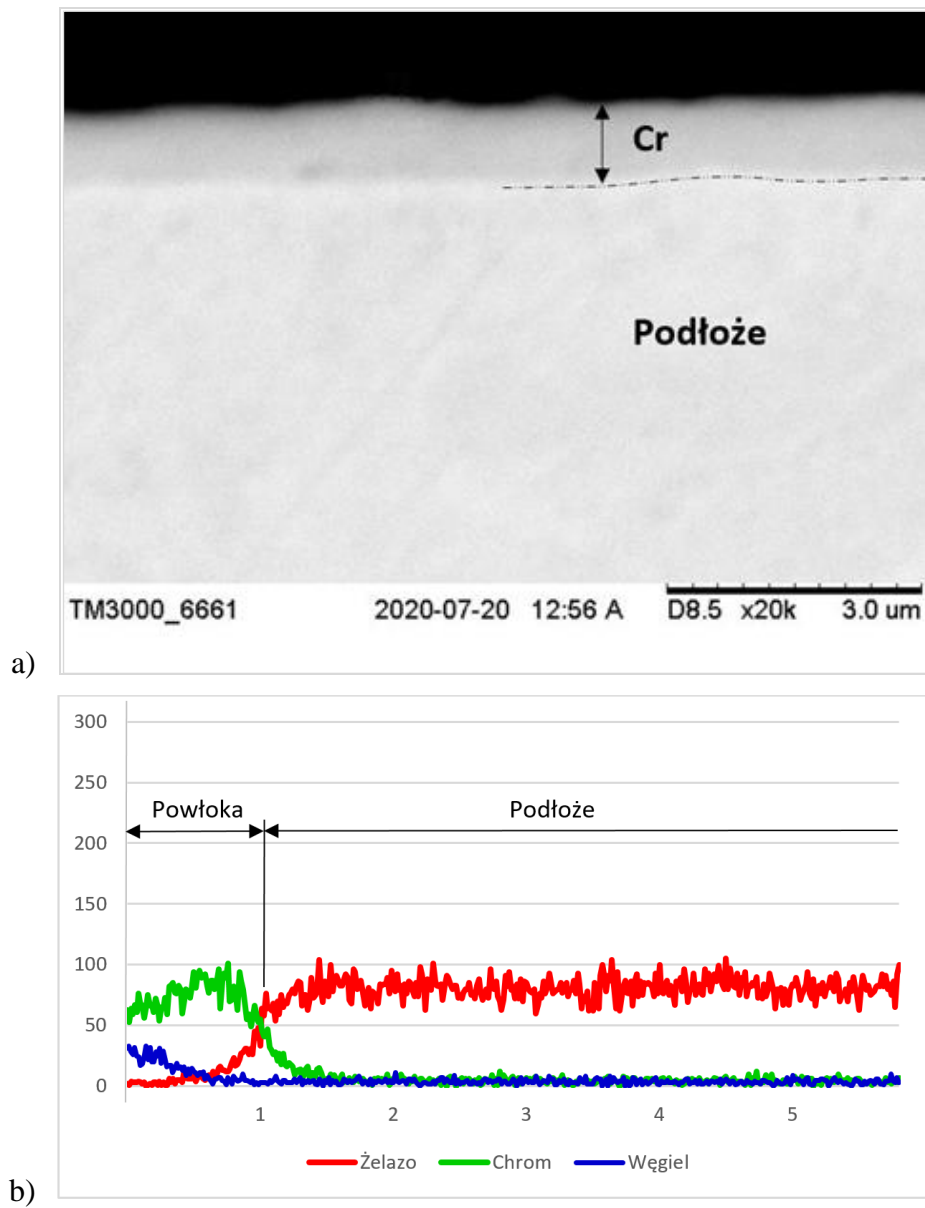


Rys. 35. Obraz mikroskopowy SEM przekroju poprzecznego powłoki Cr/Cr-DLC (a) oraz analiza liniowa rozkładu pierwiastków w powłoce (b)

Wyniki obserwacji metalograficznych próbek z powłokami typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC, w połączeniu liniową analizą rozkładu pierwiastków w powłokach, wykazały ich dwuwarstwową budowę (rys. 34-35). Powłoka typu W/W-DLC, zbudowana jest z dwóch stref: pierwszą strefę, przylegającą bezpośrednio do podłoża stali, stanowi czysty wolfram, druga strefę, zewnętrzną warstwy stanowi powłoka diamentopodobna modyfikowana wolframem W-DLC typu a-C:H:W (rys. 34).

Powłoka typu Cr/Cr-DLC, zbudowana jest z dwóch stref: pierwszą strefę, przylegającą bezpośrednio do podłoża stali, stanowi czysty chrom, druga strefę, zewnętrzną warstwy, stanowi powłoka diamentopodobna modyfikowana chromem Cr-DLC typu a-C:H:Cr (rys. 35).

Powłoka typu Cr, jest powłoką jednowarstwową, zbudowaną z czystego chromu (rys. 36).



Rys. 36 Obraz mikroskopowy SEM przekroju poprzecznego powłoki Cr (a) oraz analiza liniowa rozkładu pierwiastków w powłoce (b)

6.1.2. Wyniki pomiarów grubości powłok za pomocą kulotestera

Wyniki pomiarów grubości powłok typu W/W-DLC, typu Cr/Cr-DLC oraz typu Cr, osadzonych na powierzchni stali 42CrMo4 metodą Arc PVD, uzyskane za pomocą kulotestera, podano w tabelicy 11.

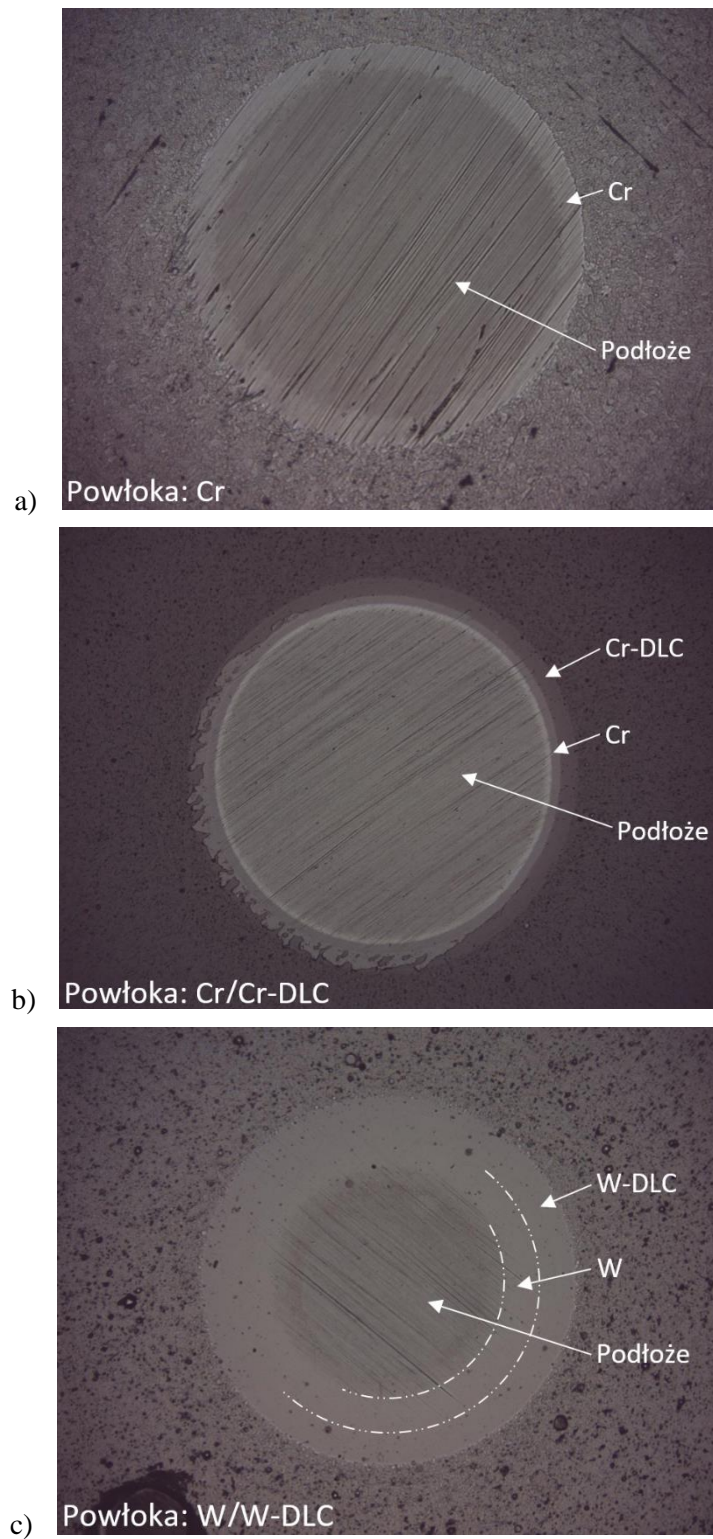
Przykładowe obrazy utworzonych wytarć, na podstawie których wyznaczano grubości poszczególnych powłok, pokazano na rys. 37.

Tablica 11. Wyniki pomiarów grubości powłok

Rodzaj powłoki	Nazwa / grubość poszczególnych stref powłoki PVD		Grubość całkowita powłoki PVD
	I strefa*	II strefa**	
W/W-DLC	W 1,49 μm	W-DLC 1,22 μm	2,71 μm
Cr/Cr-DLC	Cr 0,76 μm	Cr-DLC 0,98 μm	1,74 μm
Cr	Cr 1,00 μm		1,00 μm

*I strefa – wewnętrzna, przylegająca do powierzchni stali

**II strefa – zewnętrzna powłoki



Rys. 37. Obrazy utworzonych wytarć uzyskanych metodą kula-tarcza na powierzchni próbek ze stali z powłokami: a) Cr, b) Cr/Cr-DLC, c) W/W-DLC

6.2. Chropowatość powłok

Wyniki pomiarów chropowatości badanych powłok pokazano w tablicach 12-15 oraz na rysunku 38. W ramach badań dla każdej powłoki wykonano pomiary trzech podstawowych parametrów chropowatości Ra, Rz, Rt. Uzyskane wyniki wykazały, że powłoka Cr/Cr-DLC charakteryzuje się najmniejszą chropowatością (Tabl. 13 i 15).

Tablica 12. Parametry chropowatości powłoki typu W/W-DLC

Parametry chropowatości	Chropowatość [μm]			
	Pomiar			Wartość średnia
	1	2	3	
Ra	0,0165	0,0203	0,0200	0,0189
Rz	0,1670	0,2440	0,2000	0,2037
Rt	0,2580	0,3920	0,3000	0,3167

Tablica 13 Parametry chropowatości powłoki typu Cr/Cr-DLC

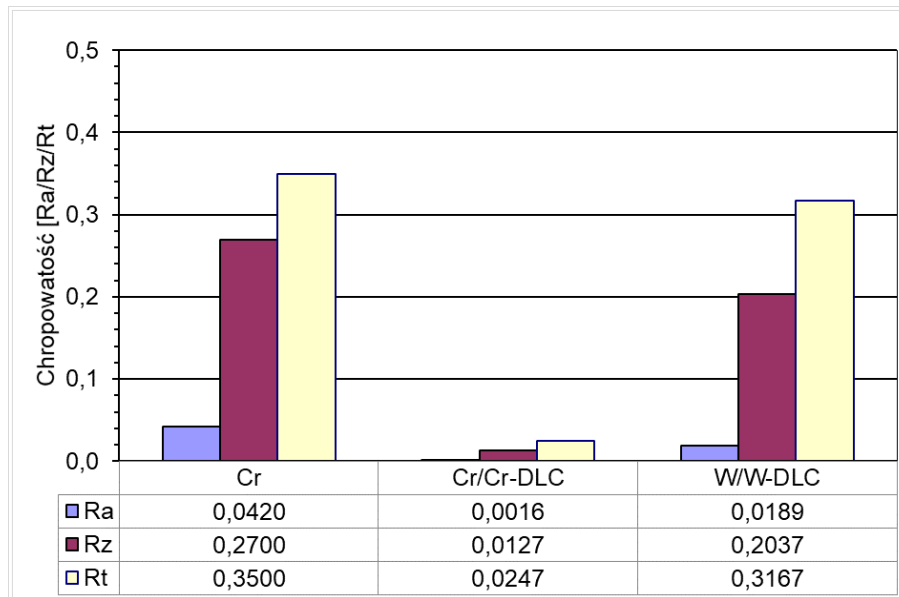
Parametry chropowatości	Chropowatość [μm]			
	Pomiar			Wartość średnia
	1	2	3	
Ra	0,0016	0,0019	0,0014	0,0016
Rz	0,0150	0,0140	0,0090	0,0127
Rt	0,0450	0,0170	0,0120	0,0247

Tablica 14. Parametry chropowatości powłoki typu Cr

Parametry chropowatości	Chropowatość [μm]			
	Pomiar			Wartość średnia
	1	2	3	
Ra	0,0470	0,0390	0,0400	0,0420
Rz	0,2800	0,2600	0,2700	0,2700
Rt	0,3600	0,3500	0,3400	0,3500

Tablica 15. Porównanie parametrów chropowatości powłok typu W/W-DLC, Cr/Cr-DLC oraz typu Cr

Parametry chropowatości	Chropowatość [μm]		
	Rodzaj powłoki		
	W/W-DLC	Cr/Cr-DLC	Cr
Ra	0,0189	0,0016	0,0420
Rz	0,2037	0,0127	0,2700
Rt	0,3167	0,0247	0,3500



Rys. 38. Wyniki pomiarów chropowatości próbek ze stali z powłokami: a) Cr, b) Cr/Cr-DLC, c) W/W-DLC

6.3. Twardość i moduł Younga

Pomiary twardości oraz modułu Younga próbek z powłokami typu W/W-DLC, typu Cr/Cr-DLC oraz typu Cr, osadzonymi na powierzchni stali 42CrMo4 metodą Arc PVD, wykonano za pomocą Nano-Hardness Testera wyposażonego we wgłębnik typu Berkovich, zachowując maksymalne zagłębienie penetratora <10% grubości powłoki. Parametry pomiaru twardości oraz modułu Younga oraz wyniki pomiarów podano, odpowiednio w tablicach 16 i 17.

