

Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marek Michalski

WPŁYW DODATKÓW MODYFIKUJĄCYCH NA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE LAKIERNICZYCH SYSTEMÓW POWŁOKOWYCH STOSOWANYCH W TECHNICIE WOJSKOWEJ

Promotor:
prof. dr hab. inż. Norbert Radek

Promotor pomocniczy:
dr hab. inż. Marcin Szczepaniak, prof. WITI

Kielce 2026

*Składam serdeczne podziękowania
Panu profesorowi Norbertowi Radkowi
oraz
Panu dr hab. inż. Marcinowi Szczepaniakowi, prof. WITI
za udzielenie cennych wskazówek
oraz pomoc przy pisaniu niniejszej pracy.*

*Składam serdeczne podziękowania
Panu Jarosławowi Czajkowskiemu
oraz mojemu zespołowi badawczemu
za wsparcie i możliwość realizacji niniejszej pracy.*

*Szczególne podziękowania składam mojej Żonie
która nakłoniła mnie do napisania niniejszej pracy*

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń	5
Wstęp.....	7
1. Charakterystyka polimerowych powłok ochronnych.....	10
1.1. Definicja i budowa powłoki	10
1.2. Rodzaje powłok.....	13
1.3. Właściwości powłok polimerowych	19
1.4. Powłoki polimerowe stosowane w technice wojskowej	21
2. Przegląd literatury i stan wiedzy	24
2.1. Wprowadzenie.....	24
2.2. Historia rozwoju polimerowych powłok ochronnych.....	24
2.3. Proekologiczne kierunki rozwoju.....	24
2.4. Współczesne powłoki polimerowe.....	25
2.5. Rozwój powłok stosowanych w technice wojskowej	26
2.6. Wnioski z analizy przeglądu literatury.....	27
3. Cel i zakres pracy	29
4. Materiały modyfikujące	31
4.1. Mikrosfery szklane	31
4.2. Nanorurki węglowe	32
5. Metodyka badań.....	35
5.1. Budowa i skład systemów powłokowych	35
5.2. Przygotowanie materiału podłoża i nanoszenie powłok	35
5.3. Zakres badań laboratoryjnych	36
5.4. Zakres badań poligonowych.....	38
6. Wyniki badań i ich analiza	39
6.1. Pomiary grubości.....	39
6.2. Pomiary połysku.....	40
6.3. Badania barwy i różnicy koloru	41
6.4. Badania charakterystyki spektralnej odbicia.....	41
6.5. Pomiary struktury geometrycznej powierzchni.....	43
6.6. Badania morfologiczne	44
6.7. Badania twardości, odporności na zużycie ściernie i erozyjne	45
6.8. Pomiary przyczepności	47
6.9. Badania odporności korozyjnej.....	48
6.10. Badania odporności na starzenie w komorach świetlnych.....	51

6.11. Badania poligonowe skuteczności maskowania	53
6.11.1. Badanie metodą naziemną na zobrażeniach wykonanych przy użyciu aparatu fotograficznego	54
6.11.2. Badanie metodą naziemną z użyciem noktowizji	56
7. Opracowanie za pomocą metodyki DoE modelu procesu nanoszenia lakierniczego systemu powłokowego	59
8. Prace wdrożeniowe	79
9. Wnioski końcowe.....	83
10. Możliwe kierunki dalszych prac badawczych.....	86
Literatura	87
Streszczenie.....	93
Summary	94
Publikacje naukowe stanowiące podstawę rozprawy doktorskiej.....	95
Oświadczenia współautorów	261

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

BP450-100/N	Powłoka gruntująca
BST	<i>Biological and Synthetic Toxins</i> - Bojowe środki trujące
BW400-6031	Powłoka nawierzchniowa maskująca w kolorze zielonym
CARC	<i>Chemical Agent Resistant Coatings</i> - Powłoki odporne na działanie środków chemicznych
CNT	<i>Carbon nanotubes</i> - Nanorurki węglowe
DoE	<i>Design of Experiments</i> – Metodyka projektowania badań i eksperymentów
ΔE^*_{ab}	Różnica barwy w przestrzeni CIELAB
EIS	<i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> - Spektroskopia impedancji elektrochemicznej
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> - Zakłócenia elektromagnetyczne
GM	<i>Glass microspheres</i> - Mikrosfery szklane
GU	<i>Gloss Units</i> - Jednostka połysku
HK	<i>Koenig Hardness</i> – Twardość mierzona wahadłem Koeniga, osc
HSC	<i>High solid coating</i> - Materiały lakiernicze o wysokiej zawartości składników stałych
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i> - Międzynarodowa Agencja Badań nad Nowotworami
IR	<i>Infrared</i> - Promieniowanie podczerwone
IRR	<i>Infrared Reflectance</i> - Odbicie promieniowania podczerwonego
L*	<i>Lightness</i> – Parametr z przestrzeni barw CIELAB oznaczający jasność koloru
Lc	<i>Critical load</i> – Krytyczne obciążenie, minimalna siła, przy której dochodzi do uszkodzenia powłoki
LSV	<i>Linear Sweep Voltammetry</i> - Linearna woltamperometria skanowa
LWIR	<i>Long-Wave Infrared</i> - Długofalowa podczerwień
LZO	Lotne związki organiczne
MWCNT	<i>Multi-Walled Carbon Nanotube</i> - Nanorurka węglowa wielopowłokowa

MWCNT-7	<i>Multi-Walled Carbon Nanotube -7</i> - Nanorurka węglowa wielopowłokowa oznaczona numerem 7
MWIR	<i>Mid-Wave Infrared</i> - Średniofalowa podczerwień
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> - Krajowy Instytut Bezpieczeństwa i Higieny Pracy (USA)
NIR	<i>Near-Infrared</i> - Promieniowanie w bliskiej podczerwieni
RAM	<i>Radar Absorbing Materials</i> - Materiały absorbujące promieniowanie radarowe
RCS	<i>Radar Cross Section</i> - Efektywna powierzchnia odbicia
RSM	<i>Response Surface Methodology</i> - Metodyka powierzchni odpowiedzi
SCI	<i>Specular Component Included</i> – Pomiar koloru z uwzględnieniem odbicia zwierciadlanego
SEM	<i>Scanning electron microscope</i> - Skaningowa mikroskopia elektronowa
SGP	Struktura Geometryczna Powierzchni
UV	<i>Ultraviolet</i> - Promieniowanie ultrafioletowe
UV-A	<i>Ultraviolet A</i> - Promieniowanie ultrafioletowe typ A
UV-B	<i>Ultraviolet B</i> – Promieniowanie ultrafioletowe typ B
VIS	<i>Visible</i> - Światło widzialne

Wstęp

Powłoki polimerowe od wielu dekad stanowią podstawowy element ochrony i modyfikacji powierzchni konstrukcji technicznych, a ich znaczenie w technice wojskowej jest szczególnie istotne. Stosowane są one nie tylko jako bariera przed oddziaływaniem środowiska, ale również jako element aktywnego kamuflażu, ochrony przed wykryciem oraz poprawy trwałości eksploatacyjnej sprzętu wojskowego. W warunkach współczesnego pola walki, gdzie zagrożenia wynikają zarówno z czynników naturalnych, jak i z oddziaływań celowych przeciwnika, skuteczność powłoki decyduje często o zachowaniu wartości bojowej sprzętu.

Wysokie wymagania stawiane systemom powłokowym w zastosowaniach militarnych wynikają z konieczności zapewnienia niezawodności działania sprzętu w ekstremalnych warunkach. Obejmują one ekspozycję na promieniowanie ultrafioletowe (UV), działanie wody morskiej i wilgoci, skrajne temperatury, erozję piaskową, a także kontakt z agresywnymi substancjami chemicznymi i środkami odkażającymi. W takich warunkach klasyczne systemy powłokowe często ulegają przedwczesnej degradacji, co prowadzi do konieczności częstych napraw, wzrostu kosztów utrzymania oraz zwiększonego ryzyka utraty funkcjonalności sprzętu.

Rozwój technologii materiałowych, a w szczególności nanotechnologii, otworzył nowe możliwości w zakresie projektowania powłok wielofunkcyjnych. W ostatnich latach szczególne zainteresowanie wzbudzają modyfikacje z wykorzystaniem nanorurek węglowych (CNT) oraz mikrosfer szklanych (GM). Nanorurki węglowe, dzięki swoim wyjątkowym właściwościom mechanicznym, termicznym i elektrycznym, mogą znacząco poprawić integralność strukturalną powłok oraz ich odporność na zużycie i uszkodzenia mechaniczne [34, 37, 46]. Mikrosfery szklane z kolei pozwalają na zmniejszenie gęstości powłoki, poprawę jej izolacyjności cieplnej oraz optymalizację właściwości optycznych w zakresie maskowania.

Światowe trendy w rozwoju powłok wojskowych obejmują tworzenie systemów spełniających jednocześnie wymagania w zakresie maskowania multispektralnego (VIS, NIR, IR), odporności na korozję, trwałości mechanicznej oraz zgodności z rygorystycznymi normami środowiskowymi, w tym ograniczenia emisji lotnych związków organicznych (LZO) [3, 10, 12, 40, 43, 50, 52, 59, 60, 67]. Na rysunku 1 przedstawiono element systemu mostu Daglezja S MS-40: pojazd-układacz MPU-40 z naniesionym maskującym systemem powłokowym.



Rysunek 1. Pojazd-układacz MPU-40 z naniesionym kamuflażem podstawowym w zakresie widma UV, VIS, NIR

Na rysunku 2 przedstawiono pojazd MPU-40 w warunkach dziennego oświetlenia oraz po zmroku przy użyciu noktowizora generacji III.

a)



b)



Rysunek 2. Widok pojazdu-układacza MPU-40 z naniesionym kamuflażem podstawowym w zakresie widma widzialnego (a) i przy użyciu noktowizora generacji III (b)

Poszukuje się rozwiązań umożliwiających wydłużenie czasu eksploatacji powłok, ograniczenie konieczności ich serwisowania oraz poprawę skuteczności kamuflażu w różnych warunkach klimatycznych i terenowych.

W niniejszej pracy postawiono hipotezę, że wprowadzenie do systemów powłokowych dodatków modyfikujących w postaci nanorurek węglowych i mikrosfer szklanych pozwoli uzyskać powłoki o lepszej odporności mechanicznej, wyższej odporności na korozję, wyższej trwałości eksploatacyjnej oraz korzystniejszych właściwościach maskujących w porównaniu z powłokami niemodyfikowanymi.

Celem pracy jest:

- analiza literaturowa dotycząca systemów powłokowych stosowanych w technice wojskowej oraz metod ich modyfikacji,
- opracowanie i wykonanie systemów powłokowych z dodatkami nanorurek węglowych oraz mikrosfer szklanych,
- przeprowadzenie badań właściwości mechanicznych, geometrycznych, fizykochemicznych i optycznych wytwarzanych systemów powłokowych,
- porównanie uzyskanych wyników z parametrami powłok referencyjnych,
- ocena wpływu modyfikatorów na trwałość i funkcjonalność systemów powłokowych.

Zakres pracy obejmuje część teoretyczną, w której przedstawiono przegląd literatury z zakresu nowoczesnych powłok polimerowych i technik ich modyfikacji oraz część eksperymentalną, opisującą materiały, metodykę badań, wyniki oraz ich analizę.

Struktura pracy obejmuje jedenaście rozdziałów. Rozdział 1 zawiera charakterystykę powłok polimerowych, ich rodzaje, właściwości i zastosowania w technice wojskowej. Rozdział 2 zawiera przegląd literatury i aktualny stan wiedzy. Rozdział 3 zawiera cel i zakres pracy. Rozdział 4 zawiera charakterystykę użytych modyfikatorów. Rozdział 5 omawia metodykę badań, w tym sposób przygotowania próbek i procedury badawcze. Rozdział 6 przedstawia wyniki badań i ich analizę. Rozdział 7 jest poświęcony opracowaniu modelu prognostycznego parametrów procesu aplikacji systemu powłokowego z wykorzystaniem metodyki DoE. Rozdział 8 poświęcony jest wdrożeniu systemu maskującego. W rozdziale 9 zaprezentowane są wnioski. Rozdział 10 wskazuje możliwe kierunki dalszych prac badawczych, a w rozdział 11 prezentuje literaturę wykorzystaną w niniejszej pracy.

1. Charakterystyka polimerowych powłok ochronnych

1.1. Definicja i budowa powłoki

Powłoki polimerowe są nakładane na różnego rodzaju podłoża takie jak metale, drewno, beton, tworzywa sztuczne, tworzywa ceramiczne w celu ochrony podłoża przed oddziaływaniem czynników zewnętrznych (mechanicznych, chemicznych, środowiskowych, cieplnych i innych), a także nadania tym podłożom odpowiednich własności dekoracyjnych oraz specyficznych zależnych od przeznaczenia. W większości zastosowań głównym celem powłok polimerowych jest ochrona podłoża przed korozją [31]. Powłoki mają za zadanie znacznie wydłużyć trwałość eksploatacyjną chronionego podłoża. Ze względu na ich różne przeznaczenie mają one różnorodną budowę. Powłoki polimerowe uzyskuje się przez aplikację m. in. materiałów lakierniczych. Materiały te są złożonymi mieszankami, których składniki można sklasyfikować w czterech głównych grupach (Publikacja 1 rys. 2, Publikacja 2 rys. 2).

Są to:

- Substancje powłokotwórcze (spoiwa),
- Pigmenty,
- Dodatki,
- Składniki lotne.

Substancje powłokotwórcze pełnią fundamentalną rolę w systemie powłokowym, gdyż to one tworzą ciągły, spójny film na powierzchni zabezpieczanego podłoża. Odpowiadają za trwałą adhezję powłoki do materiału bazowego oraz pełnią funkcję spoiwa, integrując wszystkie pozostałe składniki. Są to komponenty nielotne, które determinują podstawowe właściwości mechaniczne, chemiczne i użytkowe powłoki, takie jak: elastyczność, twardość, odporność na ścieranie, działanie chemikaliów czy wpływ czynników atmosferycznych. W zależności od typu systemu, substancjami powłokotwórczymi mogą być żywice alkidowe, epoksydowe, poliuretanowe, akrylowe i inne.

Pigmenty to drobno zdyspergowane ciała stałe, uzyskiwane z surowców naturalnych lub syntetyzowane chemicznie, które nie rozpuszczają się w fazie ciekłej materiału lakierniczego, lecz tworzą z nią trwałą zawiesinę. Odpowiadają one przede wszystkim za nadanie powłoce barwy i zdolności krycia, lecz wpływają również na właściwości optyczne, odporność na promieniowanie UV, działanie czynników chemicznych oraz mechanicznych. W zastosowaniach wojskowych szczególnie znaczenie mają pigmenty funkcjonalne, takie jak

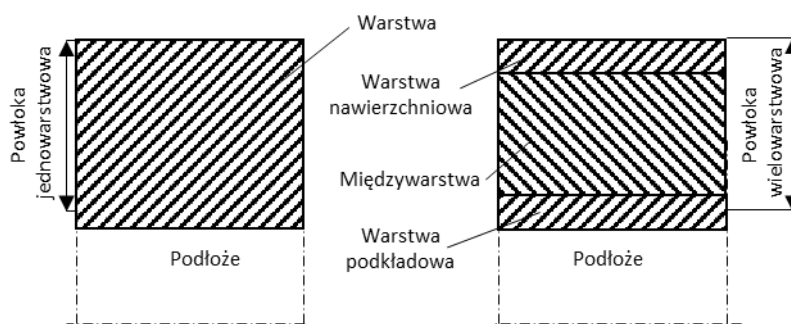
pigmenty maskujące (o odpowiedniej refleksyjności), pigmenty IR (absorpcja lub odbicie promieniowania podczerwonego) oraz pigmenty przewodzące.

Dodatki to szeroka grupa substancji pomocniczych, które stosowane są w niewielkich ilościach w celu nadania materiałom lakierniczym określonych cech użytkowych oraz ułatwienia procesów produkcyjnych, magazynowania, transportowych i aplikacyjnych.

W zależności od funkcji, dodatki mogą pełnić rolę: środków zwilżających, dyspergujących, przeciwpieniących, zapobiegających tworzeniu się kożucha, regulatorów reologii, stabilizatorów UV, biocydów, czy też modyfikatorów połysku i przyczepności. Ich dobór oraz stężenie mają istotny wpływ na stabilność materiału lakierniczego, jakość powierzchni powłoki, a także jej trwałość w warunkach eksploatacyjnych.

Składniki lotne, najczęściej w postaci rozpuszczalników organicznych lub wody, odpowiadają za regulację lepkości i konsystencji materiału lakierniczego na etapie jego wytwarzania, przechowywania oraz aplikacji. Ułatwiają nanoszenie systemu powłokowego na podłoże poprzez rozłożenie i formowanie cienkiej warstwy, która po czasie odparowuje, pozostawiając trwały film. W nowoczesnych systemach lakierniczych, ze względu na rosnące wymagania środowiskowe i sanitarne, coraz częściej stosuje się rozpuszczalniki niskoemisyjne, systemy wodorozcieńczalne lub technologie wysokiej zawartości części stałych (*high solids*), co pozwala ograniczyć emisję lotnych związków organicznych (LZO).

Z wielu względów polimerowe systemy powłokowe mają budowę warstwową. Ze względu na dużą różnorodność materiałową i technologiczną, wynikającą z różnego przeznaczenia powłok, trudno jest opracować uniwersalny model budowy systemu powłokowego [11]. Na rysunku 3 przedstawiono schemat budowy polimerowego systemu powłokowego.



Rysunek 3. Schemat budowy systemu powłokowego jednowarstwowego i wielowarstwowego

W publikacji 1 (rys. 1) i publikacji 2 (rys. 1) przedstawiono przekrój przykładowych systemów powłokowych uzyskanych za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

Polimerowe systemy powłokowe mogą występować w postaci jedno- lub wielowarstwowych układów, przy czym w zastosowaniach technicznych, w tym także wojskowych, dominują systemy powłokowe składające się z kilku warstw. Każda z warstw pełni odmienną funkcję w strukturze całego układu, zapewniając synergiczne właściwości ochronne i estetyczne.

W typowym systemie powłokowym wyróżnia się trzy podstawowe warstwy:

- warstwę podkładową,
- międzywarstwę,
- warstwę nawierzchniową.

Warstwa podkładowa odpowiada za bezpośrednią adhezję systemu powłokowego do powierzchni podłoża. Powinna charakteryzować się wysoką szczelnością w kontekście penetracji wilgoci oraz dobrą kompatybilnością z pigmentami o działaniu antykorozyjnym. W tej warstwie walory dekoracyjne – takie jak kolor czy połysk – mają drugorzędne znaczenie.

Międzywarstwa pełni przede wszystkim funkcję ochrony barierowej, utrudniającej migrację czynników korozyjnych w głąb powłoki. Zadaniem tej warstwy jest również uzyskanie odpowiedniej grubości całego układu, co przekłada się na jego trwałość eksploatacyjną.

W składzie warstw pośrednich często stosuje się napełniacze o właściwościach hydrofobowych, które dodatkowo ograniczają absorpcję wody. Międzywarstwa umożliwia także wyrównanie drobnych nierówności powierzchni podłoża, poprawiając tym samym estetykę końcowej powłoki.

Warstwa nawierzchniowa odpowiada za właściwości dekoracyjne oraz ochronne całego systemu. Zapewnia estetyczne wykończenie (odcień, połysk, efekty specjalne), jak również zabezpieczenie przed szkodliwym działaniem czynników środowiskowych – takich jak promieniowanie UV, opady atmosferyczne, zmienne temperatury czy zanieczyszczenia przemysłowe. W zależności od warunków eksploatacyjnych i oczekiwanej trwałości, do składu tej warstwy dobierane są komponenty o odpowiednio wysokiej jakości, co ma bezpośrednie przełożenie na końcowy koszt wytworzenia systemu powłokowego.

1.2. Rodzaje powłok

Powłoki polimerowe mogą być klasyfikowane według wielu kryteriów, spośród których najczęściej stosowanym jest podział ze względu na rodzaj substancji powłokotwórczej, zwanej również spoiwem. Pozostałe kryteria obejmują między innymi: pochodzenie surowca, przeznaczenie i funkcję powłoki, rodzaj zastosowanego rozcieńczalnika, zawartość składników stałych, mechanizm schnięcia oraz efekt wizualny uzyskanej powłoki [31].

Podział powłok ze względu na rodzaj zastosowanego spoiwa

Jednym z podstawowych kryteriów klasyfikacji materiałów lakierniczych jest rodzaj zastosowanego spoiwa, które warunkuje właściwości fizykochemiczne powłoki oraz sposób jej utwardzania. Na tej podstawie wyróżnia się następujące rodzaje powłok polimerowych:

- ***Powłoki alkidowe***

Wytwarzane są na bazie żywic alkidowych, będących poliestrami o stosunkowo niewielkiej masie cząsteczkowej, uzyskiwanymi w procesie polikondensacji bezwodnika ftalowego (stąd często nazywane są „ftalowymi”) z alkoholami wielowodorotlenowymi, takimi jak gliceryna, trihydroksymetylenopropan czy pentaerytryt. Utwardzanie powłok alkidowych następuje w wyniku reakcji sieciowania z tlenem atmosferycznym. Są one łatwe w aplikacji, szybko schnące, wykazują dobrą rozlewność oraz zdolność zwilżania podłoża, co predysponuje je do zastosowań jako farby podkładowe. Ich ograniczeniem jest niska odporność na działanie wody, rozpuszczalników i agresywnych mediów chemicznych. Niemniej jednak cechują się umiarkowaną odpornością na warunki atmosferyczne oraz stosunkowo trwałym zachowaniem koloru i połysku [31].

- ***Powłoki nitrocelulozowe***

Bazują na żywicach nitrocelulozowych, modyfikowanych dodatkiem żywic poliestrowych. Powłoki te utwardzają się fizycznie, poprzez odparowanie zastosowanych rozpuszczalników. Ich główną zaletą jest bardzo krótki czas schnięcia, jednak charakteryzują się one niską odpornością mechaniczną i chemiczną, co ogranicza ich zastosowanie do warstw tymczasowych lub dekoracyjnych o ograniczonym obciążeniu eksploatacyjnym [31].

- ***Powłoki chlorokauczukowe***

Otrzymywane na bazie chlorowanego kauczuku naturalnego, charakteryzują się dobrą odpornością na działanie wody, kwasów i zasad. Wykazują natomiast niską odporność na działanie olejów i rozpuszczalników organicznych. Powłoki tego typu posiadają ograniczone walory dekoracyjne – szybko tracą połysk, wykazują tendencję do żółknięcia oraz kredowania.

Ich zaletą jest dobra odporność na ścieranie i uderzenia mechaniczne. Utwardzanie przebiega na drodze fizycznej, poprzez odparowanie rozpuszczalnika [31].

- ***Powłoki poliwinylowe***

Produkowane są z kopolimerów chlorku winylu oraz innych związków winylowych. Powłoki te wykazują odporność na działanie kwasów i zasad, olejów mineralnych oraz rozpuszczalników alifatycznych. Są jednak wrażliwe na działanie estrów i ketonów. Cechują się dobrą odpornością na ścieranie i uderzenia, a także wysoką trwałością barwy i połysku. Proces ich utwardzania również przebiega fizycznie, poprzez odparowanie rozpuszczalników [31].

- ***Powłoki akrylowe***

Wytwarzane są z żywic akrylowych, będących produktami polimeryzacji lub kopolimeryzacji pochodnych kwasu akrylowego i metakrylowego. Powłoki te charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na działanie czynników atmosferycznych, w tym promieniowania UV, pod wpływem, którego nie ulegają degradacji. Cechują się wysokim połyskiem i jego długotrwałym utrzymaniem w warunkach eksploatacyjnych. Wyróżniają się również dobrą rozlewnością i właściwościami dekoracyjnymi [31].

- ***Powłoki epoksydowe***

Są to chemoutwardzalne systemy powłokowe, bazujące na żywicach epoksydowych. Utwardzanie następuje w wyniku reakcji chemicznej pomiędzy dwoma składnikami (żywica i utwardzaczem), mieszanymi w odpowiednich proporcjach objętościowych lub wagowych. Powłoki epoksydowe cechuje wysoka adhezja do różnorodnych podłoży, co sprawia, że znajdują zastosowanie w systemach antykorozyjnych. Dodatkowo wykazują dużą twardość, elastyczność oraz odporność na działanie wody, olejów i wielu agresywnych związków chemicznych. Ich główną wadą jest brak odporności na promieniowanie UV, które powoduje blaknięcie, utratę połysku i kredowanie powierzchni w warunkach zewnętrznych [31].

- ***Powłoki poliuretanowe***

Tworzone są głównie na bazie chemoutwardzalnych żywic poliestrowych oraz izocyjanianów. Podobnie jak systemy epoksydowe, wykazują one wysoką adhezję do podłoży, bardzo dobre właściwości mechaniczne oraz odporność na wodę, środki chemiczne i rozpuszczalniki organiczne. Powłoki utwardzane izocyjanianami alifatycznymi cechują się wysoką odpornością na działanie promieniowania UV oraz trwałością efektów dekoracyjnych, w tym połysku i barwy. Dzięki tym właściwościom są powszechnie stosowane jako warstwy

nawierzchniowe w systemach powłokowych o podwyższonych wymaganiach eksploatacyjnych [31].

Podział ze względu na pochodzenie surowca

Ze względu na pochodzenie zastosowanych komponentów, powłoki polimerowe można podzielić na wytwarzane na bazie surowców naturalnych, naturalnych modyfikowanych oraz surowców syntetycznych.

Do surowców naturalnych i ich modyfikacji zalicza się m.in.: olej lniany, olej tungowy, żywicę szelakową, chlorowany kauczuk czy estry celulozy. Surowce te wykorzystywane są przede wszystkim w tradycyjnych systemach lakierniczych oraz w materiałach o ograniczonym wpływie na środowisko. Z kolei surowce syntetyczne obejmują związki chemiczne otrzymywane metodami przemysłowymi, takie jak polimery, polikondensaty oraz poliaddukty. Są one podstawą nowoczesnych systemów powłokowych o wysokich wymaganiach eksploatacyjnych, szerokim zakresie zastosowań i znacznej trwałości w trudnych warunkach środowiskowych [31].

Podział ze względu na rodzaj zastosowanego rozcieńczalnika

Wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa oraz rosnące wymagania w zakresie ochrony środowiska skutkują koniecznością ograniczania negatywnego wpływu technologii przemysłowych, w tym procesów lakierniczych, na degradację środowiska naturalnego. Jednym z głównych działań w tym obszarze jest minimalizacja emisji lotnych związków organicznych (LZO), które uwalniane są do atmosfery podczas aplikacji i schnięcia powłok. W przypadku materiałów lakierniczych stosowanych do wytwarzania powłok polimerowych, ograniczenie emisji LZO osiąga się głównie poprzez:

- stosowanie receptury o obniżonej zawartości rozpuszczalników organicznych,
- zastępowanie tradycyjnych rozpuszczalników układami wodorozcieńczalnymi.

Z tego względu, materiały lakiernicze klasyfikuje się w tym kontekście na dwie podstawowe grupy:

- **materiały lakiernicze rozpuszczalnikowe** – zawierające lotne związki organiczne, umożliwiające uzyskanie odpowiedniej lepkości aplikacyjnej i parametrów rozlewności powłoki,
- **materiały lakiernicze wodorozcieńczalne** – w których wodę wykorzystuje się jako główny nośnik i rozcieńczalnik, co istotnie zmniejsza emisję szkodliwych substancji do środowiska.

Zastosowanie materiałów lakierniczych drugiego typu wpisuje się w tendencje rozwoju technologii niskoemisyjnych, przyjaznych dla ludzi i otoczenia, a jednocześnie zgodnych z aktualnymi regulacjami prawnymi dotyczącymi ochrony środowiska.

Podział ze względu na zawartość składników stałych

Działania proekologiczne w zakresie technologii lakierniczych nie ograniczają się wyłącznie do zastępowania materiałów rozpuszczalnikowych produktami wodorozcieńczalnymi. Równie istotnym aspektem jest optymalizacja składu materiałów lakierniczych, a w szczególności zwiększanie zawartości składników stałych, co pozwala na redukcję emisji LZO do atmosfery.

Wzrost udziału substancji stałych w składzie materiałów lakierniczych pozwala na uzyskanie wymaganej grubości powłoki przy niższej zawartości rozcieńczalników i skraca czas schnięcia, jednocześnie ograniczając obciążenie środowiskowe.

Na tej podstawie materiały lakiernicze można podzielić na następujące grupy:

- ***Materiały lakiernicze o niskiej zawartości składników stałych*** – tradycyjne produkty rozpuszczalnikowe, charakteryzujące się wysokim udziałem LZO,
- ***Materiały lakiernicze o średniej zawartości składników stałych*** – materiały częściowo ograniczające emisję rozpuszczalników,
- ***Materiały lakiernicze o wysokiej zawartości składników stałych (High-Solid Coatings)*** – produkty o zredukowanej ilości rozcieńczalników, spełniające zastrzone normy środowiskowe,
- ***Materiały lakiernicze bezrozpuszczalnikowe*** – materiały lakiernicze całkowicie pozbawione rozcieńczalników, w których udział części stałych sięga 100%,
- ***Materiały lakiernicze proszkowe*** – aplikowane w postaci suchego proszku, który po stopieniu i utwardzeniu tworzy jednolitą powłokę bez udziału lotnych komponentów.

Wybór odpowiedniego rodzaju materiału lakierniczego zależy od specyfiki zastosowania, wymagań eksploatacyjnych oraz obowiązujących regulacji środowiskowych.

Podział ze względu na sposób schnięcia

Sposób schnięcia powłoki polimerowej zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowanej substancji powłokotwórczej. Mechanizm schnięcia ma kluczowe znaczenie dla przebiegu procesu aplikacji, czasu utwardzania oraz ostatecznych właściwości użytkowych powłoki. Na tej podstawie wyróżnia się następujące główne typy schnięcia:

- **Schnięcie fizyczne** – to najprostszy mechanizm utwardzania powłok, polegający na odparowaniu rozpuszczalników i rozcieńczalników z warstwy lakierniczej. Proces ten prowadzi do utwardzenia powłoki wyłącznie w wyniku usunięcia składników lotnych, bez udziału reakcji chemicznych. Typowe dla materiałów jednoskładnikowych aplikowanych w temperaturze otoczenia (m.in. nitrocelulozowe, chlorokauczukowe).
- **Utwardzanie poprzez utlenianie** – w tym przypadku oprócz odparowania rozpuszczalnika zachodzi reakcja chemiczna pomiędzy spoiwem a tlenem z powietrza, prowadząca do sieciowania polimeru i utworzenia trwałej powłoki. Mechanizm ten jest charakterystyczny dla żywic alkidowych i olejów schnących.
- **Utwardzanie poprzez reakcję z wilgocią** – poza utratą rozcieńczalnika, utwardzanie zachodzi wskutek reakcji chemicznej spoiwa z wilgocią zawartą w powietrzu. Przykładami tego typu systemów są jednoskładnikowe lakiery poliuretanowe oraz silany i siloksany.
- **Utwardzanie poprzez reakcję chemiczną z drugim składnikiem** – w tym mechanizmie sieciowanie spoiwa następuje w wyniku reakcji chemicznej z komponentem utwardzającym, który zostaje zmieszany ze spoiwem tuż przed aplikacją. Schnięcie fizyczne zachodzi równoległe do reakcji chemicznej, a końcowa powłoka uzyskuje pełnię właściwości po zakończeniu procesu sieciowania. Mechanizm ten występuje m.in. w systemach epoksydowych, poliuretanowych dwuskładnikowych i akrylowych utwardzanych izocyjanianami.

Podział ze względu na widok powłoki

Kolejnym kryterium klasyfikacji powłok polimerowych jest ich widok zewnętrzny, który decyduje o walorach estetycznych wyrobu finalnego. Aspekt ten jest szczególnie istotny w zastosowaniach, w których poza funkcją ochronną istotną rolę odgrywa efekt wizualny, m.in. w sprzęcie wojskowym o funkcji kamuflażowej lub w celach dekoracyjnych.

W zależności od zastosowanych komponentów (żywic, pigmentów, dodatków specjalnych) oraz parametrów aplikacyjnych, możliwe jest uzyskanie różnorodnych efektów powierzchniowych. Do najczęściej spotykanych typów efektów należą:

- **Powłoki o wysokim połysku** – charakteryzujące się intensywnym odbiciem światła, zapewniające efekt „lustrzany” i podkreślające głębię koloru,
- **Powłoki matowe** – o zredukowanym współczynniku odbicia światła, dające powierzchnię o jednorodnym, stonowanym wykończeniu,

- **Powłoki z efektem młotkowym** – wykazujące charakterystyczne, nieregularne wgłębienia przypominające powierzchnię kutego metalu,
- **Powłoki z efektem perłowym** – zawierające pigmenty interferencyjne, nadające powierzchni połysk o zmiennej barwie w zależności od kąta padania światła,
- **Powłoki z efektem metalicznym** – bazujące na pigmentach metalicznych (m.in. aluminium, miedź), tworzące efekt „metalicznego blasku”,
- **Powłoki z efektem strukturalnym** – posiadające celowo wprowadzoną nierównomierną fakturę powierzchni, poprawiającą odporność na uszkodzenia mechaniczne lub poprawiającą właściwości dotykowe (tzw. efekt „soft touch”).

Dobór odpowiedniego typu wykończenia wizualnego zależy od funkcji użytkowej powłoki, rodzaju podłoża, środowiska eksploatacji oraz wymagań technicznych i estetycznych danego zastosowania.

Inne kryteria klasyfikacji powłok polimerowych

Poza podstawowymi kryteriami klasyfikacji powłok polimerowych, takimi jak rodzaj spoiwa, rodzaj rozcieńczalnika, sposób schnięcia czy obraz powłoki, istnieje szereg innych cech, według których można systematyzować materiały lakiernicze. Kryteria te są szczególnie istotne w kontekście praktycznych zastosowań technologii lakierniczych, właściwego doboru materiałów oraz spełnienia wymagań środowiskowych i eksploatacyjnych.

Poniżej przedstawiono wybrane dodatkowe kryteria podziału powłok polimerowych:

Ze względu na technologię utwardzania (proces sieciowania):

- powłoki termoutwardzalne,
- powłoki światłoutwardzalne,
- powłoki schnące w temperaturze otoczenia.

Ze względu na metodę aplikacji:

- powłoki natryskowe,
- powłoki zanurzeniowe,
- powłoki elektroforetyczne (kataforeza, anaforeza).

Ze względu na przeznaczenie funkcjonalne:

- powłoki ochronne,
- powłoki dekoracyjne,

- powłoki specjalne (m.in. elektroprzewodzące, antyadhezyjne, samonaprawiające się),
- powłoki maskujące (kamouflażowe).

Ze względu na właściwości mechaniczne i fizykochemiczne:

- powłoki twarde / miękkie,
- powłoki elastyczne / sztywne,
- powłoki barierowe / paroprzepuszczalne,
- powłoki elektroprzewodzące / elektroizolacyjne.

Ze względu na rodzaj podłoża:

- powłoki na metal,
- powłoki na tworzywa sztuczne,
- powłoki na drewno,
- powłoki na beton i materiały mineralne.

Ze względu na temperaturę aplikacji:

- powłoki aplikowane na zimno,
- powłoki aplikowane na gorąco.

Dodatkowe kryteria klasyfikacji pozwalają precyzyjnie dopasować system powłokowy do specyficznych wymagań technologicznych i eksploatacyjnych. Umożliwiają one również projektowanie powłok o optymalnej trwałości, odporności i funkcjonalności w zależności od warunków użytkowania.

1.3. Właściwości powłok polimerowych

Powłoki polimerowe stanowią istotny element ochrony powierzchni konstrukcji, elementów maszyn i urządzeń przed szkodliwym oddziaływaniem czynników środowiskowych, chemicznych i mechanicznych. Prawidłowy dobór i właściwości eksploatacyjne tych powłok determinują ich przydatność w określonych warunkach użytkowania. Do podstawowych właściwości powłok polimerowych zalicza się:

Grubość powłoki

Grubość powłoki jest jednym z najważniejszych parametrów technologicznych. Odpowiednia grubość zapewnia właściwości barierowe, ograniczając przenikanie wilgoci, tlenu i substancji chemicznych do podłoża. Zbyt cienka warstwa może powodować obniżenie skuteczności ochronnej, a zbyt gruba – powstawanie naprężeń wewnętrznych i osłabienie adhezji [11, 31].

Przyczepność

Adhezja, czyli przyczepność powłoki do podłoża, jest kluczowa dla trwałości systemu ochronnego. Wysoka przyczepność zapobiega łuszczeniu się i odspajaniu powłoki pod wpływem działania wilgoci, promieniowania UV czy zmian temperatury. Wpływają na nią: właściwe przygotowanie podłoża, rodzaj spoiwa, obecność pigmentów oraz parametry procesu aplikacji [14, 33].

Twardość

Twardość powłoki określa jej odporność na odkształcenia mechaniczne i zarysowania. Wyróżnia się makrotwardość i mikrotwardość, które odmiennie charakteryzują zachowanie powłoki. Wysoka twardość zwiększa odporność na ścieranie, lecz zbyt duża może powodować kruchość [27].

Elastyczność

Elastyczność oznacza zdolność powłoki do odkształcania się bez utraty ciągłości. Jest istotna w przypadku elementów narażonych na uderzenia, wibracje czy zmiany temperatury. Powłoki elastyczne potrafią kompensować ruchy podłoża, minimalizując ryzyko powstawania pęknięć [22].

Odporność mechaniczna

Odporność mechaniczna obejmuje właściwości determinujące trwałość powłoki w warunkach eksploatacji, takie jak: odporność na ścieranie, odporność na uderzenie, odporność na zarysowanie, odporność na zmęczenie materiału [64].

Odporność chemiczna

Odporność chemiczna definiuje zdolność powłoki do zachowania integralności w kontakcie z mediami agresywnymi, m.in. kwasami, zasadami, rozpuszczalnikami i olejami [5].

Odporność cieplna

Odporność cieplna oznacza zdolność powłoki do zachowania właściwości w podwyższonych temperaturach lub w warunkach częstych wahań temperatury. Istnieją powłoki odporne zarówno na krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury, jak i na długotrwałą eksploatację w podwyższonej temperaturze [39].

Odporność na promieniowanie elektromagnetyczne

Promieniowanie UV, IR i mikrofalowe może powodować degradację powłoki, skutkującą utratą połysku, zmianą barwy, kredowaniem i spadkiem właściwości mechanicznych. W powłokach stosuje się dodatki stabilizujące, które minimalizują ten efekt [6].

Właściwości specjalne

Powłoki polimerowe mogą być modyfikowane w celu nadania im dodatkowych właściwości funkcjonalnych, takich jak: przewodnictwo elektryczne lub antystatyczność, hydrofobowość lub oleofobowość, zdolność samonaprawy mikrouszkodzeń, właściwości maskujące w zakresie widzialnym i podczerwonym [18, 69].

1.4. Powłoki polimerowe stosowane w technice wojskowej

W technice wojskowej stosuje się specjalistyczne systemy powłokowe, których zadaniem jest nie tylko ochrona podłoża przed degradacją, ale również zapewnienie skutecznego maskowania obiektów w różnych zakresach widma promieniowania elektromagnetycznego. Współczesne rozwiązania w tym zakresie bazują na synergii właściwości mechanicznych, chemicznych i optycznych powłok, umożliwiającej utrzymanie wysokiej skuteczności bojowej sprzętu w zróżnicowanych warunkach środowiskowych i klimatycznych.

Powłoki antykorozyjne

Powłoki antykorozyjne w zastosowaniach wojskowych odgrywają kluczową rolę w zabezpieczeniu elementów konstrukcji metalowych przed destrukcyjnym wpływem korozji

atmosferycznej, elektrochemicznej i chemicznej. Ich skuteczność zależy od zastosowania wielowarstwowych systemów powłokowych obejmujących warstwy podkładowe z pigmentami antykorozyjnymi (m.in. fosforan cynku, pigmenty na bazie tlenków żelaza) oraz warstwy nawierzchniowe odporne na czynniki mechaniczne i środowiskowe. W warunkach eksploatacji wojskowej powłoki te muszą wykazywać odporność na działanie wysokiej wilgotności oraz zanieczyszczeń przemysłowych.

Powłoki IRR (Infrared Reflectance)

Powłoki o regulowanym współczynniku odbicia w bliskiej podczerwieni (NIR) są stosowane w celu zmniejszenia sygnatury obiektów wojskowych. Ich formuła opiera się na specjalnie dobranych pigmentach IRR, które zapewniają zachowanie odpowiednich parametrów odbicia w paśmie 700–1200 nm, przy jednoczesnym odwzorowaniu barwy w zakresie światła widzialnego. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie zgodności wizualnej z otoczeniem przy równoczesnym utrudnieniu detekcji przez systemy noktowizyjne i inne wykorzystujące to pasmo promieniowania.