Analiza wyników badań właściwości mechanicznych (Tablica 17) wykazała, że zarówno powłoka czystego chromu typu Cr jak i powłoka Cr/Cr-DLC, modyfikowana chromem, charakteryzując się znacznie mniejszą twardością, odpowiednio $H_{Cr} = 5$ GPa, $H_{Cr/Cr-DLC} = 15$ GPa, w porównaniu z powłoką W/W-DLC, modyfikowaną wolframem, dla której twardość wynosi $H_{W/W-DLC} = 32$ GPa. W przypadku powłoki czystego chromu odnotowano jednocześnie najwyższy moduł Younga ($E_{Cr} = 612$ GPa). Taka wysoka wartość modułu Younga i jednocześnie niska twardość ($H_{Cr} = 5$ GPa) świadczą o dużej podatności powłoki na odkształcanie ($H/E_{Cr} = 0,008$). Bardzo niska wartość wskaźnika plastyczności H^3/E^2 , potwierdziła również niską odporność tej powłoki na plastyczną deformację.

Tablica 16. Parametry pomiaru twardości oraz modułu Younga z wykorzystaniem urządzenia Nano-Hardness Tester

Badana powłoka	Maksymalne obciążenie wgłębnika F_{\max} [mN]	Szybkość nakładania obciążenia dF [mN/min]	Szybkość zdejmowania obciążenia dF [mN/min]	Czas zatrzymania obciążenia maksymalnego [s]	Przygotowanie próbki
Cr	3	60	60	1	Powierzchnia nienaruszona
Cr/Cr-DLC	10	60	60	1	Powierzchnia nienaruszona
W/W-DLC	10	60	60	1	Powierzchnia nienaruszona

Tablica 17. Wyniki pomiarów twardości i modułu Younga

Rodzaj powłoki	Twardość H [GPa]		Twardość HV [Vickers]		Moduł Younga E [GPa]		H/E	H^3/E^2
	Wartość	Błąd	Wartość	Błąd	Wartość	Błąd		
Cr	5	0,3	441	47	612	50	0,008	0,0003
Cr/Cr-DLC	15	1,2	1395	112	210	20	0,070	0,0765
W/W-DLC	32	3	3013	282	424	55	0,075	0,1822

W przypadku powłoki Cr/Cr-DLC, modyfikowanej chromem, odnotowano trzykrotny wzrost twardości ($H_{Cr/Cr-DLC} = 15$ GPa) przy jednoczesnym spadku modułu Younga ($E_{Cr/Cr-DLC} = 210$ GPa), w porównaniu z powłoką czystego chromu typu Cr. Taki spadek modułu sprężystości E, przy jednoczesnym wzroście twardości świadczy o poprawie właściwości sprężystych definiowanych przez indeks H/E, określający podatność powłoki na odkształcenia.

Podobną podatnością na odkształcenia charakteryzuje się powłoka W/W-DLC, dla której wskaźnik sprężystości wynosi $H/E_{W/W-DLC} = 0,075$. Powłoka ta, posiada jednak znacznie wyższą twardość $H_{W/W-DLC} = 32$ GPa, w porównaniu do powłoki Cr/Cr-DLC. Wskazuje to na znacznie lepszą odporność na zużycie tego materiału. Dodatkowo powłoka W/W-DLC charakteryzuje się lepszą odpornością na plastyczną deformację, którą definiuje wskaźnik H^3/E^2 (Tabela 17). Takie właściwości mechaniczne świadczą o tym, że powłoka W/W-DLC będzie mogła przenosić znacznie większe obciążenia, niż pozostałe badane materiały powłok.

6.4. Wyniki badań adhezji

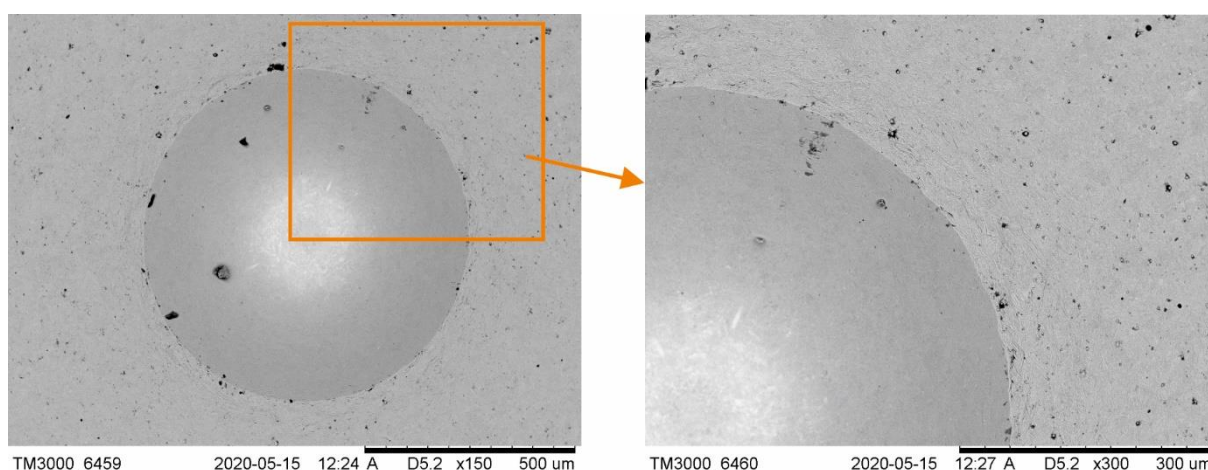
6.4.1. Wyniki badań adhezji metodą wciskania węgelnika

Wyniki badań adhezji metodą wciskania węgelnika przedstawiono na rysunkach 39, 40 i 41. Obrazy mikroskopowe powstałego odcisku zostały wykonane przy wykorzystaniu mikroskopu skaningowego Hitachi TM 3000.

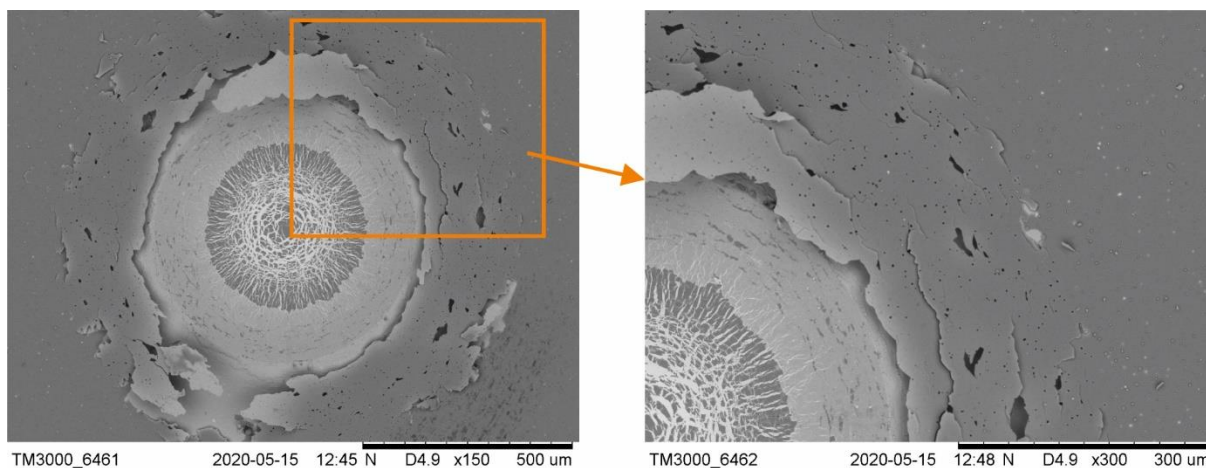
Uzyskanie wyniki wykazały, że najlepszą adhezją do podłoża stali 42CrMo4 charakteryzuje się powłoka czystego chromu, typu Cr. W obrębie powstałego odcisku nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń powłoki w postaci pęknięć czy odprysków (Rys.39). Związane jest to z właściwościami mechanicznymi tej powłoki (Tablica 17). Bardzo niska twardość tego materiału (H) i jednocześnie duża podatność na odkształcenia (H/E) oraz niska odporność na plastyczną deformację (H^3/E^2) spowodowały, że materiał powłoki jedynie odkształcił się plastycznie pod wpływem działania obciążenia węgelnika.

Natomiast, w przypadku powłoki diamentopodobnej modyfikowanej chromem typu Cr/Cr-DLC odnotowano bardzo słabą adhezję do podłoża stali, odpowiadającą skali – HF6. Świadczą o tym obserwowane defekty w postaci wyraźnych obłuszczeń powłoki w obszarze otaczającym powstały odcisk (Rys.40). Bardzo słaba adhezja powłoki typu Cr/Cr-DLC spowodowana jest prawdopodobnie wysokim stanem naprężeń w tej powłoce.

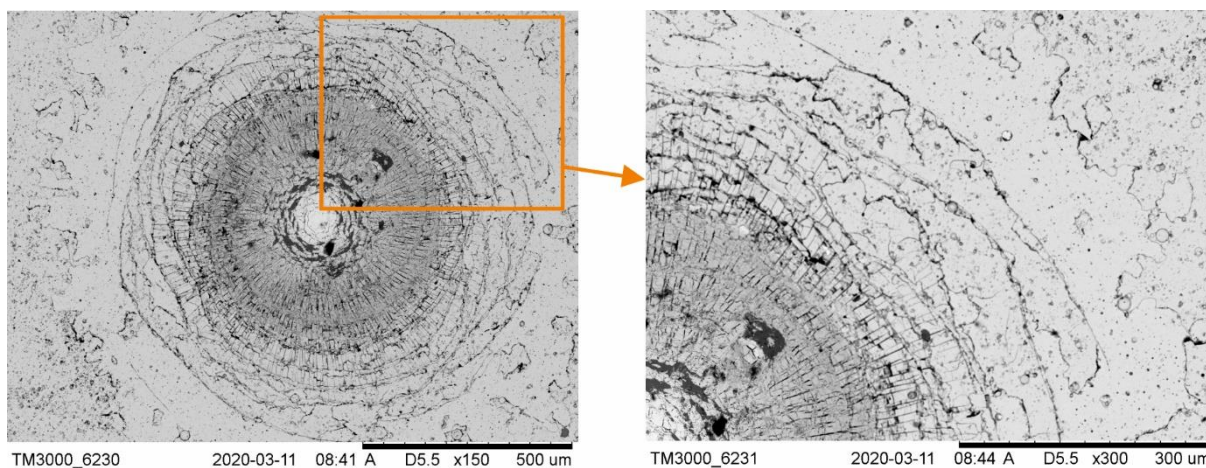
Adhezja powłoki typu W/W-DLC do stali 42CrMo4 oceniona została jako dobra, odpowiadającą skali – HF3. W obszarze powstałego odcisku zaobserwowano pęknięcia promieniowe oraz obwodowe (Rys.41).