Powłoki RAM (Radar Absorbing Materials)

Powłoki absorbujące promieniowanie radarowe stanowią jeden z kluczowych elementów technologii stealth. Ich działanie opiera się na zastosowaniu wypełniaczy dielektrycznych i/lub magnetycznych (m.in. ferrytów, węglików, grafenu, nanorurek węglowych), które pochłaniają energię fal elektromagnetycznych w zakresie mikrofalowym. W zależności od wymagań taktycznych, powłoki RAM mogą być projektowane jako cienkowarstwowe (dla redukcji masy) lub gruboziarniste, przeznaczone do szerokopasmowej absorpcji sygnałów radarowych.

Powłoki CARC (Chemical Agent Resistant Coatings)

Powłoki odporne na działanie bojowych środków trujących (BST) i substancji toksycznych (CARC) pełnią funkcję zarówno ochronną, jak i dekontaminacyjną. Formułowane są w taki sposób, aby zapobiegały wnikaniu agresywnych związków chemicznych w strukturę powłoki i umożliwiały ich łatwe usunięcie w procesie dekontaminacji. Powłoki CARC charakteryzują się wysoką odpornością chemiczną, niską porowatością oraz stabilnością koloru i połysku w warunkach długotrwałej ekspozycji na promieniowanie UV [13, 63].

Powłoki multispektralne

Rozwój technologii detekcji wymusił opracowanie powłok maskujących skutecznych w szerokim zakresie widmowym – od promieniowania widzialnego (VIS), poprzez bliską i średnią podczerwień (NIR, MWIR), aż po daleką podczerwień (LWIR) oraz pasmo radarowe. Powłoki multispektralne są projektowane w oparciu o kompozytowe układy pigmentów, wypełniaczy i dodatków funkcjonalnych, które pozwalają na jednoczesną kontrolę parametrów odbicia, absorpcji i emisji w wielu zakresach promieniowania elektromagnetycznego [54, 58].

2. Przegląd literatury i stan wiedzy

2.1. Wprowadzenie

Polimerowe powłoki ochronne stanowią jedną z kluczowych grup materiałów inżynierskich, których rola w zabezpieczeniu powierzchni przed oddziaływaniem środowiska i czynników eksploatacyjnych jest nie do przecenienia [11, 32]. Dzięki unikalnym właściwościom, takim jak odporność chemiczna, mechaniczna i termiczna, a także możliwości modyfikacji ich składu chemicznego, powłoki te znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu – od infrastruktury i energetyki, przez transport, aż po technikę wojskową [75]. Rozwój technologii polimerowych umożliwił projektowanie powłok o właściwościach dopasowanych do specyficznych wymagań użytkowych, w tym zwiększonej trwałości, zdolności do maskowania oraz odporności na ekstremalne warunki środowiskowe [23, 47].

2.2. Historia rozwoju polimerowych powłok ochronnych

Historia powłok polimerowych sięga pierwszych dekad XX wieku, kiedy to wprowadzono syntetyczne żywice alkidowe, nitrocelulozowe i fenolowe [29]. Początkowo technologie te opierały się na rozpuszczalnikowych systemach jedno- lub dwuskładnikowych, które zapewniały odpowiednią adhezję i odporność na czynniki atmosferyczne, jednak wiązały się z wysoką emisją lotnych związków organicznych [71]. Kolejne dekady przyniosły rozwój systemów epoksydowych i poliuretanowych, które znalazły szerokie zastosowanie w ochronie konstrukcji stalowych, w tym w przemyśle morskim i wojskowym [9, 73]. W latach 80. i 90. XX w. nastąpił intensywny rozwój technologii wodorozcieńczalnych, a także powłok proszkowych, co było odpowiedzią na rosnące wymagania środowiskowe [70]. Obecnie rozwój koncentruje się na powłokach hybrydowych, nanokompozytowych oraz inteligentnych, które potrafią reagować na zmiany środowiskowe, a nawet samoczynnie naprawiać mikrouszkodzenia [61, 62].

2.3. Proekologiczne kierunki rozwoju

Współczesne kierunki badań nad powłokami polimerowymi są silnie ukierunkowane na minimalizację wpływu na środowisko naturalne [67]. Regulacje prawne, takie jak dyrektywy UE ograniczające emisję LZO, wymusiły rozwój powłok o wysokiej zawartości części stałych (*high-solids*), powłok proszkowych oraz systemów wodorozcieńczalnych [12, 60]. Coraz większe znaczenie zyskują również spoiwa i dodatki pochodzenia biologicznego (*bio-based*), pozyskiwane z surowców odnawialnych, takich jak oleje roślinne modyfikowane chemicznie

[43]. Równolegle rozwijane są technologie umożliwiające odzysk i recykling powłok po zakończeniu ich eksploatacji, a także systemy umożliwiające aplikację w warunkach obniżonego zużycia energii [3, 50].

2.4. Współczesne powłoki polimerowe

Analiza literatury z ostatnich lat wskazuje, że największy wzrost liczby publikacji dotyczy powłok adaptacyjnych, nanokompozytowych i samonaprawczych. Silny nacisk kładziony jest także na integrację funkcji ochronnych z innymi właściwościami, co wpisuje się w trend powłok wielofunkcyjnych [43]. Do tych kierunków należą:

- Powłoki antybakteryjne – zawierające między innymi nanocząsteczki srebra, miedzi lub ZnO, zapewniające długotrwałą ochronę przed rozwojem mikroorganizmów na powierzchni [67].
- Powłoki o regulowanym przewodnictwie cieplnym – pozwalają na kontrolę przepływu ciepła przez powierzchnię, co jest wykorzystywane w ochronie przed przegrzewaniem [62].
- Powłoki sensoryczne – integracja z układami monitorowania stanu technicznego (SHM), pozwalającymi na wykrywanie korozji, uszkodzeń mechanicznych i zmęczeniowych w czasie rzeczywistym [61]. Tego typu rozwiązania są coraz częściej stosowane w lotnictwie i infrastrukturze krytycznej.
- Technologie hybrydowe – łączenie polimerów z komponentami ceramicznymi (*sol-gel*) lub metalicznymi w celu uzyskania wysokiej twardości, odporności na ścieranie i wysokie temperatury [70]. Hybrydy te mogą pełnić funkcje wielospektralne oraz antybakteryjne.
- Powłoki *bio-based* i biodegradowalne – produkowane z polimerów pochodzenia naturalnego (PLA, PHA) oraz żywic roślinnych, co pozwala ograniczyć ślad węglowy i emisję LZO [9]. Badania koncentrują się na poprawie ich odporności mechanicznej i chemicznej w celu zwiększenia zakresu zastosowań przemysłowych i wojskowych.
- Powłoki superhydrofobowe i oleofobowe – tworzone w oparciu o struktury biomimetyczne (*lotus effect*), osiągające kąt zwilżania poniżej 5°, co zapewnia doskonale właściwości samoczyszczące i odporność na zabrudzenia [73]. Mogą być również projektowane pod kątem odporności na oblodzenie i działanie olejów.
- Powłoki adaptacyjne i multispektralne – systemy o regulowanej emisyjności i odbiciu w pasmach VIS/NIR/MWIR/LWIR, pozwalające na dynamiczne dostosowanie

sygnatury obiektu do tła i warunków środowiskowych [71]. Rozwiązania te są szczególnie istotne w wojsku, gdzie minimalizacja wykrywalności w wielu zakresach widma ma krytyczne znaczenie.

- Nanokompozyty – zastosowanie nanorurek węglowych (CNT), grafenu, nanocząsteczek tlenków metali (TiO_2 , ZnO , Al_2O_3) oraz nanosrebra w celu poprawy właściwości mechanicznych, przewodnictwa cieplnego, barierowości oraz odporności na promieniowanie UV [29, 37, 47]. Wprowadzenie nanonapełniaczy pozwala również na redukcję masy powłok oraz nadanie im właściwości funkcjonalnych, takich jak absorpcja promieniowania mikrofalowego (RAM) czy ekranowanie EMI.
- Powłoki inteligentne (*self-healing*) – zdolne do autonomicznej naprawy mikrouszkodzeń poprzez zastosowanie mikrokapsulek z inhibitorami korozji lub monomerami polimerów, które uwalniają zawartość po uszkodzeniu powłoki [75]. Inne rozwiązania obejmują zastosowanie sieci polimerowych zdolnych do ponownego tworzenia wiązań kowalencyjnych pod wpływem bodźców, takich jak temperatura, promieniowanie UV czy zmiana pH.

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii powłok ochronnych, które coraz częściej pełnią funkcje wykraczające poza klasyczną ochronę przed korozją i czynnikami atmosferycznymi [11, 32]. Kierunki te obejmują m.in. integrację właściwości adaptacyjnych, diagnostycznych, sensorycznych oraz samonaprawczych, co ma kluczowe znaczenie w technice wojskowej, lotniczej i morskiej.

2.5. Rozwój powłok stosowanych w technice wojskowej

Rozwój powłok stosowanych w technice wojskowej jest determinowany przez rosnące wymagania dotyczące skuteczności maskowania, trwałości eksploatacyjnej oraz odporności na złożone zagrożenia chemiczne, biologiczne i fizyczne [17, 20, 76]. Nowoczesne systemy powłokowe muszą jednocześnie zapewniać ochronę przed korozją, minimalizować sygnaturę w wielu zakresach widma elektromagnetycznego oraz umożliwiać łatwą dekontaminację [66]. Współczesne kierunki rozwoju obejmują:

- Powłoki CARC (Chemical Agent Resistant Coatings) nowej generacji – charakteryzują się zwiększoną odpornością na środki bojowe i preparaty dekontaminacyjne, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokich parametrów mechanicznych i estetycznych [28, 48]. Stosuje się w nich pigmenty o kontrolowanej reflektancji oraz spoiwa o podwyższonej odporności na hydrolizę i promieniowanie UV.

- Powłoki multispektralne – umożliwiają jednoczesne maskowanie w pasmach VIS, NIR, MWIR i LWIR, dzięki zastosowaniu wielowarstwowych układów pigmentów i napełniaczy o różnej zdolności absorpcji i odbicia promieniowania [7, 65]. Rozwiązania te pozwalają ograniczyć wykrywalność zarówno przez obserwację optyczną, jak i urządzenia termowizyjne.
- Powłoki RAM (*Radar Absorbing Materials*) – bazujące na nanokompozytach polimerowych wypełnianych ferrytami, grafenem, nanorurkami węglowymi lub mikrowłóknami metalicznymi [55, 68]. Ich zadaniem jest redukcja efektywnej powierzchni odbicia (RCS) obiektów wojskowych w paśmie mikrofalowym radarów.
- Powłoki adaptacyjne – zdolne do dynamicznej zmiany parametrów optycznych i termicznych w zależności od warunków środowiskowych [52]. W wojsku znajdują zastosowanie w pojazdach bojowych, które muszą dostosowywać swoją sygnaturę w czasie rzeczywistym, aby uniknąć detekcji.
- Powłoki o zwiększonej odporności na broń chemiczną i biologiczną – zawierają komponenty antybakteryjne i antywirusowe, takie jak nanocząsteczki srebra czy miedzi, oraz wykazują odporność na agresywne środki dekontaminacyjne [10].
- Powłoki samonaprawcze w zastosowaniach polowych – wykorzystują mikrokapsułki lub sieci polimerowe zdolne do rekonfiguracji wiązań, co pozwala na szybkie usuwanie drobnych uszkodzeń powstałych w trakcie działań bojowych [40, 59].
- Powłoki nanokompozytowe – wzmacniane nanorurkami węglowymi, grafenem lub nanocząstkami tlenków metali, łączą wysoką odporność mechaniczną i chemiczną z właściwościami maskującymi oraz możliwością integracji funkcji przewodzących [4, 46].
- Powłoki o wysokiej trwałości w warunkach ekstremalnych – przeznaczone do pracy w środowisku arktycznym, pustynnym, morskim oraz w atmosferach przemysłowych o wysokiej agresywności korozyjnej [8].

Kierunki te wskazują na rosnące znaczenie powłok wielofunkcyjnych, łączących ochronę przed korozją, maskowanie multispektralne, odporność na zagrożenia chemiczno-biologiczne i zdolność samonaprawy. Ich rozwój jest silnie związany z postępem w dziedzinie nanotechnologii i inżynierii materiałowej [72].

2.6. Wnioski z analizy przeglądu literatury

- Polimerowe powłoki ochronne stanowią jedną z najważniejszych grup materiałów inżynierskich, łącząc funkcje ochronne, estetyczne i – w zastosowaniach wojskowych

– maskujące. Ich rozwój jest ściśle związany z postępowaniem w chemii polimerów, inżynierii powierzchni oraz nanotechnologii [11, 23, 32, 47, 75].

- Ewolucja technologiczna powłok przebiegała od systemów rozpuszczalnikowych o wysokiej emisji LZO, przez powłoki epoksydowe i poliuretanowe, po rozwiązania proekologiczne, takie jak systemy wodorozcieńczalne, proszkowe oraz *high-solids* [29, 70, 71, 73].
- Kierunki proekologiczne stały się dominującym trendem w ostatnich dekadach, wymuszone regulacjami prawnymi i rosnącą świadomością środowiskową. Obejmują one stosowanie surowców odnawialnych (*bio-based*), redukcję LZO, recykling powłok oraz optymalizację procesów aplikacyjnych [3, 12, 43, 50, 60, 67].
- Nowe i bieżące kierunki rozwoju obejmują powłoki samonaprawcze (*self-healing*), adaptacyjne, multispektralne, nanokompozytowe, superhydrofobowe, sensoryczne oraz *bio-based*. Szczególnie dynamiczny rozwój notują powłoki adaptacyjne, nanokompozytowe i inteligentne, które integrują funkcje ochronne, diagnostyczne i maskujące [9, 12, 23, 29, 43, 47, 60 - 62, 67, 70, 71, 73, 75].
- W technice wojskowej kluczowe znaczenie mają powłoki wielofunkcyjne – CARC nowej generacji, RAM, multispektralne i adaptacyjne – zapewniające odporność na czynniki atmosferyczne, promieniowanie elektromagnetyczne oraz zagrożenia chemiczno-biologiczne [4, 7, 8, 10, 17, 20, 28, 40, 46, 48, 52, 55, 59, 65, 66, 68, 72].
- Nanomateriały (grafen, CNT, nanocząstki tlenków metali) odgrywają coraz większą rolę w poprawie parametrów mechanicznych, barierowych i maskujących powłok, a także umożliwiają nadanie im dodatkowych funkcjonalności, m.in. absorpcji fal radarowych czy przewodnictwa elektrycznego [4, 10, 29, 40, 46, 47, 52, 55, 59, 68].
- Obecny trend badawczy zmierza w stronę integracji różnych funkcji w jednym systemie powłokowym, co pozwala na ograniczenie masy i grubości powłok przy jednoczesnym zwiększeniu ich skuteczności w wielu aspektach ochrony i maskowania.

3. Cel i zakres pracy

Problem badawczy

Współczesne systemy uzbrojenia i sprzętu wojskowego wymagają stosowania zaawansowanych technologicznie powłok lakierniczych, które pełnią funkcje ochronne oraz maskujące. Istotnym wyzwaniem w inżynierii powłok wojskowych jest opracowanie takich systemów, które skutecznie ograniczą możliwość wykrycia i identyfikacji obiektów przez środki obserwacji optycznej, termowizyjnej i radiolokacyjnej, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej trwałości eksploatacyjnej. Problem badawczy niniejszej pracy obejmuje zbadanie i porównanie wybranych właściwości eksploatacyjnych lakierniczych maskujących systemów powłokowych, opracowanych z przeznaczeniem dla uzbrojenia i sprzętu wojskowego, w celu określenia ich skuteczności w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Szczególny nacisk położono na analizę wpływu zastosowanych modyfikatorów funkcjonalnych na właściwości fizykochemiczne, mechaniczne oraz zdolności maskujące powłok.

Cel badań

Celem głównym pracy jest zbadanie właściwości eksploatacyjnych wybranych lakierniczych systemów powłokowych maskujących oraz określenie ich zachowania w warunkach rzeczywistych, z przeznaczeniem do stosowania na uzbrojeniu i sprzęcie wojskowym.

Cele szczegółowe obejmują:

1. Analizę porównawczą parametrów użytkowych standardowego systemu powłokowego i systemów powłokowych modyfikowanych nanorurkami węglowymi oraz mikrosferami szklanymi.
2. Ocenę wpływu modyfikacji na odporność mechaniczną, odporność na działanie środowiska, trwałość barwy i połysku, właściwości hydrofobowe oraz parametry maskujące w zakresie VIS, NIR i IR.
3. Określenie przydatności opracowanych systemów powłokowych do stosowania w warunkach eksploatacji polowej.

Cel naukowy

Celem naukowym jest wyznaczenie czynników najsilniej wpływających na wydłużenie trwałości eksploatacyjnej i opisanie tego wpływu w formie empirycznego modelu matematycznego. Opracowany i zwalidowany model może przyczynić się do rozszerzenia

praktycznej wiedzy w zakresie zachowania systemu powłokowego maskującego w różnych warunkach środowiskowych.

Cel aplikacyjny

Celem aplikacyjnym jest opracowanie procesu technologicznego wytwarzania lakierniczych systemów powłokowych dla uzbrojenia i sprzętu wojskowego, zapewniającego wysoką skuteczność maskowania przy jednoczesnym wydłużeniu trwałości eksploatacyjnej. Proces ten powinien być możliwy do wdrożenia w warunkach przemysłowych z zachowaniem norm wojskowych i wymagań środowiskowych.

Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- Dobór i charakterystykę materiałów powłokotwórczych oraz modyfikatorów funkcjonalnych (nanorurek węglowych i mikrosfer szklanych).
- Opracowanie i przygotowanie serii próbek lakierniczych systemów powłokowych o zróżnicowanym składzie.
- Przeprowadzenie badań laboratoryjnych w zakresie właściwości fizykochemicznych, mechanicznych i optycznych.
- Realizację badań eksploatacyjnych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.
- Analizę porównawczą wyników oraz opracowanie modelu prognostycznego procesu nakładania systemu powłokowego.
- Sformułowanie wniosków oraz rekomendacji technologicznych dla przemysłu obronnego.

4. Materiały modyfikujące

4.1. Mikrosfery szklane

Mikrosfery szklane, znane również jako puste mikrokulki szklane (*hollow glass microspheres*), są lekkimi, cienkościennymi, jednorodnymi kulistymi cząstkami wykonanymi najczęściej z chemicznie odpornego szkła borokrzemianowego lub sodowo-borokrzemianowego [51]. Charakteryzują się gęstością w zakresie od 0,12 do 0,60 g/cm³ i średnicą cząstek 16–65 μm, a ich podstawową cechą konstrukcyjną jest zamknięta, pusta przestrzeń wewnętrzna wypełniona gazem o niskiej przewodności cieplnej [1]. Dzięki sferycznej geometrii wykazują niski stosunek powierzchni do objętości oraz izotropowe właściwości mechaniczne, co odróżnia je od wypełniaczy o nieregularnym kształcie.

Tabela 1. Dane techniczne mikrosfer 3M™ Glass Bubbles S28HS [51]

Parametr	Wartość
Skład chemiczny	Szkło sodowo-borokrzemianowe
Kolor	Biały proszek
Gęstość rzeczywista	0,28 g/cm ³
Średnia średnica cząstek	ok. 30 μm
Wytrzymałość na ściskanie	3000 psi (ok. 20,7 MPa) przy 90% przeżywalności
Punkt mięknięcia	ok. 600°C
pH zawiesiny wodnej 5%	9,5
Zawartość lotnych składników	≤ 0,5%
Odporność na wodę (flotacja)	99%
Przewodność cieplna	ok. 0,074 W/m·K

Do badań zastosowano mikrosfery szklane 3M™ Glass Bubbles S28HS. W tabeli 1 przedstawiono parametry zastosowanych mikrosfer [51]. Parametry te umożliwiają ich stosowanie w procesach o umiarkowanym i wysokim ścinaniu, w tym w technologiach powłokowych wymagających intensywnego mieszania i aplikacji natryskowej. Dodatkowo mikrosfery te wykazują niską przewodność cieplną (ok. 0,074 W/m·K), co sprzyja poprawie izolacyjności termicznej materiału powłokowego [1]. Na rysunku 3 w publikacji 10 zaprezentowano obraz mikrosfer z użyciem mikroskopii SEM.

Zalety stosowania mikrosfer szklanych w systemach powłokowych:

- Redukcja gęstości i masy powłoki – dzięki niskiemu ciężarowi właściwemu mikrosfer możliwe jest obniżenie masy suchej powłoki nawet o kilkanaście procent, co jest istotne w zastosowaniach wojskowych, gdzie dąży się do minimalizacji masy wyposażenia [51].
- Poprawa izolacyjności termicznej – struktura pustych kul ogranicza przewodzenie ciepła, co może zmniejszyć sygnaturę termiczną obiektu w paśmie podczerwieni [1, 74].

- Modyfikacja właściwości optycznych – mikrosfery wykazują zdolność do rozpraszania i odbijania promieniowania w zakresie VIS i NIR, co jest szczególnie ważne w powłokach maskujących, w tym w farbach refleksyjnych odbijających promieniowanie słoneczne [74].
- Poprawa właściwości reologicznych – dzięki kulistemu kształtowi cząstek poprawiają rozlewność i ułatwiają aplikację powłoki, działając jak mikroskopijne „łożyska kulkowe” [51].
- Odporność chemiczna i wodna – szkło sodowo-borokrzemianowe wykazuje wysoką odporność na działanie wody i wielu związków chemicznych, co wydłuża trwałość powłok w trudnych warunkach eksploatacji [2].

Zastosowania w technice wojskowej

W kontekście techniki wojskowej mikrosfery szklane, a w szczególności typ S28HS, mogą znaleźć zastosowanie w:

- powłokach kamuflażowych o obniżonej sygnaturze termicznej,
- lakierach o zwiększonej odporności na promieniowanie słoneczne i procesy starzeniowe,
- systemach powłokowych o zmniejszonej masie jednostkowej, co przekłada się na mniejsze obciążenia konstrukcji pojazdów i sprzętu,
- materiałach o zwiększonej odporności na warunki środowiskowe, w tym wilgoć i zasolenie.

Podsumowanie

Zastosowanie mikrosfer szklanych 3M™ Glass Bubbles S28HS w systemach powłokowych może istotnie poprawić właściwości eksploatacyjne powłok wojskowych. Dzięki połączeniu niskiej gęstości, wysokiej wytrzymałości, dobrych właściwości izolacyjnych i modyfikacji optycznej, możliwe jest uzyskanie powłok o podwyższonej skuteczności maskowania, zwiększonej trwałości i mniejszej masie, co bezpośrednio wspiera funkcjonalność sprzętu wojskowego.

4.2. Nanorurki węglowe

Nanorurki węglowe (CNT – ang. *Carbon Nanotubes*) to jednowymiarowe nanostruktury o budowie cylindrycznej, powstałe przez zwinięcie pojedynczej lub kilku warstw grafenu w rurkę. W badaniach wykorzystano koncentrat nanorurek Matrix 204, oparty na jednopowłokowych nanorurkach węglowych (SWCNT) TUBALL™, dyspersowanych

w matrycy polimerowej. SWCNT charakteryzują się średnicą ok. 1,6 nm, długością $>5 \mu\text{m}$, powierzchnią właściwą do $1000 \text{ m}^2/\text{g}$, modułem sprężystości do 5,5 TPa, przewodnictwem elektrycznym rzędu 10^3 S/cm oraz przewodnictwem cieplnym około $6600 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [45].

Zalety stosowania Matrix 204 w systemach powłokowych [19, 37, 38, 42, 57]:

- Uzyskanie trwałej przewodności elektrycznej i właściwości antystatycznych w szerokim zakresie rezystywności powierzchniowej ($10^5\div 10^8 \Omega/\square$) przy bardzo niskim stężeniu nanorurek (0,01–0,5% wag.).
- Poprawa adhezji powłoki do podłoża, odporności na ścieranie, zarysowanie oraz wzrost twardości powłoki.
- Stabilność właściwości przewodzących niezależnie od wilgotności i temperatury otoczenia.
- Zmniejszenie zawartości tradycyjnych wypełniaczy przewodzących (m.in. sadzy, grafitu) z 8–10% wag. Do $<0,5\%$, co poprawia reologię i estetykę powłoki.
- Zachowanie lub poprawa parametrów optycznych powłoki (kolor, połysk).
- Możliwość stosowania w powłokach przeciwradiolokacyjnych RAM.

Na rysunku 3 w publikacji 10 zaprezentowano obraz nanorurek węglowych z użyciem mikroskopii SEM.

Wpływ na zdrowie ludzkie

Nanorurki węglowe mogą stanowić zagrożenie zdrowotne, zwłaszcza w postaci pyłów zdolnych do wnikania do układu oddechowego. Badania wykazały, że wdychanie CNT może powodować stany zapalne płuc, włóknienie, a w przypadku wybranych typów MWCNT – potencjalnie zmiany nowotworowe. Międzynarodowa Agencja Badań nad Nowotworami (IARC) sklasyfikowała MWCNT-7 jako możliwie rakotwórcze dla ludzi (grupa 2B), podczas gdy inne typy CNT pozostają niesklasyfikowane z powodu braku wystarczających danych.

Toksyczność CNT zależy od długości, średnicy, czystości oraz obecności pozostałości katalizatorów metali (m.in. Fe, Ni). NIOSH zaleca maksymalne dopuszczalne stężenie CNT w powietrzu na poziomie $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (średnia TWA, 8 h). Bezpieczna praca z CNT wymaga stosowania zamkniętych systemów dozowania, wentylacji stanowiskowej oraz ochrony dróg oddechowych [15].

Podsumowanie

Matrix 204 jest wysokowydajnym dodatkiem funkcjonalnym do systemów powłokowych, umożliwiającym poprawę przewodnictwa elektrycznego i właściwości mechanicznych przy

minimalnym wpływie na obraz powłoki oraz pozytywnym wpływie na absorbcję promieniowania radarowego. Wybrane nanorurki węglowe Matrix 204 nie są sklasyfikowane jako rakotwórcze.

5. Metodyka badań

5.1. Budowa i skład systemów powłokowych

Do badań przygotowano próbki ze stali niskowęglowej DC01 o wymiarach $75 \times 100 \times 1$ mm, które stanowiły podłoże dla trzech wariantów dwuwarstwowych maskujących systemów powłokowych:

- SP1 – system maskujący referencyjny: powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka nawierzchniowa maskująca BW400-6031.
- SP2 – system maskujący z dodatkiem nanorurek węglowych (CNT) o udziale masowym 0,02%: powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka nawierzchniowa BW400-6031 + CNT.
- SP3 – system maskujący z dodatkiem mikrosfer szklanych (GM) o udziale masowym 2,4%: powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka nawierzchniowa BW400-6031 + GM.

5.2. Przygotowanie materiału podłoża i nanoszenie powłok

Przygotowanie próbek przebiegało w następujących etapach:

- Odtłuszczenie zmywaczem przemysłowym XPA10006 w celu usunięcia zanieczyszczeń powierzchniowych.
- Szlifowanie mechaniczne papierem ściernym o gradacji P80 przy użyciu szlifierki oscylacyjnej w celu uzyskania odpowiedniej chropowatości powierzchni.
- Ponowne odtłuszczenie rozpuszczalnikiem XPA10006.

Nakładanie powłok wykonano metodą natrysku pneumatycznego w kabinie lakierniczej firmy Blowtherm, z zastosowaniem pistoletów natryskowych firmy SATA. Parametry procesu nanoszenia maskujących systemów powłokowych przedstawiono w publikacji 7. Po aplikacji powłoki wygrzewano w temperaturze 60°C przez 60 minut, a następnie sezonowano przez 21 dni w temperaturze $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $50 \pm 5\%$.

Na rysunku 4 przedstawiono kabinę lakierniczą w której zostały wykonane próbki. Natomiast na rysunku 5 zaprezentowano pistolet lakierniczy wykorzystany podczas aplikacji systemów powłokowych.



Rysunek 4. Kabina lakiernicza firmy Blowtherm



Rysunek 5. Pistolet SATA jet 5000 RP dysza 1,4

5.3. Zakres badań laboratoryjnych

Badania obejmowały ocenę właściwości mechanicznych, geometrycznych, fizykochemicznych i optycznych maskujących systemów powłokowych SP1, SP2 i SP3:

- Grubość powłoki – pomiar indukcją magnetyczną wg PN-EN ISO 2808 przy użyciu narzędzia pomiarowego: Elcometer 456T.
- Połysk – pomiar wg PN-EN ISO 2813 przy użyciu narzędzia pomiarowego: BYK micro-Tri-gloss, geometria 85°.
- Barwa i różnica barw (ΔE^*_{ab}) – pomiary spektrofotometrem Minolta CM-700d (parametry: d/8, SCI, 10°).
- Charakterystyka spektralna odbicia (350–1200 nm) pomiary spektrofotometr Jasco V-770.

- Chropowatość powierzchni – pomiary parametrów Ra , Rz , Rq profilometrem Mitutoyo SJ-210.
- Struktura geometryczna powierzchni (SGP) – pomiary parametrów Sa , Sp , Sq , Sv , Sz , Ssk , Sku przyrządem optycznym Talysurf CCI i analiza z użyciem oprogramowania TalyPam Platinum.
- Twardość – test wahadłem Koeniga wg PN-EN ISO 1522 przy użyciu narzędzia pomiarowego: BYK-Gardner Pendulum Hardness Tester – BYKO-Swing
- Adhezja – metoda odrywowa pull-off wg PN-EN ISO 4624 przy użyciu narzędzia pomiarowego: DeFelsko PosiTect AT-A.
- Adhezja – scratch test przy użyciu narzędzia pomiarowego Revetest Xpress Scratch Tester producenta CSM Instruments.
- Odporność na ścieranie – przy użyciu testera tribologicznego: Taber Abraser wg ASTM D4060.
- Odporność korozyjna – badania w komorze solnej firmy Ascott Alpha+ S500/ Weiss Technik M.IN.450 (ISO 9227).
- Odporność korozyjna – pomiary elektrochemiczne (EIS, LSV) przy użyciu narzędzia pomiarowego Autolab PGSTAT 100.
- Odporność na starzenie – testy w komorze UV-A, UV-B, ksenonowej przy użyciu komór: Q-Sun Xe-3 oraz QUV/spray firmy Q-Lab oraz ekspozycja w warunkach naturalnych. Na rysunku 6 przedstawiono stanowisko do badań zewnętrznych oraz stację pogodową.
- Właściwości maskujące – ocena zgodności z wymaganiami NO-80-A200 w zakresie UV/VIS/NIR przy użyciu: Spektrofotometru Jasco V-770.



Rysunek 6. Stanowisko do badań zewnętrznych (po lewej) oraz stacja pogodowa (po prawej)

5.4. Zakres badań poligonowych

Badania obejmowały ocenę skuteczności maskowania obiektu na zobrażeniach wykonanych przy użyciu aparatu fotograficznego z filtrem podczerwieni przy długości powyżej 850 nm i obiektywem 50 mm oraz przy użyciu urządzenia noktowizyjnego opartego na wzmacniaczu obrazu trzeciej generacji (Gen III), powiększeniu równym 1x i zdolności rozdzielczej 64 lp/mm.

6. Wyniki badań i ich analiza

6.1. Pomiary grubości

Wprowadzenie

Grubość całkowita systemu powłokowego jest jednym z podstawowych parametrów technologicznych, mających bezpośredni wpływ na właściwości ochronne i eksploatacyjne powłok. Zbyt mała grubość może prowadzić do obniżenia odporności korozyjnej i mechanicznej, natomiast nadmierna – do zwiększenia podatności na spękania i defekty. Pomiary grubości pozwalają ocenić stabilność procesu aplikacji oraz wpływ zastosowanych modyfikacji na budowę warstwy powłokowej.

Wyniki badań

Na podstawie danych przedstawionych w publikacji 7 (tabela 2) ustalono, że grubości całkowite badanych systemów powłokowych mieściły się w zakresie 154–167 μm .

- Najniższą grubość odnotowano dla systemu powłokowego SP1 – 154 μm .
- System powłokowy SP2 osiągnął wartość pośrednią.
- Najwyższą grubość zarejestrowano dla systemu powłokowego SP3 – 167 μm .

Wyniki wskazują, że dodatek mikrosfer szklanych w systemie powłokowym SP3 spowodował niewielki wzrost grubości powłoki, co może być konsekwencją większej objętościowej frakcji wprowadzonego modyfikatora.

Podsumowując:

- System powłokowy SP1 – najcieńsza warstwa spośród analizowanych systemów.
- System powłokowy SP2 – grubość pośrednia, porównywalna do wartości referencyjnych.
- System powłokowy SP3 – najgrubsza warstwa, co potwierdza wpływ mikrosfer szklanych na zwiększenie grubości systemu powłokowego.

Badania grubości wykazały, że wszystkie systemy powłokowe charakteryzowały się wartościami mieszczącymi się w zbliżonym przedziale, świadczącym o stabilnym procesie aplikacji. Najwyższą grubość uzyskał system powłokowy SP3 z dodatkiem mikrosfer szklanych, co wskazuje, że rodzaj zastosowanego modyfikatora może wpływać na całkowitą grubość systemu powłokowego i tym samym na jej potencjalne właściwości ochronne.

6.2. Pomiary połysku

Wprowadzenie

Połysk powierzchni powłok ochronnych jest jednym z kluczowych parametrów estetycznych i funkcjonalnych. W przypadku powłok maskujących stosowanych w technice wojskowej istotne jest, aby powierzchnia charakteryzowała się matowym wykończeniem, które ogranicza niepożądane odbicia promieniowania świetlnego i tym samym poprawia właściwości kamuflujące. W ocenie połysku wykorzystuje się różne geometrie pomiarowe, jednak w przypadku powłok matowych największe znaczenie mają pomiary przy kącie 85°.

Wyniki badań

Na podstawie danych z Publikacji 7 (tabela 5) stwierdzono, że wszystkie analizowane systemy powłokowe miały charakter powierzchni matowej, z wartościami połysku poniżej 8 GU (geometria 85°).

- Najniższą wartość połysku odnotowano dla systemu powłokowego SP2 (3,8 GU), modyfikowanego nanorurkami węglowymi.
- System powłokowy SP1 osiągnął wartość 4,6 GU.
- Najwyższą wartością połysku charakteryzował się system powłokowy SP3 (5,3 GU), zawierający mikrosfery szklane.

Wszystkie badane systemy spełniały wymagania normy obronnej NO-80-A200 w zakresie dopuszczalnych wartości połysku dla powłok maskujących.

Podsumowując:

- System powłokowy SP2 – charakteryzował się najniższym połyskiem, co potwierdza skuteczność modyfikacji nanorurkami węglowymi w kierunku zwiększenia matowości powierzchni.
- System powłokowy SP1 – uzyskał wartość połysku pośrednią.
- System powłokowy SP3 – miał najwyższą wartość połysku, jednak nadal mieścił się w granicach wymagań normy.

Przeprowadzone badania wykazały, że wszystkie systemy powłokowe spełniają wymagania dotyczące matowości powierzchni, a ich połysk nie przekracza wartości granicznych określonych w normie NO-80-A200. Najbardziej matową powierzchnią charakteryzował się system powłokowy SP2, natomiast system powłokowy SP3, mimo wyższego połysku, nadal zachowywał właściwości maskujące zgodne z wymaganiami normatywnymi.

6.3. Badania barwy i różnicy koloru

Wprowadzenie

Barwa i stabilność koloru powłok maskujących stanowią istotny element ich funkcjonalności, ponieważ wpływają na skuteczność kamuflażu w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Różnice barw ΔE^*_{ab} pozwalają ilościowo ocenić stopień zmiany barwy w stosunku do systemu odniesienia oraz określić wpływ zastosowanych modyfikacji na percepcję koloru.

Wyniki badań

Zgodnie z danymi zaprezentowanymi w publikacji 7 (tabela 6), różnice barwy ΔE^*_{ab} dla systemów powłokowych modyfikowanych SP2 i SP3, w odniesieniu do systemu niemodyfikowanego SP1, mieściły się w zakresie 0,48–0,76.

- System powłokowy SP2 (zawierający nanorurki węglowe) charakteryzował się niższą jasnością (L^*) oraz wyższymi wartościami składowych barwy w obszarze zieleni i niebieskiego.
- System powłokowy SP3 (z mikrosferami szklanymi) wykazywał wyższą jasność oraz większe wartości składowych zieleni i żółci, co wskazuje na jaśniejszy odcień barwy w porównaniu z systemem odniesienia.

Podsumowując:

- System powłokowy SP1 – stanowił system odniesienia, wobec którego oceniano różnice ΔE^*_{ab} .
- System powłokowy SP2 – cechował się przyciemnieniem barwy oraz przesunięciem jej w kierunku zielono-niebieskim.
- System powłokowy SP3 – wyróżniał się rozjaśnieniem barwy i przesunięciem w kierunku zielono-żółtym.

Wyniki badań wskazują, że zastosowane modyfikacje systemów powłokowych wpływają na zmianę parametrów barwy w stosunku do systemu niemodyfikowanego. Różnice ΔE^*_{ab} nie przekroczyły jednak wartości granicznych uznawanych za istotne z punktu widzenia percepcji, co potwierdza, że wszystkie systemy zachowały odpowiednie właściwości maskujące.

6.4. Badania charakterystyki spektralnej odbicia

Wprowadzenie

Charakterystyka spektralna odbicia stanowi istotny parametr w ocenie maskujących systemów powłokowych, szczególnie w kontekście ich zdolności do ograniczania

wykrywalności w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Analiza widm odbicia umożliwiła określenie, czy dany system spełnia wymagania norm obronnych dotyczących właściwości maskujących.

Wyniki badań

W publikacji 7 (rys. 3) przedstawiono charakterystyki spektralne odbicia wszystkich analizowanych systemów powłokowych.

- W zakresie 350–750 nm nie odnotowano znaczących różnic pomiędzy systemami maskującymi SP1, SP2 i SP3.
- W zakresie 750–980 nm wyższym poziomem odbicia charakteryzował się system maskujący SP2, co może wynikać z wpływu zastosowanej modyfikacji nanorurkami węglowymi.
- W zakresie 980–1200 nm najwyższe wartości odbicia uzyskał system maskujący SP3, co można wiązać z właściwościami optycznymi mikrosfer szklanych zastosowanych w tym systemie.

Na rysunku 3 (publikacja 7) liniami przerywanymi przedstawiono graniczne wartości dopuszczalnej reemisji fal elektromagnetycznych określone w normie obronnej NO-80 A200.

Podsumowując:

- System maskujący SP1 – uzyskał wyniki odbicia porównywalne do pozostałych systemów w zakresie światła widzialnego (350–750 nm).
- System maskujący SP2 – odznaczał się wyższym poziomem odbicia w zakresie 750–980 nm, co wskazuje na specyficzne właściwości modyfikacji nanorurkami węglowymi.
- System maskujący SP3 – wykazywał największe wartości odbicia w zakresie 980–1200 nm, co można powiązać z obecnością mikrosfer szklanych w powłoce.

Analiza charakterystyk spektralnych odbicia wykazała, że wszystkie badane systemy powłokowe spełniają wymagania normy obronnej NO-80 A200. Różnice w wartościach odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni potwierdzają wpływ rodzaju zastosowanych modyfikacji na właściwości optyczne systemów powłokowych. Wyniki wskazują, że zarówno nanorurki węglowe, jak i mikrosfery szklane mogą modyfikować zdolność powłok do odbijania promieniowania elektromagnetycznego w specyficznych zakresach długości fali, co ma znaczenie w kontekście właściwości maskujących.

6.5. Pomiary struktury geometrycznej powierzchni

Wprowadzenie

Analiza struktury geometrycznej powierzchni (SGP) powłok lakierniczych pozwala na ocenę jakości ich wykonania oraz wpływu zastosowanych modyfikacji materiałowych na właściwości eksploatacyjne. Parametry chropowatości (profilowe i przestrzenne) stanowią istotne wskaźniki kształtu i ukształtowania powierzchni, determinując m.in. adhezję powłoki do podłoża, odporność na ścieranie oraz zdolność rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego.

Wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni

W publikacji 7 (tabele 11–13) zaprezentowano wyniki pomiarów chropowatości systemów powłokowych oraz profile chropowatości (rys. 6–8). Analiza parametrów Ra i Rq wykazała brak istotnych różnic pomiędzy systemami, natomiast w przypadku parametru Rz stwierdzono różnicę między systemami lakierniczymi SP1 i SP2, przy czym system lakierniczy SP3 nie różnił się istotnie od pozostałych z uwagi na duży rozrzut wyników. Wartości parametru Ra wskazywały, że każda z modyfikacji powodowała wzrost chropowatości powierzchni.