Rys. 39. Wyniki badań adhezji metodą wciskania węgelnika powłoki typu Cr



Rys. 40. Wyniki badań adhezji metodą wciskania węgelnika powłoki typu Cr/Cr-DLC



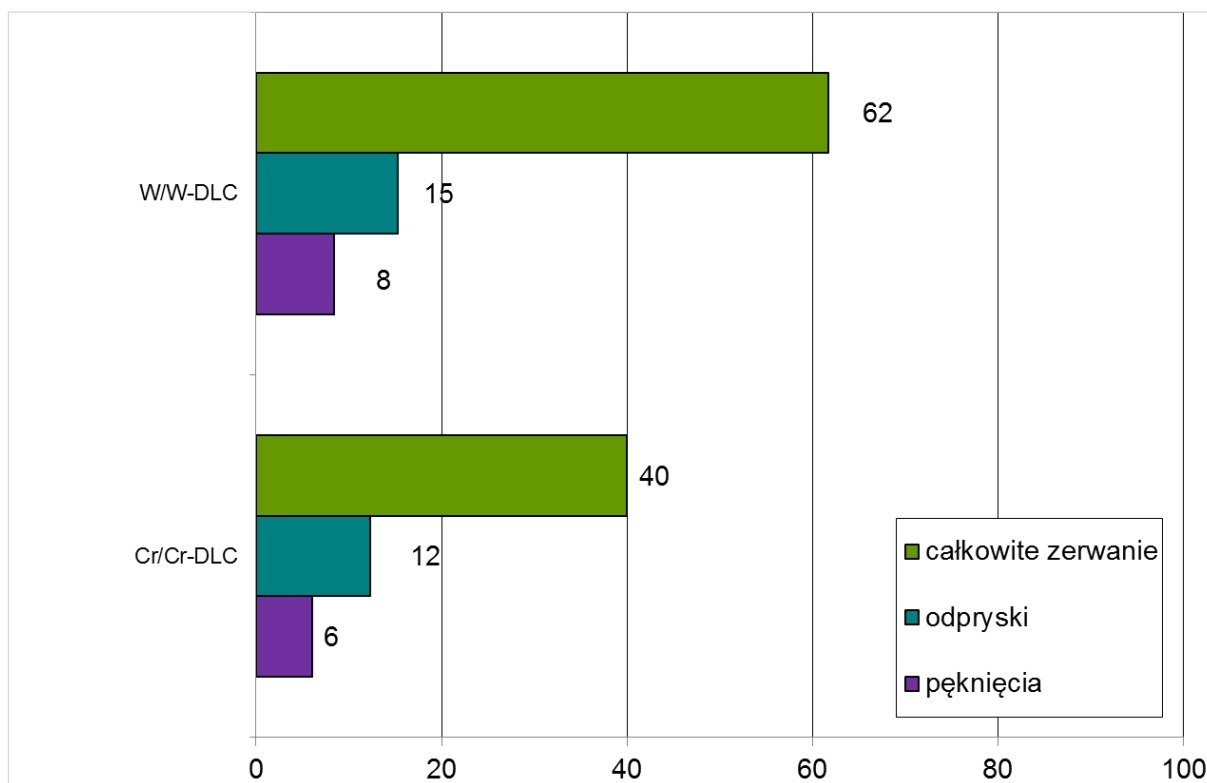
Rys. 41. Wyniki badań adhezji metodą wciskania węgelnika powłoki typu W/W-DLC

6.4.2. Wyniki badań adhezji metodą zarysowania

Zgodnie z przyjętą metodyką badań adhezji, analizie poddano zmiany parametrów procesu zarysowania, tj.: siły tarcia (F_t) i współczynnika tarcia (μ) pomiędzy węgelnikiem i badaną próbką, sygnału akustycznego (AE) emitowanego z niszczonej powłoki, a także wyniki obserwacji mikroskopowych, zniszczeń powłoki powstałych w obszarze rysy. Dla każdego z badanych materiałów powłokowych wykonane trzy rysy zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabelicy 18. Wyniki badań adhezji, w celu łatwiejszego ich porównania przedstawiono w sposób zbiorczy na rysunku 42.

Tablica 18. Parametry pomiaru adhezji metodą zarysowania

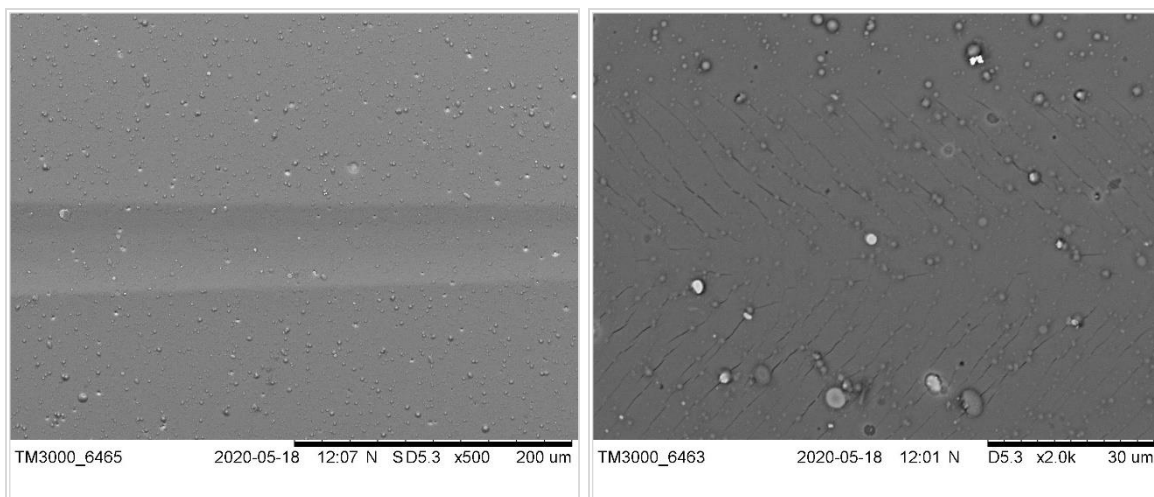
Badana powłoka	Maksymalne obciążenie wgłębnika [N]	Długość ścieżki zarysowania [mm]	Szybkość nakładania obciążenia [N/min]
Cr/Cr - DLC	100	10	100
W/W-DLC	100	10	100



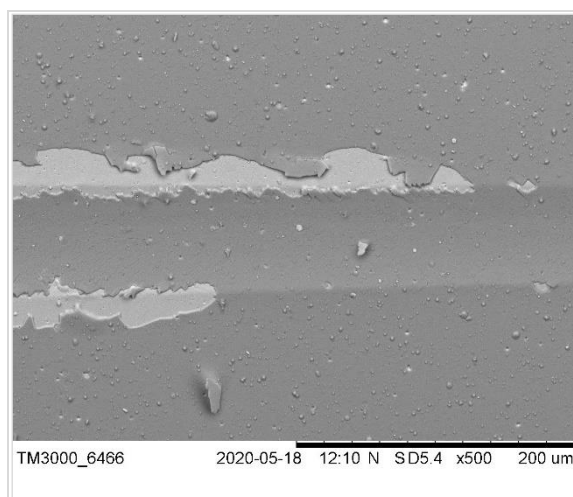
Rys. 42. Wyniki badań adhezji powłok typu Cr/Cr-DLC i W/W-DLC do podłoża stali metodą zarysowania

Przeprowadzone testy (Rys.42) wykazały, że obie powłoki DLC (Cr/Cr-DLC oraz W/W-DLC) charakteryzują się zbliżonymi wartościami parametru F_{c1} oraz F_{c2} , określającego odporność zarysowanej powłoki na kruche pęknięcie. W teście zarysowania, pierwsze pęknięcia w przypadku powłoki diamentopodobnej modyfikowanej chromem, Cr/Cr-DLC, zaobserwowano przy obciążeniu krytycznym $F_{c1(Cr/Cr-DLC)} = 6$ N. Pęknięcia te znajdowały się wewnątrz powstałej rysy i były zakrzywione przeciwnie do kierunku ruchu wgłębnika (Rys.43a). Wzrost obciążenia powodował multiplikację powstałych pęknięć oraz ich propagację na zewnątrz rysy. Spowodowało to pojawienie się przy obciążeniu wgłębnika siłą $F_{c2(Cr/Cr-DLC)} = 12$ N dużej ilości odprysków wzdłuż całej krawędzi powstałej rysy (Rys.43b). Po zarysowaniu powłoki Cr/Cr-DLC wgłębnikiem obciążonym siłą $F_{c3(Cr/Cr-DLC)} = 40$ N zaobserwowano całkowite usunięcie powłoki z obszaru rysy (Rys.43c).

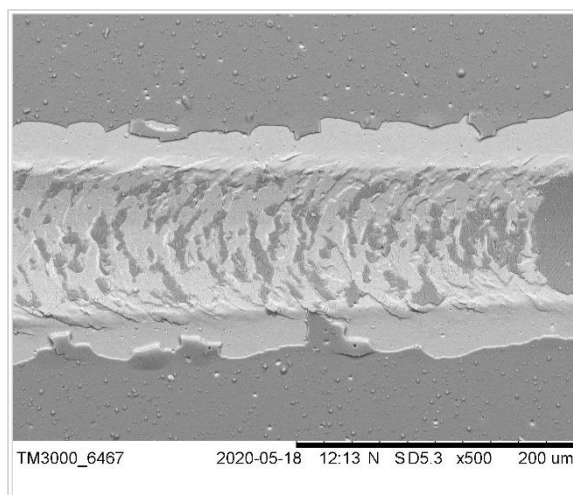
W przypadku powłoki diamentopodobnej W/W-DLC, modyfikowanej wolframem, przy obciążeniu wgłębnika siłą $F_{c1(W/W-DLC)} = 6$ N, zaobserwowano pojawienie się znacznie mniejszej ilości pęknięć (Rys.44a) w porównaniu z powłoką Cr/Cr-DLC. Wzrost obciążenia wgłębnika spowodował jedynie propagację powstałych pęknięć na zewnątrz rysy, co przyczyniło się do pojawienia się przy sile obciążającej wgłębnik $F_{c2(Cr/Cr-DLC)} = 12$ N pojedynczych odprysków wzdłuż krawędzi powstałej rysy (Rys.44b). W przypadku powłoki W/W-DLC całkowite zerwanie nastąpiło dopiero przy obciążeniu wgłębnika siłą 62 N (Rys.44c), co powoduje, że powłokę tę należy uznać jako materiał o najlepszej adhezji do podłoża.



a) pęknięcia wzdłuż krawędzi rysy pow. 500x oraz 2000x

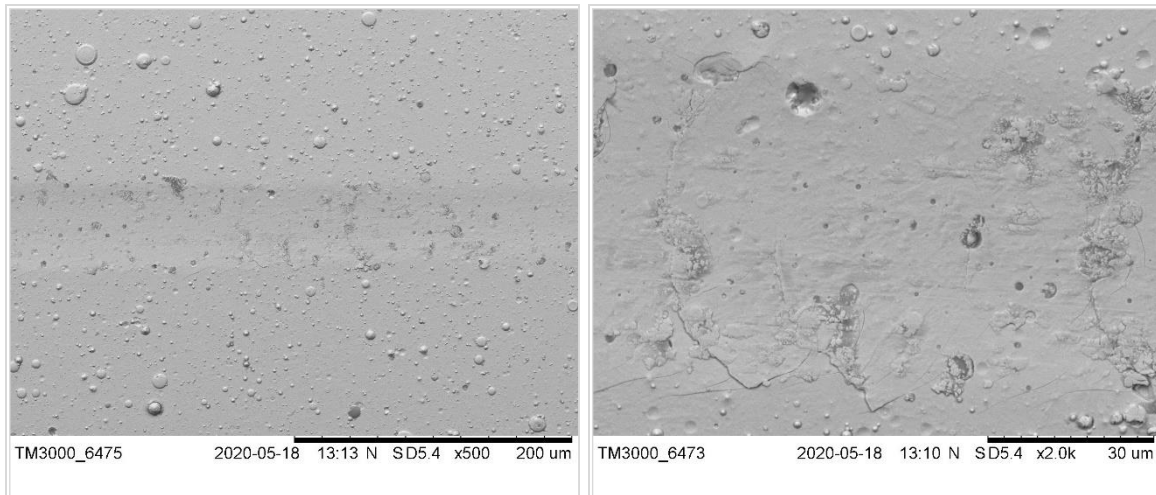


b) odpryski wzdłuż krawędzi rysy

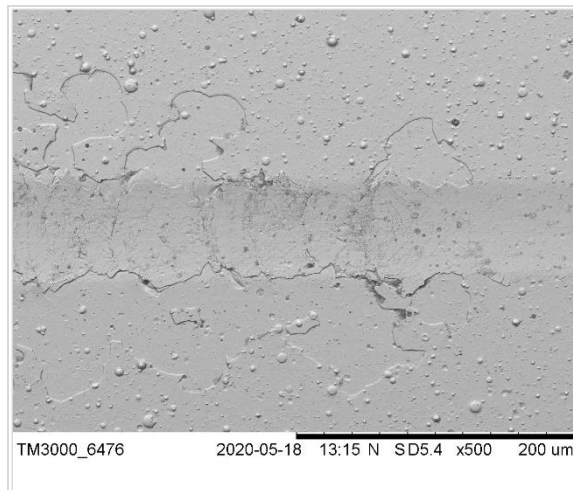


c) zerwanie

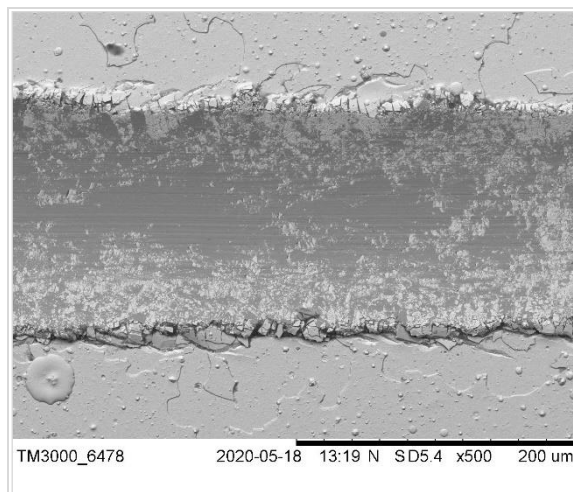
Rys. 43. Obraz mikroskopowy (mikroskop skaningowy Hitachi 3000) rysy wykonanej na powierzchni próbki pokrytej powłoką Cr/Cr-DLC: a) pow. 500 oraz 2000x, b) pow. 500x, c) pow. 500x



a) pęknięcia wzdłuż krawędzi rysy pow. 500x oraz 2000r



b) odpryski wzdłuż krawędzi rysy



c) zerwanie

Rys. 44. Obraz mikroskopowy (mikroskop skaningowy Hitachi 3000) rysy wykonanej na powierzchni próbki pokrytej powłoką W/W-DLC: a) pow. 500 oraz 2000x, b) pow. 500x, c) pow. 500x.

6.5. Wyniki badań odporności na zużycie ścierne metodą kula-tarcza

Wyniki badań odporności na zużycie ścierne, metodą kula-tarcza, pokazano w tablicy 19. Średnia objętość powstałego wytarcia dla próbki pokrytej powłoką czystego chromu Cr wyniosła $V_{\text{sr Cr}} = 4,27 \cdot 10^{-2} \text{mm}^3$ a maksymalna głębokość wytarcia wyniosła 14,5 μm . W przypadku próbek pokrytych powłokami diamentopodobnymi (Cr/Cr-DLC oraz W/W-DLC) nie nastąpiło przetarcie powłoki do podłoża a maksymalne głębokości wytarcia wynosiły odpowiednio $h_{\text{max Cr/Cr-DLC}} = 0,85 \mu\text{m}$ oraz $h_{\text{max W/W-DLC}} = 0,25 \mu\text{m}$. Ponadto odnotowane objętości powstałych wytarcia były o dwa rzędy wielkości mniejsze w porównaniu z powłoką czystego chromu Cr i wyniosły odpowiednio $V_{\text{sr Cr/Cr-DLC}} = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{mm}^3$ oraz $V_{\text{sr W/W-DLC}} = 1,46 \cdot 10^{-4} \text{mm}^3$, co świadczy o znacznie mniejszym zużyciu tych materiałów. Zgodnie z wartościami wyznaczonych wskaźników zużycia (Tabl. 19) próbka stalowa pokryta powłoką W/W-DLC charakteryzuje się najlepszą odpornością na zużycie ścierne w porównaniu do pozostałych próbek.

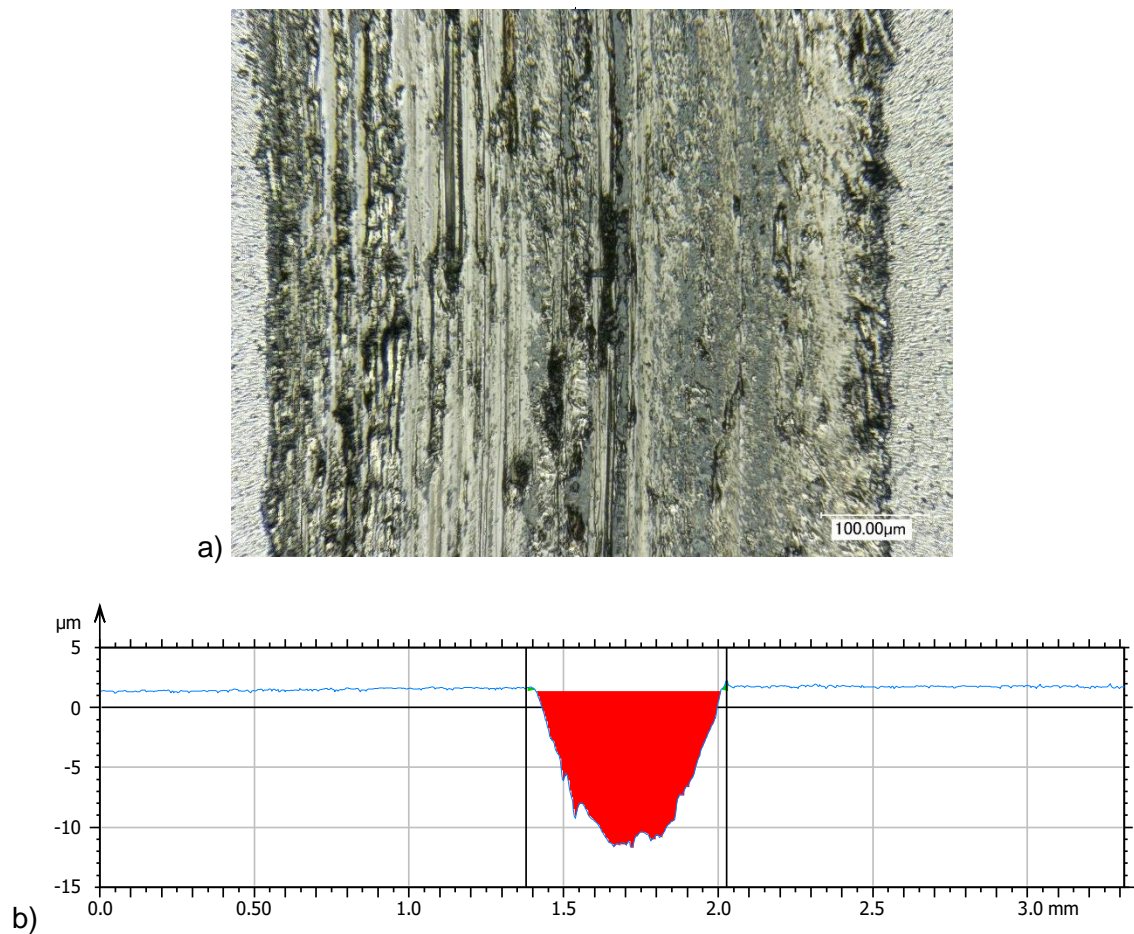
Tablica 19. Wyniki badań tribologicznych

Badana materiał	Maksymalna głębokość wytarcia h_{max} [μm]	Średnia objętość wytarcia V_{sr} [mm^3]	Wskaźnik zużycia W_z [$\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{cykle}$]
Cr	14,5	$4,27 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$
Cr/Cr-DLC	0,85	$2,56 \cdot 10^{-4}$	$8,14 \cdot 10^{-7}$
W/W-DLC	0,25	$1,46 \cdot 10^{-4}$	$3,09 \cdot 10^{-7}$

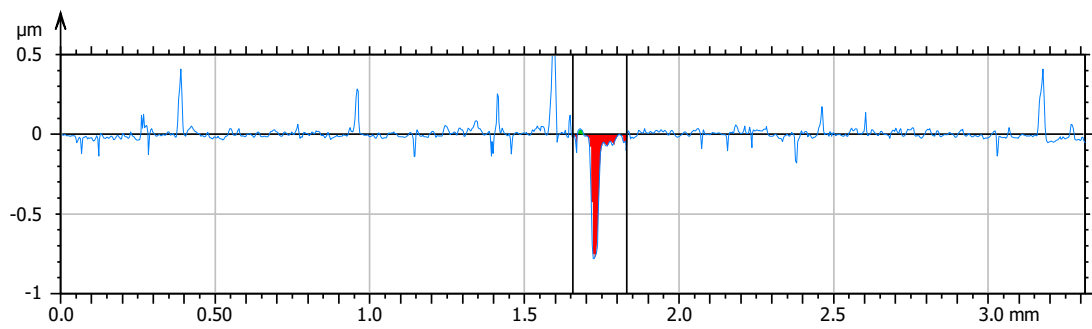
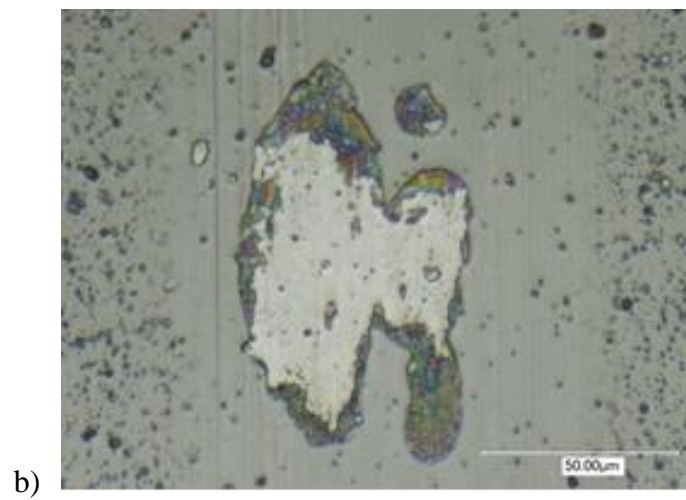
Analizie poddano również powierzchnie powstałych wytarcia (Rys. 45-47). Analizując obrazy mikroskopowe powstałych ścieżek po testach tribologicznych zaobserwowano odmienny mechanizm niszczenia powłok Cr/Cr-DLC oraz W/W-DLC.

Obszar wytarcia próbki pokrytej powłoką W/W-DLC charakteryzuje się równomierną powierzchnią (Rys 47). W obrębie powstałej rysy obserwujemy niewielkie uszkodzenie powłoki o charakterze ściernym.

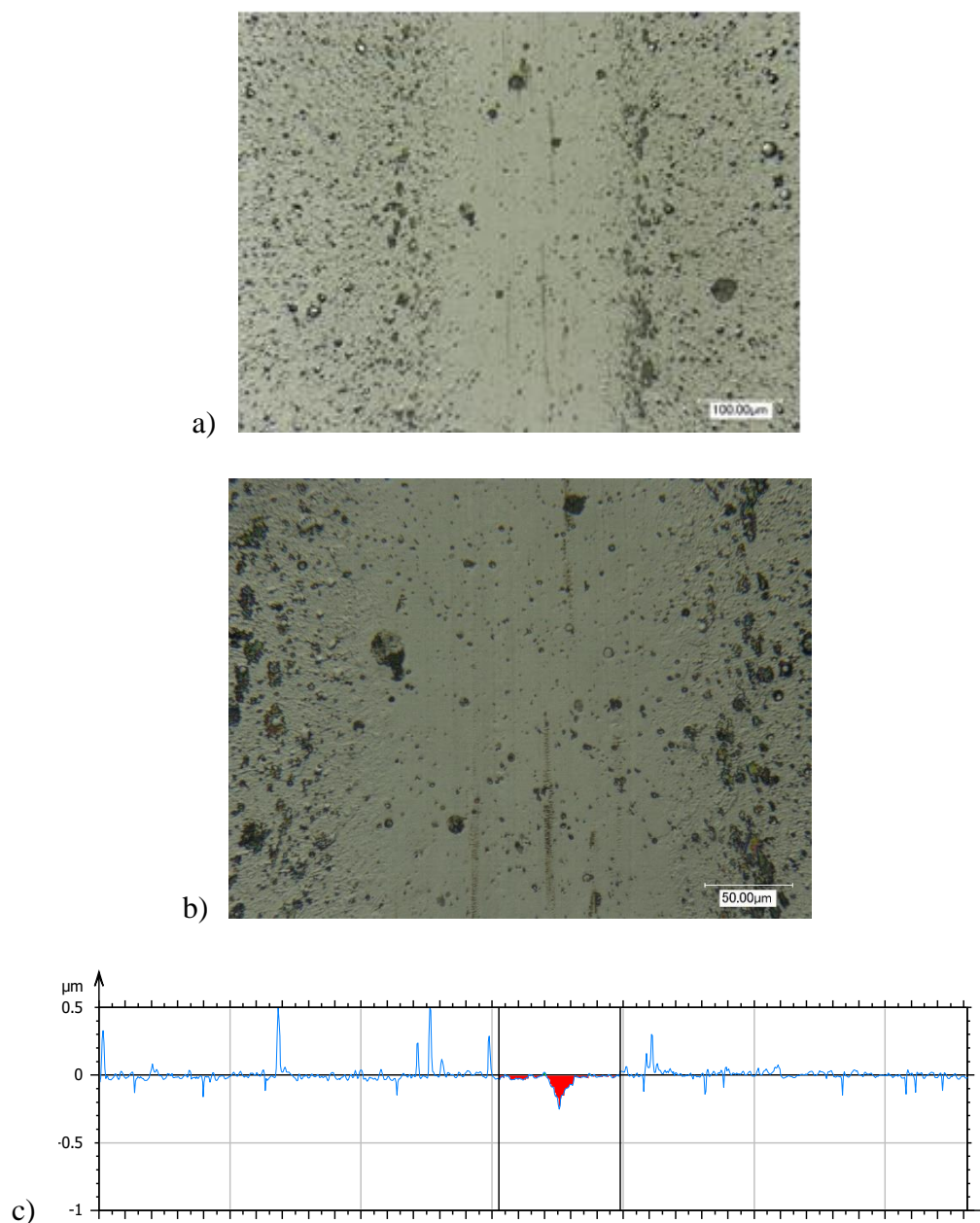
Analiza powierzchni wytarcia próbki z powłoką Cr/Cr-DLC (Rys. 46) wykazała natomiast zupełnie odmienny mechanizm niszczenia się tego materiału w procesach tarcia. Obserwowane są liczne drobne odpryski związane z niską adhezją tej powłoki oraz wgłębienia charakterystyczne dla mechanizmu zużycia ściernego przez bruzdowanie. W wyniku tego zjawiska znacznie pogarsza się współpraca w styku, doprowadzając do szybszego uszkodzenia materiału.