W publikacji 9 (rys. 2–4, tabela I) przedstawiono obrazy izometryczne powierzchni oraz uśrednione wartości parametrów SGP. Maskujące systemy powłokowe charakteryzowały się wartościami $Sa = 2,3\text{--}3,1\ \mu\text{m}$, podczas gdy podłoże stalowe DC01 po szlifowaniu papierem P80 miało $Sa = 0,8\text{--}0,9\ \mu\text{m}$. Podobne tendencje zaobserwowano dla parametru Sq , silnie skorelowanego z Sa . Naniesienie powłok skutkowało nieznacznym wzrostem chropowatości powierzchni.

Dodatkowe informacje dostarczyły parametry amplitudowe Sku i Ssk . Kurtoza była zbliżona do wartości 3, co świadczyło o rozkładzie normalnym. Najwyższe wartości uzyskano dla systemu SP3 modyfikowanego mikrosferami szklanymi. Współczynnik skośności Ssk przyjmował wartości dodatnie tylko dla systemu lakierniczego SP3, co świadczyło o powierzchni gładkiej, pozbawionej głębokich rys. Systemy lakiernicze SP1 i SP2 miały wartości ujemne Ssk , wskazujące na płaskowyzowe ukształtowanie powierzchni. Najniższą wartość Ssk stwierdzono w systemie lakierniczym SP1.

Parametry profilu chropowatości obliczono na podstawie 102 profili. Średnie wartości Ra dla systemów powłokowych mieściły się w zakresie $1,8\text{--}2,3\ \mu\text{m}$, podczas gdy podłoże DC01 miało $Ra = 0,5\text{--}0,7\ \mu\text{m}$. W tabeli II (publikacja 9) zestawiono szczegółowe wartości, wskazując, że najniższą chropowatość Ra uzyskał system lakierniczy SP2, a najwyższą system SP3, który również charakteryzował się największą wartością parametru Rz .

Analiza struktury geometrycznej powierzchni systemów powłokowych pozwoliła wskazać następujące zależności:

- Wszystkie systemy powłokowe charakteryzowały się znacznie wyższymi wartościami parametrów chropowatości niż podłoże stalowe DC01 (ponad trzykrotnie).
- System lakierniczy SP2 wykazywał najniższą wartość parametru Ra , co świadczy o relatywnie gładkiej powierzchni.
- System lakierniczy SP3 osiągnął najwyższe wartości parametrów Ra i Rz , a jego dodatnia skośność Ssk wskazywała na powierzchnię gładką, wolną od głębokich defektów.
- System lakierniczy SP1 charakteryzował się najniższą wartością współczynnika Ssk , wskazującą na płaskowyzowe ukształtowanie powierzchni.

Analizy SGP wykazała, że wszystkie systemy powłokowe tworzą powierzchnie o większej chropowatości niż podłoże, co sprzyja poprawie ich funkcjonalności, m.in. w zakresie adhezji i rozpraszania promieniowania. Najbardziej korzystną strukturą geometryczną charakteryzował się system lakierniczy SP3, natomiast system lakierniczy SP2 wyróżniał się najniższą chropowatością Ra . Wyniki te potwierdzają, że rodzaj zastosowanej modyfikacji ma istotny wpływ na strukturę geometryczną wytworzonych maskujących systemów powłokowych.

6.6. Badania morfologiczne

Wprowadzenie

Badania morfologiczne systemów lakierniczych stanowią istotny element oceny jakości powłok ochronnych i maskujących. Analiza mikrostruktury powierzchni oraz struktury wewnętrznej powłok umożliwia identyfikację defektów, takich jak pory, mikropęknięcia czy niejednorodności, które mogą negatywnie wpływać na ich właściwości eksploatacyjne.

Charakterystyka morfologii pozwala także na określenie stopnia rozproszenia i dystrybucji zastosowanych dodatków modyfikujących, takich jak nanorurki węglowe czy mikrosfery szklane, a tym samym na ocenę ich wpływu na funkcjonalność systemu powłokowego.

Do badań tego typu najczęściej wykorzystuje się techniki mikroskopowe, w szczególności mikroskopię elektronową skaningową (SEM), która zapewnia wysoką rozdzielczość i możliwość analizy topografii powierzchni oraz przekrojów powłok. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do powiązania struktury powłok z ich właściwościami mechanicznymi, korozyjnymi i optycznymi, a także do oceny poprawności procesu aplikacji.

Wyniki badań morfologicznych

W publikacji 10 (punkt 3.1) przedstawiono wyniki badań morfologicznych wykonanych techniką SEM. Na rysunkach 3a i 3b zaprezentowano obraz nanorurek węglowych i mikrosfer szklanych, natomiast na rysunku 4 – mikrostrukturę systemu powłokowego SP1. Obserwacje wykazały wyraźną granicę pomiędzy powłoką a podłożem oraz brak porów i mikropęknięć, co wskazuje na prawidłową technologię naniesienia systemu i jego szczelność. Przeprowadzone obserwacje wykazały, że minimalna grubość systemu lakierniczego wynosiła około 148 μm . System powłokowy SP1 miał maksymalną grubość około 154 μm . Ponadto stwierdzono, że powłoka podkładowa miała grubość w zakresie 72–77 μm . Analiza mikrostruktury systemów maskujących potwierdziła wyraźne granice między poszczególnymi warstwami systemu powłokowego i stalowym podłożem.

Analizując morfologię poszczególnych systemów malarskich stwierdzono, że grubości warstw wchodzących w skład danego systemu malarskiego były porównywalne. Zastosowane systemy malarskie maskujące dla obiektów wojskowych miały grubość od około 141 μm do około 157 μm . Systemy maskujące charakteryzowały się prawidłową strukturą poszczególnych warstw i brakiem defektów technologicznych.

6.7. Badania twardości, odporności na zużycie ścierne i erozyjne

Wprowadzenie

Odporność na ścieranie, twardość oraz wytrzymałość na zużycie erozyjne stanowią kluczowe parametry eksploatacyjne powłok polimerowych, szczególnie w zastosowaniach wojskowych, gdzie powierzchnie są narażone na intensywne oddziaływania mechaniczne i środowiskowe. Uszkodzenia powłok wynikające ze ścierania lub erozji mogą prowadzić do utraty ich właściwości ochronnych, a w konsekwencji do przyspieszonej degradacji sprzętu. Z tego względu w badaniach systemów powłokowych niezbędne jest kompleksowe uwzględnienie tych właściwości.

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań twardości metodą tłumienia oscylacji wahadła Koeniga, odporności na ścieranie (test Tabera) i odporności na zużycie erozyjne zgodnie z normą PN-C-81516:1976.

Wyniki badań twardości

W publikacji 7 (tabela 8) zaprezentowano czasy tłumienia oscylacji wahadła Koeniga dla badanych systemów powłokowych. Na podstawie wyników stwierdzono, że system lakierniczy SP3 charakteryzował się najszybszym tłumieniem drgań, a więc najniższą twardością. Systemy

lakiernicze SP1 i SP2 wykazały parametry zbliżone, statystycznie nierozróżnialne. Wyniki te zobrazowano graficznie na rysunku 4 (publikacja 7).

Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowana modyfikacja w systemie lakierniczym SP3 negatywnie wpłynęła na twardość powłoki, podczas gdy systemy lakiernicze SP1 i SP2 utrzymały korzystne wartości tego parametru.

Wyniki badań odporności na zużycie ściernie

Jedną z najczęściej stosowanych metod oceny odporności na ścieranie jest test Tabera, polegający na oddziaływaniu wirujących kół ściernych na powierzchnię próbki. W publikacji 11 przedstawiono wyniki takich badań: na rysunku 4 pokazano próbki po teście, na rysunku 5 zmianę grubości systemu powłokowego w zależności od liczby cykli, a na rysunku 6 ubytek masowy systemów powłokowych. Wyniki liczbowe zestawiono w tabeli 1 (publikacja 11).

Analiza danych wskazała, że najmniejszą utratą masy na cykl charakteryzował się system lakierniczy SP1, natomiast system lakierniczy SP2 uzyskał wyniki zbliżone. Największą utratę masy odnotowano w systemie lakierniczym SP3, co świadczy o jego mniejszej odporności na ścieranie. Wyniki te pozwalają stwierdzić, że lakiernicze systemy modyfikowane (SP2 i SP3) wykazały niższą odporność na ścieranie w porównaniu z lakierniczym systemem niemodyfikowanym (SP1).

Wyniki badań odporności na zużycie erozyjne

Zużycie erozyjne stanowi istotny mechanizm degradacji powłok, prowadząc do powstawania trudnych do przewidzenia uszkodzeń eksploatacyjnych. W publikacji 10, w rozdziale „Tests of resistance to erosion wear”, przedstawiono wyniki badań odporności na erozję prowadzone przy użyciu stanowiska badawczego zaprezentowanego na rysunku 10. Badania wykonano zgodnie z normą PN-C-81516:1976, a porównanie wyników przedstawiono na rysunku 11 (publikacja 10).

Otrzymane rezultaty wskazują, że wszystkie badane systemy powłokowe wykazały podobny poziom odporności erozyjnej, mieszczący się w zakresie 0,77–0,84 kg/μm. Największą odporność na zużycie erozyjne uzyskał system lakierniczy SP1 (0,84 kg/μm), a najmniejszą system lakierniczy SP3 (0,77 kg/μm). Różnice między systemami były jednak niewielkie.

Analiza wyników badań wykazała zróżnicowaną odporność systemów powłokowych na ścieranie, twardość i zużycie erozyjne:

- System powłokowy SP1 – uzyskał najlepsze wyniki w teście Tabera (najmniejsza utrata masy) oraz najwyższą odporność erozyjną, jego twardość była zbliżona do systemu powłokowego SP2.
- System powłokowy SP2 – charakteryzował się średnimi wynikami w testach ścieralności i odporności erozyjnej, przy zachowaniu wysokiej twardości, porównywalnej z systemem powłokowym SP1.
- System powłokowy SP3 – osiągnął najsłabsze wyniki pod względem odporności na ścieranie i erozję oraz najniższą twardość, co wskazuje na ograniczoną trwałość mechaniczną w porównaniu do pozostałych systemów.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że w zakresie odporności mechanicznej najlepszymi właściwościami charakteryzował się system powłokowy SP1, szczególnie pod względem odporności na ścieranie i erozję. System powłokowy SP2 zapewnia parametry pośrednie, zbliżone do systemu powłokowego SP1 pod względem twardości. Najsłabsze wyniki uzyskał system powłokowy SP3, co świadczy o negatywnym wpływie zastosowanej modyfikacji na jego odporność mechaniczną. Wyniki te wskazują, że odpowiedni dobór materiałów modyfikujących ma istotny wpływ na trwałość eksploatacyjną systemów powłokowych przeznaczonych do zastosowań wojskowych.

6.8. Pomiary przyczepności

Wprowadzenie

Przyczepność systemu powłokowego do podłoża stanowi jeden z kluczowych parametrów decydujących o jego trwałości eksploatacyjnej. Odpowiednia adhezja ogranicza ryzyko odspajania się powłoki w trakcie użytkowania, a tym samym zwiększa skuteczność ochronną i wydłuża czas bezawaryjnej eksploatacji. Do oceny przyczepności stosuje się różne metody, w tym testy mechaniczne i instrumentalne. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych i precyzyjnych technik jest test zarysowania (*scratch test*), umożliwiający określenie wartości siły krytycznej prowadzącej do utraty adhezji systemu powłokowego do podłoża.

Wyniki badań scratch test

W publikacji 10, w części „Adhesion tests”, zaprezentowano przebieg badań przyczepności metodą kontrolowanego zarysowania. W trakcie pomiaru rejestrowano takie parametry jak: siła normalna, siła tarcia oraz głębokość penetracji. Na ich podstawie wyznaczano siłę krytyczną (L_c), uznawaną za miarę adhezji systemu powłokowego do podłoża.

Wyniki zestawiono w tabeli 2 (publikacja 10). Na rysunku 8 przedstawiono zapis z pomiaru adhezji dla systemu maskującego SP2, a na rysunku 9 obraz systemu maskującego SP1 po teście zarysowania, uzyskany za pomocą mikroskopu optycznego Hirox KH-8700.

Analiza danych wykazała, że wszystkie badane systemy powłokowe cechowały się dobrą przyczepnością do stali DC01. Średnie wartości siły krytycznej, obliczone z trzech powtórzeń, mieściły się w zakresie 41,38–46,49 N. Niewielkie rozproszenie wartości wskazuje na wysoką jednorodność i szczelność badanych powłok.

Najlepszą przyczepność uzyskał system maskujący SP3, dla którego średnia siła krytyczna wyniosła 46,49 N. Najniższą przyczepność stwierdzono dla systemu maskującego SP1 (41,38 N), co stanowiło wartość mniejszą o około 11% względem systemu maskującego SP3.

Wszystkie analizowane systemy powłokowe charakteryzowały się dobrą przyczepnością do podłoża stalowego.

- System powłokowy SP3 uzyskał najwyższą wartość siły krytycznej, co potwierdza jego najlepszą adhezję do podłoża.
- System powłokowy SP1 osiągnął najniższą wartość L_c , choć różnice względem pozostałych systemów były nieznaczne.
- System powłokowy SP2 wykazywał parametry pośrednie, wskazujące na równomierną i stabilną przyczepność.

Przeprowadzone badania metodą scratch test potwierdziły, że wszystkie systemy powłokowe zapewniają odpowiedni poziom adhezji do podłoża stalowego. Najwyższą odporność na odspajanie wykazał system powłokowy SP3, natomiast system powłokowy SP1 odznaczał się nieco niższą przyczepnością. Wyniki wskazują, że zastosowane modyfikacje powłok sprzyjają poprawie ich właściwości adhezyjnych, co stanowi istotny element w kontekście ich przyszłych zastosowań w technice wojskowej.

6.9. Badania odporności korozyjnej

Wprowadzenie

Korozja stanowi poważne zagrożenie dla trwałości konstrukcji i urządzeń technicznych, generując wysokie koszty ekonomiczne, ryzyko dla bezpieczeństwa użytkownika oraz negatywny wpływ na środowisko. W celu minimalizacji skutków tego zjawiska stosuje się różne metody ochrony, spośród których szczególną rolę odgrywają powłoki ochronne. Tworzą one barierę fizyczną pomiędzy podłożem a środowiskiem agresywnym, spowalniając lub całkowicie hamując procesy korozyjne.

Ocena skuteczności systemów powłokowych wymaga zastosowania różnorodnych technik badawczych, obejmujących zarówno metody elektrochemiczne, jak i testy symulacyjne. Do podstawowych technik elektrochemicznych należą:

- metoda potencjodynamiczna (LSV),
- spektroskopia impedancyjna (EIS).

Uzupełnieniem są przyspieszone badania w komorach korozyjnych, m.in. w atmosferze mgły solnej zgodnie z normą ISO 9227:2022, pozwalające na symulację długotrwałego oddziaływania środowiska w skróconym czasie.

Wyniki badań

Metoda potencjodynamiczna (LSV)

W publikacji 10, w części „Corrosion resistance tests”, zaprezentowano wyniki badań potencjodynamicznych. Na rysunku 12 przedstawiono krzywe polaryzacyjne badanych systemów powłokowych. Analiza wykazała, że krzywe polaryzacji maskujących systemów powłokowych znajdują się poniżej krzywej polaryzacyjnej stali DC01, co świadczy o ich wyższym potencjale korozyjnym i znacznie niższym prądzie korozji względem podłoża.

W tabeli 4 (publikacja 10) zestawiono charakterystyczne wartości elektrochemiczne. Najwyższą odpornością korozyjną cechował się system powłokowy SP2, dla którego gęstość prądu korozyjnego wyniosła $1,37 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, podczas gdy dla stali podłoża wartość ta osiągnęła $9,82 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Oznacza to wzrost odporności korozyjnej ponad sześciokrotnie w stosunku do materiału wyjściowego. Pozostałe systemy również wykazywały znaczną poprawę właściwości ochronnych w porównaniu do stali DC01.

Spektroskopia impedancyjna (EIS)

Widma impedancyjne uzyskane dla badanych systemów powłokowych oraz podłoża zaprezentowano w publikacji 10 na rysunkach 13–16 w formie wykresów Nyquista. Analiza wykresów (rys. 13–15) ujawniła obecność typowej pętli pojemnościowej oraz dodatkowej pętli indukcyjnej. Jej pojawienie się może wynikać z procesów intensywnego roztwarzania podłoża w obrębie uszkodzonej powłoki, adsorpcji produktów korozji, wydzielania wodoru lub korozji wżerowej.

Dla samego podłoża (rys. 16) wartości oporności były znacznie mniejsze z uwagi na dużą powierzchnię aktywną w porównaniu z powierzchnią powleczoną. Kształt widma był zbliżony do charakterystycznego dla systemu powłokowego dwuwarstwowego. Obecność dodatkowej

pętli pojemnościowej w zakresie niskich częstotliwości wskazuje na powstawanie warstwy produktów korozji, które częściowo ograniczają dalszy rozwój procesów degradacyjnych.

Badania w komorze solnej

Badania korozyjne w komorze solnej przeprowadzono zgodnie z normą ISO 9227:2022 (publikacja 13). Wyniki zestawiono w tabeli 3. W trakcie badań na żadnym z systemów nie stwierdzono zjawisk takich jak: spęcherzenie, rdzewienie, złuszczenie, spękanie czy korozji nitkowej. Stopień skorodowania wokół rysy mieścił się w przedziale 0,8–1,1 mm, natomiast odwarstwienia w zakresie 1,0–1,6 mm.

Na rysunku 3 przedstawiono próbki po badaniu, a na rysunku 4 po usunięciu nieprzylegających fragmentów powłoki i produktów korozji. Analiza wskazała, że najmniejszym odwarstwieniem oraz najniższym stopniem skorodowania charakteryzował się system powłokowy SP3. Systemy powłokowe SP1 i SP2 uzyskały porównywalne wyniki.

W tabeli 4 (publikacja 13) zaprezentowano wyniki połysku przed i po badaniu – system SP3 wykazywał spadek połysku jedynie o 1,2 GU. Zmiany koloru (tabela 5 i rys. 5) były najbardziej wyraźne dla systemu powłokowego SP3 ($\Delta E^*_{ab} = 1,36$). Charakterystyki spektralne (rys. 6–8) ujawniły, że systemy powłokowe SP1 i SP2 uległy jedynie nieznacznym zmianom, podczas gdy system powłokowy SP3 wykazał największe różnice, szczególnie w zakresie bliskiej podczerwieni (750–1200 nm), gdzie reemisja była niższa o około 5%.

Przeprowadzone badania odporności korozyjnej potwierdziły skuteczność wszystkich analizowanych systemów powłokowych w ochronie stali DC01.

- System powłokowy SP2 – uzyskał najlepsze parametry elektrochemiczne w badaniach potencjodynamicznych (najniższy prąd korozji), co wskazuje na wysoką skuteczność ochronną.
- System powłokowy SP3 – w badaniach w komorze starzeniowej system powłokowy SP3 charakteryzował się najmniejszym odwarstwieniem i skorodowaniem wokół rysy, choć równocześnie wykazywał największe zmiany barwy i charakterystyk spektralnych.
- System powłokowy SP1 – prezentował wyniki pośrednie, porównywalne do systemu powłokowego SP2 w badaniach w komorze solnej, lecz mniej korzystne w badaniach elektrochemicznych.

Wszystkie systemy znacząco zwiększały odporność korozyjną w stosunku do materiału podłoża.

Badania wykazały, że analizowane systemy powłokowe skutecznie chronią stal DC01 przed procesami korozyjnymi. Najlepsze właściwości elektrochemiczne uzyskał system powłokowy SP2, natomiast system powłokowy SP3 zapewniał największą stabilność w badaniach komorowych. Wyniki potwierdzają, że odpowiednia modyfikacja systemów powłokowych pozwala uzyskać wysoki poziom odporności korozyjnej, co ma kluczowe znaczenie dla ich potencjalnych zastosowań w technice wojskowej.

6.10. Badania odporności na starzenie w komorach świetlnych

Trwałość eksploatacyjna systemów powłokowych w znacznym stopniu zależy od oddziaływania czynników atmosferycznych, takich jak zmienne temperatury, wahania wilgotności względnej powietrza, opady atmosferyczne czy intensywność promieniowania słonecznego. Aby ocenić odporność powłok na tego typu obciążenia środowiskowe, stosuje się dwa zasadnicze podejścia badawcze:

- **badania poligonowe (ekspozycja naturalna)** – charakteryzują się wysokim realizmem i prostotą wykonania, jednak wymagają długiego czasu trwania oraz nie zawsze odzwierciedlają wszystkie możliwe warunki eksploatacyjne;
- **badania przyspieszone w komorach starzeniowych** – prowadzone w ściśle kontrolowanych warunkach (temperatura, wilgotność, natężenie i charakterystyka promieniowania). Choć nie w pełni odwzorowują rzeczywiste warunki środowiskowe, umożliwiają uzyskanie wyników w znacznie krótszym czasie, zapewniają powtarzalność pomiarów oraz pozwalają na porównywanie trwałości różnych systemów powłokowych.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki badań odporności trzech systemów powłokowych (SP1, SP2, SP3) na procesy starzeniowe, przeprowadzonych w różnych komorach świetlnych (UV-A, UV-B, lampa ksenonowa), a także w warunkach naturalnej ekspozycji atmosferycznej. Analizie poddano przede wszystkim zmiany połysku, barwy oraz charakterystyk spektralnych w kolejnych etapach narażeń.

Badania w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-A

W publikacji 14, w części „Badanie w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-A”, przedstawiono cykl ekspozycji (tabela 1) oraz charakterystykę widmową lamp w porównaniu z promieniowaniem słonecznym (rys. 3). Wyniki połysku po 0, 1500 i 3000 godzinach ekspozycji zaprezentowano w tabeli 4, natomiast zmiany barwy w tabeli 5 i na rysunku 6. Charakterystyki spektralne systemów powłokowych przedstawiono na rysunkach 7–9.

Analiza wyników wykazała, że po 1500 godzinach połysk wszystkich systemów wzrósł średnio o 1 GU, przy czym największe zmiany odnotowano dla systemów powłokowych SP1 i SP2. Po 3000 godzin ekspozycji przyrost połysku dla systemów powłokowych SP1 i SP2 wynosił 5–6 GU, a dla systemu powłokowego SP3 około 3 GU. Zmiany barwy po 1500 godzinach były niewielkie ($\Delta E^*_{ab} < 1$), a najmniejsze wartości uzyskano w systemie z dodatkiem mikrosfer szklanych. Po 3000 godzin największą zmianę koloru odnotowano dla systemu powłokowego SP2 ($\Delta E^*_{ab} = 2,10$), mniejszą dla systemu powłokowego SP1 ($\Delta E^*_{ab} = 1,52$), a najmniejszą dla systemu powłokowego SP3 ($\Delta E^*_{ab} = 1,30$). We wszystkich przypadkach (rys. 7–9) zmiany w widmach spektralnych mieściły się w wymaganiach normy obronnej dla koloru zielonego.

Badania w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-B

W części „Badanie w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-B” (publikacja 14) zaprezentowano cykl ekspozycji (tabela 2) oraz charakterystyki widmowe lamp (rys. 4). Wyniki połysku po 0, 500 i 1000 godzinach ekspozycji przedstawiono w tabeli 6, a zmiany barwy w tabeli 7 i na rys. 10. Charakterystyki spektralne zamieszczono na rys. 11–13.

Stwierdzono, że po 500 godzinach zmiana połysku wszystkich systemów wyniosła maksymalnie 2 GU. Po 1000 godzin wartość połysku wzrosła o około 4 GU dla systemów lakierniczych SP1 i SP2, natomiast dla systemu lakierniczego SP3 jedynie o 1,5 GU. Zmiany koloru były najmniejsze dla systemu powłokowego SP1 ($\Delta E^*_{ab} = 0,45$) i SP2 ($\Delta E^*_{ab} = 0,67$). Największą różnicę barwy wykazywał system lakierniczy SP3 – zarówno po 500, jak i po 1000 godzinach. Mimo obserwowanych różnic, w każdym przypadku zmiany spektralne mieściły się w dopuszczalnym zakresie normy obronnej dla koloru zielonego.

Badania w komorze starzeniowej z lampą ksenonową

W części „Badanie w komorze starzeniowej z lampą ksenonową” (publikacja 14) zaprezentowano cykl ekspozycji (tabela 3) oraz charakterystykę promieniowania lampy i filtra w porównaniu z widmem naturalnym (rys. 5). Wyniki połysku po 0, 1000 i 2000 godzinach przedstawiono w tabeli 8, a zmiany koloru w tabeli 9 i na rys. 14. Charakterystyki spektralne systemów powłokowych pokazano na rys. 15–17.

Po 1000 i 2000 godzinach ekspozycji nie stwierdzono istotnych różnic połysku badanych powłok. Zmiana koloru po 1000 godzinach była największa dla systemu powłokowego SP1 ($\Delta E^*_{ab} = 0,85$), a najmniejsza dla systemu powłokowego SP2 ($\Delta E^*_{ab} = 0,24$). Po 2000 godzin ekspozycji największe zmiany barwy wystąpiły w systemie powłokowym SP1, a najmniejsze

w systemie powłokowym SP3 ($\Delta E^*_{ab} = 0,40$). Widma reflektancji po 1000 godzinach nie wykazywały istotnych odchyżeń, natomiast po 2000 godzinach zaobserwowano zmiany dla systemów maskujących SP1 i SP2 w zakresie 350–700 nm. System powłokowy SP3 charakteryzował się najmniejszą zmianą reemisji.

Badania w warunkach naturalnej ekspozycji atmosferycznej

W części „Badanie w naturalnych warunkach atmosferycznych” (publikacja 14) opisano lokalizację i sposób rozmieszczenia próbek, okres badań oraz charakterystykę warunków klimatycznych (temperatura minimalna, maksymalna i średnia, średnia wilgotność, czas zawilgocenia, średnioroczna energia promieniowania UV-A). Wyniki połysku po 0, 12 i 24 miesiącach ekspozycji przedstawiono w tabeli 10, a zmiany barwy w tabeli 11 i na rysunku 18. Charakterystyki spektralne systemów powłokowych pokazano na rysunkach 19–21.

Po dwóch latach ekspozycji systemów maskujących SP1 i SP2 wykazywały przyrost połysku o około 1 GU, natomiast system maskujący SP3 nie zmienił swojej wartości. Po roku zmiana koloru dla systemów maskujących SP1 i SP2 wyniosła około $\Delta E^*_{ab} = 0,5$, a najmniejszą odnotowano dla systemu maskującego SP3 ($\Delta E^*_{ab} = 0,14$). Drugi rok badań nie przyniósł znaczących dodatkowych zmian. W analizie widm reflektancji nie stwierdzono istotnych różnic w przebiegu charakterystyk spektralnych systemów maskujących SP1–SP3 w całym okresie dwuletniej ekspozycji.

Przeprowadzone badania odporności na starzenie wykazały, że zastosowane systemy powłokowe różnią się stabilnością właściwości optycznych w zależności od rodzaju oddziaływania promieniowania i warunków ekspozycji. Największą odpornością na zmiany połysku i barwy w badaniach laboratoryjnych oraz w warunkach atmosferycznych odznaczał się system powłokowy SP3 modyfikowany mikrosferami szklanymi. Wyniki te potwierdzają zasadność stosowania dodatków modyfikujących w celu poprawy trwałości eksploatacyjnej powłok maskujących przeznaczonych do zastosowań wojskowych.

6.11. Badania poligonowe skuteczności maskowania

Celem badania była ocena skuteczności maskowania sprzętu wojskowego w naturalnym środowisku działania w dwóch zakresach rozpoznania:

- w bliskiej podczerwieni – NIR – przy długości fali powyżej 850 nm;
- w noktowizji.

Badania wykonano dla maskującego systemu powłokowego SP3. Wybór systemu SP3 był podyktowany korzystnymi wynikami badań laboratoryjnych.

6.11.1. Badanie metodą naziemną na zobrazeniach wykonanych przy użyciu aparatu fotograficznego

W ramach przeprowadzonych badań terenowych uzyskano zobrazenia badanego sektora, w którym umieszczony został oceniany sprzęt wojskowy.

Zobrazowania wykonywano w skali 1:10 000. Aby uzyskać właściwe odwzorowanie tej skali, należało określić dystans pomiędzy aparatem a obiektem na podstawie parametrów optycznych zastosowanego sprzętu: ogniskowej obiektywu i wielkości matrycy światłoczułej. W celu określenia odległości od obserwowanego obiektu z jakiej należy posłużyć się wzorem 6.1:

$$L = \frac{10\,000 * Oo}{1\,000} * W_f \quad (6.1)$$

gdzie:

L – odległość od obserwowanego obiektu z jakiej należy wykonać zobrazenia, m,

Oo – ogniskowa obiektywu aparatu, mm,

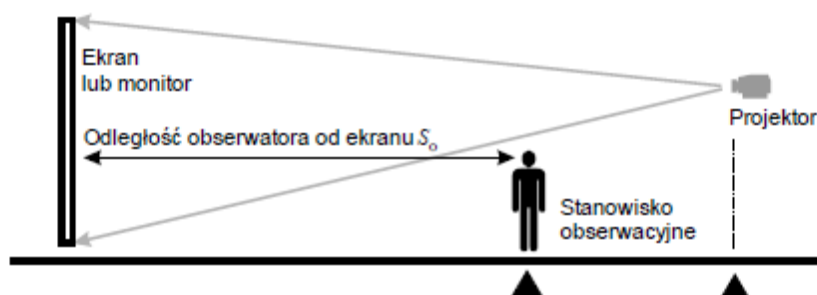
W_f – współczynnik przeliczeniowy efektywnej ogniskowej dla aparatu (dla formatu małego obrazka wynosi 1).

Dla zastosowanego w badaniach przetwornika (matrycy) o wymiarach 36 mm × 24 mm (pełnoklatkowego) i przy użytego obiektywu o ogniskowej 50 mm ustalono dystans zdjęciowy na 500 m.

Do rejestracji obrazu wykorzystano cyfrowy aparat fotograficzny Canon EOS 5D o rozdzielczości 5616x3744 pikseli ze stałogniskowym obiektywem 50mm Canon 50 mm f/1.2 L EF USM. Zastosowano filtr podczerwony Hoya IR85N przepuszczający promieniowanie o długości powyżej 850 nm.

Ocena uzyskanych zdjęć prowadzona była w warunkach laboratoryjnych, przy wykorzystaniu odpowiednio przygotowanego stanowiska do prezentacji obrazów wyposażonego w skalibrowany projektor multimedialny, ekran o wysokiej odbijalności oraz komputer sterujący. Kluczowe było odtworzenie warunków obserwacji odpowiadających sytuacji terenowej z odległości 1000 metrów. W tym celu zastosowano ekran o przekątnej 277 cm, a odległość obserwatora wynosiła 6,67 m. Współczynnik ten zapewnił proporcjonalność między fizyczną wielkością wyświetlanego obrazu a symulowaną

odległością obserwacji. Na rysunku 7 przedstawiono schemat stanowiska do wykonywania obserwacji w oparciu o zobrazenia.



Rysunek 7. Schemat stanowiska do wykonywania obserwacji w oparciu o zobrazenia [44]

Dla zadanych parametrów zobrazenia i ekranu, aby wyznaczyć odległość obserwatora od ekranu lub monitora dla stanowiska obserwacyjnego należy posłużyć się zależnością 6.2:

$$S_0 = 2,3 * pE \quad (6.2)$$

gdzie:

S_0 – odległość stanowiska obserwacyjnego od ekranu lub monitora, m,

pE – przekątna zobrazenia wyświetlanego na ekranie lub monitorze, m.

Do badania wykorzystano trzech niezależnych obserwatorów, z których każdy oceniał zdjęcia samodzielnie, bez kontaktu z pozostałymi uczestnikami badania. Osoby analizujące zobrazenia nie były informowane o rodzaju ani liczbie sprzętu znajdującego się w sektorze, co miało na celu eliminację uprzedzeń oraz zapewnienie obiektywności wyników. Zadaniem obserwatorów była ocena skuteczności maskowania sprzętu polegająca na wskazaniu jego lokalizacji oraz stopnia widoczności w powszechnie stosowanej skali:

- Brak widoczności (B) – braku obecności obiektu o potencjalnym znaczeniu wojskowym w obszarze prowadzenia obserwacji;
- Wykrycie (D) – obecności obiektu o potencjalnym znaczeniu wojskowym w obszarze prowadzenia obserwacji (odkrycie czegoś, co potencjalnie może być źródłem zainteresowania obserwatora);
- Rozpoznanie (R) – wykryty obiekt to konkretny typ m.in. człowiek, kołowy transporter rozpoznania, ciężki pojazd gąsienicowy (czołg), pokrycie maskujące;
- Identyfikacja (I) – Rozpoznany obiekt to konkretny typ obiektu m.in. człowiek to żołnierz, KTO to Rosomak, czołg to T-72, pokrycie maskujące to Berberys (możliwość wyróżnienia wzoru kamuflażu).

Przeprowadzona procedura badawcza pozwala na ocenę skuteczności różnych form maskowania sprzętu wojskowego w warunkach rzeczywistych. Zastosowanie fotograficznych zobrażeń wykonywanych z zachowaniem rygorystycznych parametrów skali i jakości obrazu umożliwia wiarygodną analizę wykrywalności obiektów w różnych warunkach oświetleniowych. Metoda ta znajduje zastosowanie m.in. w ocenie skuteczności kamuflażu i planowaniu działań taktycznych w oparciu o dane obrazowe.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładową fotografię podlegającą ocenie skuteczności maskowania.



Rysunek 8. Fotografia obiektu z filtrem podczerwieni 850 nm

Badanie skuteczności maskowania obiektu przed rozpoznaniem optycznym na zobrazeniach przy pomocy aparatu fotograficznego dla systemu powłokowego SP3:

- na zdjęciu w skali 1:10 000 – obiekt nie został rozpoznany.
- na zdjęciu w skali 1:10 000 z filtrem podczerwieni – obiekt nie został rozpoznany.

Analizując wyniki badania skuteczności maskowania metodą naziemną na zobrazeniach stwierdzono, że obiekt pokryty badanym systemem maskującym SP3 nie został rozpoznany co świadczy o skutecznym maskowaniu zastosowanego systemu powłokowego.

6.11.2. Badanie metodą naziemną z użyciem noktowizji

Badanie przeprowadzono w warunkach ograniczonego oświetlenia 0,005 lx, przy zapewnionej dobrej widoczności, tj. bez obecności mgły oraz opadów atmosferycznych.

Badanie wykonano w następujący sposób:

- W obserwacji uczestniczyło trzech badaczy, którzy dokonywali oceny przy użyciu urządzenia noktowizyjnego opartego na wzmacniaczu obrazu trzeciej generacji (GEN III). Sprzęt charakteryzował się jednokrotnym powiększeniem ($1\times$) oraz rozdzielczością na poziomie 64 linii na milimetr (lp/mm).
- W sektorze, w którym prowadzono obserwację, wyznaczono linie odniesienia (rubieże), rozmieszczone co 50 metrów w kierunku obiektów podlegających rozpoznaniu. Dodatkowo precyzyjnie określono granice sektora obserwacyjnego. Informacje te zostały przekazane osobom prowadzącym obserwację przed rozpoczęciem badania.
- Przed przystąpieniem do badania uczestnicy nie byli zaznajomieni z typem sprzętu poddawanego rozpoznaniu, co miało na celu ograniczenie wpływu uprzedniej wiedzy na wynik badania.
- Obserwacja (ocena widoczności sprzętu) rozpoczynała się z dystansu 500 metrów od obiektu. Następnie następowało przemieszczenie się obserwatorów o 50 metrów w kierunku obiektu na kolejną rubież. Na każdej rubieży obserwator dokonywał obserwacji i notował stopień widoczności sprzętu zgodnie ze skalą: B – brak widoczności, W – wykrycie, R – rozpoznanie, I – identyfikacja. Obserwacja i notowanie trwało nie dłużej niż 2 minuty. Obserwację prowadzono do minimalnej odległości 50 m.
- Ostateczny wynik badania wyrażono jako średnią odległość rozpoznania danego obiektu ($R_{\acute{s}r}$), wyliczoną zgodnie z przyjętym wzorem 6.3:

$$R_{\acute{s}r} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{oi}}{n} \quad (6.3)$$

gdzie:

$R_{\acute{s}r}$ – średnia odległość rozpoznania sprzętu, m,

R_{oi} – odległość rozpoznania sprzętu przez i -tego obserwatora, m,

n – liczba obserwatorów.

Na rysunku 9 przedstawiono zdjęcie z obiektywu użytego noktowizora podczas wykonywania badania.



Rysunek 9. Obraz z noktowizora uzyskany podczas badań poligonowych

Badanie skuteczności maskowania obiektu przed rozpoznaniem optycznym z użyciem noktowizji dla systemu powłokowego SP3 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badania z użyciem noktowizora

Odległość obserwatorów od obiektu	Wynik obserwacji		
	Obserwator 1	Obserwator 2	Obserwator 3
500 m	Brak widoczności	Brak widoczności	Brak widoczności
450 m	Brak widoczności	Brak widoczności	Brak widoczności
400 m	Brak widoczności	Brak widoczności	Brak widoczności
350 m	Brak widoczności	Brak widoczności	Brak widoczności
300 m	Brak widoczności	Brak widoczności	Brak widoczności
250 m	Brak widoczności	Brak widoczności	Brak widoczności
200 m	Wykrycie i rozpoznanie	Brak widoczności	Wykrycie i rozpoznanie
150 m	Rozpoznanie	Wykrycie i rozpoznanie	Rozpoznanie
100 m	Identyfikacja	Identyfikacja	Identyfikacja
50 m	Identyfikacja	Identyfikacja	Identyfikacja

Analizując wyniki badania skuteczności maskowania metodą naziemną z użyciem noktowizji stwierdzono, że obiekt pokryty badanym systemem maskującym SP3 charakteryzował się średnią odległością rozpoznania R_{sr} równą 183 metry co świadczy o skutecznym maskowaniu zastosowanego systemu powłokowego.

7. Opracowanie za pomocą metodyki DoE modelu procesu nanoszenia lakierniczego systemu powłokowego

Wprowadzenie

Proces technologiczny można zdefiniować jako sekwencję celowych działań, w których wykorzystuje się określone narzędzia oraz materiały w celu osiągnięcia zaplanowanego rezultatu – wytworzenia produktu będącego samodzielnym wyrobem bądź elementem większej całości. W dalszej części pracy rozpatrywany jest przypadek dotyczący otrzymania lakierniczego systemu powłokowego, której właściwości ilościowe muszą odpowiadać określonym wymaganiom użytkowym. Ze względu na fakt, iż proces nakładania powłok obejmuje jednocześnie zjawiska natury fizycznej i chemicznej, kluczowe staje się określenie, które z parametrów technologicznych w największym stopniu determinują charakterystykę końcowej powłoki będącej przedmiotem analizy. Kolejnym etapem jest wskazanie takich wartości tych parametrów, które zapewnią optymalne warunki prowadzenia procesu. Z uwagi na znaczną czasochłonność i koszty związane z przeprowadzaniem badań doświadczalnych oraz późniejszymi analizami laboratoryjnymi, konieczne jest wykorzystanie metody badawczej pozwalającej na redukcję nakładów czasowych i finansowych przy jednoczesnym zachowaniu wiarygodności oraz obiektywności uzyskiwanych wyników. Narzędziem spełniającym te kryteria jest planowanie doświadczeń (*design of experiments*), znane także jako teoria eksperymentu, szeroko opisane zarówno w literaturze anglojęzycznej [16, 21, 25, 26, 35, 41, 56], jak i krajowej [24, 30, 36, 49, 53].

Metodyka

Część doświadczalna była prowadzona według metodyki planowania eksperymentu (*DoE* – *Design of Experiments*) w wariacie metodyki powierzchni odpowiedzi (*RSM* – *Response Surface Methodology*). Przyjęto trzy czynniki kontrolowane (*factors*): ciśnienie materiału lakierniczego (oznaczenie X1), średnicę dyszy (oznaczenie X2) oraz czas odparowania (oznaczenie X3). Dla czynnika X1 ustalono trzy wartości nastaw (*levels*), natomiast dla czynników X2 i X3 po dwie wartości nastaw, które pokazane są w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości nastaw czynników kontrolowanych

Czynnik kontrolowany			Wartości rzeczywiste poziomów kodowanych		
Opis	J.m.	Oznaczenie	-1	0	+1
Ciśnienie materiału lakierniczego	bar	X1	2,0	2,5	3,0
Średnica dyszy	mm	X2	1,4	–	1,6
Czas odparowania	min	X3	5	–	15

Do badań przygotowano próbki ze stali niskowęglowej DC01 o wymiarach 75 mm x 100 mm x 1 mm, następnie odtłuszczono je zmywaczem przemysłowym XPA10006 w celu usunięcia zanieczyszczeń powierzchniowych. Kolejną operacją było szlifowanie mechaniczne papierem ściernym o gradacji P80 przy użyciu szlifierki oscylacyjnej w celu uzyskania odpowiedniej chropowatości powierzchni, następnie ponownie odtłuszczono z użyciem zmywacza XPA10006. Na tak przygotowane próbki został naniesiony podkład epoksydowy pod farby maskujące BP450-1000/N przy wykorzystaniu natrysku pneumatycznego pistoletem firmy SATA. Po aplikacji warstwy podkładowej próbki zostały wygrzane 60 minut w temperaturze 60°C i pozostawione 16 godzin w temperaturze 22°C. Następnie została nałożona farba BW400-6031 zmodyfikowana mikrosferami szklanymi w udziale masowym mikrosfer wynoszącym 2,4% przy użyciu natrysku pneumatycznego pistoletem firmy SATA z wykorzystaniem wartości nastaw czynników kontrolowanych (tabela 3). Następnie próbki zostały wygrzane 60 minut w temperaturze 60°C i sezonowane przez 21 dni w temperaturze $23 \pm 1^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $50 \pm 5\%$.

Wielkościami obserwowanymi były grubość warstwy (d), połysk (GU85), twardość mierzona wahadłem Koeniga (HK) oraz parametry chropowatości powierzchni (R_a i R_z). Badania eksperymentalne przeprowadzono według planu doświadczenia kompletnego (*full factorial experimental design*) z trzykrotną replikacją pomiarów (*triplicate*). Struktura planu pokazana jest w tabeli 4.

Tabela 4. Struktura planu doświadczenia

Nr testu	X1	X2	X3
1	2,0	1,4	5
2	2,0	1,4	15
3	2,0	1,6	5
4	2,0	1,6	15
5	2,5	1,4	5
6	2,5	1,4	15
7	2,5	1,6	5
8	2,5	1,6	15
9	3,0	1,4	5
10	3,0	1,4	15
11	3,0	1,6	5
12	3,0	1,6	15

Identyfikację modeli prognostycznych dla wielkości obserwowanych przeprowadzono zgodnie z metodyką RSM wychodząc od początkowej struktury modelu liniowego z interakcjami dwuczynnikowymi uzupełnionego o człon kwadratowy względem czynnika X1. Z modelu usuwano składniki nieistotne statystycznie realizując regresję krokową wsteczną. Po uzyskaniu modelu z wszystkimi składnikami statystycznie istotnymi przeprowadzono analizę wariancji oraz test normalności reszt.

W tabeli 5 i 6 przedstawiono wyniki pomiarów.

Tabela 5. Wyniki pomiarów grubości, połysku i twardości dla systemu powłokowego SP3

	Grubość, μm					Połysk, GU	Wahadło Koenig, s			
	n	Min	Max	\bar{x}	σ	85°	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średni czas tłumienia
01-1	6	124	146	138,7	8,29	4,4	36	33	35	48,5
02-1	6	130	145	138,8	5,85	4,3	35	35	36	49,5
03-1	6	131	145	139,7	4,97	4,5	38	35	36	50,9
04-1	6	153	161	155,7	3,08	5,5	33	35	34	47,6
05-1	6	138	154	146,8	6,77	4,2	35	30	36	47,1
06-1	6	133	147	141,8	5,27	4,6	34	38	36	50,4
07-1	6	140	155	147,0	5,40	5,2	34	36	32	47,6
08-1	6	138	153	145,7	5,89	5,1	35	32	36	48,1
09-1	6	140	147	144,0	2,45	3,9	34	35	34	48,1
10-1	6	137	147	142,8	4,07	4,3	35	35	37	49,9
11-1	6	146	161	154,5	5,54	4,6	35	36	35	49,5
12-1	6	152	165	156,2	5,19	5,5	31	37	33	47,1

Ciąg dalszy Tabeli 5

	Grubość, μm					Polysk, GU	Wahadło Koenig, s			
	n	Min	Max	\bar{x}	σ	85°	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średni czas tłumienia
01-2	6	136	154	142,7	7,03	4,2	34	38	35	49,9
02-2	6	146	163	153,0	6,51	4,5	39	31	36	49,5
03-2	6	142	154	147,8	4,96	4,7	35	36	34	49,0
04-2	6	138	149	142,2	4,62	5,1	36	37	35	50,4
05-2	6	138	153	144,8	5,04	4,0	37	36	37	51,3
06-2	6	135	143	138,8	3,06	3,9	34	37	37	50,4
07-2	6	138	150	142,8	4,40	4,5	36	38	32	49,5
08-2	6	152	166	166,0	5,47	5,3	36	37	31	48,5
09-2	6	135	152	140,7	6,25	3,7	36	35	38	50,9
10-2	6	144	156	149,7	5,09	4,3	33	32	34	46,2
11-2	6	144	153	146,2	3,54	4,3	35	33	36	48,5
12-2	6	146	170	159,2	10,6	4,9	31	37	35	48,1
01-3	6	141	152	146,2	3,66	3,7	36	38	38	52,3
02-3	6	136	147	140	3,95	4,2	40	40	37	54,6
03-3	6	146	157	148,3	4,32	4,8	37	33	34	48,5
04-3	6	147	160	152,2	4,67	5,7	35	37	37	50,9
05-3	6	125	138	131,7	5,65	3,4	38	36	39	52,7
06-3	6	129	150	139,7	7,99	4,6	35	35	36	49,5
07-3	6	129	147	142,7	6,89	4,8	33	37	39	50,9
08-3	6	141	155	148	5,22	5,1	38	34	35	49,9
09-3	6	137	147	141,5	3,99	3,5	33	38	36	49,9
10-3	6	136	146	141,7	4,23	4,4	35	34	32	47,1
11-3	6	143	168	158,3	10,6	4,8	34	37	42	52,7
12-3	6	146	168	160,7	7,74	5,9	36	32	37	49,0

Tabela 6. Wyniki pomiarów chropowatości dla systemu powłokowego SP3

	Chropowatość, μm							
	<i>Ra</i> - odcinek pomiarowy 2,5 mm				<i>Rz</i> - odcinek pomiarowy 12,5 mm			
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średnia z pomiarów	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średnia z pomiarów
01-1	3,160	3,127	3,305	3,197	20,328	19,702	19,810	19,947
02-1	3,344	3,018	3,236	3,199	19,445	16,945	19,698	18,696
03-1	2,913	3,612	3,140	3,222	17,700	25,173	20,311	21,061
04-1	2,944	2,795	2,626	2,788	16,855	16,854	16,729	16,813
05-1	3,571	2,916	3,380	3,289	21,516	18,913	19,783	20,071
06-1	3,040	2,700	2,814	2,851	18,510	16,646	17,424	17,527

Ciąg dalszy tabeli 6

	Chropowość, μm							
	<i>Ra</i> - odcinek pomiarowy 2,5 mm				<i>Rz</i> - odcinek pomiarowy 12,5 mm			
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średnia z pomiarów	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Średnia z pomiarów
07-1	3,235	2,877	3,521	3,211	18,873	18,055	22,239	19,722
08-1	3,141	2,979	2,848	2,989	21,289	19,249	17,896	19,478
09-1	3,417	3,185	3,323	3,308	20,527	19,169	21,630	20,442
10-1	3,211	2,972	3,207	3,130	20,045	18,822	20,543	19,803
11-1	3,466	3,661	3,109	3,412	20,674	23,670	19,700	21,348
12-1	3,022	2,516	3,001	2,846	17,653	15,759	17,702	17,038
01-2	3,314	2,987	3,084	3,128	20,817	18,235	20,222	19,758
02-2	3,900	2,911	3,052	3,288	23,763	17,219	19,479	20,154
03-2	3,321	3,510	3,482	3,438	20,854	18,460	22,807	20,707
04-2	2,811	2,775	2,842	2,809	17,925	16,988	19,151	18,021
05-2	3,327	3,461	3,026	3,271	20,119	21,194	19,911	20,408
06-2	3,346	3,051	3,062	3,153	20,839	18,326	20,961	20,042
07-2	3,019	2,762	3,255	3,012	18,003	17,901	17,701	17,868
08-2	2,677	3,077	2,985	2,913	16,856	18,018	17,950	17,608
09-2	3,355	3,429	3,786	3,523	21,649	21,041	22,275	21,655
10-2	2,846	3,088	4,946	3,627	17,379	20,000	26,556	21,312
11-2	3,254	2,941	3,269	3,155	19,389	18,579	21,120	19,696
12-2	3,121	2,801	2,858	2,927	19,743	18,248	18,551	18,847
01-3	3,603	3,500	3,208	3,437	22,761	21,542	20,255	21,519
02-3	3,402	3,118	3,457	3,326	20,423	18,582	22,427	20,477
03-3	3,105	3,494	2,649	3,083	18,179	19,725	15,644	17,849
04-3	3,191	2,911	3,000	3,034	19,334	17,946	18,588	18,623
05-3	3,101	3,405	3,560	3,355	18,208	20,861	23,092	20,720
06-3	3,034	2,704	3,304	3,014	17,965	16,550	18,946	17,820
07-3	2,785	2,847	2,847	2,826	16,734	16,690	16,690	16,705
08-3	2,912	3,076	2,988	2,992	18,713	19,278	19,148	19,046
09-3	3,492	3,470	3,653	3,538	20,771	21,414	22,462	21,549
10-3	3,162	3,350	3,172	3,228	21,682	22,778	18,429	20,963
11-3	3,094	3,073	2,745	2,971	19,075	18,850	17,595	18,507
12-3	3,175	2,653	3,152	2,993	18,808	16,792	18,960	18,187

Analiza wyników

Grubość

Wyjściową formą modelu była postać liniowa z członem kwadratowym względem X1 oraz z interakcjami dwuczynnikowymi. Po przeprowadzonej identyfikacji parametrów (tabela 7) większość parametrów okazała się statystycznie nieistotna.

Tabela 7. Parametry wyjściowego modelu predykcyjnego dla grubości (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	144,65	1,590	90,93	0,00
X1	2,090	1,120	1,86	0,07
X2	4,161	0,918	4,53	0,00
X3	1,883	0,918	2,05	0,05
X1*X1	2,880	1,950	1,48	0,15
X1*X2	2,010	1,120	1,79	0,09
X1*X3	0,270	1,120	0,24	0,81
X2*X3	1,372	0,918	1,49	0,15

Po sekwencyjnej redukcji metodą regresji wstecznej składników nieistotnych statystycznie ostateczny model uzyskał formę liniową zależną tylko od czynnika X2 (tabela 8).

Tabela 8. Parametry docelowego modelu prognostycznego dla grubości (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	146,57	1,04	141,4	0,00
X2	4,16	1,04	4,0	0,00

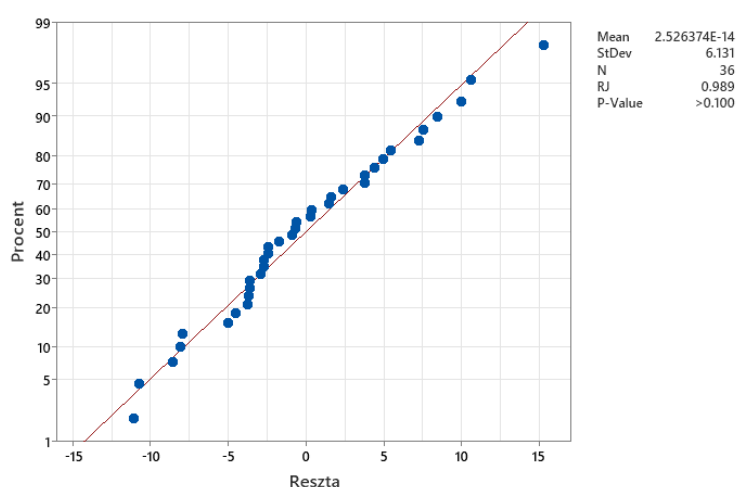
Współczynnik determinacji uzyskanego modelu miał niską wartość $R^2 = 0,32$, co sygnalizowało znaczny wpływ czynników niekontrolowanych, widoczny także w rozrzutach wartości wewnątrz replikacji pomiarów.

Analiza wariancji dla tak uzyskanego modelu pokazała (tabela 9), że dokładność prognostyczna modelu nie odbiega znacząco od błędu czystego (*pure error*), gdyż brak dopasowania (*lack-of-fit*) jest statystycznie nieistotny.

Tabela 9. Analiza wariancji docelowego modelu prognostycznego dla grubości

Składnik modelu	df	SS	MS	F	p
X2	1	623,3	623,3	16,1	0,00
Error	34	1315,8	38,7	-	-
lack-of-fit	10	489,8	49,0	1,42	0,23
pure error	24	826,0	34,4	-	-
Total	35	1939,1	-	-	-

Test normalności reszt dla modelu docelowego wykazał zgodność z rozkładem normalnym (rysunek 10).

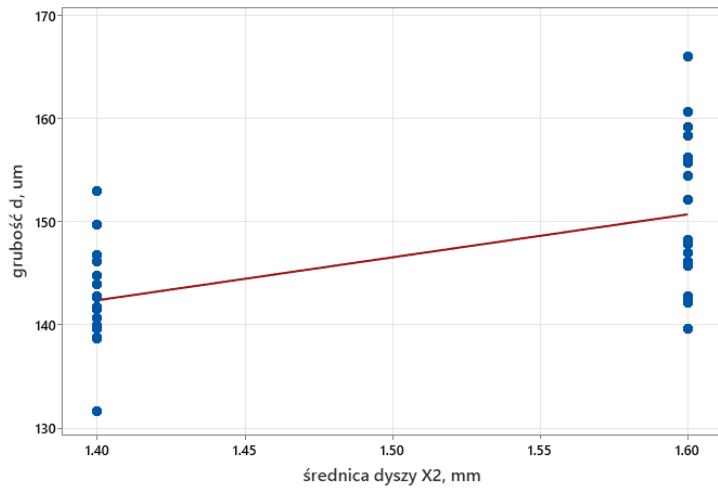


Rysunek 10. Test normalności reszt docelowego modelu prognostycznego dla grubości

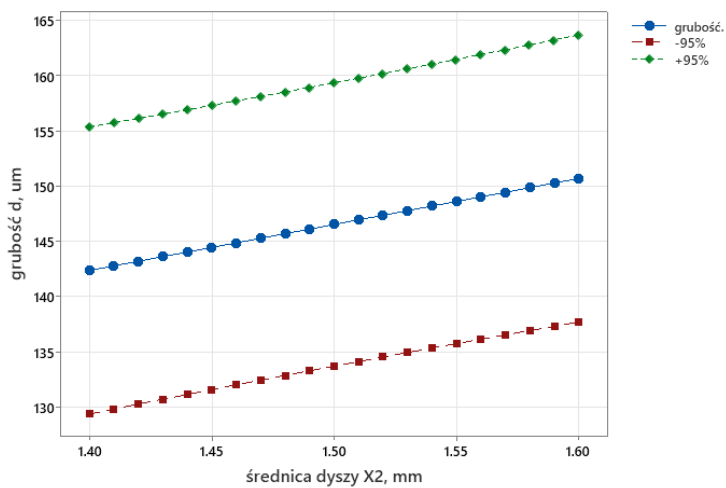
Ostateczna postać modelu prognostycznego dla grubości wyrażona poprzez czynnik rzeczywisty ma postać:

$$d = 84,2 + 41,6 * X2 \quad (7.1)$$

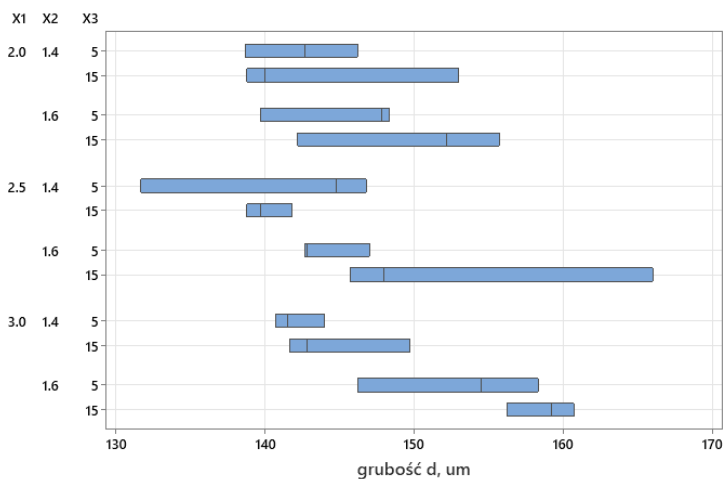
Rozrzut wyników pomiarowych względem modelu prognostycznego pokazuje silny wpływ czynników niekontrolowanych (rysunek 11), co odzwierciedla się w stosunkowo szerokim pasmie ufności modelu prognostycznego (rysunek 12). Rozrzuty w poszczególnych układach planu doświadczenia oraz ich zmienność są pokazana na rysunku 13. Jakkolwiek test Levena nie wykazał statystycznie istotnych różnic pomiędzy wariancjami w poszczególnych układach, to wykres wyraźnie wskazuje na lepszą stabilność w schematach (2,5; 1,4; 15) oraz (3,0; 1,4; 5), natomiast najgorsza stabilność grubości wykazywana jest dla schematu (2,5; 1,6; 15).



Rysunek 11. Wyniki pomiarów oraz docelowy model prognostyczny dla grubości



Rysunek 12. Docelowy model prognostyczny dla grubości wraz z pasmem ufności 95%



Rysunek 13. Rozrzuty w poszczególnych replikacjach układów planu doświadczenia

Połysk

Wyjściową formą modelu była postać liniowa z członem kwadratowym względem X1 oraz z interakcjami dwuczynnikowymi. Po przeprowadzonej identyfikacji parametrów (tabela 10) większość parametrów okazała się statystycznie nieistotna.

Tabela 10. Parametry wyjściowego modelu predykcyjnego dla połysku (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	4,56	0,09	53,06	0,00
X1	-0,06	0,06	-1,03	0,31
X2	0,45	0,05	9,07	0,00
X3	0,28	0,05	5,60	0,00
X1*X1	0,01	0,11	0,12	0,91
X1*X2	0,038	0,061	0,62	0,54
X1*X3	0,063	0,061	1,03	0,31
X2*X3	0,050	0,050	1,01	0,32

Po sekwencyjnej redukcji metodą regresji wstecznej składników nieistotnych statystycznie ostateczny model uzyskał formę liniową zależną od czynników X2 i X3 (tabela 11).

Tabela 11. Parametry docelowego modelu prognostycznego dla połysku (czynniki kodowane)

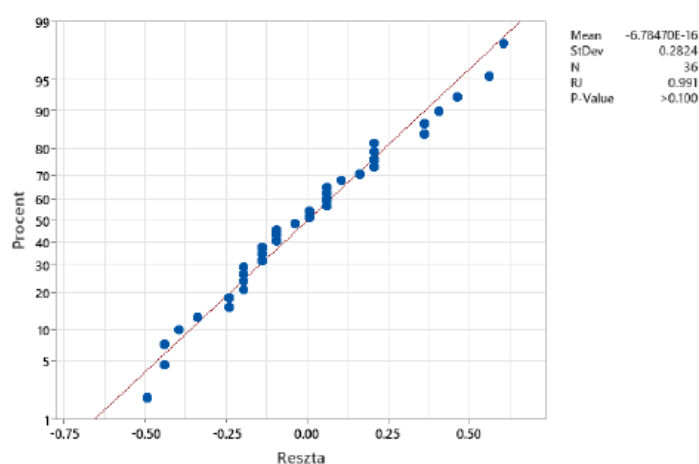
Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	4,57	0,05	94,20	0,00
X2	0,45	0,05	9,28	0,00
X3	0,28	0,05	5,73	0,00

Współczynnik determinacji uzyskanego modelu miał wartość $R^2 = 0,78$, co wskazuje, że model prognostyczny wyjaśnia większość obserwowanej zmienności pomiarowej połysku. Analiza wariancji dla tak uzyskanego modelu pokazała (tabela 12), że dokładność prognostyczna modelu nie odbiega znacząco od błędu czystego (*pure error*), gdyż brak dopasowania (*lack-of-fit*) jest statystycznie nieistotny.

Tabela 12. Analiza wariancji docelowego modelu prognostycznego dla połysku

Składnik modelu	df	SS	MS	F	p
X2	1	7,290	7,290	86,2	0,00
X3	1	2,778	2,778	32,8	0,00
Error	33	2,792	0,085	-	-
lack-of-fit	9	0,586	0,065	0,71	0,70
pure error	24	2,207	0,092	-	-
Total	35	12,860	-	-	-

Test normalności reszt dla modelu docelowego wykazał zgodność z rozkładem normalnym (rysunek 14).



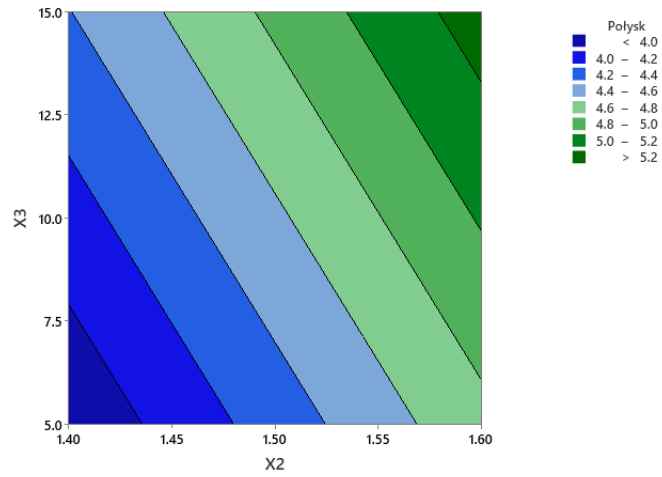
Rysunek 14. Test normalności reszt docelowego modelu prognostycznego dla połysku

Ostateczna postać modelu prognostycznego dla grubości wyrażona poprzez czynnik rzeczywisty ma postać:

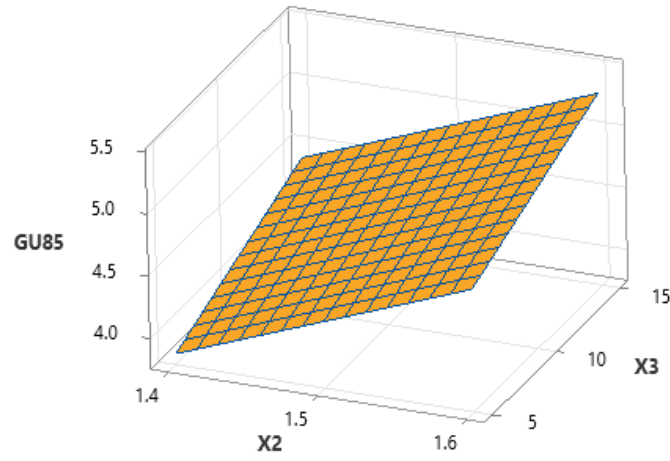
$$GU_{85} = -2,74 + 4,5 \cdot X2 + 0,056 \cdot X3 \quad (7.2)$$

Zachowanie modelu prognostycznego pokazane jest w formie poziomicowej (rysunek 15) oraz przestrzennej (rysunek 16).

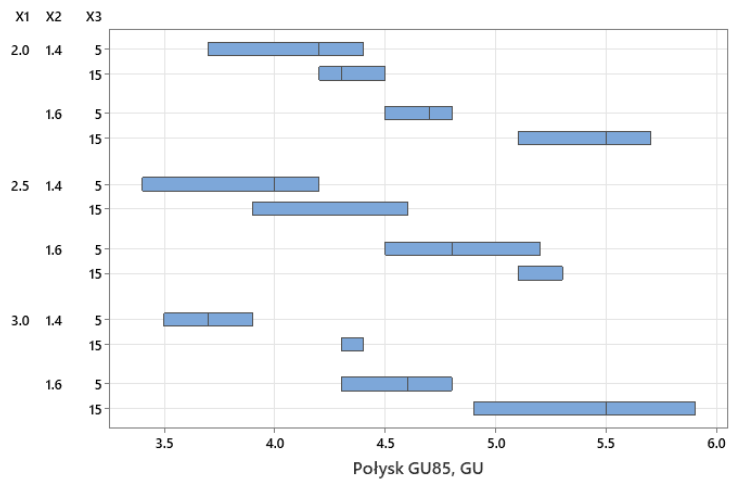
Rozrzut wyników pomiarowych względem modelu prognostycznego pokazuje umiarkowany wpływ czynników niekontrolowanych. Rozrzuty w poszczególnych układach planu doświadczenia oraz ich zmienność są pokazana na rysunku 17. Jakkolwiek test Levena nie wykazał statystycznie istotnych różnic pomiędzy wariancjami w poszczególnych układach, to wykres wyraźnie wskazuje na lepszą stabilność w schemacie (3,0; 1,4; 15).



Rysunek 15. Wykres poziomicowy docelowego modelu prognostycznego dla połysku



Rysunek 16. Wykres przestrzenny docelowego modelu prognostycznego dla połysku



Rysunek 17. Rozrzuty w poszczególnych replikacjach układów planu doświadczenia

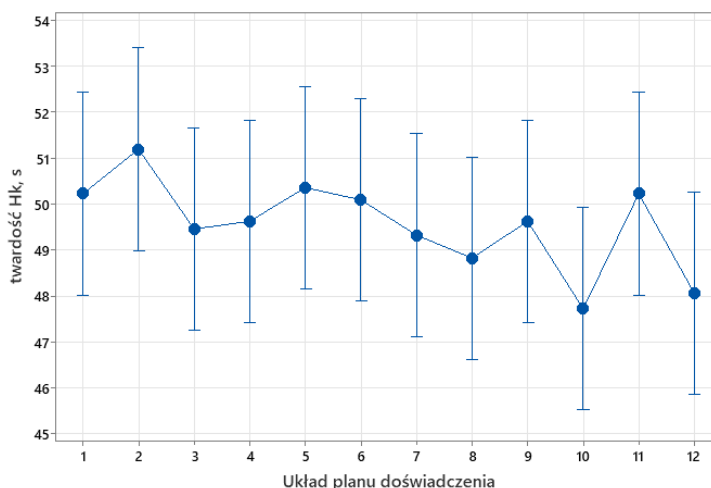
Twardość

W przypadku pomiarów twardości metodą wahadła Koeniga nie zaobserwowano żadnej statystycznie istotnej zmienności względem czynników kontrolowanych (tabela 13).

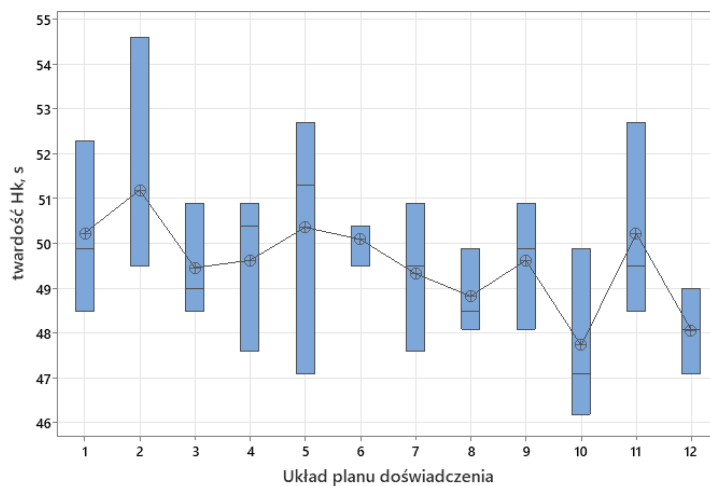
Tabela 13. Analiza wariancji układów pomiarowych dla twardości

Składnik modelu	df	SS	MS	F	p
układy planu	11	32,1	2,92	0,85	0,59
Error	24	82,0	3,42	-	-
Total	35	114,1	-	-	-

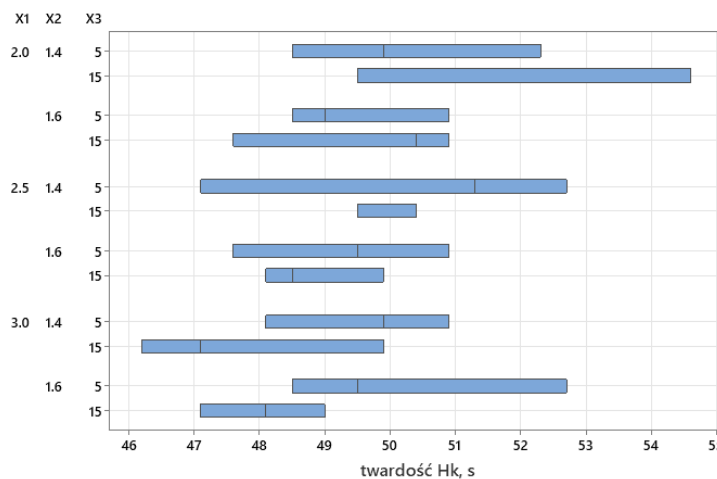
Zachowanie wyników pomiarów pokazane jest w wariancie przedziałów ufności 95% (rysunek 18) oraz box-plot (rysunek 19). Rozrzuty w poszczególnych układach planu doświadczenia oraz ich zmienność są pokazane na rysunku 20. Jakkolwiek test Levena nie wykazał statystycznie istotnych różnic pomiędzy wariancjami w poszczególnych układach, to wykres wyraźnie wskazuje na lepszą stabilność połysku w schemacie (2,5; 1,4; 15), (układ nr 6 planu doświadczenia).



Rysunek 18. Wykres wartości średnich i przedziałów ufności dla twardości w poszczególnych układach planu doświadczenia



Rysunek 19. Wykres box-plot dla twardości w poszczególnych układach planu doświadczenia



Rysunek 20. Rozrzuty w poszczególnych replikacjach układów planu doświadczenia

Parametr chropowości Ra

Wyjściową formą modelu była postać liniowa z członem kwadratowym względem X1 oraz z interakcjami dwuczynnikowymi. Po przeprowadzonej identyfikacji parametrów (tabela 14) większość parametrów okazała się statystycznie nieistotna.

Tabela 14. Parametry wyjściowego modelu predykcyjnego dla parametru Ra (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	3,07	0,05	65,20	0,00
X1	0,03	0,03	0,89	0,38
X2	-0,12	0,03	-4,33	0,00
X3	-0,09	0,03	-3,34	0,02
X1*X1	0,119	0,058	2,06	0,05
X1*X2	-0,035	0,033	-1,06	0,30
X1*X3	-0,004	0,033	-0,12	0,91
X2*X3	-0,023	0,027	-0,83	0,42

Po sekwencyjnej redukcji metodą regresji wstecznej składników nieistotnych statystycznie ostateczny model uzyskał formę liniową zależną kwadratowo od czynnika X1 oraz liniowo od czynników X2 i X3 (tabela 15).

Tabela 15. Parametry docelowego modelu prognostycznego dla parametru Ra (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	3,07	0,05	66,67	0,00
X1*X1	0,12	0,06	2,11	0,04
X2	-0,12	0,03	-4,43	0,00
X3	-0,09	0,03	-3,41	0,00

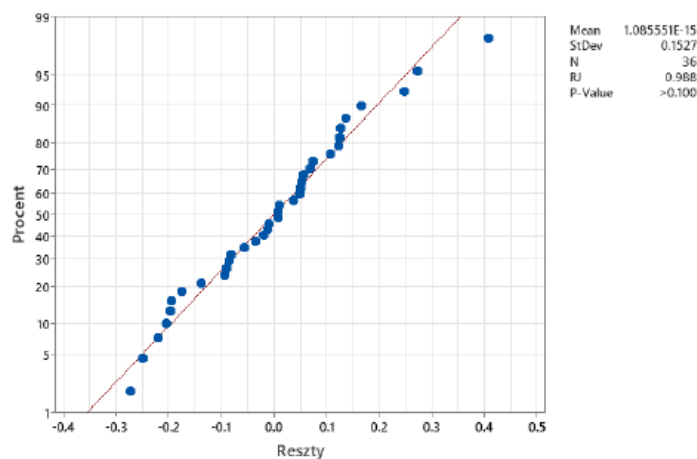
Współczynnik determinacji uzyskanego modelu miał wartość $R^2 = 0,53$, co wskazuje, że aczkolwiek model prognostyczny wyjaśnia większość obserwowanej zmienności pomiarowej połysku, to wpływ czynników niekontrolowanych jest znaczny.

Analiza wariancji dla tak uzyskanego modelu pokazała (tabela 16), że dokładność prognostyczna modelu nie odbiega znacząco od błędu czystego (*pure error*), gdyż brak dopasowania (*lack-of-fit*) jest statystycznie nieistotny.

Tabela 16. Analiza wariancji docelowego modelu prognostycznego dla parametru Ra

Składnik modelu	df	SS	MS	F	p
X1*X1	1	0,1132	0,1132	4,44	0,04
X2	1	0,4996	0,4996	19,60	0,00
X3	1	0,2968	0,2968	11,64	0,00
Error	32	0,8159	0,0255	-	-
lack-of-fit	8	0,2451	0,0306	1,29	0,30
pure error	24	0,5708	0,0238	-	-
Total	35	1,7255	-	-	-

Test normalności reszt dla modelu docelowego wykazał zgodność z rozkładem normalnym (rysunek 21).



Rysunek 21. Test normalności reszt docelowego modelu prognostycznego dla Ra .

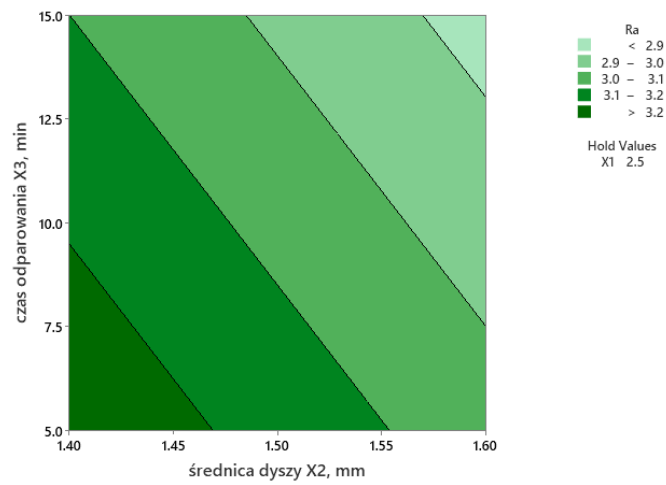
Ostateczna postać modelu prognostycznego dla grubości wyrażona poprzez czynnik kodowany ma postać:

$$Ra = 3,07 + 0,12 * X1^2 - 0,12 * X2 - 0,09 * X3 \quad (7.3)$$

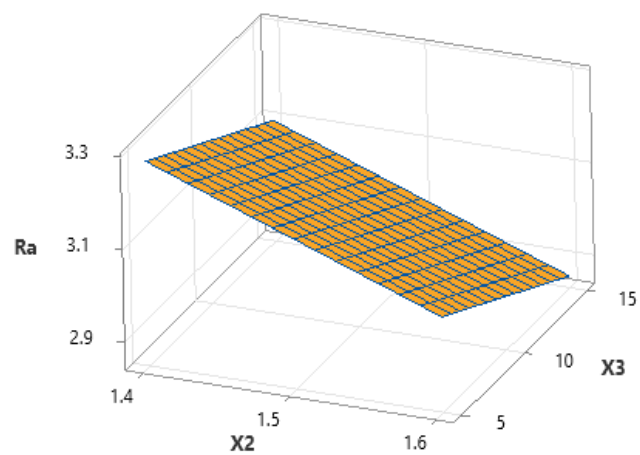
Z uwagi nie niehierarchiczność modelu (brak członu liniowego $X1$) nie jest możliwe uzyskanie wzoru w postaci rzeczywistej. Zachowanie modelu prognostycznego pokazane jest w formie poziomicowej (rysunek 22) oraz przestrzennej (rysunek 23). Najniższą prognozowaną wartość parametru Ra uzyskuje się dla schematu (*; 1,6; 15).

Rozrzut wyników pomiarowych względem modelu prognostycznego pokazuje umiarkowany wpływ czynników niekontrolowanych. Rozrzuty w poszczególnych układach planu doświadczenia oraz ich zmienność są pokazana na rysunku 24. Jakkolwiek test Levena nie

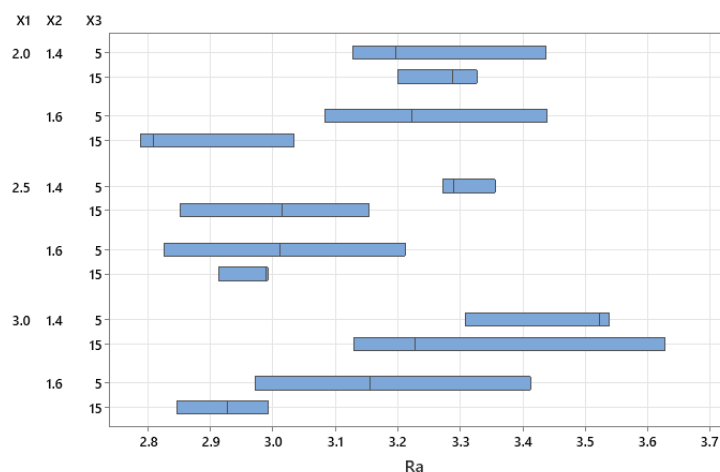
wykazał statystycznie istotnych różnic pomiędzy wariancjami w poszczególnych układach, to wykres wyraźnie wskazuje na lepszą stabilność w schemacie (2,5; 1,6; 15).



Rysunek 22. Wykres poziomicowy docelowego modelu prognostycznego dla parametru Ra



Rysunek 23. Wykres przestrzenny docelowego modelu prognostycznego dla parametru Ra



Rysunek 24. Rozrzuty w poszczególnych replikacjach układów planu doświadczenia

Parametr chropowości Rz

Wyjściową formą modelu była postać liniowa z członem kwadratowym względem X1 oraz z interakcjami dwuczynnikowymi. Po przeprowadzonej identyfikacji parametrów (tabela 17) większość parametrów okazała się statystycznie nieistotna.

Tabela 17. Parametry wyjściowego modelu predykcyjnego dla Rz (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	18,92	0,34	55,45	0,00
X1	0,24	0,24	0,99	0,33
X2	-0,72	0,20	-3,63	0,00
X3	-0,53	0,20	-2,69	0,01
X1*X1	0,789	0,418	1,89	0,07
X1*X2	-0,193	0,241	-0,80	0,43
X1*X3	0,042	0,241	0,17	0,86
X2*X3	-0,015	0,197	-0,07	0,94

Po sekwencyjnej redukcji metodą regresji wstecznej składników nieistotnych statystycznie ostateczny model uzyskał formę liniową zależną liniowo od czynników X2 i X3 (tabela 18).

Tabela 18. Parametry docelowego modelu prognostycznego dla parametru R_z (czynniki kodowane)

Składnik modelu	Parametr	SE	t	p
Stała	19,44	0,20	98,39	0,00
X2	-0,72	0,20	-3,62	0,00
X3	-0,53	0,20	-2,68	0,01

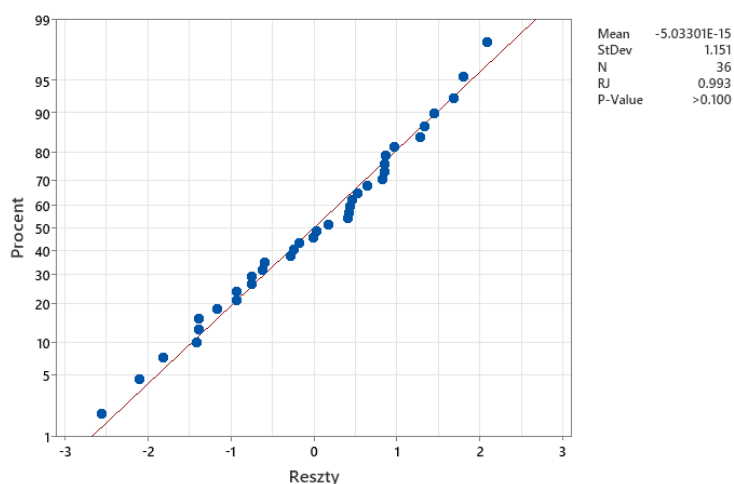
Współczynnik determinacji uzyskanego modelu miał niską wartość $R^2 = 0,32$, co sygnalizowało znaczny wpływ czynników niekontrolowanych, widoczny także w rozrzutach wartości wewnątrz replikacji pomiarów.