Rys. 45. Ścieżki wytarcia powstałe po testach tribologicznych próbek pokrytych powłoką Cr:
a) obraz mikroskopowy pow. 500x, b) profil wytarcia



Rys. 46. Ścieżki wytarcia powstałe po testach tribologicznych próbek pokrytych powłoką Cr/Cr-DLC a) pow. 500x, b) 2000x, c) profil wytarcia



Rys. 47. Ścieżki wytarcia powstałe po testach tribologicznych próbek pokrytych powłoką W/W-DLC: a) pow. 500x, b) 1000x, c) profil wytarcia

Wskaźnik zużycia ściernego dla próbek z powłokami W/W-DLC wynosił $W_{z(W/W-DLC)} = 3,09 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{cykle}$, a więc był ponad dwukrotnie (ok. 2,6 razy) mniejszy od wskaźnika zużycia dla próbek z powłokami typu Cr/Cr-DLC, który wynosił $W_{z(\text{Cr/Cr-DLC})} = 8,14 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{cykle}$ (tabl. 19). Świadczy to o mniejszym zużyciu ściernym o ok. 2,6 razy powłoki W/W-DLC w porównaniu z powłoką Cr/Cr-DLC. W przypadku powłoki z czystego chromu, typu Cr, wskaźnik zużycia wynosił $W_{z(\text{Cr})} = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{cykle}$, a więc był o trzy rzędy wielkości większy od wskaźników zużycia dla pozostałych powłok. Świadczyło to bardzo dużym zużyciu ściernym tej powłoki.

6.6. Wyniki badań odporności na korozję

Badania odporności na korozję wykonano w roztworze 0,5 M NaCl dla następujących rodzajów próbek ze stali 42CrMo4:

- próbki z powłokami typu W/W-DLC,
- próbki z powłokami typu Cr/Cr-DLC,
- próbki ze stali, bez powłoki.

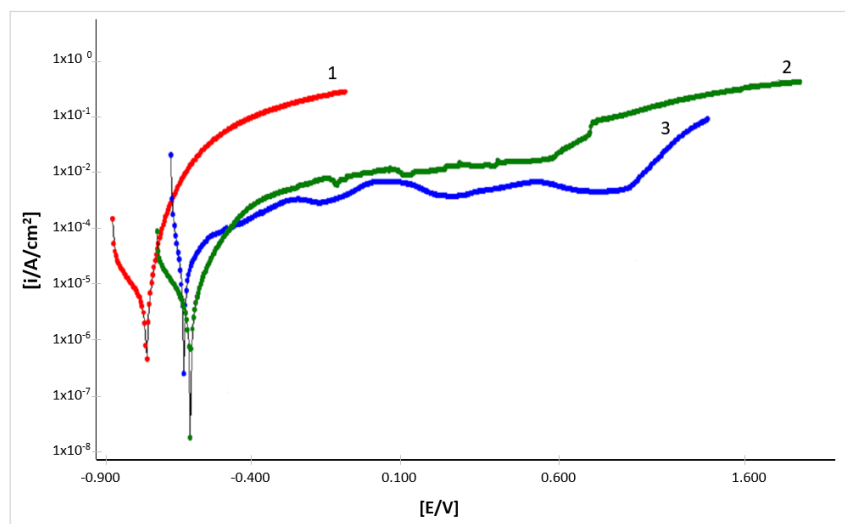
W roztworze 0,5 M NaCl potencjał korozyjny badanych próbek stabilizował się po 30 min, przy czym dla powłok typu W/W-DLC ustalał się na poziomie $E_{kor(W/W-DLC)} = - 562$ mV – podobnym do od potencjału próbek z warstwami typu Cr/Cr-DLC, który wynosił $E_{kor(Cr/Cr-DLC)} = - 547$ mV (tabl. 20).

Potencjał korozyjny stali 42CrMo4 stanowiącej podłoże powłok, ustalał się na najniższym poziomie $E_{kor} = - 715$ mV.

Krzywa polaryzacji anodowej dla próbek ze stali 42CrMo4, charakteryzująca się szybkim wzrostem gęstości prądu, świadczyła o aktywnym roztwarzaniu tej stali w roztworze NaCl (rys. 48). Wolniejszy wzrost gęstości prądu anodowego dla próbek z powłokami typu Cr/Cr-DLC wskazywał na mniej intensywne roztwarzanie ich powierzchni (tabl. 20). Najwolniejszy wzrost gęstości prądu anodowego obserwowano dla próbek z powłokami typu W/W-DLC. Dwukrotnie niższe gęstości prądu anodowego, w przypadku powłok typu Cr/Cr-DLC i W/W-DLC, odpowiednio $I_{kor(śr)} = 7,6$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ i $I_{kor(śr)} = 7,4$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, wskazywały na większą odporności korozyjną próbek ze stali i z tymi powłokami, niż próbek bez powłok, dla których $I_{kor(śr)} = 15$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Tablica 20. Wyniki analizy krzywych polaryzacji anodowej próbek ze stali 42CrMo4 bez powłok oraz z powłokami Cr/Cr – DLC, W/W – DLC

Badana powłoka	E_{kor} [mV]	$I_{kor(śr)}$ [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
Stal bez powłoki	- 715	15
Cr/Cr - DLC	- 547	7,6
W/W-DLC	-562	7,4



Rys. 48. Krzywe polaryzacji anodowej dla próbek ze stali 42CrMo4: 1– bez powłok, 2 – z powłoką Cr/Cr–DLC, 3 – z powłoką W/W–DLC

7. Dyskusja wyników badań

Przedmiotem badań w pracy była ocena możliwości zwiększenia trwałości łańcuchów stosowanych w przemyśle do przenoszenia pędu, przez zastosowanie nowoczesnych rozwiązań inżynierii powierzchni. Bardzo ważnym warunkiem prawidłowej pracy przekładni łańcuchowej jest stabilność wymiarowa łańcucha, o której decyduje stopień zużycia poszczególnych elementów łańcucha. W badaniach skoncentrowano się nad poprawą właściwości głównego elementu konstrukcyjnego łańcucha napędowego – sworznia, który podczas eksploatacji ulega zużyciu ściernemu, co powoduje wydłużanie łańcucha.

Przeprowadzono analizę i badania własne czynników niszczących sworznie w łańcuchach napędowych (rozdział 2.1.4.), które wykazały że głównym czynnikiem niszczącym, w tym przypadku, jest zużycie ścierne. Jako czynnik niszczący, uwzględniono również oddziaływanie korozyjne środowiska.

Eksploatacja w warunkach zmiennych wymuszeń tribologicznych i korozyjnych powoduje niekorzystne zmiany struktury materiałów, które mogą być przyczyną utraty ich ważnych właściwości mechanicznych.

Na podstawie analizy stanu wiedzy w zakresie nowoczesnych metod w inżynierii powierzchni (rozdział 2.2.), jako rozwiązanie materiałowe umożliwiające spełnienie wymienionych wymagań, wybrano powłokę dwuwarstwową: diamentopodobną typu a-C:H:W modyfikowaną wolframem z międzywarstwą z wolframu, oznaczaną w pracy jako W/W-DLC. Powłokę tą osadzano metodą odparowania łukiem elektrycznym Arc PVD (Arc Physical Vapour Deposition) na powierzchni stali stopowej 42CrMo4, która jest stosowana na sworznie. Ponadto przeprowadzono badania powłoki dwuwarstwowej: diamentopodobnej typu a-C:H:Cr, modyfikowanej chromem z międzywarstwą z chromu, oznaczaną jako Cr/Cr-DLC, która wg danych literaturowych, odznacza się wysoką twardością, dobrą adhezją do podłoża stali oraz dobrymi właściwościami tribologicznymi. Należy podkreślić, że osadzanie powłok z czystych metali, wolframu lub chromu, na powierzchni stali, jako międzywarstwy w powłokach dwuwarstwowch, kompensuje naprężenia wewnętrzne i polepsza adhezję powłok do podłoża stali.

Dla porównania, przeprowadzono również badania powłok jednowarstwowych, otrzymywanych z czystego chromu typu Cr, osadzanych metodą Arc PVD, gdyż w niektórych przypadkach, dla zwiększenia trwałości sworzni, stosuje się chrom osadzany za pomocą tradycyjnej obróbki galwanicznej.

Analiza morfologii powierzchni próbek z badanymi powłokami, wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM+BSE (Hitachi TM 3000), wykazała obecność jednorodnej, bardzo drobnej struktury, z niewielką ilością fazy kropelkowej, charakterystycznej dla metody ARC PVD – odparowania łukiem elektrycznym. Największy udział fazy mikrokropelkowej zaobserwowano w przypadku powłoki modyfikowanej wolframem W/W-DLC (rys. 30), zaś najmniejszą ilość fazy mikrokrpalekowej stwierdzono na powierzchni powłoki czystego chromu typu Cr (Rys. 32). Podobne obrazy skaningowe powierzchni powłok, osadzanych metodą Arc PVD, obserwowano w pracach J. Smolika [poz. lit. 79], R. Byona [poz. lit. 89],

Rentgenowska analiza fazowa powierzchni próbek ze stali 42CrMo4 z osadzonymi powłokami, wykazała obecność wolframu oraz węglika wolframu WC w przypadku powłok W/W-DLC, jak również obecność chromu oraz węglików chromu, głównie typu Cr₂₃C₆, dla powłok typu Cr/Cr-DLC (rys. 33). Obecność węglików wolframu WC w powłokach diamentopodobnych typu W-DLC wykazano w pracy M. Madej [poz. lit. 92] zaś węglików chromu w powłokach typu Cr-DLC, stwierdzono w publikacji M. Pancielejko [poz. lit. 109].

Wyniki obserwacji poprzecznych zglądów metalograficznych próbek, za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM+EDS) z powłokami typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC, w połączeniu z liniową analizą rozkładu pierwiastków w powłokach, wykazały ich dwuwarstwową budowę. Powłoka typu W/W-DLC, o całkowitej grubości ok. 2,7 μm (ocenianej za pomocą kulotestera), zbudowana była z dwóch stref: pierwszą strefę, przylegającą bezpośrednio do podłoża stali, stanowił czysty wolfram, drugą strefę, zewnętrzną warstwy stanowiła powłoka diamentopodobna W-DLC typu a-C:H:W (rys. 34). Podobnie, powłoka typu Cr/Cr-DLC, o całkowitej grubości ok. 1,7 μm (ocenianej za pomocą kulotestera), zbudowana była z zewnętrznej strefy zawierającej powłokę diamentopodobną Cr-DLC typu a-C:H:Cr, z międzywarstwą, przylegającą do podłoża stali, zawierającą czysty chrom (rys. 35), co potwierdziły wyniki liniowej analizy rozkładu pierwiastków w powłokach. Grubość powłoki jednowarstwowej typu Cr wynosiła zaledwie ok. 1 μm.

Wyniki pomiarów chropowatości badanych powłok, uzyskane za pomocą profilometru, wykazały, że powłoka Cr/Cr-DLC charakteryzowała się najmniejszą chropowatością (Ra = 0,0016 μm, Rz = 0,0127 μm, Rt = 0,0247 μm), w odróżnieniu od powłoki W/W-DLC, której chropowatość była prawie o rząd wielkości większa (Ra = 0,0189 μm, Rz = 0,0189 μm, Rt = 0,3167 μm).

Analiza wyników badań właściwości mechanicznych (rozdział 6.3.) wykazała, że zarówno powłoka czystego chromu typu Cr, jak i powłoka diamentopodobna typu Cr/Cr-DLC

modyfikowana chromem, charakteryzują się znacznie mniejszą twardością ($H_{Cr}=5\text{GPa}$, $H_{Cr/Cr-DLC}=15\text{GPa}$) w porównaniu z powłoką diamentopodobną typu W/W-DLC, modyfikowaną wolframem ($H_{W/W-DLC}=32\text{GPa}$).

W przypadku powłoki czystego chrom, typu Cr, odnotowano jednocześnie najwyższy moduł Younga ($E_{Cr}=612\text{GPa}$). Taka wysoka wartość modułu Younga i jednocześnie niska twardość ($H_{Cr}=5\text{GPa}$) świadczą o dużej podatności powłoki na odkształcanie ($H/E_{Cr}=0,008$). Bardzo niska wartość wskaźnika plastyczności H^3/E^2 , potwierdziła również niską odporność tej powłoki na plastyczną deformację.

W przypadku powłoki diamentopodobnej, typu Cr/Cr-DLC modyfikowanej chromem, odnotowano trzykrotny wzrost twardości ($H_{Cr/Cr-DLC}=15\text{GPa}$) przy jednoczesnym spadku modułu Younga ($E_{Cr/Cr-DLC}=210\text{GPa}$), w porównaniu z powłoką czystego chromu. Taki spadek modułu sprężystości E , przy jednoczesnym wzroście twardości świadczy o poprawie właściwości sprężystych definiowanych przez indeks H/E , określający podatność powłoki na odkształcenia.

Podobną podatnością na odkształcenia charakteryzują się powłoka typu W/W-DLC, dla której wskaźnik sprężystości wynosi $H/E_{W/W-DLC}=0,075$. Powłoka ta, posiada jednak znacznie wyższą twardość $H_{W/W-DLC}=32\text{GPa}$, w porównaniu do powłoki Cr/Cr-DLC. Wskazuje to na znacznie lepszą odporność na zużycie tego materiału. Dodatkowo powłoka DLC domieszkowana wolframem charakteryzują się lepszą odpornością na plastyczną deformację, którą definiuje wskaźnik H^3/E^2 (Tablica 17). Takie właściwości mechaniczne świadczą o tym, że powłoka W/W-DLC będzie mogła przenosić znacznie większe obciążenia, niż pozostałe badane materiały powłok. Podobne wyniki badań, świadczące o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych powłok diamentopodobnych modyfikowanych wolframem, uzyskano w pracy M. Madej [poz lit. 92].

Badania adhezji powłok do powierzchni stali, wykonane metodą penetracyjną (za pomocą wciskania węgelnika Rockwell'a), przeznaczoną do badania adhezji powłok narażonych podczas eksploatacji na duże obciążenia mechaniczne, wykazały że, najlepszą adhezją do podłoża stali 42CrMo4, charakteryzuje się powłoka jednowarstwowa, z czystego chromu typu Cr. Jednocześnie jednak, jak wykazano w rozdziale 6.3. powłoka ta odznacza się bardzo niską twardością (H), dużą podatnością na odkształcenia (H/E) oraz niską odpornością na plastyczną deformację (H^3/E^2), co praktycznie dyskwalifikuje tę powłokę do zastosowań w warunkach dużych obciążeń mechanicznych.

Adhezja powłoki typu W/W-DLC do stali 42CrMo4 oceniona została jako dobra, odpowiadającą skali – HF3. Natomiast, w przypadku powłoki diamentopodobnej

modyfikowanej chromem typu Cr/Cr-DLC odnotowano bardzo słabą adhezję do podłoża stali, odpowiadającą skali – HF6, spowodowaną prawdopodobnie wysokim stanem naprężeń w tej powłoce.

Adhezja powłok do podłoża stali, oceniana za pomocą testu zarysowania, potwierdziła, że najlepszą adhezją do podłoża stali, charakteryzowała się powłoka typu W/W-DLC, dla której całkowite oderwanie powłoki od podłoża stali, nastąpiło dopiero przy obciążeniu wgłębnika siłą 62N (Rys. 42 i 44c). Podobne wyniki badań, świadczące o dobrej adhezji powłok diamentopodobnych DLC, modyfikowanych wolframem, uzyskano w pracy M. Madej [poz. lit. 92].

Badania odporności na zużycie ściernie metodą kula-tarcza (ball-on-disc), przeprowadzone dla próbek ze stali 42CrMo4 pokrytych powłokami diamentopodobnymi typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC, wykazały że, w obu przypadkach nie nastąpiło przetarcie powłoki do podłoża a maksymalne głębokości wytarc wnosyły odpowiednio, $h_{Cr/Cr-DLC} = 0,85\mu m$ i $h_{W/W-DLC} = 0,25\mu m$. Wskaźnik zużycia ściernego dla próbek z powłokami W/W-DLC wynosił $W_z = 3,09 \cdot 10^{-7} mm^3/N \cdot \text{cykle}$, a więc był ponad dwukrotnie (ok. 2,6 razy) mniejszy od wskaźnika zużycia dla próbek z powłokami typu Cr/Cr-DLC, który wynosił $W_z = 8,14 \cdot 10^{-7} mm^3/N \cdot \text{cykle}$ (tabl. 19). Świadczy to o mniejszym zużyciu ściernym o ok. 2,6 razy powłoki W/W-DLC w porównaniu z powłoką Cr/Cr-DLC. W przypadku powłoki z czystego chromu, typu Cr, wskaźnik zużycia wynosił $W_z = 1,36 \cdot 10^{-4} mm^3/N \cdot \text{cykle}$, a więc był o trzy rzędy wielkości większy od wskaźników zużycia dla pozostałych powłok. Świadczyło to bardzo dużym zużyciu ściernym tej powłoki. Podobne wyniki badań, świadczące o bardzo dobrej odporności na zużycie ściernie powłok diamentopodobnych DLC, uzyskano w pracach C. Donneta [poz. lit. 102, 106, 107] i M. Madej [poz. lit. 92].

Elektrochemiczne badania korozyjne wykazały, że próbki ze stali 42CrMo4 z powłokami diamentopodobnymi typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC, wykazywały dobrą odporność korozyjną w roztworze zawierającym jony chlorkowe (0,5 M NaCl), w porównaniu do próbek ze stali nie pokrytych powłokami. Świadczyły o tym, m.in. dwukrotnie niższe gęstości prądu anodowego, $I_{kor(sr)} = 7,6\mu A/cm^2$ w przypadku powłok Cr/Cr-DLC oraz $I_{kor(sr)} = 7,4\mu A/cm^2$ dla powłok W/W-DLC, w porównaniu z gęstością prądu anodowego próbki ze stali bez powłoki, $I_{kor(sr)} = 15\mu A/cm^2$. Stal bez powłok ulegała intensywnemu roztwarzaniu wskutek oddziaływania środowiska korozyjnego.

Wykazano więc większą odporności korozyjną próbek ze stali 42CrMo4 z powłokami typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC, niż próbek z tej stali bez powłok.

Udowodniono słuszność tezy badawczej przyjętej w pracy, że zwiększenie trwałości sworzni, stanowiących główny element konstrukcyjny łańcuchów napędowych, stosowanych powszechnie w przemyśle, można uzyskać przez wytworzenie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem, typu W/W-DLC, osadzonej dwuetapowo metodą Arc PVD, najpierw przez nałożenie czystego wolframu na powierzchnię stali, a następnie powłoki DLC typu a-C:H:W.

Powłoki diamentopodobne typu W/W-DLC mogą więc być wykorzystywane dla polepszenia właściwości użytkowych sworzni ze stali 42CrMo4 w łańcuchach napędowych, narażonych podczas eksploatacji na ścieranie oraz korozję w agresywnych środowiskach zawierających jony chlorkowe.

Podsumowując rozważania przedstawione w pracy można stwierdzić, że celowym byłoby wykonanie bardziej szczegółowych badań budowy powłok typu W/W-DLC, za pomocą specjalnych metod spektroskopowych np. SEM+BSE+WDS, umożliwiających analizę pierwiastków lekkich, takich jak węgiel, jak również badań elektrochemicznych odporności korozyjnej w kilku różnych agresywnych środowiskach, dla poszerzenia zakresu ich stosowania. Ponadto wskazane byłoby przeprowadzenie badań w kierunku poszukiwania kolejnych rozwiązań modyfikacji powłok DLC w celu zwiększenia ich odporności na zużycie ścierne oraz odporności na korozję.

8. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Udowodniono słuszność tezy badawczej przyjętej w pracy, że zwiększenie trwałości sworzni, stanowiących główny element konstrukcyjny łańcuchów napędowych, stosowanych powszechnie w przemyśle, można uzyskać przez wytworzenie powłoki diamentopodobnej modyfikowanej wolframem, typu W/W-DLC, osadzonej dwuetapowo metodą Arc PVD, najpierw przez nałożenie czystego wolframu na powierzchnię stali, a następnie powłoki DLC typu a-C:H:W.
2. Analiza morfologii powierzchni próbek z badanymi powłokami, wykonana za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (Hitachi TM-3000), wykazała obecność jednorodnej, bardzo drobnej struktury, z niewielką ilością fazy kropelkowej, charakterystycznej dla metody Arc PVD – odparowania łukiem elektrycznym.
3. Rentgenowska analiza fazowa powierzchni próbek ze stali 42CrMo4 z osadzonymi powłokami, wykazała obecność wolframu oraz węglika wolframu WC w przypadku powłok W/W-DLC, jak również obecność chromu oraz węglików chromu, głównie typu Cr₂₃C₆ dla powłok typu Cr/Cr-DLC.
4. Powłoka typu W/W-DLC, wytworzona metodą Arc PVD, zbudowana była z dwóch stref: pierwszą strefę, przylegającą bezpośrednio do podłoża stali, stanowił czysty wolfram, drugą strefę, zewnętrzną warstwy stanowiła powłoka diamentopodobna typu a-C:H:W. Całkowita grubość powłoki typu W/W-DLC wynosiła ok. 2,7 μm.
5. Powłoka typu Cr/Cr-DLC, wytworzona metodą Arc PVD, zbudowana była z dwóch stref: pierwszą strefę, przylegającą bezpośrednio do podłoża stali, stanowił czysty chrom, drugą strefę, zewnętrzną warstwy stanowiła powłoka diamentopodobna typu a-C:H:Cr. Całkowita grubość powłoki typu Cr/Cr-DLC wynosiła ok. 1,7 μm.
6. Chropowatość powłoki Cr/Cr-DLC była prawie o rząd wielkości mniejsza, niż powłoki W/W-DLC. Najmniejszą chropowatość miała powłoka z czystego chromu typu Cr.

7. Powłoki z czystego chromu typu Cr, jak również powłoki diamentopodobne typu Cr/Cr-DLC, charakteryzowały się znacznie mniejszą twardością ($H_{Cr}=5\text{GPa}$, $H_{Cr/Cr-DLC}=15\text{GPa}$) w porównaniu z powłoką diamentopodobną typu W/W-DLC ($H_{W/W-DLC}=32\text{GPa}$).
8. Adhezja powłok typu W/W-DLC do stali 42CrMo4 oceniona metodą wciskania wgłębnika oraz za pomocą testu zarysowania, okazała się dobra, w odróżnieniu od powłok typu Cr/Cr-DLC, które wykazywały bardzo słabą adhezję do podłoża stali, spowodowaną prawdopodobnie wysokim stanem naprężeń w tych powłokach.
9. Badania odporności na zużycie ściernie metodą kula-tarcza (ball-on-disc), przeprowadzone dla próbek ze stali 42CrMo4 pokrytych powłokami diamentopodobnymi, wykazały że, wskaźnik zużycia ściernego dla próbek z powłokami W/W-DLC ($W_z= 3,09 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{cykle}$), był ponad dwukrotnie mniejszy od wskaźnika zużycia dla próbek z powłokami typu Cr/Cr-DLC ($W_z = 8,14 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{cykle}$), co świadczy o ponad dwukrotnie większej odporności na zużycie ściernie powłok W/W-DLC w porównaniu z powłokami Cr/Cr-DLC.
10. Próbki ze stali 42CrMo4 z powłokami typu W/W-DLC i Cr/Cr-DLC, wykazały dobrą odporność na korozję w roztworze zawierającym jony chlorkowe, ocenianą metodami elektrochemicznymi, w odróżnieniu od próbek z tej stali bez powłok, które ulegały intensywnej korozji w tym środowisku.

9. LITERATURA

1. Sappok D., Gummer A., Sauer B.: Experimental and analytical wear studies of bush- and rolle chain chains. w: Proceedings of the 5th World Tribology Congress (WTC '13), Torino, Włochy, 2013

2. EU Patent: 13767000.6-1655; BE/01.10.12/BEA201200651; Improved caster wheel assembly of a pickup for an agricultural machine. 27.09.2013. Autorzy: Dumarey R., Choluj M., Domalewski R., Bucharzewski M., Kraśniewski P., Okrasko A., Szyjkowski Ł., Ziembicki Ł.
3. ASM Handbook, vol. 4, "Steel Heat Treatment". Totten G. E., Howes M.A.H. (Eds.), Marcel Dekker, Inc., New York – Basel – Hong-Kong, 1997
4. Edenhofer B.: Technology, advantages and applications of direct-feed atmospheres for carburizing. *Heat Treatment of Metals*, 3, 1995, 55–60
5. Michalski J.: Nawęglanie, węgloazotowanie, azotowanie – tendencje rozwojowe. IV Seminarium szkoleniowe SECO/WARWICK 2000 r.
6. Kasprzycka E.: Chromizing, in: *Encyclopedia of Tribology*. Wang, Q. Jane and Chung, Yip-Wah (Eds.), Springer-Verlag, New York Inc, Vol. 1, 2013, 382-387
7. Młynarczyk A.: Modyfikowanie budowy i właściwości jedno- i wieloskładnikowych dyfuzyjnych warstw węglików chromu, wanadu i tytanu wytwarzanych na stalach metodą proszkową. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005
8. Roberge P. R., *Handbook of corrosion engineering*, Second Edition. McGraw-Hill, USA, 2012
9. *Poradnik Galwanotechnika*. Praca zbiorowa. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, 2002
10. Mazurkiewicz A., Smolik J.: *Zaawansowane technologie inżynierii powierzchni wspomagające procesy eksploatacji i wytwarzania*, Wydawnictwo ITeE-PIB, Radom 2015
11. Mazurkiewicz A.: Knowledge transfer mechanisms for advanced surface engineering technologies. *Heat Treatment and Metals. International Heat Treatment and Surface Engineering*, vol.1, no 3, October 2007, 108÷113
12. *Prawo ochrony środowiska. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r.* (Dz. U. Nr 62, poz. 627, 2001)
13. Wendler B. G.: *Functional coatings by PVD or CVD methods*. Wyd. Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute (ITeE – PIB), Radom 2011
14. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Edited by: D.M. Mattox, Elsevier, 2010
15. Sappok D., Gummer A., Sauer B.: Experimental and analytical wear studies of bush- and roller chain chains, *Proceedings of the 5th World Tribology Congress (WTC '13)*, Torino, Włochy, 2013
16. Donnet C., Erdemir A. (Ed.): *Tribology of Diamond-like Carbon Films - Fundamentals and Applications*, Springer, New York, 2008
17. Madej M., *Właściwości systemów tribologicznych z powłokami diamentopodobnymi*. Monografia 46. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2013
18. Hauert R. An overview on tribological behaviour of diamond-like carbon in technical and medical applications. *Tribology International* 37, 2004, 991-1003