Analiza wariancji dla tak uzyskanego modelu pokazała (tabela 19), że dokładność prognostyczna modelu nie odbiega znacząco od błędu czystego (*pure error*), gdyż brak dopasowania (*lack-of-fit*) jest statystycznie nieistotny.

Tabela 19. Analiza wariancji docelowego modelu prognostycznego dla parametru R_z

Składnik modelu	df	SS	MS	F	p
X2	1	18,40	18,40	13,09	0,00
X3	1	10,11	10,11	7,19	0,01
Error	33	46,40	1,41	-	-
lack-of-fit	9	16,39	1,82	1,46	0,22
pure error	24	30,01	1,25	-	-
Total	35	74,91	-	-	-

Test normalności reszt dla modelu docelowego wykazał zgodność z rozkładem normalnym (rysunek 25).



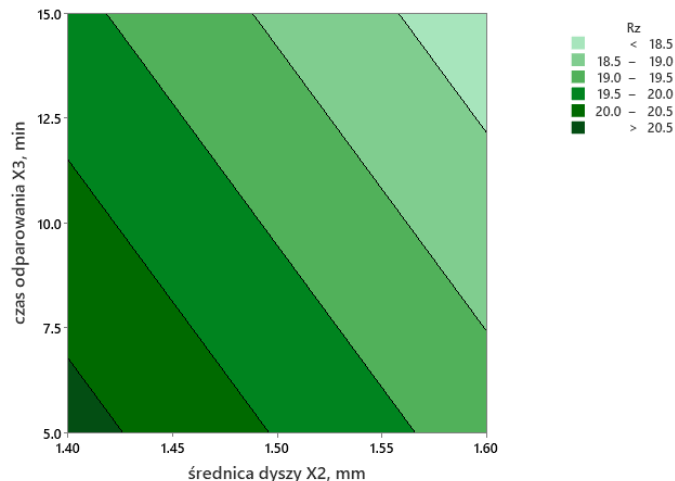
Rysunek 25. Test normalności reszt docelowego modelu prognostycznego dla parametru R_z

Ostateczna postać modelu prognostycznego dla grubości wyrażona poprzez czynniki rzeczywiste ma postać:

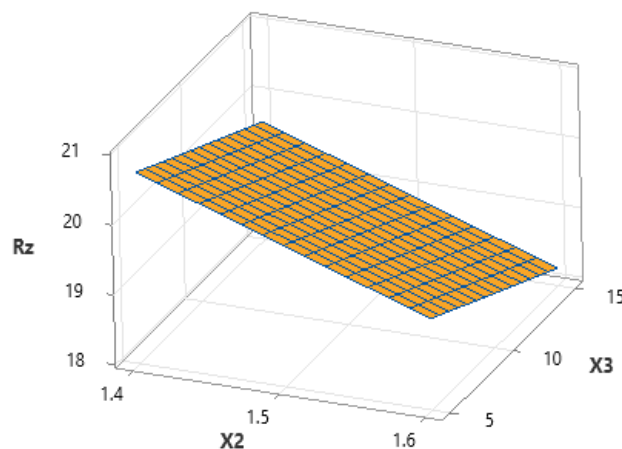
$$Rz = 31,2 - 7,15 * X2 - 0,11 * X3 \quad (7.4)$$

Zachowanie modelu prognostycznego pokazane jest w formie poziomicowej (rysunek 26) oraz przestrzennej (rysunek 27). Najniższą prognozowaną wartość parametru Rz uzyskuje się dla schematu (*; 1,6; 15).

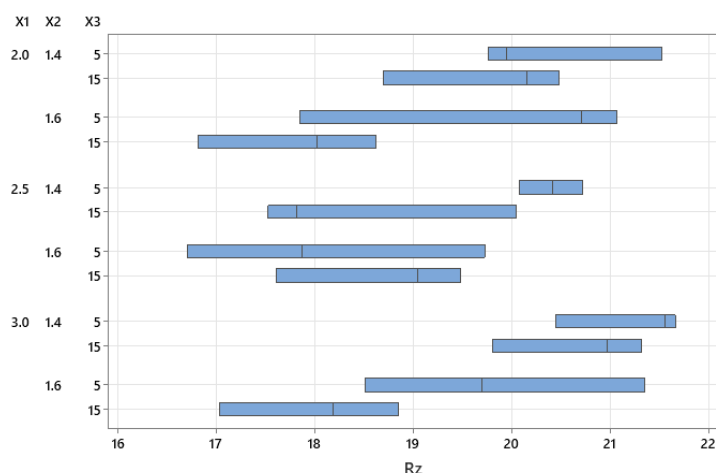
Rozrzut wyników pomiarowych względem modelu prognostycznego pokazuje znaczny wpływ czynników niekontrolowanych. Rozrzuty w poszczególnych układach planu doświadczenia oraz ich zmienność są pokazana na rysunku 28. Jakkolwiek test Levena nie wykazał statystycznie istotnych różnic pomiędzy wariancjami w poszczególnych układach, to wykres wyraźnie wskazuje na lepszą stabilność w schemacie (2,5; 1,4; 5).



Rysunek 26. Wykres poziomicowy docelowego modelu prognostycznego dla parametru Rz



Rysunek 27. Wykres przestrzenny docelowego modelu prognostycznego dla parametru Rz



Rysunek 28. Rozrzuty w poszczególnych replikacjach układów planu doświadczenia

Podsumowanie

Na podstawie badań eksperymentalnych za pomocą metodyki DoE, opracowano model prognostyczny systemu powłokowego SP3 dla wybranych wielkości kontrolowanych bazujących na trzech czynnikach kontrolowanych. Czynnikiemami kontrolowanymi były: ciśnienie materiału lakierniczego, średnica dyszy oraz czas odparowania. Wielkościami obserwowanymi były właściwości użytkowe systemu powłokowego: grubość, połysk, twardość oraz parametry chropowatości powierzchni (Ra , Rz).

Wyniki badań wykazały, że:

- grubość systemu powłokowego była w największym stopniu zależna od średnicy dyszy ($X2$), przy czym uzyskany model prognostyczny charakteryzował się umiarkowaną dokładnością ($R^2 \approx 0,32$);
- połysk powierzchni istotnie zależał od średnicy dyszy ($X2$) oraz czasu odparowania ($X3$), a model prognostyczny dobrze opisywał zależności ($R^2 \approx 0,78$);
- twardość mierzona metodą wahadła Koeniga nie wykazywała znaczącego wpływu czynników kontrolowanych;
- parametry chropowatości Ra i Rz wykazywały zależność od średnicy dyszy ($X2$) i czasu odparowania ($X3$), a w przypadku Ra także od kwadratowego wpływu ciśnienia materiału ($X1^2$);
- zaobserwowano silny wpływ czynników niekontrolowanych, których źródłem mógł być manualny charakter procesu nakładania powłok lakierniczych.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że istotny wpływ na właściwości końcowe powłoki miały zarówno parametry aplikacji, jak i czynniki trudne do kontroli technologicznej.

8. Prace wdrożeniowe

Analiza wymagań i konkurencyjności projektu

Podstawowym wymaganiem stawianym systemom powłokowym stosowanym w technice wojskowej jest zapewnienie skutecznej ochrony przed oddziaływaniem czynników środowiskowych, mechanicznych i chemicznych, a także utrzymanie wysokiej efektywności maskowania w różnych warunkach eksploatacyjnych. Wymagania te obejmują zarówno właściwości użytkowe, jak i parametry związane z funkcjonalnością kamuflażu.

W szczególności istotne jest:

- wydłużenie trwałości eksploatacyjnej powłok, tak aby ograniczyć częstotliwość konserwacji i napraw, co przekłada się na zmniejszenie kosztów utrzymania sprzętu wojskowego oraz zapewnienie jego ciągłej gotowości bojowej,
- zwiększenie odporności na zużycie mechaniczne, obejmujące odporność na ścieranie, uderzenia i erozję, co bezpośrednio wpływa na integralność systemu powłokowego i jego zdolność do długotrwałej ochrony podłoża,
- wydłużenie trwałości właściwości maskujących w trakcie eksploatacji, tak aby powłoka zachowywała swoje parametry w zakresie barwy, połysku i charakterystyki spektralnej odbicia, minimalizując ryzyko wykrycia obiektów przez systemy obserwacji w paśmie VIS, NIR i IR.

Analiza konkurencyjności wykazała, że obecne rozwiązania stosowane w wojsku spełniają jedynie podstawowe wymagania w zakresie ochrony antykorozyjnej i maskowania wizualnego, jednak ich trwałość eksploatacyjna oraz odporność na intensywne zużycie pozostają ograniczone. Dlatego konieczne było opracowanie systemu powłokowego o podwyższonych parametrach użytkowych, bazującego na zastosowaniu nowoczesnych dodatków modyfikujących – nanorurek węglowych i mikrosfer szklanych.

Wprowadzenie tych modyfikatorów umożliwia nie tylko poprawę odporności mechanicznej i barierowej systemu, lecz także optymalizację właściwości optycznych w szerokim zakresie spektralnym, co stanowi istotną przewagę konkurencyjną opracowanego systemu nad klasycznymi rozwiązaniami stosowanymi w technice wojskowej.

Wdrożenie opracowanego systemu powłokowego niesie również wymierne efekty ekonomiczne. Wydłużenie okresu eksploatacji dzięki zwiększonej odporności na degradację środowiskową i uszkodzenia mechaniczne ogranicza częstotliwość koniecznych napraw i renowacji. Tym samym zmniejsza się liczba cykli odnawiania powłoki, które wiążą się nie

tylko z wysokimi kosztami materiałowymi i roboczogodzinami, lecz także z czasowym wyłączeniem sprzętu z użytkowania, generującym straty operacyjne. Redukcja tych procesów obniża całkowity koszt utrzymania sprzętu wojskowego w cyklu życia, a jednocześnie podnosi poziom dyspozycyjności i gotowości bojowej sprzętu.

Selekcja dodatków modyfikujących

Na podstawie badań literaturowych i wstępnych testów eksperymentalnych wytypowano dwa rodzaje modyfikatorów:

- mikrosfery szklane (3M™ Glass Bubbles S28HS) – nadające powłoce niższą gęstość, zmniejszające przewodnictwo cieplne i poprawiające parametry optyczne,
- nanorurki węglowe Matrix 204 – poprawiające przewodnictwo elektryczne, właściwości mechaniczne i absorpcję promieniowania elektromagnetycznego.

Selekcja dodatków została poprzedzona analizą ich budowy, właściwości fizykochemicznych i potencjalnego wpływu na aplikację oraz eksploatację systemu powłokowego.

Opracowanie receptur i wykonanie próbek

W opracowanych recepturach wykorzystano dwa rodzaje modyfikatorów: nanorurki węglowe oraz mikrosfery szklane, których dobór ilościowy oparto na analizie dostępnych danych literaturowych, danych dostarczonych przez producentów oraz wcześniejszych wynikach badań. Podczas projektowania składu materiałów lakierniczych kluczowe było zachowanie podstawowych parametrów użytkowych powłoki, takich jak:

- kolor – zgodny z wymaganiami norm obronnych dla barw maskujących,
- połysk – na poziomie zapewniającym matowe wykończenie powierzchni, ograniczające ryzyko wykrycia w warunkach eksploatacyjnych,
- charakterystyki spektralne – mieszczące się w przedziałach określonych w wymaganiach normatywnych (VIS, NIR, IR), niezbędnych do zapewnienia skuteczności maskowania.

Próbki z naniesionymi systemami powłokowymi wykonano zgodnie z technologią aplikacji zalecaną przez producenta zestawu maskującego, obejmującą:

- przygotowanie podłoża stalowego,
- nanoszenie kolejnych warstw systemu powłokowego przy użyciu standardowych technik aplikacyjnych,

- kontrolę parametrów aplikacji (ciśnienie, średnica dyszy, czas odparowania), zapewniającą powtarzalność i porównywalność otrzymanych systemów powłokowych.

Analiza wyników badań eksperymentalnych

Przeprowadzone szereg badania laboratoryjnych i poligonowych których wyniki i analiza została zaprezentowana w punkcie 6 niniejszej pracy. Badania wykazały, że zastosowane modyfikacje pozwoliły uzyskać parametry zgodne z wymaganiami klientów końcowych – zarówno w aspekcie ochronnym, jak i funkcjonalnym.

Ustalenie parametrów aplikacyjnych i właściwości użytkowych

Na podstawie badań eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale 7, obejmujących badanie wpływu ciśnienia materiału, średnicy dyszy oraz czasu odparowania, opracowano model prognostyczny dla systemu powłokowego SP3 ustalono optymalne parametry procesu aplikacji maskującego systemu powłokowego.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że:

- grubość systemu powłokowego była w największym stopniu kształtowana przez średnicę dyszy,
- połysk systemu powłokowego zależał istotnie zarówno od średnicy dyszy, jak i czasu odparowania,
- chropowatość systemu powłokowego ulegała zmianom pod wpływem interakcji wszystkich trzech badanych czynników,
- twardość systemu powłokowego nie wykazywała istotnej zależności od parametrów aplikacyjnych, co świadczy o stabilności tego parametru w badanym zakresie.

Ustalono, że optymalne parametry aplikacyjne dla systemu maskującego SP3 obejmują:

- średnicę dyszy natryskowej zapewniającą równomierne nanoszenie warstwy i uzyskanie wymaganej grubości,
- czas odparowania pomiędzy warstwami pozwalający na utrzymanie matowego charakteru powłoki przy jednoczesnej kontroli połysku i parametrów chropowatości,
- ciśnienie materiału lakierniczego gwarantujące stabilność procesu bez ryzyka powstawania defektów powierzchniowych.

Opracowane parametry aplikacyjne umożliwiają uzyskanie systemów powłokowych o właściwościach zgodnych z wymaganiami norm obronnych, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej powtarzalności procesu technologicznego.

Opracowanie technologii wytwarzania

Na podstawie wyników badań zaprezentowanych w rozdziale 6 oraz danych przedstawionych w rozdziale 7 opracowano kompletną technologię wytwarzania maskującego systemu powłokowego obejmującą:

- przygotowanie podłoża (szlifowanie, odtłuszczenie, aplikacja podkładu),
- aplikację warstwy nawierzchniowej modyfikowanej mikrosferami,
- wygrzewanie i sezonowanie w kontrolowanych warunkach.

Technologia została zastosowana w trakcie badań poligonowych.

Aplikacja w warunkach produkcyjnych

Próbne aplikacje przeprowadzono na rzeczywistych elementach sprzętu wojskowego, które potwierdziły poprawność opracowania technologii wytwarzania i aplikacji maskujących systemów powłokowych, a otrzymane systemy powłokowe spełniały wymagania normy obronnej (NO-80-A200) dotyczące właściwości maskujących i eksploatacyjnych.

Opracowanie końcowych parametrów wytwarzania i aplikacji

Wdrożenie zakończono opracowaniem końcowych parametrów procesu, obejmujących:

- recepturę materiału lakierniczego,
- parametry technologiczne aplikacji,
- warunki utwardzania i sezonowania,
- procedury kontroli jakości (grubość, adhezja, charakterystyki spektralne itd.).

Ostateczna dokumentacja technologiczna pozwala na seryjne wytwarzanie lakierniczego systemu maskującego, którego skuteczność i trwałość zostały potwierdzone w badaniach laboratoryjnych i poligonowych.

9. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz analiz można sformułować następujące wnioski:

- Opracowane systemy powłokowe spełniły wymagania normy obronnej w zakresie barwy, połysku oraz charakterystyk spektralnych odbicia, co potwierdza ich przydatność do zastosowań w technice wojskowej.
- Zastosowanie modyfikatorów w postaci nanorurek węglowych (system powłokowy SP2) oraz mikrosfer szklanych (system powłokowy SP3) pozwoliło na uzyskanie systemów o odmiennych właściwościach użytkowych w stosunku do referencyjnego systemu powłokowego (system powłokowy SP1).
- W pomiarach grubości wszystkie systemy lakiernicze charakteryzowały się stabilną grubością w zakresie 154–167 μm , największą grubość odznaczał się system lakierniczy SP3, co potwierdza wpływ mikrosfer szklanych na zwiększenie objętości systemu powłokowego.
- Wszystkie systemy malarskie spełniały wymagania normy NO-80-A200, zachowując matowe wykończenie powierzchni (<8 GU przy 85°) przy czym najniższy połysk odnotowano dla systemu lakierniczego SP2 (3,8 GU).
- Analiza koloru i różnicy barwy ΔE^*_{ab} wykazała, że wszystkie systemy mieściły się w dopuszczalnym zakresie stawianym przez normę obronną, przy czym system powłokowy SP3 charakteryzował się różnicą koloru ($\Delta E^*_{ab} = 0,76$) względem systemu referencyjnego SP1, a system powłokowy SP2 posiadał różnicę koloru $\Delta E^*_{ab} = 0,48$.
- W badaniach charakterystyki spektralnej odbicia wszystkie systemy mieściły się w wymaganiach normy NO-80-A200. W zakresie 350–750 nm nie stwierdzono istotnych różnic, natomiast w zakresie 750–980 nm system powłokowy SP2 wykazywał wyższe odbicie, a system powłokowy SP3 w przedziale 980–1200 nm. Zróżnicowanie to może być wykorzystane w dalszych pracach do kształtowania właściwości maskujących w paśmie bliskiej podczerwieni.
- W pomiarach struktury geometrycznej powierzchni system powłokowy SP1 wykazywał najniższą wartość parametru $Sa = 12,272 \mu\text{m}$, co świadczy o relatywnie gładkiej powierzchni. System lakierniczy SP3 osiągnął najwyższe wartości parametrów $Sa = 3,111 \mu\text{m}$, natomiast próbki ze stali DC01 po szlifowaniu papierem ściernym o uziarnieniu P80, na które nanoszono powłoki, miały $Sa = 0,8 - 0,9 \mu\text{m}$.

- Analiza morfologiczna za pomocą mikroskopii SEM wykazała, że grubości warstw wchodzących w skład danego systemu malarskiego były porównywalne oraz były pozbawione defektów strukturalnych (mikroporów i pęknięć).
- W testach odporności mechanicznej system maskujący SP1 charakteryzował się najwyższą odpornością na ścieranie uzyskując wartość ubytku masy na jeden cykl równą 0,092 mg oraz odpornością na zużycie erozyjne równe 0,84 kg/μm, natomiast system maskujący SP3 wykazywał obniżoną odporność na ścieranie uzyskując wartość ubytku masowego na jeden cykl równą 0,111 mg.
- W badaniach twardości metodą wahadła Koeniga system maskujący SP3 uzyskał najniższą wartość twardości równą 43,6 sekund w stosunku do systemów maskujących SP1 i SP2, które uzyskały wyniki odpowiednio 50,1 sekundy i 50,4 sekundy.
- Testy przyczepności metodą scratch test potwierdziły wysoką adhezję wszystkich systemów, przy czym najwyższą przyczepność wykazał system powłokowy SP3, którego średnia siła krytyczna wynosiła 46,49 N, a najniższą system powłokowy SP1 który charakteryzował się średnią siłą krytyczną równą 41,38 N.
- Wyniki badań odporności korozyjnej (LSV, EIS, komora solna) potwierdziły istotne zwiększenie odporności wszystkich systemów lakierniczych w porównaniu z podłożem stalowym (stal DC01). Najwyższą odporność korozyjną w badaniach LSV wykazał system powłokowy SP2, który posiadał najmniejszą gęstość prądu korozyjnego $j_{\text{corr}} = 1,37 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. W badaniach EIS największą pętlę pojemnościową uzyskał system powłokowy SP3, co sugeruje wyższą odporność korozyjną w odniesieniu do systemów malarskich SP1 i SP2. Ponadto system powłokowy SP3 w badaniach w komorze solnej również charakteryzował się najmniejszym odwarstwieniem i skorodowaniem wokół rysy.
- W badaniach starzeniowych w komorach UV-A, UV-B i z lampą ksenonową oraz w warunkach naturalnej ekspozycji najmniejszą zmianą barwy i połysku wykazywał system powłokowy SP3, co wskazuje na jego wysoką stabilność eksploatacyjną.
- Badania poligonowe przy użyciu noktowizji oraz zobrazowaniach wykonanych przy użyciu aparatu fotograficznego potwierdziły skuteczność maskowania w zakresie VIS i NIR systemu maskującego SP3, który posiadał niską wykrywalnością.
- Wprowadzenie modyfikatorów w postaci nanorurek węglowych i mikrosfer szklanych umożliwiło osiągnięcie synergii właściwości ochronnych i maskujących wytworzonych

systemów powłokowych, co powinno przyczynić się do zwiększenia ich trwałości eksploatacyjnej w zastosowaniach w technice wojskowej.

- Zastosowanie metodyki DoE umożliwiło identyfikację kluczowych czynników procesu technologicznego, które w największym stopniu determinują właściwości użytkowe systemu powłokowego SP3. Średnica dyszy i czas odparowania to parametry o największym wpływie na połysk i chropowatość, natomiast twardość pozostaje niezależna od badanych czynników.
- Opracowany model prognostyczny procesu nakładania systemu powłokowego SP3 pozwala na kształtowanie właściwości powłoki, co zwiększa jej potencjał użytkowy w zastosowaniach wojskowych.

10. Możliwe kierunki dalszych prac badawczych

1. Rozszerzenie zakresu modyfikacji – przeprowadzenie badań z wykorzystaniem innych typów nanonapełniaczy i mikrowypełniaczy, takich jak np. nanokrzemionka, tlenki metali czy mikrosfery ceramiczne, w celu porównania ich wpływu na właściwości eksploatacyjne wytworzonych systemów powłokowych.
2. Badania nad trwałością długookresową – prowadzenie wieloletnich testów poligonowych w różnych strefach klimatycznych (klimat morski, pustynny, tropikalny) w celu oceny wpływu czynników środowiskowych na degradację systemów powłokowych.
3. Analiza właściwości termicznych i NIR – pogłębione badania nad zdolnością systemu powłokowego do redukcji sygnatury termicznej sprzętu wojskowego w zakresie średniej i dalekiej podczerwieni (MWIR, LWIR).
4. Optymalizacja procesów aplikacji – dalsze doskonalenie parametrów natrysku, doboru dysz oraz warunków odparowania rozpuszczalników z wykorzystaniem zaawansowanych metod statystycznych i sztucznej inteligencji w modelowaniu procesów technologicznych.
5. Kompatybilność środowiskowa – ocena możliwości zastosowania ekologicznych spoiw i rozpuszczalników przy zachowaniu wymaganych właściwości eksploatacyjnych systemów powłokowych.
6. Wzajemne oddziaływanie modyfikatorów – badania synergicznych efektów zastosowania kombinacji różnych dodatków modyfikujących (np. nanorurek węglowych i mikrosfer szklanych jednocześnie) w celu uzyskania lakierniczych systemów hybrydowych o zoptymalizowanych właściwościach.
7. Walidacja przemysłowa – przeprowadzenie badań wdrożeniowych w skali półtechnicznej i przemysłowej, pozwalających na weryfikację laboratoryjnych i poligonowych wyników badań oraz ocenę efektywności procesu w warunkach produkcji seryjnej.

Literatura

- [1] 3M: 3M™ Glass Bubbles Technical Data Sheet – S28HS, 3M Company, 2023.
- [2] 3M: Glass Bubbles Overview, 3M Company, 2019.
- [3] Agnol L. et al.: UV-curable waterborne polyurethane coatings: A state-of-the-art and recent advances review, *Progress in Organic Coatings*, 2021, 154, p. 106156. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106156>.
- [4] Al-Saleh M. H., Sundararaj U.: Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites, *Carbon*, 2009, 47(6), pp. 1738–1746. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.02.030>.
- [5] Allen N.S., Edge M.: *Fundamentals of Polymer Degradation and Stabilization*, Springer, 1992.
- [6] Allen N.S.: *Degradation and Stabilization of Polyolefins*, Springer, 1983.
- [7] Andersson K. E., Åkerlind, C.: A review of materials for spectral design coatings in signature management applications, In *Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence X and Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XI (Vol. 9253)*, SPIE, 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2067167>.
- [8] Antony J. S. et al.: Wear- and corrosion-resistant coatings for extreme environments: Advances, challenges, and future perspectives, *Coatings*, 2025, 15(8), p. 878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>.
- [9] Bierwagen G. et al.: *Organic Coatings for Corrosion Control*, 1998, vol. 689. <https://doi.org/10.1021/bk-1998-0689>.
- [10] Birkett M. et al.: Recent Advances in Metal-Based Antimicrobial Coatings for High-Touch Surfaces, *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(3), p. 1162. <https://doi.org/10.3390/ijms23031162>.
- [11] Burakowski T., Wierchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa, 1995.
- [12] Dyrektywa 2004/42/WE z 21 kwietnia 2004 w sprawie ograniczenia emisji LZO (VOC) wynikających ze stosowania rozpuszczalników organicznych w niektórych farbach i lakierach oraz w produktach do odnawiania pojazdów, Dz.U. UE L 143 z 30.04.2004, s 87-96.
- [13] Escarsega J. et al.: *Mechanisms of Military Coatings Degradation: Accelerated and Outdoor Exposure Evaluations*, Army Research Laboratory, 2003, ARL-TR-3085.

- [14] Funke W.: Problems and progress in organic coatings science and technology, *Progress in Organic Coatings*, 1997, 31(1–2), pp. 5–9. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(97\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(97)00013-1).
- [15] Gernand J.M., Casman E.A.: A Meta-Analysis of Carbon Nanotube Pulmonary Toxicity Studies-How Physical Dimensions and Impurities Affect the Toxicity of Carbon Nanotubes, *Risk Analysis*, 2014, 34(3), pp. 583-597. <https://doi.org/10.1111/risa.12109>.
- [16] Hinkelmann K.: Design and analysis of experiments, Vol.3. Special Designs and Applications, Hoboken, John Wiley & Sons, *New Jersey* 2012.
- [17] Huang Y.-S., et al.: Tunable structural transmissive color in Fano-resonant optical coatings employing phase-change materials. *Materials Today Advances*, 2023, 18, p. 100364. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100364>.
- [18] Huanzheng Z. et al.: Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling, *Nature Communications*, 12, 2021, 1805. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22051-0>.
- [19] International Agency for Research on Cancer (IARC), Carbon nanotubes: Summary of data reported and evaluation, 2017, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 111.
- [20] Jabbour C. et al.: Chemical targets to deactivate biological and chemical toxins using surfaces and fabrics, *Nature Reviews Chemistry*, 2021, 5, pp. 370-387.
- [21] John P. W. M.: Statistical design and analysis of experiments. SIAM, Philadelphia 1998.
- [22] Jones F. et al.: *Organic Coatings: Science and Technology*, 4th ed., Wiley-Blackwell, 2017.
- [23] Junxiong X. et al.: Multifunctional microwave absorption materials: construction strategies and functional applications, Royal Society of Chemistry, 2024, 11 pp. 5874-5894. <https://doi.org/10.1039/D4MH00793J>.
- [24] Kasprzak W., Lysik B.: Analiza wymiarowa. Algorytmiczne procedury planowania eksperymentu, WNT, Warszawa 1988.
- [25] Kempthorne O., Hinkelmann K.: Design and analysis of experiments. Vol.1. Introduction to experimental design, Hoboken, John Wiley & Sons, *New Jersey* 2007.
- [26] Kempthorne O., Hinkelmann K.: Design and analysis of experiments. Vol.2. Advanced experimental design, Hoboken, John Wiley & Sons, *New Jersey* 2005.

- [27] Kendig M., Mills D.: An historical perspective on the corrosion protection by paints, *Progress in Organic Coatings*, 2017, 102(A), pp. 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.04.044>.
- [28] Khanna A. S.: *High-Performance Organic Coatings*, Woodhead Publishing, 2008.
- [29] Koleske J. et al.: *Paint and Coating Testing Manual*, ASTM International, 2012. <https://doi.org/10.1520/MNL17-2ND-EB>.
- [30] Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, WNT, Warszawa 2006.
- [31] Kotnarowska D.: *Metody badań jakości powłok ochronnych*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2015.
- [32] Kotnarowska D.: *Powłoki polimerowe – struktura, właściwości, zastosowania*. WNT, Warszawa, 2015.
- [33] Leidheiser H. Jr.: Corrosion of Painted Metals - A Review, *Corrosion*, 1982, 38(7), pp. 374–383. <https://doi.org/10.5006/1.3581899>.
- [34] Levent C. et al.: Reinforcement effects of multiwall carbon nanotubes and graphene oxide on PDMS marine coatings, *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, vol. 15, pp. 105-120.
- [35] Mason R. L. et al.: *Statistical design and analysis of experiments*. Hoboken, John Wiley and Sons, *New Jersey* 1989.
- [36] Mańczak K.: *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa 1976.
- [37] Mikhail R. et al.: New perspectives in SWCNT applications: Tuball SWCNTs. Part 1. Tuball by itself - All you need to know about it, *Carbon Trends*, 2022, 8, p. 100175.
- [38] Mikhail R. et al.: New perspectives in SWCNT applications: Tuball SWCNTs. Part 2. New Composite Materials through Augmentation with Tuball, *Carbon Trends*, 2022, 8, p. 100176.
- [39] Mittal K.L.: *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, Vol. 5, CRC Press, 2009.
- [40] Montemor M.: Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 258, pp. 17–37. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031>
- [41] Montgomery D. C.: *Design and analysis of experiments*, Hoboken, John Wiley & Sons, *New Jersey* 2008.

- [42] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2013). Current intelligence bulletin 65: Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers, 2013, Centers for Disease Control and Prevention, Publication No. 2013-145.
- [43] Noreen A. et al.: Bio-based polyurethane: An efficient and environment friendly coating systems: A review. *Progress in Organic Coatings*, 2016, vol. 91, pp. 25-32.
- [44] Norma obronna NO-80-A200:2021 Farby specjalne do malowania maskującego. Wymagania i metody badań.
- [45] OCSiAl: TUBALL™ Overview – Paints & Coatings, OCSiAl Group, 2018.
- [46] Ollik K., Lieder M.: Review of the Application of Graphene-Based Coatings as Anticorrosion Layers, *Coatings* 2020, 10(9), p. 883. <https://doi.org/10.3390/coatings10090883>.
- [47] Paul S.: Special Issue: Coatings for Harsh Environments, *Coatings*, 2020, 10(4), p. 407. <https://doi.org/10.3390/coatings10040407>.
- [48] Piazza A. G.: Chemical Agent Resistant Coating (CARC) system for military vehicles. Paper 2016, no. S2016-00055, pp. 1–11. <https://doi.org/10.5006/S2016-00055>.
- [49] Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice, WNT, Warszawa 1984.
- [50] Pourhashem G.: Coating a Sustainable Future, *Coatings*, 2020, 10(8), p. 713. <https://doi.org/10.3390/coatings10080713>.
- [51] Przerada I.: Mikrosfery szklane – właściwości i zastosowanie, *Szkło i Ceramika*, 2019, 70(5), s. 24-27.
- [52] Qiao Y. et al.: Niu, X.: Research Progress of Bionic Adaptive Camouflage Materials, *Frontiers in Materials*, 2021 vol. 8, p. 637664. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.637664>.
- [53] Rafajłowicz E.: Algorytmy planowania eksperymentu, AOW PLJ, Warszawa 1996.
- [54] Rui X. et al.: Preparation of silver-plated Hollow Glass Microspheres and its application in infrared stealth coating fabrics, *Progress in Organic Coatings*, 2019, vol. 131, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.02.009>.
- [55] Ruiz-Pérez F. et al.: Carbon-based radar absorbing materials: A critical review, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, 7(3), p. 100454. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>.
- [56] Ryan T. P.: Modern experimental design, Hoboken, John Wiley & Sons, *New Jersey* 2007.
- [57] Saito R. et al.: Physical Properties of Carbon Nanotubes, Imperial College Press, 1998. <https://doi.org/10.1142/p080>.

- [58] Salihoglu O. et al.: Graphene-Based Adaptive Thermal Camouflage, *Nano Letters*, 2018, 18, pp. 4541-4548. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b01746>.
- [59] Samadzadeh, M. et al.: A review on self-healing coatings based on micro/nanocapsules, *Progress in Organic Coatings*, 2010, 68(3), pp. 159–164. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.01.006>.
- [60] Santamaria-Echart A. et al.: Advances in Waterborne Polyurethane and Polyurethane-Urea Dispersions and Their Eco-friendly Derivatives: A Review, *Polymers* 2021, 13(3), p. 409. <https://doi.org/10.3390/polym13030409>.
- [61] Sanyal S. et al.: Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection, *2024 Coatings*, 14(3), p. 324. <https://doi.org/10.3390/coatings14030324>.
- [62] Shchukin D. et al.: Layer-by-Layer Assembled Nanocontainers for Self-Healing Corrosion Protection, *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, pp. 1672-1678. <https://doi.org/10.1002/adma.200502053>.
- [63] Sheetz A. et al.: Chemical agent resistant coating (CARC) – how the U.S. Marine corps paints its. Tactical equipment, Department of Defense, 2017, 941059.
- [64] Sinko J.: Challenges of chromate inhibitor pigments replacement in organic coatings, *Progress in Organic Coatings*, 2001, 42(3–4), pp. 129–140. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00202-8](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00202-8).
- [65] Tan C., et al.: Deep-subwavelength Multilayered Meta-coatings for Visible-Infrared Compatible Camouflage, *Nanophotonics*, 2024. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2024-0029>.
- [66] Tran T. B., Tong M. H.: Experimental research and evaluation of thermal camouflage effectiveness of advanced materials for mobile vehicles, *Journal of Military Science and Technology*, 2025, 14(2), pp. 45-58. <https://doi.org/10.1234/jmst.v14i2.1559>.
- [67] UNEP: 2022 Assessment Report, United Nations Environment Programme, 2022.
- [68] Vinoy K. J., Jha R. M.: Radar absorbing materials: From theory to design and characterization, Springer-Verlag, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8065-8>.
- [69] Wang Y. et al.: Photothermally activated self-healing coatings for corrosion protection: A review, *Progress in Organic Coatings*, 2023, 185, p. 107886. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107886>.
- [70] Weiss K. D.: Paint and coatings: A mature industry in transition. *Progress in Polymer Science*, 1997, 22(1), pp. 77–99. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(96\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(96)00017-5).

- [71] Wicks Z. et al.: *Organic Coatings: Science and Technology*, Wiley, 2007. <https://doi.org/10.1002/047007907X>.
- [72] Yimyai T. et al.: Corrosion-Responsive Self-Healing Coatings. *Advanced Materials*, 2023, 35(47), pp. 2300101. <https://doi.org/10.1002/adma.202300101>.
- [73] Zhang D. et al.: (2016). Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: A review of recent progresses and future directions. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2016, 13(1), pp. 11–29.
- [74] Zheng Q. et al.: Near Infrared Reflection and Hydrophobic Properties of Composite Coatings Prepared from Hollow Glass Microspheres Coated with Needle-Shaped Rutile Shell, *Materials*, 2022, 15(23), Article 8310, pp. 1-12. <http://doi.org/10.3390/ma15238310>.
- [75] Zhenqiang Z. et al.: Functional polymer–ceramic hybrid coatings: Status, progress, and trend, *Progress in Polymer Science*, 2024, vol. 154, p. 101840. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2024.101840>.
- [76] Zunino J.: *Active Coatings Technologies for Customized Military Coating Systems*, CRS Press, 2007, <https://doi.org/10.1201/9780429187469>.

Streszczenie

Praca poświęcona jest kompleksowej analizie polimerowych powłok ochronnych, ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowań w technice wojskowej. W pierwszej części przedstawiono charakterystykę powłok, ich klasyfikację oraz właściwości fizykochemiczne, takie jak grubość, przyczepność, twardość oraz odporność na czynniki mechaniczne, chemiczne i promieniowanie elektromagnetyczne. Omówiono również specyficzne typy powłok stosowanych w technice wojskowej, m.in. powłoki antykorozyjne, IRR, RAM, CARC oraz powłok z kamuflażem multispektralnym.

W dalszej części pracy dokonano przeglądu literatury, opisując historię rozwoju powłok polimerowych, współczesne trendy proekologiczne oraz kierunki rozwoju szczególnie ważne dla zastosowań wojskowych. Określono cele i zakres badań, które obejmowały projektowanie, wytwarzanie oraz oceny właściwości użytkowych maskujących systemów powłokowych modyfikowanych mikrosferami szklanymi i nanorurkami węglowymi.

Metodyka badań obejmowała przygotowanie materiału podłoża, nanoszenie powłok oraz szeroki zakres badań laboratoryjnych i poligonowych. W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów grubości, połysku, barwy, charakterystyki spektralnej odbicia, struktury geometrycznej powierzchni, morfologii, a także odporności na ścieranie, korozję i starzenie. Szczególną uwagę poświęcono badaniom skuteczności maskowania metodami naziemnymi, w tym z użyciem noktowizji.

Kolejnym etapem było opracowanie za pomocą metodyki DoE modelu prognostycznego procesu nakładania powłok lakierniczych oraz wdrożenie systemu maskującego. Omówiono selekcję dodatków modyfikujących, opracowanie receptur, analizę wyników eksperymentalnych, ustalenie parametrów aplikacyjnych i technologii wytwarzania oraz implementację w warunkach produkcyjnych.

Praca kończy się wnioskami oraz propozycjami dalszych kierunków badań, które mają na celu dalsze doskonalenie właściwości powłok i ich efektywności w zastosowaniach wojskowych.

Summary

This thesis This work is devoted to a comprehensive analysis of polymer protective coatings, with particular emphasis on their applications in military technology. The first part presents the characteristics of coatings, their classification, and their physicochemical properties, such as thickness, adhesion, hardness, and resistance to mechanical, chemical, and electromagnetic radiation factors. Specific types of coatings used in military technology are also discussed, including anti-corrosion coatings, IRR, RAM, CARC, and multispectral camouflage coatings.

The next section of the work provides a literature review, describing the history of polymer coating development, contemporary pro-environmental trends, and development directions particularly relevant to military applications. The objectives and scope of the research, which included the design, manufacture, and evaluation of the performance properties of camouflage coating systems modified with glass microspheres and carbon nanotubes, are defined.

The research methodology included substrate material preparation, coating application, and a wide range of laboratory and field tests. This paper presents the results of measurements of thickness, gloss, color, spectral reflectance characteristics, surface geometric structure, morphology, as well as resistance to abrasion, corrosion, and aging. Particular attention was paid to testing the effectiveness of camouflage using ground-based methods, including night vision.

The next step was to develop a predictive model for the paint application process using DoE methodology and implement a camouflage system. The paper discusses the selection of modifying additives, formulation development, analysis of experimental results, determination of application parameters and manufacturing technology, and implementation in production.

The paper concludes with conclusions and proposals for further research directions aimed at further improving the properties of coatings and their effectiveness in military applications.

**Publikacje naukowe stanowiące podstawę
rozprawy doktorskiej**

1. **Michalski M.:** *Maskujące systemy powłokowe w zastosowaniu w technice wojskowej. Ogólna charakterystyka.* Rozdział w monografii pt. „Wybrane aspekty technologiczne i logistyczne w inżynierii mechanicznej”. Monografie, Studia, Rozprawy M166, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2024, s. 126-136. **(20 pkt)**
ISSN 1897-2691
2. **Michalski M.:** *Paint coatings in military applications general characteristics.* SYSTEM SAFETY: HUMAN - TECHNICAL FACILITY - ENVIRONMENT - CzOTO, vol. 5, 1 (2023), pp. 285-293. **(20 pkt, SCOPUS)**
<https://doi.org/10.2478/czoto-2023-0031>
3. Przybył W., Mazurczuk R., Szczepaniak M., Radek N., **Michalski M.:** *Virtual Methods of Testing Automatically Generated Camouflage Patterns Created Using Cellular Automata.* Materials Research Proceedings, 24 (2022), pp. 66-74. **(20 pkt, SCOPUS)**
<https://doi.org/10.21741/9781644902059-11>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w analizie wyników badań, na pomocy przy pisaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 10%.
4. Przybył W., **Michalski M.**, Mazurczuk R., Bogdanowicz K., Radek N.: *Radar Recognition: Paint Coatings with Absorption Properties in the Microwave Range.* Materials Research Proceedings 34 (2023), pp. 169-177. **(20 pkt, SCOPUS)**
<https://doi.org/10.21741/9781644902691-21>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu materiału do badań, współudziale w pomiarach współczynników tłumienia, analizie wyników badań, na pomocy w przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 35%.
5. Przybył W., **Michalski M.**, Radek N.: *Contemporary Coatings for Military Vehicles in the Context of Their Protection and Masking Effectiveness.* Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 74, 2 (2025), pp. 9-18 . **(20 pkt)**
<https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.3083>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu schematu manuskryptu, na pomocy w przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 45%.