19. Pedersen S.L.: Model of Contact between rollers and sprockets in chain-drive systems. *Archive of Applied Mechanics*, 74 (7) 2005, 489-508
20. Potrykus J.: *Poradnik Mechanika*. Wyd. REA-SJ 2020
21. *The Complete Guide to Chain*. Kogyo Chosaki Publishing Co., Ltd. p. 240, www.chain-guide.com
22. Renold, Goup Head Office, Trident 2, Trident Business Park, Styland Road Wythenshawe, Manchester M22 5X8, www.renold.com
23. Tsubaki, www.tsubaki.com
24. Iwis, Albert-Rozhaupter-Str. 53, 81369 Munich, Germany, www.iwis.com.
25. Donghua, Parelweg 1, 1812 RS Alkamar, Holland
26. TIDC India, Post Bag No. 11, M.T.H Road, Ambattur, Chennai – 600 053, Tamin Nadu, India www.tidcindia.in
27. Diamond Head Office, 402 Kentucky Avenue, Indianapolis, Indiana 46225, www.diamondchain.com
28. Dolzamet Sp. Z o. o., Fabryczna 1, 59-225, Chojnów, www.dolzamet.pl
29. Spomasz Zamość S.A., Szczebrzeska 19, 22-400 Zamość, www.spomasz.biz.pl
30. Komercc, Okrzei 8, 59-225 Chojnów, www.komercc.pl
31. Komes Sp. Z o. o., Kcyńska Nowe Osiedle 1, 89-200 Szubin, www.komes-ltd.pl
32. www.galmet.nso.pl
33. www.glowny-mechanik.pl
34. Mulik R. V., Joshi M. M.: Dynamic Analisis of Timing Chain Syatem of a High Speed Three Cylinder Diesel Engine. *International Journal of Engineering And Science*, vol. 4 (5), 2014
35. Srivastava N., Haque I.: A review on belt and chain continuously variable transmissions (CTV). *Dynamic and control. Jurnal of Mechanism and Machine Teory*, vol. 44, 2009, 19-41
36. Duan C., Hebbale K., Liu F., Yaou J.: Physics-based modeling of a chain continuously variable transmission. *Jurnal of Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, 2016, 397-408
37. Osiński Z.: *Podstawy konstrukcji maszyn*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2020
38. Słowiński B.: *Inżynieria eksploatacji maszyn*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2011
39. www.utrzymanieruchu.pl, 23 lipiec 2013

40. Saito R., Noda N., Sano Y.: Newly Developed Wear Testing Machine Having Sufficient Reproducibility Useful for Investigating Roller Chains. *The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ International)*, vol. 60, (10), 2020, 2255-2265
41. Zgłoszenie reklamacyjne nr 30151034910300062140AI7120, 27.10.2015 CNH Industrial Polska Sp. Z o. o. Otolińska 25, 09-410 Płock, Polska
42. Zgłoszenie reklamacyjne nr 20150028718000062150AF4020, 05.11.2015 CNH Industrial America LLC, 200 George Delp Road, New Holland PA 17557
43. Saito R., Noda N., Sano Y., Song J., Minami T., Birou Y., Miyagi A., Huang Y.: Fatigue Strength Analysis and Fatigue Damage Evaluation of Roller Chain. *Journal of Metals* 8, 2018, 847-853
44. Jagtap M. D. Gaikwad B. D., Pawar P. M.: Study of Rolleer Conveyor Chain Strip under Tensile Loading. *International of Modern Engineering Research* 4 (5), 2014, 651-662
45. Noguchi S., Nnagasaki K., Nakayama S., Kanada T., Hishino T., Ohtani T.: Static Stress Analysis of Link Plate of Roller Chain using Finite Element Method and Some Design Proposals for Weight Saving. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 3 (2), 2009, 125-132
46. Tushar D., Prashant M., Bhaskar D.: Fea Based Study of Effect of Radial Variation of Outer Link in A Typical Roller Chain Link Assembly. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 1 (4), 2012, 2231-6477
47. Noguchi S., Yoshiba H., Nakayama S., Kanada T.: Evaluation of wear between pin and bush in roller chain. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 3 (4), 2009, 512-520
48. Zgłoszenie reklamacyjne nr 30151034591900062140AI8060, 23.10.2015 CNH Industrial Polska Sp. Z o. o. Otolińska 25, 09-410 Płock, Polska
49. Zgłoszenie reklamacyjne nr 20150026086500062150AF8080, 19.10.2015 CNH Industrial America LLC, 200 George Delp Road, New Holland PA 17557
50. Liu S., Hayek S., Chen F.: On the impact intensity of vibrating axialiy moving roller chains. *Journal of Vibration and Acoustics* 114, 1992, 397-401
51. Sappok D., Gummer A., Sauer B.: Experimental and analytical wear studies of bush- and rolle chain chains. *Proceedings of the 5th World Tribology Congress (WTC '13)*, Torino, Włochy, 2013
52. Katalog Produktów: SKF, Wyd. 6772 PL, 2008
53. Htun M. S., Kyaw S. T., Lwin K. T.: Effect of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Spring Steel. *Journal of Metals, Materials and Minerals* 8 (2), 2008, 191-197
54. K. Dermentzis, A. Christoforidis, E. Valsamidou: Removal of nickel copper, zincand chromium from synthetic an industrial wastewater by electrocoagulation, *Int. J. Environ* 1, 2011, 697–710

55. Dobrzański L., Hajduczek E., Marciniak J., Nowosielski R.: Obróbka cieplna materiałów narzędziowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Skrypty uczelniane nr 1024 cz. I i II, Gliwice, 1982
56. Adamek A., Gorockiewicz R., Korecki M.: Nawęglanie próżniowe stali specjalnych i wysokostopowych, Materiały X Seminarium Grupy SECO/Warwick pt. Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Łagów, 2006
57. Clark A. D., Northwood D. O., Bowers R. J., Sun X., Bauerle P.: Comparison of Austempering and Quench-and-Tempering Processes for Carburized Automotive Steels. SAE International Journal of Materials and Manufacturing 6 (2), 2013, 146-153
58. Wilson B.: Roller chain lubrication. Industrial Lubrication and Tribology, Emeraldinsight 48, 1996
59. Burakowski T., Wierzchoń T.: Surface Engineering of Metals, Principles, Equipment, Technologies. CRC Press Boca Raton, London, New York, Washington D. C. 1999
60. Dobrzański L. A.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe, WNT, Warszawa 2006
61. Mittemeijer E. J., Somers M., A. J., Thermochemical Surface Engineering of Steels. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering: Number 62, Elsevier 2015
62. Burakowski T.: Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni. Wyd. ITeE- PIB, Radom 2004
63. Kasprzycka E.: Wybrane technologie w inżynierii powierzchni. W książce: Inżyniera Materiałów Konstrukcyjnych, Wyd. PW, Płock 2008, 101-126
64. Socha J., Weber J. A., Podstawy elektrolitycznego osadzania stopów metali. Wyd. IMP, Warszawa 2001
65. Handbook of Thermal Spray Technology. Edited by: J.R. Davis. ASM International 2004
66. Handbook of Heat Treating of Irons and Steels, Volume 4D. Edited by: Dossett J., Totten G. E., ASM International 2014
67. Moszczyński A.: Nawęglanie gazowe stali. WNT, Warszawa 1983
68. Kasprzycka E., Tacikowski J.: Gas nitriding, Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. Rafael Colás and George Totten (Eds.), Taylor & Francis Group, New York 2016, vol. 5, 2399-2406
69. Małdziński L., Tacikowski J.: Concept of an economical and ecological process of gas nitriding of steel. Härterei-Technische Mitteilungen 61, 2006, 296-302
70. Kasprzycka E.: Antykorozyjne warstwy dyfuzyjne wytwarzane z par metali (Cr, Ti) przy obniżonym ciśnieniu. Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Precyzyjnej. Seria: Monografie IMP, Warszawa 2002

71. Bogdański B., Kasprzycka E., Kraśniewski P.: Tribological characterizations of chromized carbide layers produced by the pack powder method at low pressure, *Tribology* 3, 2015, 9-19
72. Pertek–Owsianna A.: Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymywanych w procesie borowania gazowego. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Seria: Rozprawy, Poznań 2001
73. Burakowski T., Development of surface engineering, *Journal of Materials Protection*, 1999, s.103-109
74. Kasprzycka E.: Composite layers produced on the titanium and the cobalt base in vacuum titanizing process. *Problemy Maszynostrojenia i Awtomatyzacji* 4, 2005, 93-96
75. Thornton J.A.: High rate thick film growth, *Annual Review of Materials Science* 7,1977,239-245
76. Vetter J.: Vacuum arc coatings for tools: potential and application, *Surface and Coatings Technology* 76,1995, 719-724
77. Burakowski T.: Wiązka elektronowa i możliwości jej wykorzystania do poprawy własności powierzchni”, *Mechanik* 8, 1992, 9-12
78. Miernik K.: Działanie i budowa magnetronowych urządzeń rozpylających. Wyd. ITeE Radom 1997
79. Smolik J.: Hybrydowe technologie inżynierii powierzchni. Wyd. ITeE-PIB 2016
80. Smolik J.: Rola warstw hybrydowych typu warstwa azotowana /powłoka PVD w procesie zwiększania trwałości matryc kuźniczych, *Monografia*, Wyd. ITeE-PIB Radom 2007
81. Dobrzański L.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. WNT, Gliwice-Warszawa 2002
82. Kupczyk M.: Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwwzręczymi. Wyd. Politechnika Poznańska, Poznań 2009
83. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
84. Mazurkiewicz A., Smolik J.: Advanced technologies of surface engineering. Wyd. ITeE-PIB Radom 2009
85. Mazurkiewicz A., Smolik J.: Zaawansowane technologie inżynierii powierzchni wspomagające procesy eksploatacji i wytwarzania. Wydawnictwo ITeE-PIB, Radom 2015
86. Mazurkiewicz A., Smolik J.: The innovative direction of hybrid technologies development and implementations in surface engineering area. *Archives of Metallurgy and Materials* 57(3), 2012, 657-664
87. Martin P.J., Bendavid A.: Review of the filtered vacuum arc process and materials deposition. *Thin Solid Films* 394, 2001, 1-6
88. Kasprzycka E.: Properties of tool steel with Cr/CrN type hybrid coatings, obtained by PVD method. *Archives of Metallurgy and Materials*. 64 (1), 2019, 293-301

89. Madej M., The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings. *Wear*, 317, 1-2, 179-187, 2014
90. Münz W.D.: Continuous hard coating. *Metall Progress* 8, 1987,65-68
91. Holmberg K. ,Ronkainen H., Matthews M.: Tribology of thin coatings. *Ceram. Int.*, 26, 2000, 787–795
92. Madej M., Ozimina D., Pająk M.: Właściwości powłok węglowych uzyskiwanych w procesach fizycznego osadzania z fazy gazowej. *Mechanik*, 4, 2015, 151-156
93. Madej M.: The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings. *Wear* 317, 2014,179-187
94. Vercamen K.: A comparative study of state-of-the-art diamond-like carbon films, *Surface and Coatings Technology* 133-134, 2000, 466-472
95. Cheng Y.H. et al: On the deposition mechanism of a-C:H films by plasma enhanced chemical vapor deposition, *Surface and Coatings Technology* 135, 2000, 27-33
96. Angus J.C.: Diamond and diamond-like films, *Thin Solid Films* 216, 1992, 126-133
97. Richter F.: Preparation and properties of amorphous carbon and hydrocarbon films, *Thin Solid Films* 212, 1992, 245-250
98. Whang K.W., Tae H.S.: The properties of diamond-like carbon films prepared by r.f. discharges, *Thin Solid Films* 204, 1991, 49-58
99. Schultrich B., Scheibe H.-J., Drescher D., Ziegele H.: Deposition of superhard amorphous carbon films by pulsed vacuum arc deposition, *Surface and Coatings Technology* 98, 1998, 1097-1101
100. Cheng Y.: Influence of deposition parameters on the internal stress in a-C:H films, *Surface and Coatings Technology* 111, 1999, 141-147
101. Mitura S., Haś Z., Gorokhovskiy V.: The system for depositing hard diamond-like films onto complex-shaped machine elements in an r.f. arc plasma, *Surface and Coatings Technology* 47,1991, 106-112
102. Donnet C.: Diamond-like carbon-based functionally gradient coatings for space tribology, *Surface and Coatings Technology* 120-121,1999, 548-554
103. Ullmann J., Schulze S., Erben J., Grünewald W., Heger D., Mühlhng I.: Diamond-like amorphous carbon films prepared by r.f. sputtering in argon: electron-assisted investigations, *Thin Solid Films* 219, 1992, 109-118
104. Kudoyarowa V.Kh., Hernyshov A.V., Zvonareva T.K., Dzhelepova N.B., Tsolov M.B.: Study of diamond-like carbon films for protective coatings, *Surface and Coatings Technology* 100-101,1998, 192-195
105. Pappas D.L., Hopwood J.: Deposition of diamondlike carbon using a planar radio frequency induction plasma, *Journal of Vacuum Science and Technology* A12(4) Jul/Aug, 1994, 1576-1579

106. Donnet C.: Tribochemistry of diamond-like carbon coatings in various environments, *Surface and Coatings Technology* 68-69, 1994, 626-631
107. Donnet C.: Recent progress on the tribology of doped diamond-like and carbon alloy coatings: a review, *Surface and Coatings Technology* 100-101, 1998, 180-186
108. Mack M.: *Surface Technology*. MediaPRINT Landsberg Germany (1990) ISBN 930038
109. Pancielejko M., Czyżniewski A., Gilewicz A., Zavaleyev V.: Właściwości powłok DLC z podwarstwami na bazie chromu zastosowanych na narzędziach ze stali szybkoobrotowej do obróbki drewna. *Inżynieria Materiałowa* 6, 2014, 535-538
110. Grischke M., Bewilogua K., Trojan K., Dimige H.: Application-oriented modifications of deposition processes for diamond-like-carbon-based coatings, *Surface and Coatings Technology* 74-75, 1995, 739-745
111. Dong-Wook Kim: Tribological characteristics of Cr/CrN/a-C:H/W/a-C:H coating under boundary lubrication conditions with glycerol mono-oleate (GMO) and molybdenum dithiocarbamate (MoDTC), *Wear* 342-343, 2015, 107-116
112. Madej M., Ozimina D: Właściwości tribologiczne powłok DLC, *Tribologia* 3, 2012, 96-102
113. Schmid C., Hetzner H., Tremmel S., Hilpert F., Durst K.: Tailored Mechanical Properties and Residual Stresses of -C:H:W Coatings, *Advanced Materials Research* 996, 2014, 14-21
114. www.performcoat.com/applications/components/
115. Michalczewski R.: The Rolling Contact Fatigue of PVD Coated Spur Gears, *Key Engineering Materials* 527, 2013, 77-82
116. Michalczewski R.: Właściwości tribologiczne smarowanych, wysokoobciążonych elementów maszyn pokrytych cienkimi powłokami niskotarciowymi, *Monografia: Wydawnictwo ITeE-PIB w Radomiu*, ISBN 978-837789-108-7
117. Barbacki A., *Mikroskopia elektronowa*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003
118. Bujak J., Właściwości powłok (Ti,Al,Cr)N wytwarzanych metodą łukowo-próżniową, *Problemy Eksploatacji*, 2 (2011) 81
119. Online: <http://www.csm-instruments.com>
120. *Handbook on Instrumented Indentation*, Certified ISO9001, CSM Instruments SA, Rue de la Gare 4, CH-2034 Peseux
121. Pharr M., Oliver W. C., Brotzen F. R., On the generality of the relationship between contact stiffness, contact area and Elastic moduli during indentation, *Jurnal Materials Research*, 7 (1992)
122. Hintermann H.E., Fresenius J.: Characterization of surface coatings by the scratch Adhesion test and by indentation measurements *Anal. Chem.* (1993), 346, 45-52

123. Mittal K.L.: Adhesion measurement of thin films. *Electrocomponent Science and Technology*, 1976
124. Vidakis N., Antoniadis A., Bilalis N.: The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (2003) 481–485
125. Sekler J., Steinmann P.A, Hinterman H. E.: The scratch test different critical load determination techniques. *Surface and Coatings Technology* 36, 1998, 519-529

10. SPIS TABLIC

Tablica 1. Ważniejsze substraty i powłoki osadzone metodami PVD oraz ich właściwości	32
Tablica 2. Właściwości tribologiczne różnych par trących	35
Tablica 3. Przykładowe właściwości różnych powłok węglowych	37
Tablica 4. Przykładowe wartości współczynnika tarcia dla powłok a-C oraz a-C:H	37
Tablica 5. Zakres badań wytworzonych powłok	44
Tablica 6. Skład chemiczny stali	45
Tablica 7. Parametry oczyszczania chemicznego próbek w trichloroetylenie w myjce ultradźwiękowej typu UMO 50 1000	49
Tablica 8. Parametry osadzania powłok typu W/W-DLC metodą Arc PVD	50
Tablica 9. Parametry osadzania powłok typu Cr/Cr-DLC metodą Arc PVD	51
Tablica 10. Parametry osadzania powłok typu Cr metodą Arc PVD	52
Tablica 11. Wyniki pomiarów grubości powłok	74
Tablica 12. Parametry chropowatości powłoki typu W/W-DLC	76
Tablica 13. Parametry chropowatości powłoki typu Cr/Cr-DLC	76
Tablica 14. Parametry chropowatości powłoki typu Cr	77
Tablica 15. Porównanie parametrów chropowatości powłok typu W/W-DLC, Cr/Cr-DLC oraz typu Cr	77
Tablica 16. Parametry pomiaru twardości oraz modułu Younga z wykorzystaniem urządzenia Nano-Hardness Tester	79
Tablica 17. Wyniki pomiarów twardości i modułu Younga	79
Tablica 18. Parametry pomiaru adhezji metodą zarysowania	82
Tablica 19. Wyniki badań tribologicznych	86
Tablica 20. Wyniki analizy krzywych polaryzacji anodowej próbek ze stali 42CrMo4 bez powłok oraz z powłokami Cr/Cr – DLC, W/W – DLC	90

11. SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1.	Widok łańcucha drabinkowego	13
Rys. 2.	Pierwsze szkice łańcucha wykonane przez Leonarda Da Vinci.....	14
Rys. 3.	Schemat typowej przekładni łańcuchowej: z^1 – ilość zębów koła napędowego, z^2 – ilość zębów koła napędzanego, c – odległość osi kół	14
Rys. 4.	Podstawowe rodzaje cięgien łańcuchowych: a) łańcuch pierścieniowy (ogniowy), b) łańcuch drabinkowy (Galla), c) łańcuch płytkowy (Fleyer'a)	17
Rys. 5.	Różne konstrukcje łańcuchów drabinkowych: a) łańcuch sworzniowy, b) łańcuch tulejkowy, c) łańcuch rolkowy	17
Rys. 6.	Łańcuchy specjalne: a) zębate, b) do przekładni bezstopniowych.....	18
Rys. 7.	Łańcuchy specjalne: a) ze sworzniem drążonym, b) transportowy.....	19
Rys. 8.	Łańcuchy specjalne rolnicze: a) łańcuch typu S, b) łańcuch typu CA, c) łańcuch do kombajnów zbożowych, d) łańcuch do pras rolniczych.....	19
Rys. 9.	Widok łańcucha drabinkowego rolkowego: a) budowa łańcucha: 1-płytki zewnętrzna, 2-płytki wewnętrzna, 3-sworzeń, 4-tuleja, 5-rolka, b) przekrój wzdłużny pary ogniwa łańcucha	20
Rys. 10.	Zerwana płytki wewnętrzna łańcucha	21
Rys. 11.	Zużycie zębów wieńca koła zębatego w wyniku współpracy z wydłużonym łańcuchem.....	22
Rys. 12.	Przekrój łańcucha drabinkowego rolkowego (a): 1) tuleja, 2) rolka, 3) płytki zewnętrzna, 4) płytki wewnętrzna, 5) sworzeń, A) powierzchnia współpracy sworzni z tuleją, B) powierzchnia współpracy rolki z tuleją, C) powierzchnia współpracy płytki zewnętrznej z wewnętrzną oraz widok zużytego sworzni w wyniku zużycia ściernego (b).....	23
Rys. 13.	Schemat obciążeń łańcucha napędowego: F_T [N] - siła, $t[h]$ - czas pracy	24
Rys. 14.	Weryfikacja wydłużenia łańcucha: ΔL – wydłużenie, L_{nom} – nominalna długość łańcucha, P – podziałka, N – liczba ogniw, L_z – zmierzona długość.....	24
Rys. 15.	Zużycie koła zębatego: a) prawidłowe – w wyniku współpracy z łańcuchem o nominalnej podziałce, b) nieprawidłowe – w wyniku współpracy z łańcuchem wydłużonym	25
Rys. 16.	Podział metod PVD osadzania powłok.	32
Rys. 17.	Czynniki determinujące właściwości tribologiczne powłoki	35

Rys. 18.	Schemat próbki krążkowej do badań zużycia przez tarcie oraz do badań metalograficznych	46
Rys. 19.	Schemat przygotowania zglądów poprzecznych próbek do badań metalograficznych	46
Rys. 20.	Urządzenie typu Standard produkcji ITeE - PIB w Radomiu do wytwarzania powłok metodą Arc PVD: a) widok ogólny, b) widok wnętrza komory roboczej i mechanizmu obrotowego	48
Rys. 21.	Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) Hitachi TM 3000: a) widok ogólny, b) widok panelu sterowania.....	53
Rys. 22.	Pomiar grubości cienkich powłok: a) kulotester, b) schemat węzła tarcia, c) krater wytarcia	54
Rys. 23.	Mikroskop cyfrowy firmy Keyence VHX-1000E wykorzystywany do obserwacji i pomiarów odcisków /www.keyence.com/.....	55
Rys. 24.	Profilograf Form Talysurf PGI 830 firmy Taylor Hobson.....	56
Rys. 25.	Pomiar twardości oraz modułu Younga: a) widok NanoHardness Testera, b) zależność przemieszczenia wgłębnika w funkcji obciążenia, c) widok odcisku wgłębnika typu Berkovich w badanej powłoce	57
Rys. 26.	Formy zniszczenia powłoki występujące w badaniu adhezji metodą wciskania wgłębnika	59
Rys. 27.	Pomiar adhezji metodą zarysowania (scratch-test): a) widok urządzenia REVETEST f-my CSM, b) widok zarysowania, c) zależność zmian sygnałów Ft-siła tarcia, AE- emisji akustycznej, μ -współczynnika tarcia w funkcji siły obciążającej wgłębnik F_n	61
Rys. 28.	Tester tribologiczny ball-on-disc firmy DUCOM	62
Rys. 29.	Schemat węzła tarcia w metodzie ball-on-disc	62
Rys. 30.	Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką W/W-DLC, pow.: a – 500x, b – 1000x, c – 2500x, d – 5000x	64, 65
Rys. 31.	Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką Cr/Cr-DLC, pow.: a – 500x, b – 1000x, c – 2500x, d – 5000x	66, 67
Rys. 32.	Obrazy skaningowe powierzchni próbki z powłoką typu Cr, pow.: a – 500x, b – 1000x, c – 2500x, d – 5000x	68, 69
Rys. 33.	Dyfraktogramy rentgenowskie z powierzchni próbek ze stali 42CrMo4 z powłokami diamentopodobnymi typu: a – W/W-DLC, b – Cr/Cr-DLC	70

Rys. 34.	Obraz mikroskopowy SEM przekroju poprzecznego powłoki W/W-DLC (a) oraz analiza liniowa rozkładu pierwiastków w powłoce (b).....	71
Rys. 35.	Obraz mikroskopowy SEM przekroju poprzecznego powłoki Cr/Cr-DLC (a) oraz analiza liniowa rozkładu pierwiastków w powłoce (b).....	72
Rys. 36.	Obraz mikroskopowy SEM przekroju poprzecznego powłoki Cr (a) oraz analiza liniowa rozkładu pierwiastków w powłoce (b)	73
Rys. 37.	Obrazy utworzonych wytarć uzyskanych metodą kula-tarcza na powierzchni próbek ze stali z powłokami: a) Cr, b) Cr/Cr-DLC, c) W/W-DLC.....	75
Rys. 38.	Wyniki pomiarów chropowatości próbek ze stali z powłokami: a) Cr, b) Cr/Cr-DLC, c) W/W-DLC	78
Rys. 39.	Wyniki badań adhezji metodą wciskania wgłębnika powłoki typu Cr	80
Rys. 40.	Wyniki badań adhezji metodą wciskania wgłębnika powłoki typu Cr/Cr-DLC... ..	81
Rys. 41.	Wyniki badań adhezji metodą wciskania wgłębnika powłoki typu W/W-DLC	81
Rys. 42.	Wyniki badań adhezji powłok typu Cr/Cr-DLC i W/W-DLC do podłoża stali metodą zarysowania	82
Rys. 43.	Obraz mikroskopowy (mikroskop skaningowy Hitachi 3000) rysy wykonanej na powierzchni próbki pokrytej powłoką Cr/Cr-DLC: a) pow. 500x oraz 2000x, b) pow. 500x, c) pow. 500x.....	84
Rys. 44.	Obraz mikroskopowy (mikroskop skaningowy Hitachi 3000) rysy wykonanej na powierzchni próbki pokrytej powłoką W/W-DLC: a) pow. 500x oraz 2000x, b) pow. 500x, c) pow. 500x.....	85
Rys. 45.	Ścieżki wytarcia powstałe po testach tribologicznych próbek pokrytych powłoką Cr: a) obraz mikroskopowy pow. 500x, b) profil wytarcia.....	87
Rys. 46.	Ścieżki wytarcia powstałe po testach tribologicznych próbek pokrytych powłoką Cr/Cr-DLC: a) pow. 500x, b) 2000x, c) profil wytarcia	88
Rys. 47.	Ścieżki wytarcia powstałe po testach tribologicznych próbek pokrytych powłoką W/W-DLC: a) pow. 500x, b) 1000x, c) profil wytarcia.....	89
Rys. 48.	Krzywe polaryzacji anodowej dla próbek ze stali 42CrMo4: 1– bez powłok, 2 – z powłoką Cr/Cr–DLC, 3 – z powłoką W/W–DLC	91