6. Radek N., **Michalski M.**, Mazurczuk R., Szczodrowska B., Plebankiewicz I., Szczepaniak M.: *Operational tests of coating systems in military technology applications*. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 25, 1(2023), pp. 1-13. **(200 pkt, IF: 2,2, Web of Science, SCOPUS)**
<https://doi.org/10.17531/ein.2023.1.12>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu próbek do badań, wykonaniu badań adhezji, połysku, koloru oraz reflektanci, analizie wyników badań, na pomocy w przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 50%.
7. **Michalski M.**, Radek N.: *Physical properties of masking coating systems used in military technology*. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 82, 154 (2025), pp. 69-79. **(70 pkt, Web of Science)**
<https://doi.org/10.17402/643>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu materiału do badań, pomiarach grubości, twardości, chropowatości oraz wykonaniu badań połysku i koloru, analizie wyników badań, na przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 80%.
8. Radek N., **Michalski M.**, Pietraszek J., Szczepaniak M.: *Functional properties of coating systems for weapons and military vehicles*. *CONFERENCE PROCEEDINGS: 34th International Conference on Metallurgy and Materials*, 21-23.05.2025, Brno, Czech Republic, pp. 339-344. **(SCOPUS, artykuł wysłany do indeksacji: Web of Science)**
<https://doi.org/10.37904/metal.2025.5137>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu próbek do badań, współudziale w wykonaniu i analizie badań strukturalnych, pomiarach i analizie struktury geometrycznej powierzchni, współudziale w pomiarach i analizie nanotwardości oraz przyczepności, na pomocy w przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 50%.
9. **Michalski M.**: *Analiza struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych do zastosowań militarnych*. *Mechanik*, 10 (2024), str.1-4. **(20 pkt)**
<https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.10.20>

10. Radek N., **Michalski M.**, Kamiński J., Szczepaniak M., Kowalkowski S.: *Analysis of the performance properties of coating systems for military applications*. Advances in Science and Technology Research Journal, 19, 5 (2025), pp. 200-212. **(100 pkt, IF: 1,3, Web of Science, SCOPUS)**
<https://doi.org/10.12913/22998624/201155>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu materiału do badań, pomiarach i analizie chropowatości, wykonaniu badań adhezji, twardości i odporności na zużycie erozyjne, współudziale w badaniach odporności korozyjnej, analizie danych, na przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 50%.
11. **Michalski M.**: *Abrasion resistance of camouflage coating systems*. Technical Transactions, 011 (2024), pp. 1-6. **(40 pkt)**
<https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2024011>
12. **Michalski M.**, Pisarek U., Radek N., Przybył W., Szczepaniak M.: *The Influence of Operational Exposure on Changes in Parameters of Effective Camouflage of Coatings Used in Military Technology*. Advances in Science and Technology Research Journal 17, 1 (2023), pp. 182-196. **(100 pkt, IF: 1,1, Web of Science, SCOPUS)**
<https://doi.org/10.12913/22998624/156940>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu próbek do badań, wykonaniu badań połysku i koloru, pomiarach i analizie struktury geometrycznej powierzchni, współudziale w pomiarach przyczepności metodą odrywania (pull-off), analizie wyników badań, na przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).
Mój udział procentowy szacuję na 60%.
13. **Michalski M.**, Łabęcka P., Kozieł T.: *Corrosion resistance of masking coating systems used in military technology*. Ochrona przed Korozją, 68, 5 (2025), pp. 138-143 .
(40 pkt, IF: 0,4, Web of Science, SCOPUS)
<https://doi.org/10.15199/40.2025.5.2>
(Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu hipotezy badawczej, wytworzeniu materiału do badań, wykonaniu badań korozyjnych w komorze solnej, połysku, koloru oraz reflektanci, współudziale w badaniach odporności korozyjnej metodą potencjodynamiczną i impedancyjną, analizie danych, na przygotowaniu manuskryptu i odpowiedzi na recenzje).

Mój udział procentowy szacuję na 80%.

14. **Michalski M.:** *Badania starzeniowe maskujących systemów powłokowych do zastosowań w technice wojskowej.* WIEDZA OBRONNA, 291, 2 (2025), str. 89-113.

(70 pkt)

<https://doi.org/10.34752/2025-2-5>

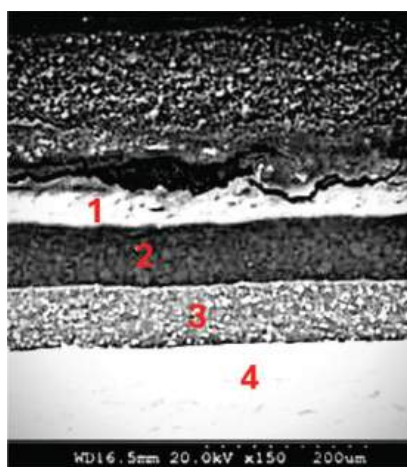
Publikacja 1

MASKUJĄCE SYSTEMY POWŁOKOWE W ZASTOSOWANIU W TECHNICIE WOJSKOWEJ. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA

STRESZCZENIE

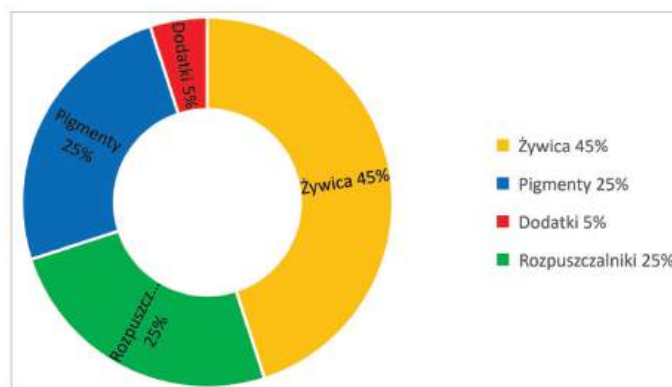
W rozdziale zaprezentowano przegląd prowadzonych badań nad rozwojem maskujących systemów powłokowych w zakresie promieniowania ultrafioletowego, widzialnego, bliskiej podczerwieni, fal radarowych. Przedstawiono również rozwiązania z użyciem lekkich materiałów, jak i nanomateriałów oraz badania eksploatacyjne tych systemów. Zaprezentowano między innymi wpływ oddziaływania temperatury na systemy powłokowe oraz badania w komorach o cyklicznie zmieniających się warunkach.

Powłoki polimerowe stanowią element systemu: otoczenie – powłoka – podłoże. Chronią one podłoże przed destrukcyjnym oddziaływaniem czynników środowiska eksploatacji. W wielu przypadkach powłoki decydują o bezpiecznym działaniu obiektu technicznego. Powłoki polimerowe są nakładane na różnego rodzaju podłoża, takie jak metale, drewno, beton, tworzywa sztuczne, tworzywa ceramiczne, w celu ochrony podłoża przed oddziaływaniem czynników zewnętrznych (mechanicznych, chemicznych, środowiskowych, cieplnych i innych), a także nadania tym podłożom odpowiednich własności dekoracyjnych oraz specyficznych zależnych od przeznaczenia. W większości zastosowań głównym celem powłok polimerowych jest ochrona podłoża przed korozją. Powłoki mają za zadanie znacznie wydłużyć trwałość eksploatacyjną chronionego podłoża. Ze względu na ich różne przeznaczenie mają one różnorodną budowę. Na rysunku 1 przedstawiono budowę typowego wielowarstwowego lakierniczego systemu powłokowego.



Rys. 1. Budowa typowego systemu powłokowego na stali S355. Uzyskana za pomocą SEM: 1 – powłoka nawierzchniowa, 2 – powłoka międzywarstwowa, 3 – powłoka podkładowa, 4 – stal (S355) [1]

Powłoki polimerowe uzyskuje się przez aplikację m.in. materiałów lakierniczych. Materiały lakiernicze są złożonymi mieszaninami, których składniki można sklasyfikować w czterech głównych grupach [2]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy skład i udziały typowych składników materiału lakierniczego.



Rys. 2. Typowe składniki materiału lakierniczego

W technice wojskowej w zależności od rodzaju sił zbrojnych i przeznaczenia stosuje się lakiernicze systemy powłokowe o różnej budowie i przeznaczeniu. Systemy te mają różne funkcje. Do podstawowych funkcji należą:

- zabezpieczenie sprzętu przed korozją,
- zabezpieczenie przed zmiennymi warunkami atmosferycznymi,
- zabezpieczenie przed promieniowaniem słonecznym,
- zabezpieczenie przed wodą morską.

Lakiernicze systemy powłokowe stosowane w technice wojskowej mają również inne funkcje, do których należą:

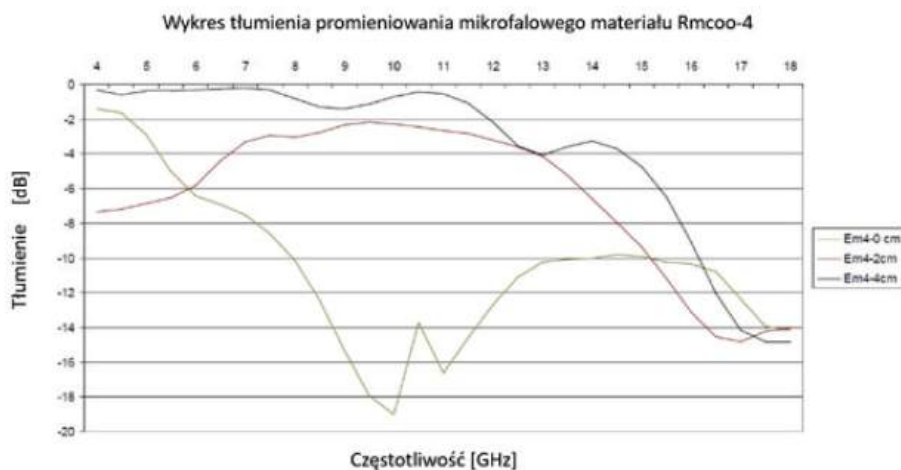
- odporność na media agresywne,
- odporność na środki bojowe i środki do likwidacji skażeń,
- maskowanie w zakresie widzialnym i w szerszym zakresie spektrum promieniowania elektromagnetycznego,
- odporność na zarysowanie,
- i inne.

1. POLIMEROWE SYSTEMY POWŁOKOWE

1.1. Powłoki maskujące

Kamuflaż jest jedną z najskuteczniejszych i jednocześnie bardziej ekonomicznych metod ukrywania sprzętu wojskowego, a tym samym uzyskiwania przewagi ofensywnej i defensywnej nad wrogiem, zarówno w obronie, jak i ataku [8]. Podstawowy kamuflaż polega na naniesieniu systemu powłokowego w kolorze otaczającego tła. Kamuflaż działa w zakresie promieniowania widzialnego. W związku z rozwojem sensorów działających w szerszym zakresie promieniowania elektromagnetycznego dąży się do uzyskania skutecznego maskowania w zakresie widma widzialnego, ultrafioletu, bliskiej podczerwieni, fal radarowych pracujących w różnych pasmach i termowizji.

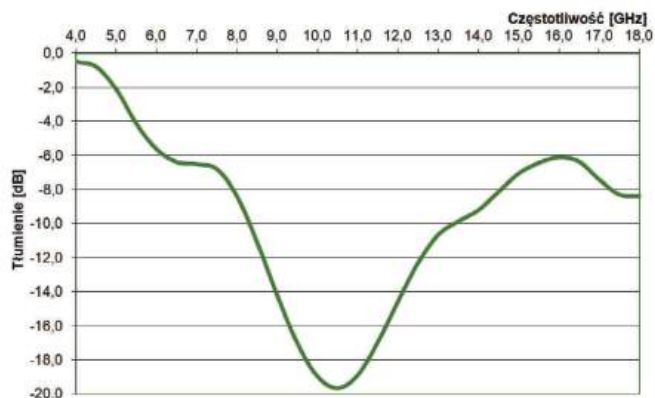
Prowadzone są badania nad zastosowaniem nowych rozwiązań w celu poprawienia skutecznego maskowania. Na rysunku 3 przedstawiono badania prowadzone w Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej na materiale Emcco-4.



Rys. 3. Wykres tłumienia promieniowania mikrofalowego materiału Emcco-4 (opracowanie własne) [3]

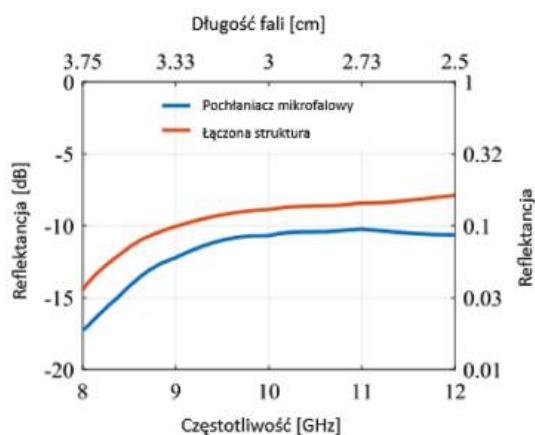
Z wykresu (rys. 3) wynika, że własności tłumienia sięgają poniżej -18 dB dla częstotliwości pomiędzy 9 GHz a 10 GHz. Natomiast w pozostałym zakresie częstotliwości wartość tłumienia jest niższa.

Podobne wyniki można zauważyć w badaniach z użyciem żelaza sferycznego zaprezentowanych na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres tłumienia promieniowania mikrofalowego materiału SP5 [10]

Ciągle doskonalenie detektorów stosowanych do wykrycia i rozpoznania obiektów wojskowych, poszerzenie zakresów ich detekcji w różnych pasmach fali elektromagnetycznej, kombinacja różnych detektorów powodują konieczność stosowania rozwiązań kamuflażu multispektralnego [4]. Prowadzone są badania nad rozwojem maskowania multispektralnego dla światła widzialnego, średniej podczerwieni (MIR, $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ i $8\text{--}14\ \mu\text{m}$), laserów ($1,55\ \mu\text{m}$ i $10,6\ \mu\text{m}$) i mikrofal ($8\text{--}12$ GHz) z możliwością chłodzenia w oknie nieatmosferycznym ($5\text{--}8\ \mu\text{m}$).

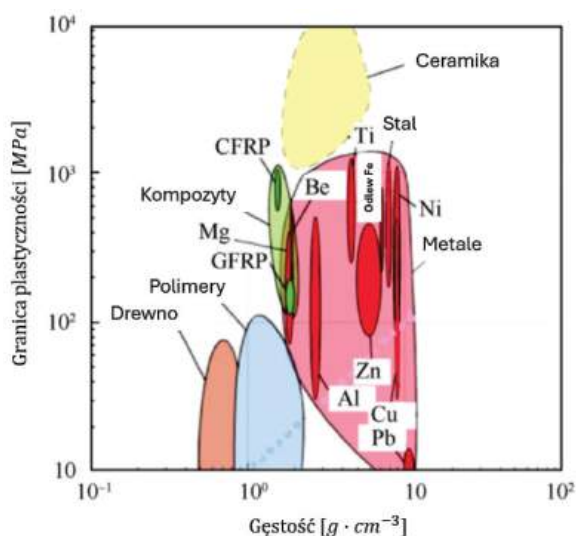


Rys. 5. Wykres tłumienia promieniowania mikrofalowego kamuflażu multispektralnego [4]

Wyniki tych prac mogą wprowadzić możliwość manipulacji wielospektralnej, przetwarzania sygnału i zarządzania ciepłem. Na rysunku 5 przedstawiono własności tłumienia fal radarowych w zakresie 8–12 GHz.

1.2. Lekkie systemy powłokowe

Postęp w przemyśle obronnym wymaga konieczności stosowania nowych zaawansowanych materiałów, do których należą między innymi materiały lekkie. Są to materiały o mniejszej gęstości, ale zapewniające podobne lub lepsze własności od materiałów używanych obecnie. Stosowanie lekkich materiałów przyczynia się do zmniejszenia zużycia energii ze względu na ich stosunek wytrzymałości do masy. Mogą wpływać na dobrą odporność termiczną, odporność na uszkodzenia, trwałość zmęczeniową. Nowa generacja mikrosfer poprawia ognioodporność, wpływa pozytywnie na zmniejszenie zdolności wykrywania w zakresie fal radarowych. Tworząc przy użyciu mikrosfer bariery cieplne, można chronić wrażliwe elementy elektroniczne przed wpływem temperatury sąsiadujących nagranych elementów. Zastosowanie lekkich materiałów w polimerowych systemach powłokowych stosowanych w technice wojskowej ma wpływ na rozwinięcie zdolności obiektów wojskowych [5]. Na rysunku 6 zaprezentowano porównanie granicy plastyczności i gęstości stali z innymi lekkimi metalami i materiałami konstrukcyjnymi stosowanymi w technice wojskowej.



Rys. 6. Porównanie granicy plastyczności i gęstości stali z innymi lekkimi metalami i materiałami konstrukcyjnymi [5]

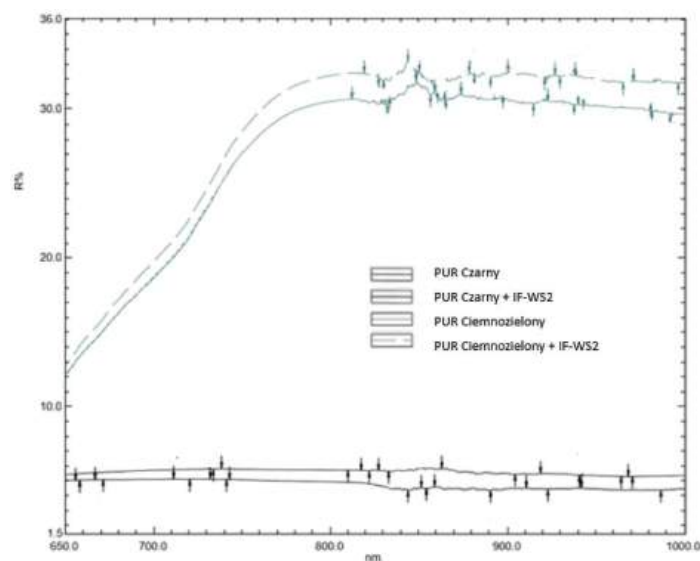
1.3. SYSTEMY POWŁOKOWE Z WYKORZYSTANIEM NANOCZĄSTECZEK

Rozwój w dziedzinie nanotechnologii i umiejętności wytwarzania nanocząstek niosą za sobą możliwość zastosowania ich w różnych gałęziach przemysłu. W wielu ośrodkach badawczych są prowadzone badania nad możliwością zastosowania polimerowych systemów powłokowych z wykorzystaniem nanotechnologii w przemyśle obronnym na wielu polach. Nanocząsteczki wpływają na zwiększenie wytrzymałości mechanicznej, mogą poprawiać własności maskujące systemu, jak również wzmacniać konstrukcję wielowarstwowych systemów powłokowych. Zwiększają odporność na uderzenia, rozciąganie i poprawiają własności ochrony antykorozyjnej [6]. Przykładowe własności mechaniczne maskującej powłoki standardowej i zmodyfikowanej przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry fizykomechaniczne systemów [6]

Właściwość	Metoda		Wymagana jakość	Próbka / Wyniki			
	SORS 1634	SORS 1564		PUR b	PUR b + 1% wag. IF-WS ₂	PUR dg	PUR dg + 0,5% wag. IF-WS ₂
Twardość, s (wahadło Keniga)	6,19	4,7	>80	90,0	97,0	101,6	109,0
Odporność na uderzenia kulek stalowych	6,20	4,8	Musi wytrzymać 4500 kulek stalowych	+(5000)	+(9500)	+(6000)	+(7500)
Odporność na ścieranie, lit. / μm	6,22	4,9	0,1 lit. pomnożona przez grubość powłok	1 lit.	1 lit.	5 lit.	>6 lit

Natomiast na rysunku 7 przedstawiono przebieg reemisji polimerowych systemów powłokowych standardowych i zmodyfikowanych nanocząsteczkami dla dwóch kolorów: czarnego i zielonego.



Rys. 7. Reemisja standardowego i zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego [6]

2. BADANIA ODPORNOŚCI MASKUJĄCYCH SYSTEMÓW POWŁOKOWYCH NA RÓŻNE NARAŻENIA

2.1. Krótkotrwałe narażenia na temperaturę

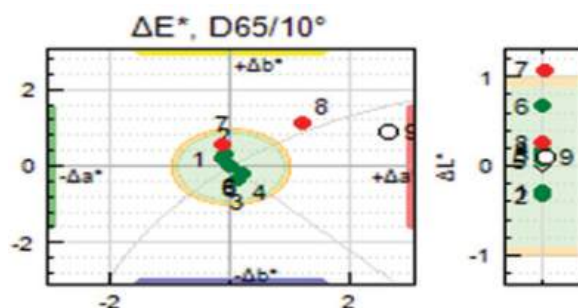
Systemy powłokowe maskujące zastosowane na pojazdach i sprzęcie wojskowym podlegają różnym narażeniom. Powinny charakteryzować się trwałymi właściwościami zapewniającymi ochronę przed degradacyjnym wpływem narażeń, takich jak warunki atmosferyczne, media eksploatacyjne, np. benzyna, olej napędowy, smar czy środki bojowe i środki do likwidacji skażeń. Autorzy publikacji [9] przedstawiają aspekt krótkotrwałego narażenia powłok maskujących na temperatury do 250°C. Maskujący system lakierniczy w trzech wariantach kolorystycznych (zielony, brązowy, czarny) poddano działaniu temperatur w zakresie od 90°C do 250°C zmieniających się co 20°C. W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiaru zmiany koloru względem wymagań normy obronnej.

Tabela 2. Zmiana ΔE względem normy obronnej dla BW400-6031, BW400-8027, BW400-9021 [9]

	90°C	110°C	130°C	150°C	170°C	190°C	210°C	230°C	250°C
BW400-6031 (zielona) ΔE^* w porównaniu do NO-80-A200	0,82	0,89	0,12	0,16	0,44	0,69	1,38	1,79	2,73
BW400-8027 (brązowa) ΔE^* w porównaniu do NO-80-A200	0,98	0,97	0,93	0,88	0,89	0,92	0,90	1,08	1,79
BW400-9021 (czarna) ΔE^* w porównaniu do NO-80-A200	0,90	0,53	0,88	0,94	1,34	0,49	1,05	0,62	0,43

W oparciu o uzyskane wyniki nie stwierdzono wpływu temperatury w powyższym zakresie na zmianę koloru maskującego systemu powłokowego.

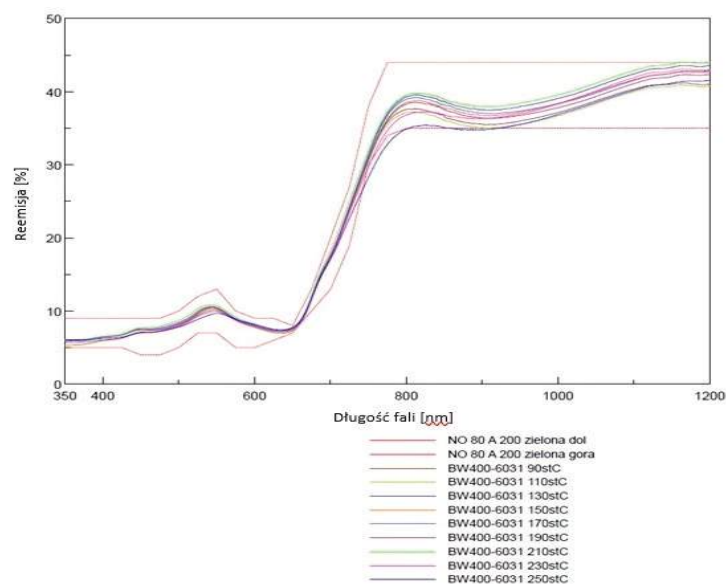
W kolejnym badaniu sprawdzono wpływ temperatury na zmianę współrzędnych barw maskujących systemów powłokowych w układzie CIE L*a*b* dla koloru zielonego, co zostało zaprezentowane na rysunku 8.



Rys. 8. Parametry koloru dla BW400-6031 (zielony). 1– 90°C, 2–110°C, 3–130°C, 4–150°C, 5–170°C, 6–190°C, 7–210°C, 8–230°C, 9–250°C [9]

Na rysunku 9 można zauważyć, że kolor zielony jest stabilny w temperaturach do 210°C.

Zbadano również wpływ temperatury na zmianę charakterystyki spektralnej systemów maskujących. Na rysunku 9 przedstawiono wyznaczoną charakterystykę dla koloru zielonego.



Rys. 9. Wpływ temperatury od 90°C do 250°C na reemisję maskującego systemu powłokowego z farbą maskującą BW400-6031 (zielona) [9]


Wyznaczone charakterystyki spektralne dla powłok narażonych na różne temperatury nie wykazały znaczących różnic.

2.2. Narażenia na ciągłą wilgoć kondensacyjną

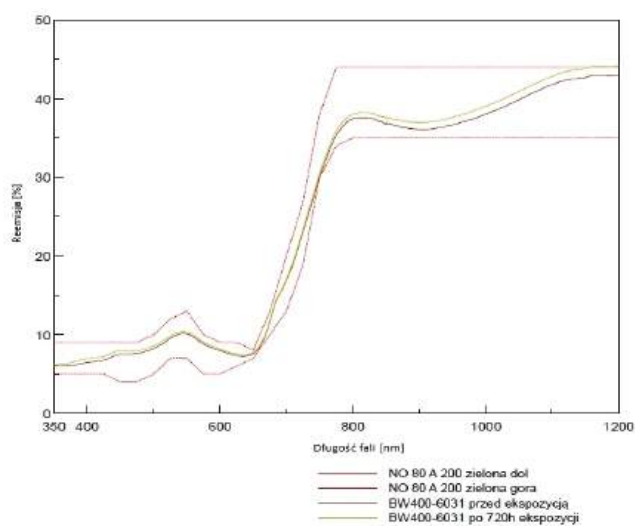
Wilgoć kondensująca się na powierzchni powłoki umożliwia przechodzenie wielu jonów do roztworu i tworzenie się w ten sposób elektrolitu, powodując możliwość wystąpienia korozji elektrochemicznej podłoża. Badanie w komorze starzeniowej przeznaczonej do wytworzenia warunków ciągłej kondensacji na powierzchni powłoki przy jednoczesnym występowaniu podwyższonej temperatury, tj. 40°C ($\pm 1^\circ\text{C}$), daje możliwość badania przyspieszonego narażenia na odporności lakierniczego systemu powłokowego na ten typ narażenia.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań maskującego systemu powłokowego w komorze wilgotnościowej HK310 firmy Kohler. Podczas badania oceniano zmiany, jakie zachodziły na powierzchni powłoki zgodnie z normą PN-EN ISO 4628.

Tabela 3. Wyniki końcowe dla maskującego systemu powłokowego po badaniu [10]

Czas ekspozycji na działanie wilgoci kondensacyjnej, h	720
Odporność na działanie wilgoci kondensacyjnej, h	Powyżej 720
Stopień spęcherzenia	0 (S0)
Stopień zardzewienia	Ri0
Stopień zluszczenia	0 (S0)
Stopień spękania	0 (S0)
Stopień korozji nitkowej	0 (S0)
Wygląd próbki po badaniu:	
	

Na rysunku 10 przedstawiono zmiany charakterystyki spektralnej przed i po narażeniu na ciągłą wilgoć kondensacyjną.



Rys. 10. Wpływ ciągłej wilgoci kondensacyjnej na reemisję powłoki maskującej BW400-6031 (zielona) [10]

3. PODSUMOWANIE

Wprowadzanie nowych sensorów do wykrywania i identyfikacji sprzętu wojskowego wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań w obszarze budowy maskujących systemów powłokowych i ich modyfikatorów. Dokonując przeglądu literatury, można zauważyć prowadzenie badań w tym zakresie. Badania te obejmują szerokie spektrum promieniowania elektromagnetycznego od fal ultrafioletowych przez bliską i daleką podczerwień, promieniowanie radarowe i termalne. Niektóre z tych badań uwzględniają ograniczenie nagrzewania się powłok wynikające z bliskiego sąsiedztwa urządzeń nagrzewających się czy też promieniowania słonecznego. Prowadzi się badania nad możliwością zastosowania nanocząsteczek i składników powłoki o niskiej gęstości. Powstawanie nowych rozwiązań systemów powłokowych rodzi konieczność badań nie tylko własności maskujących danego systemu powłokowego, ale również konieczność prowadzenia badań eksploatacyjnych tych systemów z użyciem metod najbardziej odzwierciedlających rzeczywiste warunki eksploatacji maskujących systemów powłokowych.

LITERATURA

- [1] Radek N.: *Powłoki do zastosowań w technice wojskowej technologii wytwarzania i właściwości*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2023.
- [2] Kotnarowska D.: *Powłoki ochronne*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2010.
- [3] Huanzheng Z. i in.: *Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling*, "Nature Communications" 2021, 12:1805.
- [4] Siengchin S.: *A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments*, "Defence Technology" 2023, 24, s. 1–17.
- [5] Simic D. i in.: *Nanotechnology for Military Applications – a Survey of Recent Research in Military Technical Institute*, "Scientific Technical Review" 2018, Vol. 68, No. 1, s. 59–72.
- [6] Kelly L.C.: *Low-Emissivity Topcoats for the Reduction of Thermal Infrared Emissions from Military Platforms*, "Coatings Tech" 2020, s. 18–31.
- [7] Laprus M.: *Leksykon wiedzy wojskowej*, Wydawnictwo MON, 1979.
- [8] Szczodrowska B., Mazurczuk R.: *A review of modern materials used in military camouflage within the radar frequency range*, "Technical Transactions" 2021/003.
- [9] Michalski M. i in.: *The Influence of Operational Exposure on Changes in Parameters of Effective Camouflage of Coatings Used in Military Technology*, "Advances in Science and Technology Research Journal" 2023, 17(1), s. 182–196.
- [10] Radek N. i in.: *Operational tests of coating systems in military technology applications*, „Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability” 2023, 25, 1.

Publikacja 2

PAINT COATINGS IN MILITARY APPLICATIONS GENERAL CHARACTERISTICS

doi: 10.2478/czoto-2023-0031

Date of submission of the article to the Editor: 06/11/2023

Date of acceptance of the article by the Editor: 06/12/2023

Marek Michalski¹ – *orcid id*: 0000-0003-0419-7886

¹Kelce University of Technology, F.H. Barwa, **Poland**

Abstract: The article presents an overview of research conducted on the development of camouflage coating systems in the range of ultraviolet, visible, near infrared and radar waves, as well as operational tests of these systems. Among other things, the influence of temperature on coating systems and tests in chambers with cyclically changing conditions is presented.

Keywords: camouflage, paint coatings, radar waves, corrosion resistance, military coatings.

1. INTRODUCTION

Polymer coatings are part of the system: surroundings - coating - substrate. Coating protects the substrate against the destructive influence of operating environment factors. In many cases, the coating determines the safe operation of a technical facility. Polymer coatings are applied to various types of substrates such as metals, wood, concrete, plastics, ceramics in order to protect the substrate against the effects of external factors (mechanical, chemical, environmental, thermal and other) and to give these substrates appropriate decorative and specific properties depending on destination. In most applications, the main purpose of polymer coatings is to protect the substrate against corrosion. The coatings are intended to significantly extend the service life of the protected substrate. Due to their different purposes, they have various structures. Figure 1 shows the structure of a typical multi-layer coating system (Radek, 2023).

Polymer coatings are obtained by applying, among others: paint materials. Paint materials are complex mixtures whose ingredients can be classified into four main groups (Kotnarowska, 2010). Figure 2 shows an example of the composition and proportions of typical components of the paint material.

In military technology, depending on the type of armed forces and purpose, paint coating systems of various structures and purposes are used. These systems have different functions. The basic functions include:

- protection of equipment against corrosion
- protection against changing weather conditions
- protection against solar radiation
- protection against sea water.

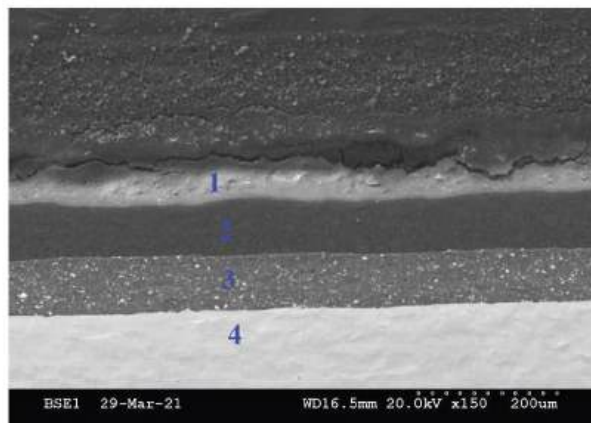


Fig. 1. SEM microphotography of the typical coating system on S355 carbon steel substrate: 1- topcoat, 2 – Inter coat, 3 – primer coat, 4 – steel (S355). Source: Radek N, 2023

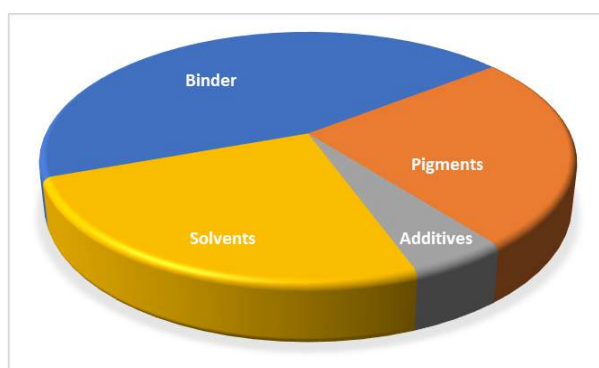


Fig. 2. Components and paint structure. Source: Kotnarowska D., 2010

Paint coating systems used in military technology also have other functions, including:

- resistance to aggressive media
- resistance to warfare agents and agents for eliminating contamination
- camouflage in the visible range and in a wider range of the electromagnetic radiation spectrum
- scratch resistance
- and other.

Modern camouflage coatings for military purposes bring innovative elements to other branches of industry, services, and research. On one hand, the military demand acts as an impetus for the development of materials and research techniques. On the other hand, it leads to the improvement of production techniques in civilian applications. This has resulted, for instance, in the creation of anti-graffiti coatings for railway rolling stock (Radek et al., 2019). This required achieving suitable corrosion resistance of the base material (Scendo et al., 2012), which was found to be linked to the effects of potentially shaping surface textures using laser technology (Scendo et al., 2013), also in specialized coatings applied through the electrospark deposition (ESD) method (Radek et al., 2008; Radek and Antoszewski, 2009), and DLC coatings (Radek et al., 2020; Radek et al., 2021). Surface smoothness also necessitates proper shaping of welded joints (Radek et al., 2018) and highly rough ESD coatings (Radek, 2009).

The coatings obtained, due to their high utility parameters, significantly impact the final product quality (Ulewicz, 2018; Pacana et al., 2021) and quality management methods (Borkowski et al., 2012). The complexity of processes requires the systematic application

of Design of Experiments (DOE) methodology (Pietraszek et al., 2020) and appropriate training for the personnel involved in these processes (Radek et al., 2023).

2. CAMOUFLAGE

Camouflage is one of the most effective and at the same time more economical methods of hiding military equipment and thus gaining an offensive and defensive advantage over the enemy, both in defence and attack (Laprus M. 1979). Basic camouflage involves applying a coating system in the colour of the surrounding background. Camouflage works in the visible radiation range. Due to the development of sensors operating in a wider range of electromagnetic radiation, efforts are being made to achieve effective masking in the visible spectrum, ultraviolet, near infrared, radar waves operating in various bands and thermal imaging.

Research is being carried out on the use of new solutions to improve effective camouflage. Figure 3 shows the research conducted at the Military Institute of Engineering Technology on the EMCCO-4 material (Szczodrowska and Mazurczuk, 2021)

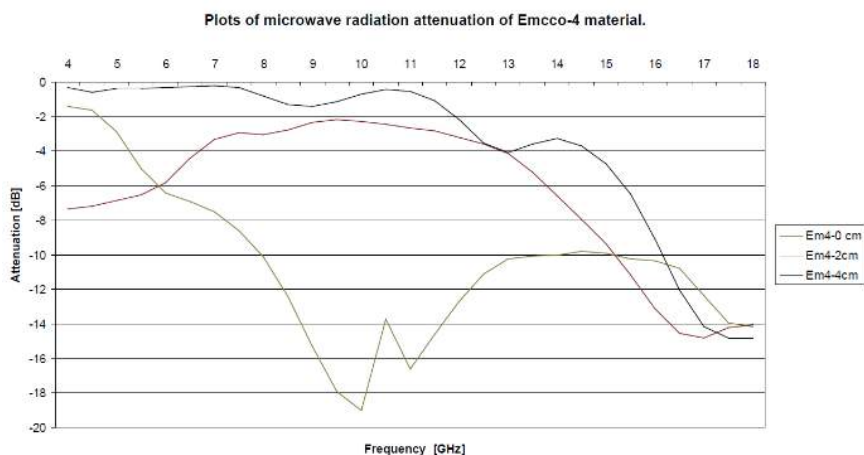


Fig. 3. Plots of microwave radiation attenuation of Emcco-4 material (own elaborators). Source: Szczodrowska B., Mazurczuk R. 2021

The graph shows that the attenuation properties reach below -18 dB for frequencies between 9 and 10 GHz. However, in the remaining frequency range the attenuation value is lower.

We can see similar results in tests using spherical iron (Radek N. 2023) presented in Figure 4.

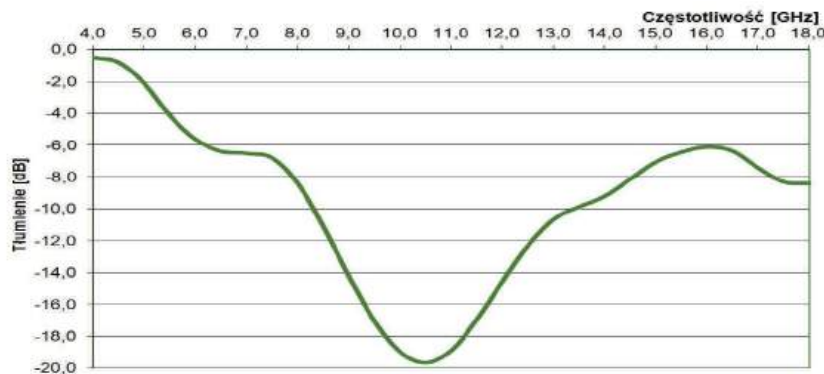


Fig. 4. Graphs of microwave radiation attenuation of SP5 material. Source: Radek N. 2023

The article (Huanzheng Z. et al., 2021) presents an example of multispectral camouflage for visible light, mid-infrared (MIR, 3-5 and 8-14 μm), lasers (1.55 and 10.6 μm) and microwaves (8- 12 GHz) with the possibility of cooling in a non-atmospheric window (5- 8μm).

The results of this work may introduce the possibility of multispectral manipulation, signal processing and thermal management. Figure 5 shows the attenuation properties of radar waves in the range of 8-12 GHz.

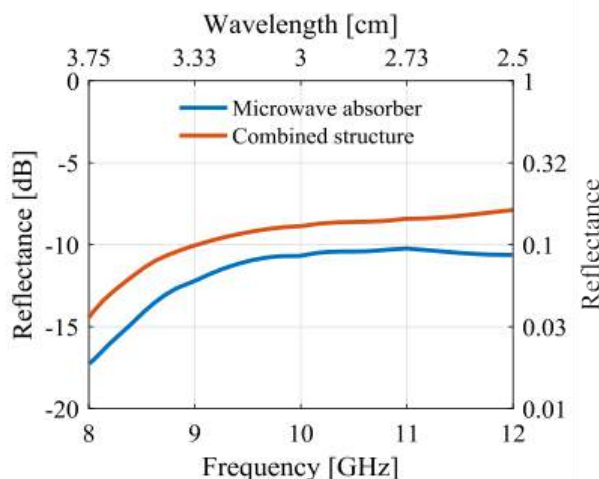


Fig. 5. Attenuation charts of microwave radiation of multispectral camouflage. (source: Huanzheng et al., 2021)

3. RESEARCH OF THE RESISTANCE OF CAMOUFLAGE COATING SYSTEMS TO VARIOUS EXPOSURES

3.1. Short-term exposure to temperature.

Camouflage coating systems used on vehicles and military equipment are subject to various exposures. They should be characterized by durable properties ensuring protection against the degradative impact of exposures such as: weather conditions, operating media, e.g. gasoline, diesel oil, grease, chemical agents and agents for eliminating contamination. The authors of the publication "The Influence of Operational Exposure on Changes in Parameters of Effective Camouflage of Coatings Used in Military Technology" present the aspect of short-term exposure of camouflage coatings to temperatures up to 250 °C. Camouflage paint system in three colour variants (green, brown, black), exposed to temperatures ranging from 90 °C to 250 °C changing every 20 °C. Table 1 shows the results of measuring the colour change in relation to the requirements of the defence standard.

Table 1

Change in ΔE relative to the defence standard for BW400-6031, BW400-8027, BW400-9021.

	90 °C	110 °C	130 °C	150 °C	170 °C	190 °C	210 °C	230 °C	250 °C
BW400-6031 (green) ΔE* in reference NO-80-A200	0,82	0,89	0,12	0,16	0,44	0,69	1,38	1,79	2,73
BW400-8027 (brown) ΔE* in reference NO-80-A200	0,98	0,97	0,93	0,88	0,89	0,92	0,90	1,08	1,79
BW400-9021 (black) ΔE* in reference NO-80-A200	0,90	0,53	0,88	0,94	1,34	0,49	1,05	0,62	0,43

Source: Michalski M. et al., 2023

Based on the obtained results, there was no influence of temperature in the above range on the colour change of the camouflage coating system.

In the next study, the influence of temperature on the change of colour coordinates of camouflage coating systems in the CIE $L^*a^*b^*$ system was checked for three colours: green, brown, black, which was presented in Figures 6 to 8.

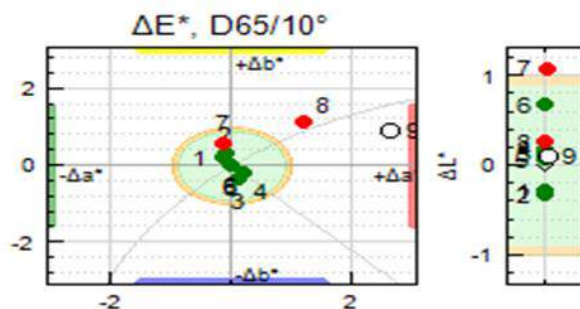


Fig. 6. Colour parameters for BW400-6031 (green). 1- 90 °C, 2- 110 °C, 3- 130 °C, 4- 150 °C, 5- 170 °C, 6- 190 °C, 7- 210 °C, 8- 230 °C, 9- 250 °C. (source: Michalski et al., 2023)

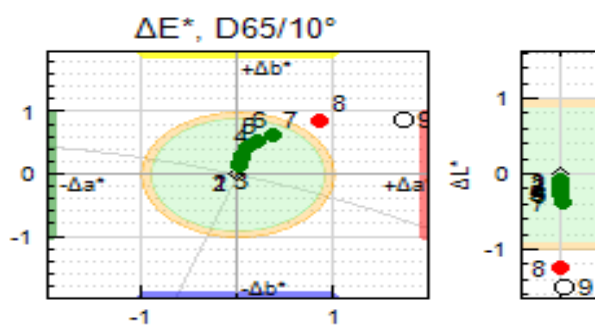


Fig. 7. Colour parameters for BW400-8027 (brown). 1- 90 °C, 2- 110 °C, 3- 130 °C, 4- 150 °C, 5- 170 °C, 6- 190 °C, 7- 210 °C, 8- 230 °C, 9- 250 °C. (source: Michalski et al., 2023)

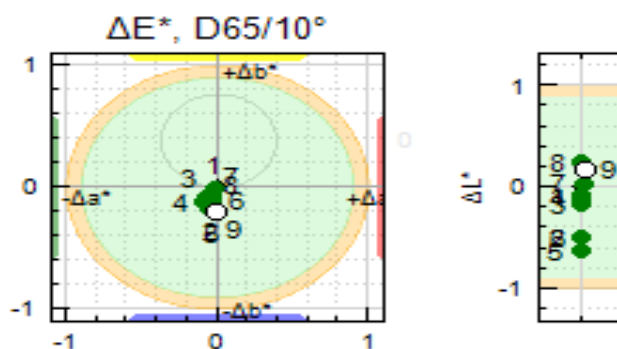


Fig. 8. Colour parameters for BW400-9021 (black). 1- 90 °C, 2- 110 °C, 3- 130 °C, 4- 150 °C, 5- 170 °C, 6- 190 °C, 7- 210 °C, 8- 230 °C, 9- 250 °C. (source: Michalski et al., 2023)

In the above figures you can see that the black colour is stable at temperatures up to 250°C, while the brown and green colours become more red and yellow.

The influence of temperature on the change in the spectral characteristics of the camouflage systems was also examined. Figure 9 shows the determined characteristics for the green colour.

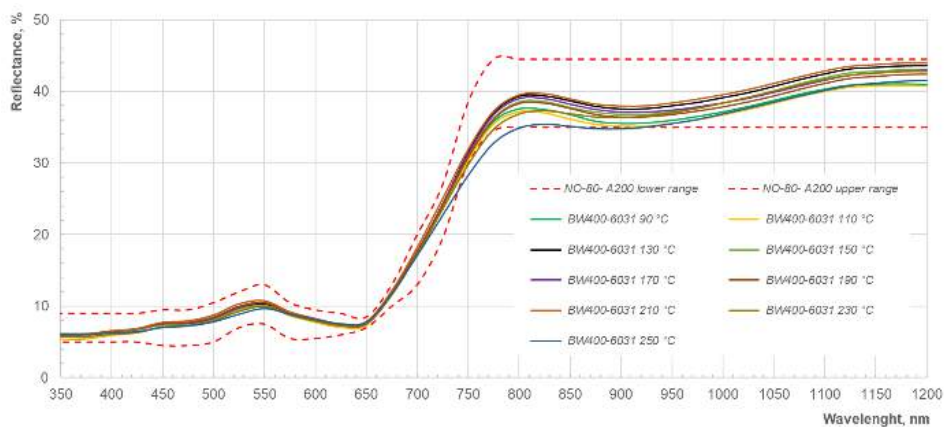


Fig. 10. Effect of temperatures from 90 °C to 250 °C on the reflectance of the BW400-6031 (green) camouflage paint coating system. (source: Michalski et al., 2023)

The determined spectral characteristics for coatings exposed to different temperatures did not show any significant differences.

3.2. EXPOSURE TO CYCLICALLY CHANGING CONDITIONS

The key aspect in selecting a camouflage coating system is its durability. It depends on a number of factors, such as: weather conditions, type of substrate used, method and conditions of surface preparation and application and drying of individual layers of the system. To assess the durability of coating paint systems taking into account environmental aspects, appropriate aging tests are used, which should be carried out in real time in various climatic zones. Testing coatings in natural conditions is a time-consuming process. This necessitates the use of accelerated artificial aging tests. It is worth noting that the simulated environment does not always correlate with the results obtained when exposing objects in natural conditions. However, accelerated artificial aging testing is essential for developing and improving coating products, but also for maintaining product quality throughout its life cycle.

The authors of the article "Operational tests of coating systems in military technology applications" present the results of cyclical aging tests conducted on a green camouflage coating system. The tests were carried out based on the PN-EN ISO 12944-6 standard. The cyclic test consisted of the stages shown in Figure 11. Stage one - test in a UV light chamber, stage two - test in a salt chamber and stage three - test at low temperature. The entire test lasts 7 days and can be repeated.

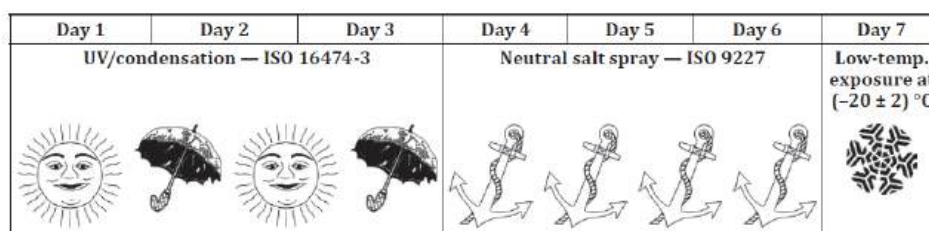
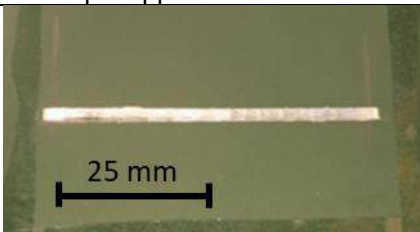
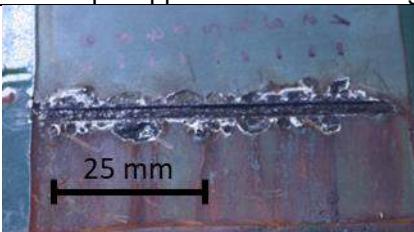


Fig. 11. Cyclic ageing test according to PN-EN ISO 12944-6 (Annex B)

Among other things, the impact of a cyclic aging test on gloss, colour and spectral characteristics was examined. Table 2 shows the results of coating destruction measurements and a photo of the coating before and after exposure.

Table 2

Results the camouflage coating system after the cyclic corrosion test according to PN-EN ISO 12944-6

Duration of exposure to cyclic climatic conditions [h]	2688
Resistance to cyclic climatic condition [h]	More than 2688
Degree of blistering	0 (S0)
Degree of rusting	Ri0
Degree of flaking	0 (S0)
Degree of cracking	0 (S0)
Degree of filiform corrosion	0 (S0)
Degree of corrosion around the scribe [mm]	2.4
The sample appearance before testing:	The sample appearance after testing:
	

(source: Radek et al., 2023)

Figure 12 shows changes in the spectral characteristics before and after exposure to changing climatic conditions.

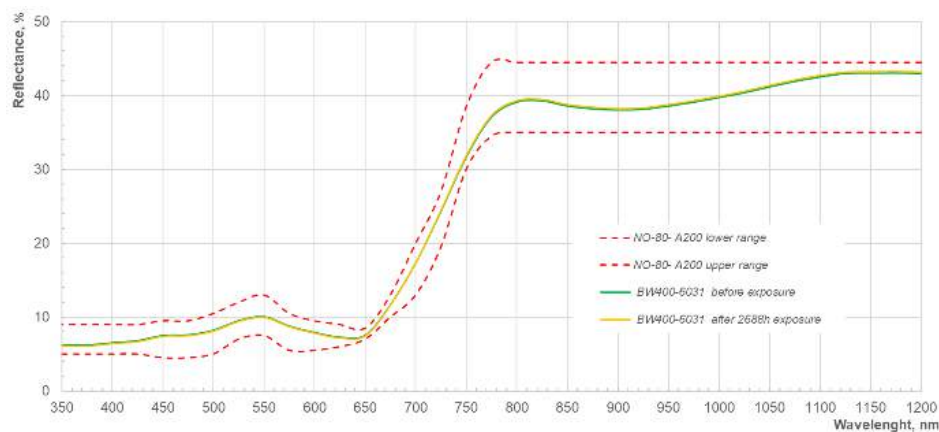


Fig. 12. Influence of cyclic changing climate conditions on the reflectance of BW400-6031 (green) camouflage coating. (source: Radek et al., 2023)

4. CONCLUSIONS

The implementation of new sensors for detecting and identifying military equipment forces the search for new solutions in the area of building camouflaging coating systems and their modifiers. When reviewing the literature, one can notice that research has been conducted in this area. This research covers a wide spectrum of electromagnetic radiation, from ultraviolet waves through near and far infrared, radar and thermal radiation. Some of these tests take into account the limitation of heating of coatings resulting from the close

proximity of heating devices or solar radiation. The development of new solutions of coating systems creates the need to test not only the camouflage properties of a given coating system, but also the need to conduct operational tests of these systems using methods that most closely reflect the actual operating conditions of masking coating systems.

REFERENCES

- Borkowski, S., Ulewicz, R., Selejdak, J., Konstanciak, M., Klimecka-Tatar, D., 2012. *The use of 3x3 matrix to evaluation of ribbed wire manufacturing technology*, METAL 2012 – 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 1722-1728.
- Huanzheng Z. et al., 2021. *Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling*. Nature Communications, 12, art. 1805. DOI: 10.1038/s41467-021-22051-0
- Kotnarowska, D., 2010. *Powłoki ochronne*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, Poland.
- Lance C. Kelly, 2020. *Low-Emissivity Topcoats for the Reduction of Thermal Infrared Emissions from Military Platforms*, CoatingsTech, April 2020, 18-31.
- Laprus M. *Leksykon wiedzy wojskowej*. Wydawnictwo MonI 1979.
- Michalski M. et al., 2023. *The Influence of Operational Exposure on Changes in Parameters of Effective Camouflage of Coatings Used in Military Technology*, Advances in Science and Technology Research Journal, 17(1), 182-196. DOI: 10.12913/22998624/156940
- Pacana, A., Czerwinska, K., Dwornicka, R., 2021. *Analysis of quality control efficiency in the automotive industry*, Transportation Research Procedia, 55, 691-698. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.037
- Pietraszek, J., Radek, N., Goroshko, A.V., 2020. *Challenges for the DOE methodology related to the introduction of Industry 4.0*, Production Engineering Archives, 26(4), 190-194. DOI: 10.30657/pea.2020.26.33
- Radek, M., Pietraszek, A., Kozień, A., Radek, K., Pietraszek, J., 2023. *Matching Computational Tools to User Competence Levels in Education of Engineering Data Processing*, Materials Research Proceedings, 34, 453-459. DOI: 10.21741/9781644902691-52
- Radek, N., 2009. *Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition*, Eksploatacja i Niezawodność, 44(4), 10-16.
- Radek N. 2023. *Powłoki do zastosowań w technice wojskowej technologie wytwarzania i właściwości*, Monografia M160, 2023.
- Radek, N., Antoszewski, B., 2009. *The influence of laser treatment on the properties of electro-spark deposited coatings*, Kovove Materialy, 47(1), 31-38.
- Radek, N., Michalski, M., Mazurczuk, R., Szczodrowska, B., Plebankiewicz, I., Szczepaniak, M., 2023. *Operational tests of coating systems in military technology applications*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 25(1), art.12. DOI: 10.17531/ein.2023.1.12
- Radek, N., Pietraszek, J., Goroshko, A., 2018. *The impact of laser welding parameters on the mechanical properties of the weld*, AIP Conference Proceedings, 2017, art.020025. DOI: 10.1063/1.5056288

- Radek, N., Pietraszek, J., Pasieczynski, Ł., 2019. *Technology and application of anti-graffiti coating systems for rolling stock*, METAL 2019 – 28th Int. Conf. on Metallurgy and Materials, 1127-1132. DOI: 10.37904/metal.2019.909
- Radek, N., Pietraszek, J., Szczotok, A., Fabian, P., Kalinowski, A., 2020. *Microstructure and tribological properties of DLC coatings*, Materials Research Proceedings, 17, 171-176. DOI: 10.21741/9781644901038-26
- Radek, N., Tokar, D., Kalinowski, A., Pietraszek, J., 2021. *Influence of laser texturing on tribological properties of DLC coatings*, Production Engineering Archives, 27(2), 119-123. DOI: 10.30657/pea.2021.27.15
- Radek, N., Wajs, E., Luchka, M., 2008. *The WC-Co electrospark alloying coatings modified by laser treatment*, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 47(3-4), 197-201. DOI: 10.1007/s11106-008-9005-7
- Scendo, M., Radek, N., Trela, J., 2013. *Influence of laser treatment on the corrosive resistance of WC-Cu coating produced by electrospark deposition*, International Journal of Electrochemical Science, 8(7), 9264-9277.
- Scendo, M., Trela, J., Radek, N., 2012. *Purine as an effective corrosion inhibitor for stainless steel in chloride acid solutions*, Corrosion Reviews, 30(1-2), 33-45. DOI: 10.1515/CORREVEV-2011-0039
- Suchart S., 2023. *A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments*, Defence Technology, 24, 1-17.
- Szczodrowska B., Mazurczuk R., 2021. *A review of modern materials used in military camouflage within the radar frequency range*, Technical Transactions, 118, art. e2021003. DOI: 10.37705/TechTrans/e2021003
- Ulewicz, R., 2018. *Outsourcing quality control in the automotive industry*, MATEC Web of Conf., 183, art.03001. DOI: 10.1051/matecconf/201818303001

Publikacja 3

Virtual Methods of Testing Automatically Generated Camouflage Patterns Created Using Cellular Automata

PRZYBYŁ Wojciech^{1, a*}, MAZURCZUK Robert^{1, b}, SZCZEPANIAK Marcin^{1, c},
RADEK Norbert^{2, d} and MICHALSKI Marek^{3, e}

¹Military Institute of Engineer Technology, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, Poland

²Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering,
Al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Poland

³F. H. Barwa, ul. Warkocz 3-5, 25-253 Kielce, Poland

^aprzybyl@witi.wroc.pl, ^bmazurczuk.r@witi.wroc.pl, ^cszczepaniak@witi.wroc.pl,
^dnorrad@tu.kielce.pl, ^emmichalski@barwa.kielce.pl

Keywords: Military, Camouflage, Image Processing, Virtual Reality, Circular Automata

Abstract. The article presents a method of designing and assessing the camouflage effectiveness of a novel camouflage pattern used in military uniforms. “Artificial intelligence”, namely cellular automata, which, based on terrain imaging, allowed the authors to obtain dedicated, tailor-made, or universal camouflage patterns, was used as the design method. On the other hand, the study on camouflage effectiveness was based on tests with the participation of observers in a virtual environment using a personal computer.

Introduction

Camouflage is one of the most effective and, simultaneously, more economical methods of concealing the forces, and thus gaining an offensive and defensive advantage over the enemy, both in defense and in an attack [i] Given the technological progress, especially in the field of sensors, on today's battlefield the reconnaissance can be conducted via hyperspectral imaging, i.e. from a wide range of the electromagnetic spectrum, covering not only the visible spectrum but also near- and far-infrared (thermal vision) and microwave (radar) radiation wavebands.

On the other hand, multispectral methods are also employed for this purpose. These are based on the acquisition of data from selected characteristic frequencies (channels), e.g. where spectral characteristics of live flora include the minimum locally 670 nm (VIS red) and maximum 800 nm (NIR). So a good battle dress uniform (BDU), an effective camouflage coating, or proper vehicle camouflage painting should fit into the background in a wide range of electromagnetic spectra.

The Eye as a Tool

However, the human eye remains the essential reconnaissance instrument. It is equipped with a retina, on the surface of which two types of sensors are located: rod cells responsible for monochromatic and night vision (scotopic vision) and cone cells [ii] responsible for color vision and functioning in daylight (photopic vision). The former (amounting to about 120 million), due to their location outside of the central part of the retina, do not provide acute vision but are about 100 times more sensitive to light than the cone cells and react well to movement. On the other hand, the cone cells (about 6 million), thanks to their huge concentration – mainly in the central part of the retina [iii], near the macula (macula lutea) – ensure sharp vision, especially up to 20 degrees in the visual axis of the human eye.

Moreover, due to their sensory characteristics, the cone cells have a particularly good but selective color sensitivity[iv]. Hence, there are cone receptors sensitized to visible shortwave radiation (short-preferring (S), with peak spectral sensitivity at approx. 420 nm) responsible for the perception of blue color, those sensitive to colors with medium wavelengths, such as green (mid-preferring (M), with the peak at approx. 530 nm)) and the ones sensitive to colors with long wavelengths (long-preferring (L), with the peak at around 565 nm)), such as red.

Stimulating these three types of cones in the right proportions allows the eye to perceive (trichromatism). In the case of sufficiently intense and balance stimulation of all three types of cone cells, humans are capable of seeing the color white (white light).

Considering the limitations and inadequacies of the human sense of sight – trichromatism, and not detecting a continuous signal in the visible range (400-700 nm), the CIE 1931 XYZ color space was developed to correspond to human perception. To obtain a perceptually uniform space, one in which the colors could be compared easily, the CIE XYZ model underwent mathematical transformations, resulting in the CIELAB model, where “L” is light, “a” is a color from green to crimson, and “b” corresponds to the colors blue to yellow. This model is used as the primary device-independent model for describing and comparing colors.

Camouflage Patterns

We can therefore distinguish central and peripheral vision. In terms of the camouflage itself, its goal is to neutralize distinctive features of the object to be camouflaged. These physical properties make the object stand out from the background and focus the observer’s attention. They include, among others, the color, shape, size, gloss (shine), contrast, and interrupted continuity of the background. Three main types of patterns can be distinguished (Fig. 1):

- the mimetic pattern, whose function is to cause the object to blend into its background of the terrain (crypsis). Detection is minimized while the observer makes an eye sweep;
- the disruptive (dazzle) pattern is to break the shape of the given object so that the observer has greater difficulty focusing their attention on the given object and, what follows, recognizing or even identifying this object.
- the mixed pattern, i.e., mimetic-disruptive pattern, where the mimetic camouflage is obtained by applying intricate details referring to the terrain background, and the disruptive element is its proper aggregation.



Fig 1. Types of camouflage: a) mimetic – bird [v]; b) dazzle – USS Hobson [vi];
c) mixed – Danish M84 [vii]

Camouflage patterns are usually dedicated to a selected environment: forest, desert, an agricultural area, urban surroundings, etc. One extreme case is the photorealistic camouflage used by nature observers or hunters. Attempts were also made to design and implement a universal camouflage pattern to provide adequate protection in diverse environments, e.g., forests and rocky areas. However, their universality was revealed to be questionable.

Currently, in several research centers worldwide, including WITI (Fig. 2), work is underway on technologies that would enable the creation of adaptive camouflage, which would automatically adjust itself to its background.



Fig. 2. Electrochromic cells change their color with the voltage applied

Generation of Camouflage Pattern

The main goal of the camouflage pattern designed by the authors was its effectiveness and applicability, which meant the possibility of using it in specific military applications (uniforms, camouflage nets, mobile camouflage, camouflage painting of vehicles). However, several limitations have been imposed on the design, including the guidelines on the nature of camouflage and the technological requirements resulting from the assumed perceptual model of the human eye. These included:

- reduction of the number of colors to only a few;
- creating a micro-pattern with mimetic functions;
- obtaining a macro-pattern disrupting the silhouette outline;
- avoidance of a noticeably repetitive pattern;
- the pattern has to blend well with the given environment.

To meet the above requirements, the authors chose a method based on processing representative images of the selected environment. The work used only images that meet the above requirements. At least five photographs were selected for a given type of environment (such as a Central European forest) and season (e.g., summer). Only the areas that could serve as the proper background were cut out of these images for further processing, and so, for example, forest areas, sky, or ground were discarded. In contrast, fragments showing forest vegetation were left (Fig. 3).

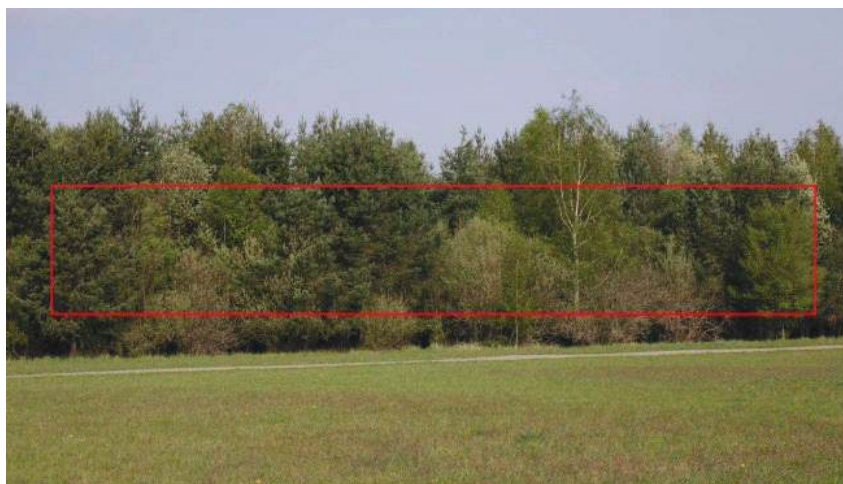


Fig. 3. Fragment of the photograph selected for further processing

The next step was to reduce the color palette too, but a few – in the works, it was decided to use 4, as this is the most common number of colors for uniforms and camouflage covers. After

analyzing various methods, the global algorithm with the minimal variance (the so-called Otsu method of automatic image thresholding) was selected and tested, which enabled the selection of colors representative for the entire set of representative frames. The method is based on dividing the color space into areas with a minimum variance inside each area and with maximum variance between the areas. Afterward, a color representative for each area is indicated. This can be done, among others, using the median or weighted average method to obtain the colors that are most different from one another and with the greatest possible optical contrast between them.

This method yielded not only four representative color coordinates in the CIELAB color space model but also the percentage share of individual colors, and the processed images with a reduced number of colors assumed the form of textures containing a large number of fine spots (micropattern) and no macro pattern (Fig. 4).



Fig. 4. Image with the colors reduced to four

To obtain the macro pattern, the authors reviewed the techniques of grouping pixels and decided that cellular automata (CA) would be employed for further investigations.

Similarly, as artificial neural networks, cellular automata facilitate replacing complex descriptions of complicated circuits with a system of numerous simple circuits with simple rules [viii] Cellular automata are constructed of neighboring cells, forming a network of d-dimensions, where each cell at a given moment (cycle) can assume one of the defined states at a given moment (cycle). The way states alter between successive cycles is determined by simple rules relating to the state of the cell and its neighbors (Fig. 5).

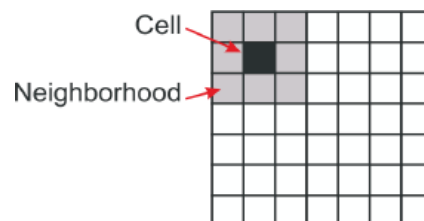


Fig. 5. Cellular automata system model

In the adopted camouflage design methodology, what follows the stage of reducing the number of colors is graphics described as pairs of two-dimensional arrays:

- a color matrix with dimensions of $n \times 3$, where n specifies the number of colors used; in the authors' case, it was 4, and the number 3 corresponds to the color coordinates of the CIELAB color space model, where L can assume the values from 0-100, and a and b – from 128 to 127;
- pixel matrix with dimensions $x \times y$, where x and y are the width and height of the graphic expressed in pixels, respectively, the colors of the graphic are described by the color index from the color matrix; in the authors' case, there were four colors, from 0 to 3.

The image model adopted in this manner made it possible to directly translate them into the cellular automata model, in which a 2-dimensional network of cellular automata was incorporated. The network corresponded to the pixel matrix, with states defined by the index from the color matrix.

Among the distinct types of neighborhoods (Fig. 6a and Fig. 6b), the von Neumann neighborhood was selected (Fig. 6c), and in the case of cells at the margins, they were supplemented with cells from the opposite side of the network that was to surround them.

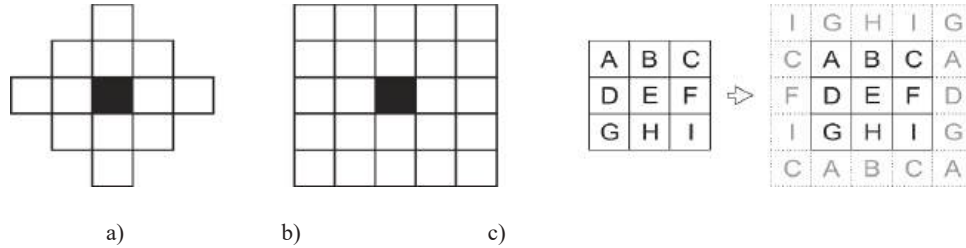


Fig. 6. a) the Moor and b) von Neumann neighborhood; c) surrounding the cells at the margins

As the result of the review and testing of diverse types of CA, the majority-vote CE type, with $r = 1$, and 4 states, was used in work. The transition rule (function) determined the new state as the one which obtained the highest number (sum) of states in the previous cycle for the cell and its neighborhood (Fig. 7).

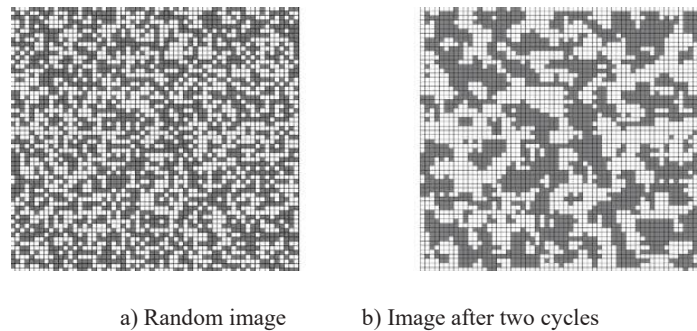


Fig. 7. Operation of the majority vote-type cellular automata

Further image processing using CA, involved an averaged image created out of n (min. 5) images with a reduced number of colors k ($k = 4$). The images were unified in terms of the scale of the elements in the photo so that in each image, 1 px corresponds to the same dimension in each image ($\text{px/cm} = \text{constant}$). All images have also been cropped to one size $x \times y$.

Then, a 3-dimensional array with dimensions $[y \times x \times n]$ was created from those layers, and it corresponded to the size of the frame and the number of images and contained images (pixels) in the form of successive layers (Fig. 8a). To obtain an averaged image, the 3-dimensional array $[y \times x \times n]$ was reduced to a 2-dimension matrix $[y \times x]$, taking the value for the $[y, x]$ cell as the most frequent value for all the layers n of the array for this index in the matrix (Fig. 8b).

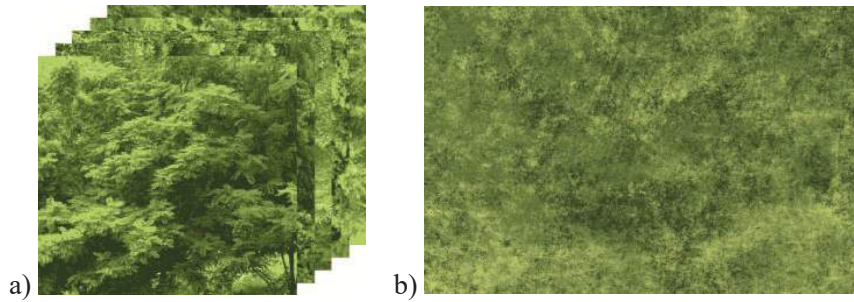


Fig. 8. 3-dimensional table created out of several images and a) its averaged version b)

After several cycles of cellular automata operation, the authors received a macro pattern. CA operation was stopped when the size of the larger macro pattern spots reached the intended maximum size for a given application. Per the defensive standard [ix], this threshold was set at 0.3 of the dimension of the camouflaged object. For example, for uniforms – $0.3 \times 200 \text{ cm} = 60 \text{ cm}$, and for medium-sized armed personnel carrier – $0.3 \times 800 \text{ cm} = 240 \text{ cm}$. The generated pattern is shown in Figure 9.



Fig. 9. Camouflage pattern generated using CA

The next step was to verify the camouflage effectiveness of the newly created pattern. For this purpose, the camouflage had to be applied to the military facility/object for which it was intended (e.g., a uniform, camouflage net, etc.) and then assessed. Initial tests could be conducted in a virtual environment using camouflage patterns and 3D models of military objects (Fig. 10), and the final tests, once verifying the camouflage on real objects during field tests using observers.



Fig. 10. Application of the camouflage pattern onto a 3D object

Virtual Environment

Bearing in mind the constraints of human vision, the concepts of a virtual environment [x] were presented to assess camouflage effectiveness of the newly designed camouflage patterns, which, based on modern computer systems and displays, could largely replace the onerous and quite expensive field research (Fig. 11), in particular at the initial stage of designing camouflage patterns

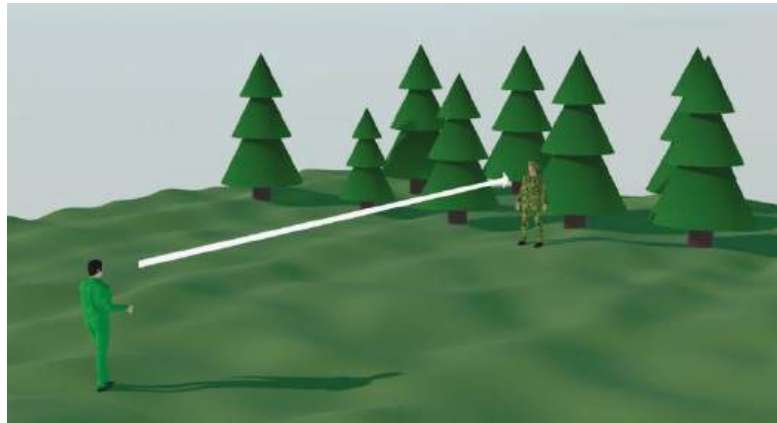


Fig. 11. Graphic representation of field tests

Virtual environment studies are based on presenting the observers with images containing the background (most often real images) from a given distance with a model of a camouflage pattern on the background (Fig. 12) and performing a typical detection-recognition-identification (DRI) assessment during which the observer states, whether the object has been detected (D), recognized (R) or identified (I). Detection is understood to mean the presence of an object, recognition – the ability to determine the type of object spotted (e.g., a tank), and identification, where the observer can provide details of the kind of object spotted (e.g., an M1 Abrams main battle tank).



Fig. 12. Typical virtual test display

Additionally, the time measurement for each observer from the start of the observation to the occurrence of either D, R, or I, for each image under observation.

One of the measures of central tendencies is taken as the test results. Usually, it is the average, or in the case of a large spread – the median of the distance, and the average or median of the detection, recognition and identification times for a given pattern against a given background. This is recorded for at least 6 observers.

To ensure the conditions for virtual tests resemble those in the natural environment the most, quite a few conditions have to be met and the researchers have to have at their disposal the following:

- images that have to meet most of the requirements [xi] in terms of quality – appropriate spatial and tonal resolution, correct model and color space, good sharpness, lighting, white balance, and be with the attached metadata on the environmental and atmospheric conditions, location (geographical), direction (NSEW) and time of when the image was taken, distance from the background (observation border), as well as its photographic parameters (focal length of the lens, size of the matrix, shutter, diaphragm);
- models of objects with the tested camouflage applied to them, and the camouflage colors are in a tightly controlled color scheme;
- a test station ensuring the correct colors representation (calibration and color management system) and appropriate simulation of the observation distance, which results from the image geometry and which in virtual testing means the distance from the display to the observer, and one which will also enable testing in accordance with selected methodologies and registration of test parameters.

In addition, it is also necessary to visually synchronize the model and the background to ensure that their sizes, lighting, and color space are consistent. The benefits of research studies performed in virtual environments include, first of all:

- becoming independent from the availability of training areas (proving grounds) with the required background, for which the camouflage pattern is dedicated. The desired terrain may not be accessible due to e.g., military operations and weather conditions.
- independence from weather conditions and the season;
- allowing research to be conducted in safe and comfortable conditions where observers can focus on reconnaissance;
- access to a convenient and immediate preview of the test results, thanks to the analytical module, which is a part of the virtual research management system;
- availability of military equipment and soldiers necessary to carry out field research is no longer an issue.

Summary

The proposed method of generating and testing camouflage patterns enables the design of novel patterns containing both the micro-pattern responsible for blending the camouflaged object into the background, thus reducing the likelihood of detection and the macro-pattern, which disrupts the silhouette outline and makes the object recognition challenging. The discussed methods can be used to design camouflages for various military objects: uniforms, camouflage covers, mobile camouflages, or vehicles with camouflage painting. The investigated pattern-generating method allows obtaining patterns both strictly dedicated to specific environments and seasons, as well as more universal patterns, depending on the provided initial images.

Together with the virtual testing method, which enables economic and quick testing, several individual solutions can be evaluated, not only limited to different types of cellular automata but also using morphological transformations, genetic algorithms, or artificial neural networks to find the most optimal solutions. In the future, it would be worthwhile to perform further cognitive science research in the field of image perception and recognition to replace human observers with their artificial counterparts, which would reduce the testing costs even further and which would lead to obtaining even more effective camouflage solutions using various camouflage patterns. The presented methods do not have to be constrained to the visible spectrum, and if the researchers had at their disposal an appropriate library of images from other electromagnetic spectra, that would allow them to design and examine solutions for the different ranges as well.

References

- [1] M. Laprus. *Leksykon wiedzy wojskowej*. Wydawnictwo MON, Warszawa, 1979.
- [2] H. Hofer, J. Carroll, D. R. Williams, Photoreceptor mosaic, in: L.R. Squire (ed.), *Encyclopaedia of Neuroscience*, Academic Press, 2009, 661-668.
<https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01814-3>
- [3] D.M. Dacey. Parallel pathways for spectral coding in primate retina. *Annual Review of Neuroscience* 23 (2000) 743-775. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.23.1.743>
- [4] B.B. Lee. The evolution of concepts of colour vision, *Neurociencias* 4 (2008) 209–224.
- [5] BirdsVarious0013 [online]. [accessed: 2022-01-31]. Available from:
<https://www.textures.com/download/BirdsVarious0013/40251>
- [6] NH 53549 USS Hobson (DD-464) [online]. [accessed: 2022-01-31]. Available from:
<https://www.history.navy.mil/our-collections/photography/numerical-list-of-images/nhhc-series/nh-series/NH-53000/NH-53549.html>.
- [7] Danish M84 Kampuniform Pattern [online]. [accessed: 2022-01-31]. 2020. Available from:
<https://www.joint-forces.com/kit-camo/32901-danish-m84-kampuniform-pattern?fbclid=IwAR2c7C6Yj4pphLowqrJwyHFihCEUGknfnJ2vuzjaMVknqw8S6SFLZQ3aF8U>
- [8] S. Wolfram. *Physica*, North-Holand, Amsterdam, 1984.
- [9] Polska Norma Obronna NO-10-A800:2007, Malowanie maskujące uzbrojenia i sprzętu wojskowego, Wymagania ogólne – NO-10-A800.
- [10] W. Przybył, I. Plebankiewicz, A. Januszko. A Concept of Virtual Reality in Military Camouflage Application. *Materials Research Proceedings* 17 (2020) 86-93.
<https://doi.org/10.21741/9781644901038-13>
- [11] W. Przybył, I. Plebankiewicz, A. Januszko, C. Śliwiński, W. Malej. Images of the environment and models of military objects in virtual method of assessing camouflaging efficiency. *Selected issues of mechanical engineering technologies* (2020) 234-242.

Publikacja 4

Radar Recognition: Paint Coatings with Absorption Properties in the Microwave Range

PRZYBYŁ Wojciech^{1,a*}, MICHALSKI Marek^{2,b}, MAZURCZUK Robert^{1,c},
BOGDANOWICZ Krzysztof A.^{1,d} and RADEK Norbert^{3,e}

¹Military Institute of Engineer Technology, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, Poland

²F. H. Barwa, ul. Warkocz 3-5, 25-253 Kielce, Poland

³Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Machine Building, Al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Poland

^aprzybyl@witi.wroc.pl, ^bmmichalski@barwa.kielce.pl, ^cmazurczuk.r@witi.wroc.pl,
^dbogdanowicz@witi.wroc.pl, ^enorrad@tu.kielce.pl

Keywords: Radar, Coatings, Absorption, Microwave

Abstract. The article presents the characteristics of modern reconnaissance systems in the radar range and camouflage methods for this range. Two absorbers of electromagnetic radiation in the 4-18 GHz range were tested, measuring their attenuation properties. Carbonyl iron and thin-walled hollow microspheres based on soda-lime-borosilicate glass were tested, on the basis of which paint coatings with different shares of absorbers and different coating thicknesses were produced. The attenuation properties of both absorbers were determined and attention was paid to the maximum values and frequencies for which they occur. Further directions of research were also proposed in order to obtain varnish coatings that are an effective camouflage agent in radiolocation.

Introduction

On the contemporary battlefield, as shown by recent full-scale conflicts, artillery, both barreled and rocket artillery, as well as armored forces with accompanying mechanized infantry units, still play a decisive role. On the fronts of modern conflicts, the improvement of means of destruction is observed, increasing the share of "intelligent" weapon components. However, what ensures their effective attack, even for the most modern system, is effective reconnaissance. In close range and direct combat, the human eye is still the basic reconnaissance device, but since the invention of the rifle, later cannons, then rockets and airplanes, the area of direct combat has been constantly increasing. For reconnaissance purposes, a number of sensors are used that operate in different ranges of electromagnetic radiation (Fig.1).

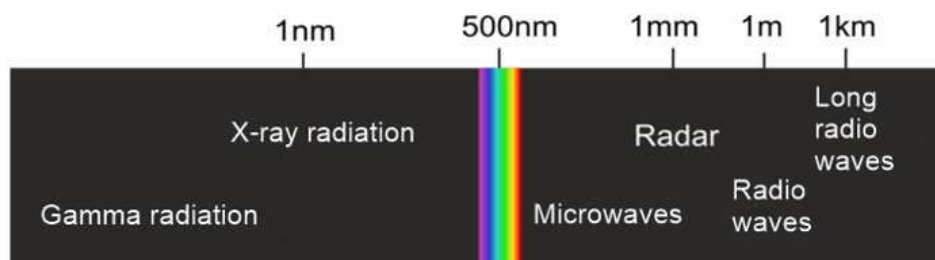


Fig.1. Scheme of the electromagnetic radiation spectrum

Sensors in the optical and thermal bands are commonly used – especially for closer distances. On the other hand, for longer distances, radars operating in the microwave band up to hectometer waves are used. Due to various properties, e.g. reflection or absorption by water vapor, penetration through selected media, etc., they find various applications: telecommunications, meteorological,

SAR or military reconnaissance. Therefore, the frequency was divided into different bands (Table 1),

Table 2. Frequency division into bands (source: [1])

Band name	Frequency range [GHz]	Wavelength range [cm]	Band's symbol
VHF	0.1 - 0.3	300 - 100	A
UHF	0.3 - 0.5	100 - 60	B
	0.5 - 1.0	60 - 30	C
L	1 - 2	30 - 15	D
S	2 - 3	15 - 10	E
	3 - 4	10 - 7.5	F
C	4 - 6	7.5 - 5	G
	6 - 8	5 - 3.75	H
X	8 - 10	3.75 - 3	I
	10 - 12	3 - 2.5	J
Ku	12 - 18	2.5 - 1.67	J
K	18 - 26.5	1.67 - 1.1	J (do 20 GHz)
Ka	26.5 - 40	1.1 - 0.75	K
Millimeter wave	40 - 100	0.75 - 0.3	L (do 60 GHz)
			M (>60 GHz)

Several bands are used in reconnaissance applications. Here are some example uses:

- S band – NUR-15 – three-coordinate complementary radar for radar coverage and detection of low-flying targets; the AN/APY-2 radar station of the E-3/AWACS aircraft;
- Band C – LIWIEC artillery reconnaissance radar set;
- Band X – AN/APG-66 radar station of the F-16 aircraft; RPW-10 – battlefield radar (Figure 2);
- Ku-band – AN/PPS-5C – battlefield radar;
- L band – 59N6E Protiwnik-GE – long range radars.



Fig.2. PGSR-3i Beagle battlefield reconnaissance radars (source: [2])

The main task of the radars is to raise the situational awareness in the theatre of war by detecting, locating and identifying ground and air objects, thanks to the registration of their radar echoes by the antennas. Some of them that use the Doppler effect can also contain information about the speed of a moving object. Others using synthetic aperture radar (SAR) are able to produce a three-dimensional image of the terrain, and sometimes also determine the type of material, shape and size of the object. Currently, the most modern radars are AESA – Active Electronically Scanned Array, whose antenna consists of many independently, electronically controlled modules, which makes it possible to track many targets. They are also characterized by greater resolution and accuracy (Fig.3).



Fig.3. C-band AESA radar used in the ZDPSR BYSTRA radiolocation station (source: [3])

The vast majority of radars are equipped with receiving antennas as well as emitting electromagnetic pulses, which makes them easy targets to track. Passive radars, which do not send their own signals, do not have this handicap, and they receive the radar echo from other sources, which may be, for example, telecommunication transmitters (telephony, radio, terrestrial or satellite TV).

An important element of the modern battlefield is to hide your own forces from the enemy's radar reconnaissance. One way to achieve this goal is to construct your own objects in such a way that their radar echo is as small as possible. The measure used to determine and compare the size of signals in echolocation is the Radar Cross Section (RCS). It describes the measure of the energy that would be reflected from the object in relation to the total energy incident on the object and referred to a unit sphere with an area of 1 m² and perfectly reflecting waves in all directions. Thus, this quantity is described in m² or in dB. Table 3 shows estimated RCS values for sample objects.

Table 3. Example RCS values for selected objects (source: [4])

Object	RCS [m ²]	RCS [dB]
Bird	0.01	-20
Human	1	0
Motorboat	10	10
Passenger car	100	20
Truck	200	23
corner	20379	43.1

Thus, the basic features affecting the RCS are: the size of the object, its shape and material properties in terms of absorption and reflection of electromagnetic waves. Already today there are constructions in the stealth technology, which, thanks to their construction (specific shape) and the materials used for the outer shells, are able to effectively reduce the RCS, and thus the radar echo, so as to become almost invisible to radars or significantly reduce the detection distance. For example, B-2 Spirit heavy bomber with a wingspan of 52 m has RCS approx. 0.1 m² [5]. Table 4 shows a few selected RCS for modern military aircraft.



Fig.4. B-2 Spirit heavy bomber, constructed in stealth technology (source: [6])

Table 4. RCS for selected modern models of military aircraft (source: [7])

Aircraft model	RCS	Rmax
	[m ²]	[km]
F-15C; Su-27	10–15	450–600
MIG-29	5	370–450
F/A-18C	3	330–395
F-16C	1,2	260–310
Su-47	0.3	185–220
F-18E	0.1	140–170
F-35A	0.0015	50–60

The authors of the article are also working on reducing RCS. They focus on material properties and, in this article, they tested and compared sets of paint coatings that were selected as potential radar echo reducing. Wave absorbers were sought, which, as thin varnish coatings, would attenuate electromagnetic waves in the C, X, Ku ranges, which are used in radiolocation, as previously mentioned.

Radiation energy in the paint coating is decomposed into 3 components: reflection, absorption and multiple reflection [8].

$$SE = SE_R + SE_A + SE_{MR} \tag{1}$$

Due to the study of attenuation, only the absorption part of the SEA was considered in this article. The presence of magnetic and electric dipoles enables the conversion of electromagnetic energy into energy dissipated in the layer (e.g. heat), which contributes to increasing electromagnetic attenuation.

Paint coatings were tested - a lossy, absorbing layer with a thickness of s and the assumed reflection coefficient $\Gamma = 0$ and wave impedance $Z_n = 1$, applied to metal plates (reflective layer). Thus, the model system can be described by the equation:

$$\Gamma = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \tag{2}$$

For a plane wave it was assumed:

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \tanh \left(j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \cdot s \right) \tag{3}$$

λ – wavelength in free space

$\epsilon_r(f) = \epsilon'(f) - j \epsilon''(f)$ – complex permittivity

$\mu_r(f) = \mu'(f) - j \mu''(f)$ – complex magnetic permeability

j – imaginary part $\sqrt{-1}$

Two different materials were tested as absorbers:

- BASF's spherical carbonyl iron, designated EB, with a particle size of 3 - 4 μm (Table 5 contains basic properties)
- Thin-walled empty microspheres manufactured by 3M marked as S22 with particle size D50 - 35 μm (Table 6 contains basic properties).

Table 5. Properties of the carbonyl iron used in the study

Type	Form	Size	Bulk density [kg/m ³]	Fe atom content [%]	C atom content [%]	N atom content [%]	O atom content [%]
BASF EB	powder	3 ÷ 4 μm with a wider grain size distribution	4 200	> 97,3	< 1	< 1	< 0,4

Table 6. Properties of the glass microspheres used in the study

Type	Form	Particle size D ₅₀ [μm]	Density [kg/m ³]	Scrush test [MPa]	Minimum survivability [%]
3M S22	Powder	35	0.22	2.76	80

On the basis of these absorbers, varnish pastes were made, which were used to paint aluminum plates with dimensions of 300 × 300 × 4 mm.

In the case of carbonyl iron, Epikote 828 epoxy resin and Ancamine 1618 hardener were used as a binder. The composition also included additives produced by Amepox Microelectronic Co Ltd.: AX-R, reducing viscosity, and AX-S - increasing flexibility.

For 3M S22 glass microspheres, XX0606 polyurethane resin was selected as a binder, with XPH80002 hardener and BYK 969 dispersant additive.

The share of carbonyl iron as an absorber in the varnish paste was 75% for the first series of samples and 80% for the second series of samples. The thickness of the applied paste layer is 0,5, 1, 1.5, 2.0 mm for each series, respectively.

On the other hand, in the samples with the participation of 3M S22 glass microspheres, 3 series of samples with the absorber content of 20.5%, 35.0 and 54.0%, respectively, were made. The thickness of the applied paint layer was for 20.5% 4w - 0.814mm, 6w - 1.041mm, 8w - 1.273 mm.

For 35% 4w - 0.987mm, 6w - 1.416mm, 8w - 1.803mm and for 54% 4w - 1.457mm, 6w - 1.798mm, 8w - 2.278mm.

The tests consisted in measuring the radar signal reflected from the samples with coatings and comparing them to the reference sample - without the varnish coating. The tests were carried out on a measuring stand consisting of a reflectometer operating in the 4-18 GHz range and a control computer (Figure 5).

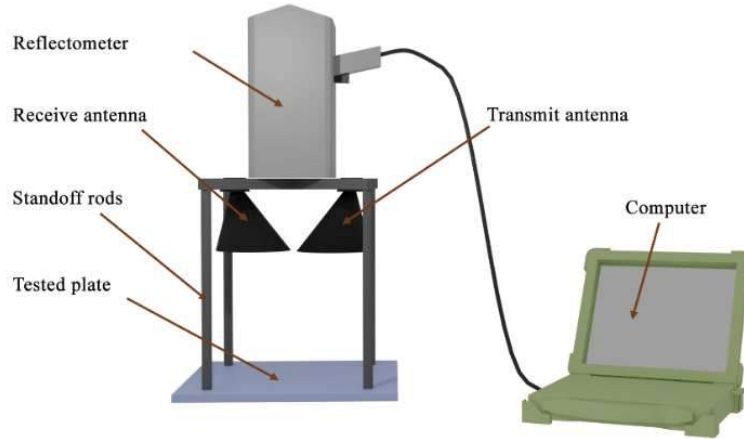


Fig.5. Scheme of the measuring station (description of individual elements in the diagram).

The results of attenuation measurements for carbonyl iron as an absorber are presented in Table 7, while the graphs in Fig.6 and Fig.7 show the attenuation tendency depending on the thickness of the paint layer with the absorber.

Table 7. Results of attenuation measurements for EB carbonyl iron

Frequency [GHz]	content 75%				content 80%			
	0.5mm	1.0mm	1.5mm	2.0mm	0.5mm	1.0mm	1.5mm	2.0mm
4	-4.5	-5.0	-4.5	-18.0	-1.7	-2.6	-5.0	-6.0
6	-4.5	-7.0	-7.0	-12.5	-1.9	-3.0	-7.5	-8.0
8	-7.0	-12.0	-12.0	-9.0	-2.1	-5.0	-11.5	-14.0
10	-7.0	-13.0	-11.0	-7.0	-2.3	-7.0	-12.5	-12.0
12	-5.0	-10.0	-7.0	-5.0	-2.5	-9.0	-11.0	-6.0
14	-4.5	-5.0	-4.5	-4.0	-2.8	-10.0	-7.0	-5.0
16	-4.0	-4.5	-4.0	-4.0	-5.0	-10.0	-6.0	-5.0
18	-4.0	-4.5	-4.0	-4.0	-6.0	-10.0	-6.0	-5.0

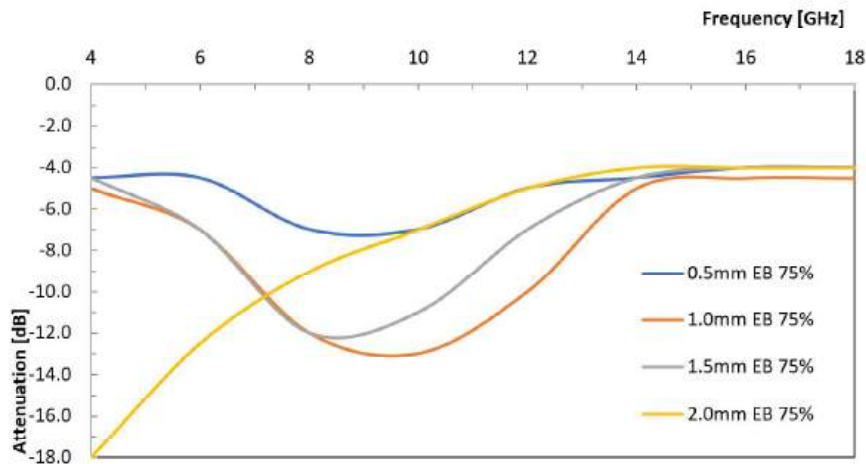


Fig.6. Influence of thickness on attenuation - EB absorber, 75% share

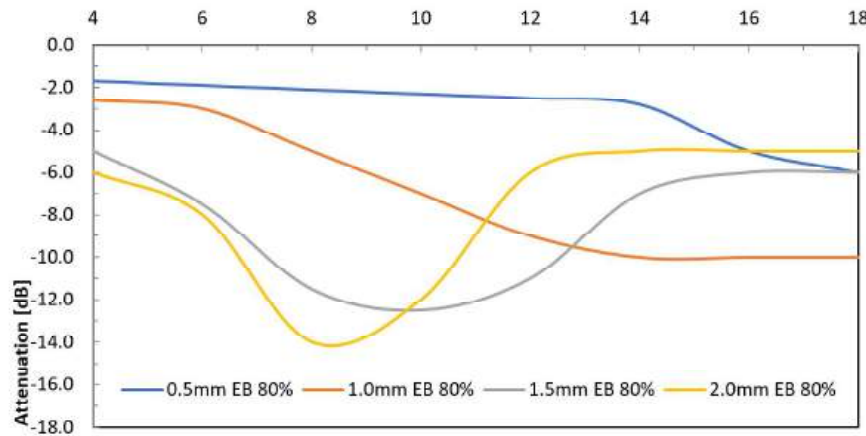


Fig.7. Influence of thickness on attenuation - EB absorber, 80% share

For 3M S22 glass microspheres, the results are presented in Table 8, and the damping tendency in Fig.8, Fig.9 and Fig.10.

The thickness of the applied paint layer was for 20.5% 4w - 0.814mm, 6w - 1.041mm, 8w - 1.273 mm. For 35% 4w - 0.987mm, 6w - 1.416mm, 8w - 1.803mm and for 54% 4w - 1.457mm, 6w - 1.798mm, 8w - 2.278mm.

Table 8. Results of attenuation measurements for S22 glass microspheres

Frequency [GHz]	Content 3M S22 20.5%			Content 3M S22 35%			Content 3M S22 54%		
	4w 0.814 mm	6w 1.041 mm	8w 1.273 mm	4w 0.987 mm	6w 1.416 mm	8w 1.803 mm	4w 1.457 mm	6w 1.798 mm	8w 2.278 mm
4.0	-0.282	-0.200	-0.380	-0.252	-0.222	-0.371	-0.256	-0.310	-0.481
6.0	-0.706	-0.096	-0.176	-0.097	-0.120	-0.165	-0.112	-0.733	-0.179
8.0	-0.074	-0.100	-0.183	-0.096	-0.141	-0.257	-0.142	-0.228	-0.172
10.0	-0.086	-0.153	-0.313	-0.204	-0.215	-0.335	-0.182	-0.282	-0.289
12.0	-0.102	-0.269	-0.376	-0.177	-0.362	-0.454	-0.267	-0.484	-0.506

14.0	-0.073	-0.200	-0.312	-0.117	-0.310	-0.596	-0.244	-0.479	-0.656
16.0	-0.459	-0.671	-0.891	-0.519	-0.787	-0.657	-0.830	-0.650	-0.403
18.0	-0.538	-0.746	-0.948	-0.554	-0.711	-1.250	-0.849	-0.989	-1.726

From the presented results, it can be seen that the absorbers used show attenuation properties in the range of the tested frequencies (4-18GHz). It should be added that carbonyl iron has 10 times better damping properties than S22 glass microspheres, achieving a reduction of even -18 dB for selected frequencies and coating thicknesses (4GHz, 2mm, 75% EB) compared to a sample without a paint coating with an absorber. The S22 glass microsphere absorber reached a maximum value of -1.73 dB for a share of 54% and a coating thickness of 2.278 mm. At the same time, it can be stated that the maximum attenuation for both absorbers depends on the thickness of the layer - usually for a thicker layer there is greater attenuation and the type, share and thickness also affect the position of the maximum attenuation in the spectrum of the tested frequencies.

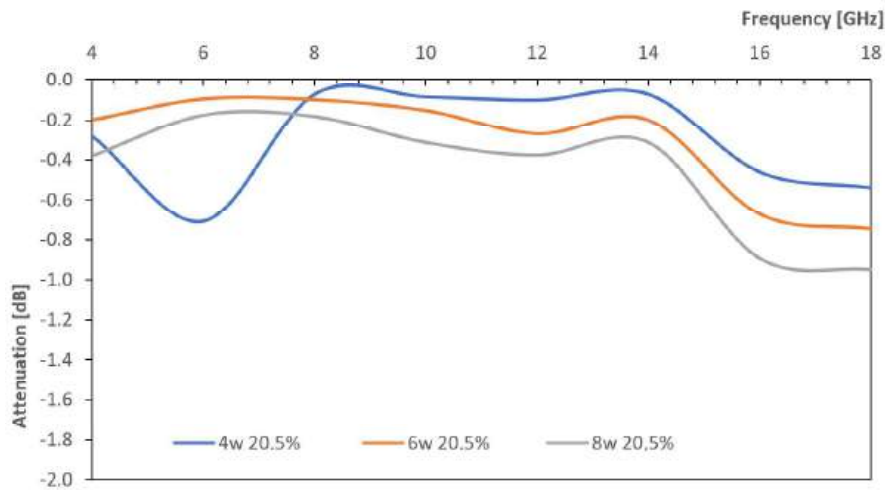


Fig.8. Influence of thickness on attenuation - 3M S22 absorber, share 20.5%

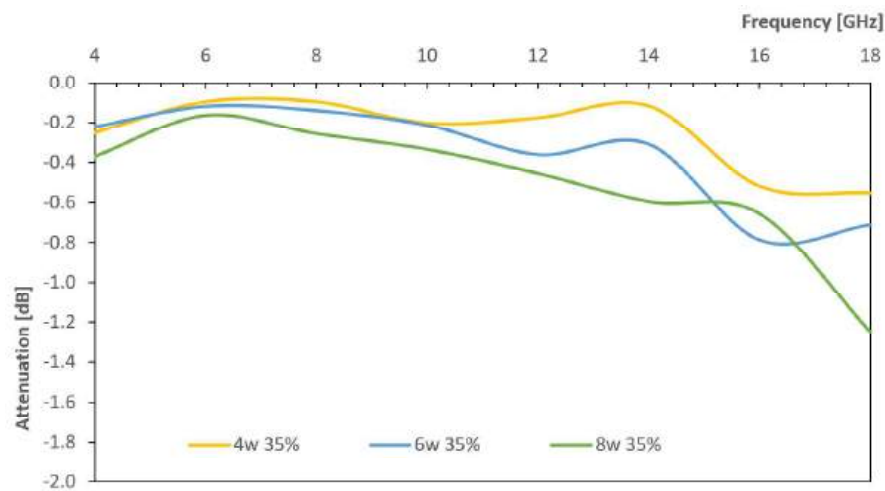


Fig.9. Influence of thickness on attenuation - 3M S22 absorber, share 35%

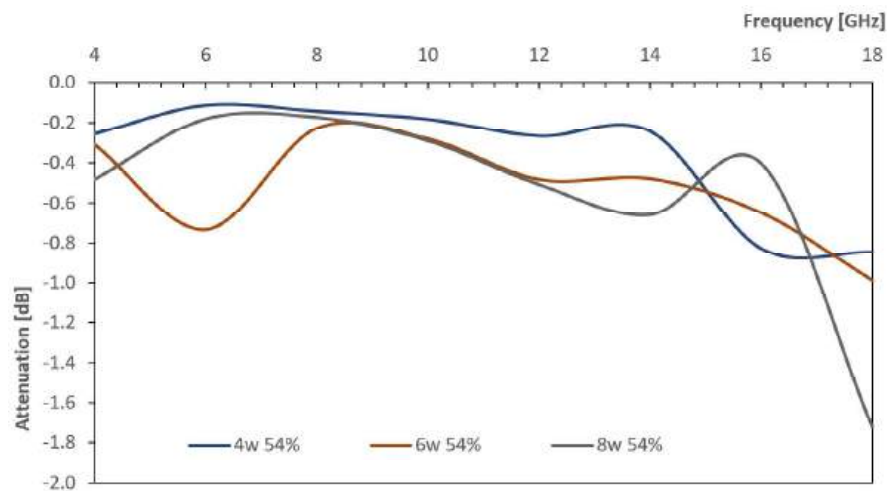


Fig.10. Influence of thickness on attenuation - 3M S22 absorber, share of 54%

Conclusions

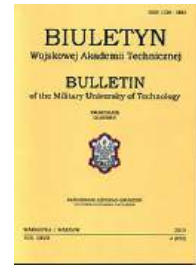
Carbonyl iron as an absorber provides good attenuation properties (-18dB), which cannot be stated in relation to S22 glass microspheres, for which the highest attenuation was -1.73 dB. At the same time, good attenuation properties for carbonyl iron occur in a fairly narrow frequency range and do not cover the C, X, Ku bands, but occur for different frequency values depending on the thickness of the layer and the share of the absorber. In connection with the above, it can be assumed that attenuation in a wider range could be obtained by using multi-layer systems with different shares of absorbers, as well as different thicknesses of individual layers forming the paint coating. In addition, further research with greater precision and a wider frequency range would be advisable to confirm the trends of "shifting" of the maximum attenuation.

In conclusion, carbonyl iron has great potential to be used as a radar absorber in paint coatings in camouflage applications.

References

- [1] Based on IEEE, <https://www.radartutorial.eu/07.waves/wa04.po.html>, 2023-01-23
- [2] <https://polska-zbrojna.pl/Mobile/ArticleShow/30589>, 2023-01-23
- [3] Materiały producenta – PIT-RADWAR, <https://www.pitradwar.com/oferta/425,zdolna-doprzerzutu-stacja-radiolokacyjna-bystra#>, 2023-01-20
- [4] M. Skolnik, « Introduction to radar systems », wydanie drugie, McGraw-Hill Inc, 1980, strona 44.
- [5] D. Richardson: Stealth Warplanes, Zenith Press, 2001
- [6] <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104482/b-2-spirit/>
- [7] Prasad N.E., Wanhill R.J.H., Aerospace Materials and Material Technologies Volume 1: Aerospace Materials, Springer Nature, 2016, s. 1-343. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2143-5>
- [8] Sankaran S., Deshmukh K., Ahamed M.B., Khadheer Pasha S.K., Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, t. 114, 2018, s. 49-71. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.006>

Publikacja 5



Contemporary Coatings for Military Vehicles in the Context of their Protection and Camouflage Effectiveness

Wojciech Przybył^{1*}, Marek Michalski^{2,3}, Norbert Radek³

¹ Military Institute of Engineer Technology, 136 Obornicka St., 50-961 Wrocław, Poland

² F.H. Barwa Company, 3/5 Warkocz St., 25-253 Kielce, Poland

³ Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering,
7 Al. 1000-lecia P. P. St., 25-314 Kielce, Poland

* Corresponding author at: przybyl@witi.wroc.pl

Article history:

Received: 22nd May 2025

Accepted: 3rd June 2025

Available on-line: 10th October 2025

Keywords: paint coatings, multispectral camouflage, radar, IRR, RAM

DOI: 10.5604/01.3001.0055.3083

© 2025 The Author(s). This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of contemporary coatings applied to land vehicles from the perspective of their camouflage effectiveness in VIS/NIR, MWIR/LWIR, and 1-18 GHz ranges, as well as their mechanical and operational resistance. NATO standards (STANAG 2338) and national standards (MIL-DTL-53039/64159, NO-80-A200, TL 8010-0002), along with technical specifications of certified IRR-CARC paints (USA, Poland, Germany), are identified. Based on available tests and case studies, the limitations of single coating layers (inability to simultaneously control optical, thermal, and radar signatures) are discussed, and the application of mobile multispectral coverings (Saab Barracuda MCS, Lubawa Miranda) as a hybrid solution is justified.

1. Introduction

Camouflage coatings on contemporary military vehicles are among the fundamental elements of operational capabilities in present-day armed conflicts [1]. In recent years, due to advanced materials engineering, these coatings have undergone significant development, driven by the introduction of advanced reconnaissance systems operating across various electromagnetic radiation ranges [2, 3]. Sensors utilized by these systems, often installed on unmanned aerial vehicles (UAVs) and supported by semi-automatic or automatic target identification systems, have necessitated the adaptation of vehicle masking and protection systems, including camouflage coatings [4].

Applied camouflage coatings are subjected to extreme operational conditions while simultaneously having to fulfill a range of requirements, often contradictory [5]:

- effective camouflage across different electromagnetic radiation ranges;
- adequate protection of equipment against environmental factors;
- suitable physical and mechanical durability;

- appropriate chemical resistance;
- ease of repair (application) in field conditions.

This article focuses on camouflage effectiveness and durability parameters of external coatings protecting land military vehicles. However, due to the increasing use of radars in land forces reconnaissance, selected aspects of stealth technology employed in aviation [6], which find application or inspire solutions for land vehicles, are also addressed. The requirements and technical specifications of contemporary camouflage coatings are also presented through specific examples used in various armies worldwide, as well as their representation in applicable military standards (NATO/STANAG and their national equivalents), and innovative solutions under testing [7], including the authors' own research results [8].

2. Camouflage Effectiveness Against Reconnaissance

On the modern battlefield, reconnaissance platforms are equipped with optical, thermal, and radar sensors, as well as those combining several (multispectral) or many

(hyperspectral) bands from these ranges or sub-ranges. Therefore, detection, recognition, identification, and tracking increasingly rely on the analysis of multiple physical signatures from many sources: optical radiation recorded as images from the visible range, ultraviolet (UV), near infrared (NIR), thermal radiation recorded as thermograms (MWIR and LWIR), or radio radiation in the form of radar echoes [9]. Such an extensive and diverse range of effective protection requires a specific approach in each of these ranges, but typically involves minimizing the signal difference between the object and the background against which the object may be observed [10].

2.1. Optical Range Camouflage

The effectiveness of coatings in the optical range (ultraviolet 250–380 nm, visible range 380–720 nm, and near infrared 720–2500 nm) refers to their mimetic capabilities – concealment, and deforming capabilities – hindering silhouette recognition. The main techniques for achieving high effectiveness are:

- selection of appropriate camouflage built from patches with shapes, colors, contrasts, and patterns ensuring concealment from the widest possible distance range in images taken from this range;
- ensuring maximum conformity of spectral curves of colors forming the camouflage pattern with the dominant spectral curves for elements present in the background [11].

For example, in forest areas (woodland), which during the vegetation period are characterized by rich presence of chlorophyll in green parts of plants (leaves, needles, stems, etc.), it is desirable for the green color used in camouflage patterns to correspond to the so-called chlorophyll curve (Fig. 1), particularly in the 680–730 nm range (red edge), where a characteristic sudden jump to values above 50% re-emission is observed. Hence, for many coverings, the IRR – Infrared Reflectance is specified, which encompasses the near infrared and its conformity with the reflectance of, for example, leaves [12].

Similar characteristic points for the spectral curve can be found for other environments: desert – sand, snow-covered areas – snow, etc.

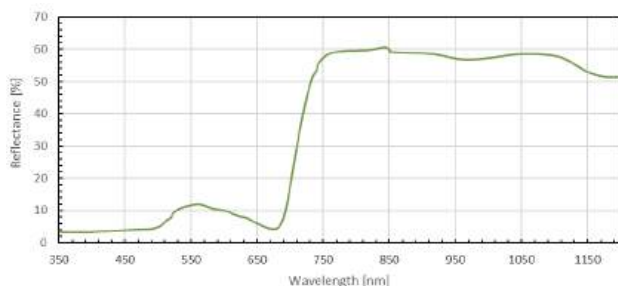


Fig. 1. Maple leaf re-emission curve (own research)

Quite accurate information about spectral curves for the background or object can be obtained using hyperspectral cameras or spectrometers, but due to costs and computational needs, this type of sensor is rarely used today. With ongoing miniaturization and cost reduction, its share may significantly increase in the future.

Currently, multispectral cameras are used instead – recording only selected characteristic points of the spectrum and determining various indicators, e.g. the RATIO vegetation index (1), the camouflage coefficient W_m (2), etc., which are approximate and simplified representations of the camouflage curve's adaptation to the background [13].

$$\text{RATIO} = \frac{\text{NIR}}{\text{RED}}, \quad (1)$$

where RATIO refers to RATIO vegetation index, NIR corresponds to the value for the channel containing the 720 nm wavelength, and RED is the value for the channel containing the 660 nm wavelength.

$$W_m = \frac{R_1}{R_2}, \quad (2)$$

where W_m – camouflage coefficient, R_1 – value of the sample re-emission coefficient for wavelength $\lambda_1 = 735$ nm, R_2 – value of the sample re-emission coefficient for wavelength $\lambda_2 = 650$ nm.

Among the high saturation of sensors on the modern battlefield, cameras equipped with visible light matrices are most commonly encountered. As a result of their operation, operators receive RGB images. More advanced systems make color comparisons in one of the independent color models, referenced to the “standard human eye”. The CIE Lab* color model is commonly used and is characterized by an almost linear space, which facilitates perceptual comparison of color differences as a simple Cartesian distance (3) [14]:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}. \quad (3)$$

It is assumed that a difference already at the level of $\Delta E_{ab}^* > 3$ indicates a noticeable color difference.

Another way to maintain color fidelity is to use ready-made color libraries, such as RAL, which define CIE Lab* values, and sometimes also the re-emission curve for characteristic spectrum points.

Simultaneously, to prevent the impression of patches forming the camouflage pattern from merging into a single averaged patch – especially from greater distances – individual colors should be characterized by appropriate optical contrast between them, the proportion of individual colors, and the size and arrangement of patches (occurrence of micro-pattern and macro-pattern).

Despite the common presence of various sensors, reconnaissance performed independently by observers – without instruments, i.e., with the naked eye – still remains the basic reconnaissance technique.

On the modern battlefield, broadband sensors are also encountered, resulting in integrated (for the spectrum range and sensitivity curve) monochromatic images – e.g., night vision devices amplifying and processing partial light from parts of the visible range and near infrared ranges, or high-sensitivity panchromatic sensors mounted in reconnaissance aircraft heads.

The final parameters specified in the requirements, affecting camouflage effectiveness in this range, are texture, roughness, and gloss/matte finish of the coating. They relate to the ability of light reflections to appear on the surfaces of military vehicles. It is assumed that the lower the gloss, i.e., the more matte the surface, the more advantageous from the optical camouflage perspective, which is not always beneficial for thermal camouflage (high emissivity). For standard camouflage paints, the typical gloss measured at an angle of 60° should not exceed 2 GU.

2.2. Thermal Range Camouflage

Military vehicles, due to their numerous heat sources such as working engines, exhaust fumes, the presence of onboard personnel, friction elements, and heating of electrical elements, are very often characterized by higher operating temperatures than the ambient temperature. The second factor causing vehicles to heat up is external, with solar radiation being the main source. Therefore, the essence of camouflage in this range is to minimize the difference in electromagnetic radiation fluxes reaching the detector from vehicles and the surroundings, thereby making it difficult to detect objects with thermal imaging cameras [15].

Taking into account Planck's law (maximum radiation intensity depending on wavelength) and factors absorbing radiation in the atmosphere such as water vapor, carbon dioxide, ozone, etc., three operating ranges of infrared cameras are distinguished in practice [16]:

- SWIR – near infrared (0.9–1.7 μm) – belongs to the optical range, relies mainly on reflected sunlight or residual light (night vision devices) and is not used in thermal imaging;
- MWIR – medium infrared (3–5 μm) – predisposed for applications at higher temperatures (engines, exhaust fumes) and at greater distances, also enabling visualization of hot gases; characterized by more complicated and expensive data acquisition systems and higher sensitivity to fog and water vapor;
- LWIR – far infrared (7–14 μm) – used in simpler in construction and cheaper sensors, but with shorter ranges, less sensitive to atmospheric factors (fog, moisture) and predisposed to recording lower temperature ranges – close to ambient temperature.

Thermal signature reduction can be achieved in various ways:

- Using thermal insulation, which is usually associated with constructing a heat dissipation system [17];
- Using a cooling system, which requires the supply of electrical energy [18];
- Application of special coatings with optimal emissivity and high thermal radiation reflection coefficient [19].

In the context of this article's topic, the focus is on coatings that prevent objects from heating up from solar radiation while allowing the emission of internal thermal energy of the vehicle. However, it should be noted that the image recorded by thermal imaging cameras depends not only on temperature but also on the surface emissivity, which determines the ability to radiate energy, especially in the LWIR range, where its high value (above 0.90) indicates intensive radiation, making it clearly visible in thermal images.

Therefore, the key parameters for coatings in the thermal protection range are:

- Low solar radiation absorption coefficient (solar absorptance) – $\alpha < 0.65$ (for light colors), which prevents excessive heating from sunlight [20];
- High infrared emissivity coefficient ($\varepsilon > 0.85$) – enables the discharge of internal thermal energy [21];
- Absorption to emissivity ratio ($\alpha/\varepsilon < 0.8$) – determining the heating capability.

However, it should be noted that high emissivity – characteristic of matte surfaces (beneficial in the optical range) – while enabling the discharge of internal thermal energy, also causes a significant impulse on thermal sensors. In turn, low emissivity does not reduce the actual temperature of the vehicle but reduces the signal of vehicles detected by thermal sensors. Therefore, an alternative method is the use of low-emissivity and low-absorptivity coatings.

The application of optimally selected parameters will enable a lower signature in thermal imaging devices, slower aging of coatings, and better crew comfort (smaller temperature increase inside the vehicle above the required level).

2.3. Radar Range Camouflage

Protection in the radar range requires objects to have the lowest possible radar signature [22], both active – originating from the object's own devices – and passive – the radar echo of the object, i.e., its response to the signal emitted by the radar's transmitting antenna. The power of the return signal (radar echo) recorded by the radar's receiving antenna is determined by the formula (4):

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (4)$$

where, G_{RX} – receiving antenna gain, G_{TX} – transmitting antenna gain, P_{RX} – receiving antenna signal power, P_{TX} – transmitting antenna signal power, λ – wavelength, σ – effective reflection surface, R – distance of the object from the antenna.

In the context of the object itself, according to the equation, σ – RCS (Radar Cross Section) affects the size of the radar signature. The factors influencing RCS are the shape and size of the vehicle and the coating [23] it is covered with – specifically its absorption and scattering properties (RAM – Radar Attenuation) in frequency ranges used by military radar systems (mainly C-band 4–8 GHz, X: 8–12 GHz, Ku: 12–18 GHz, and Ka: 26.5–40 GHz).

The essence of RAM coating attenuation is the conversion of electromagnetic radiation energy into another type of energy – mainly thermal. Hence the use of the following phenomena [24]:

- Absorption through dielectric losses;
- Absorption through magnetic losses;
- Interference damping in resonators.

Therefore, the interaction of electromagnetic waves with the material depends on its electrical properties (electrical permittivity) and magnetic properties (magnetic permeability). The ideal material is one that maximizes wave absorption inside and simultaneously minimizes reflected and penetrating waves. Therefore, it becomes necessary to match the input impedance of the RAM layer and free space, which is described by the formula (5):

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \right) \right], \quad (5)$$

where: Z_{in} – input impedance, $Z_0 \approx 377 \Omega$ – free space impedance, μ_r – magnetic constant, ϵ_r – dielectric constant, d – material thickness, f – frequency, c – speed of light.

Therefore, the impedance matching condition takes the form presented in formula (6):

$$\left| Z_{in} / Z_0 \right| \approx 1. \quad (6)$$

The attenuation coefficient RL can be determined by equation (7):

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|. \quad (7)$$

Currently, RAM materials that are active components of coatings include ferrite materials [25], conductive carbon materials and their composites [26], conductive polymers and their composites [27], and resonator or metamaterial systems [28].

However, due to the nature of electromagnetic waves, it is extremely difficult to achieve satisfactory attenuation effects for a wide frequency range. Therefore, a 6 dB at-

tenuation level (75% reduction) for a given radiation frequency is generally accepted as effective.

To enable attenuation over a wider range, additional mechanisms are used, such as:

- Multi-layer interference structures;
- Gradient structures.

3. Operational and Durability Parameters

Paint coatings applied to military vehicles, in addition to camouflage functions, must primarily meet strict durability and operational requirements. The basic ones include [29]:

- adhesion to the substrate – the binding force of the coating to the substrate resulting from adhesion (surface interactions) and cohesion (layer cohesion);
- hardness – resistance of the coating to permanent deformation under mechanical force;
- flexibility – ability of the coating to deform without permanent damage during mechanical stress;
- impact resistance – ability of the coating to absorb mechanical energy without damage under sudden and dynamic force;
- abrasion resistance – ability of the coating to maintain structure under repeated friction;
- resistance to operating fluids – ability of the coating to maintain mechanical and operational properties as well as aesthetic properties after exposure to fuels, oils, lubricants, decontaminants, etc.;
- maintenance of key camouflage, protective, mechanical, and operational properties throughout the expected service life.

Camouflage coatings must also maintain their properties in various environmental conditions; hence the requirements for: operating temperature range, corrosion resistance, thermal cycles, humidity, salt fog, UV radiation, and a range of chemical factors – CARC (Chemical Agent Resistant Coating) [30].

The high camouflage, protective, durability, and operational requirements presented above require the use of multi-layer coating systems. The structure of a typical multi-layer coating system consists of:

- a primer coating with anti-corrosive properties and good adhesion to the substrate;
- intermediate coatings – e.g., with camouflage properties in the SNIR and radar range;
- topcoat – e.g., highly resistant, camouflage coatings in the optical and thermal range.

4. Standards and Recommendations for Coatings

Contemporary camouflage and protective coatings used on military vehicles must meet a series of multi-aspect technical requirements covering camouflage effectiveness in the optical, thermal, and radar ranges,

as well as high mechanical and chemical resistance in difficult operational conditions. Due to the complexity of these functions and the need to ensure these requirements, as well as interoperability within allied operations, a series of unified standards and military specifications has been developed and incorporated into the standards of international organizations (e.g., NATO) and national ones [31].

These standards refer to the requirements and test methods separately for the following ranges:

- Optical range: colors according to CIE Lab*, spectral curve, IRR or at least reflection coefficient for NIR or VIS/NIR camouflage coefficients, gloss, optical contrast between colors;
- Thermal range: emissivity, absorption;
- Radar range: radar echo reduction, RCS reduction;
- Mechanical and operational requirements: hardness, flexibility, adhesion, abrasion resistance, chemical resistance (CARC), durability, environmental resistance, and resistance to propellants and lubricants, NBC, etc.

NATO normative and technical-executive documents (STANAG, AEP) mainly establish requirements as well as operational, environmental, executive, and test procedures. However, each national army develops its own detailed executive standards. Therefore, German (TL, VG), French (NORMDEF), Polish (NO-80), Czech (ČOS), or American (MIL-SPEC/DTL/STD) standards are national interpretations of these guidelines with their own additional requirements.

Meanwhile, Russian GOST standards often have a more general character, and detailed requirements (e.g., for the T-14 Armata) are classified or included in special documentation.

4.1. Selected Standards for Coatings

4.1.1. USA [32]

Standard	Scope
MIL-DTL-53039	Specification for aliphatic polyurethane coatings
MIL-DTL-64159	Specification for water-dispersible polyurethane coatings
MIL-DTL-12468	Specification for infrared reflecting paints
MIL-STD-461	Standard for electromagnetic compatibility
MIL-STD-810	Standard for environmental tests

4.1.2. Poland [33]

Standard	Scope
NO-80-A200	Defense standard for special paints for military equipment
NO-06-A103	Standard for electromagnetic compatibility

4.1.3. Germany [34]

Standard	Scope
TL 8010-0001	Technical specification for camouflage paints
VG 95613	Defense standard for camouflage paints
VG 95370	Defense standard for electromagnetic properties
TL 8010-0004	Technical specification for anti-corrosion paints

4.1.4. Russia

Standard	Scope
GOST R 52754	Standard for paints for military equipment
GOST R 52107	Current standard for camouflage materials
GOST R 53112	Defense standard for electromagnetic properties
GOST R 51691	Standard for paint materials

Access to the full contents of military standards requires appropriate authorizations and contact with relevant standardization bodies in individual countries. Detailed parameter values and their ranges or tolerances are often information with restricted access or covered by confidentiality clauses. Due to constant progress in reconnaissance and the need to meet these requirements, normative and executive documents concerning coatings are also subject to constant and regular updates.

5. Selected Contemporary Coatings Used on Military Vehicle Coverings

5.1. USA

The United States Army employs a comprehensive system of military specifications (MIL-SPEC, AEP) to ensure the quality, performance, and suitability of coatings applied to military equipment. These specifications often require testing for properties such as chemical resistance (particularly Chemical Agent Resistant Coatings – CARC), corrosion protection, abrasion resistance, impact resistance, and camouflage effectiveness in the visible and infrared spectra. Compliance with specific MIL-SPECs indicates that the paint has undergone extensive testing and meets the requirements established by the Department of Defense for use in military applications.

MIL-DTL-53039E is a detailed specification covering chemical agent-resistant aliphatic polyurethane coatings intended for use as a topcoat on tactical military equipment, including a wide range of land vehicles [35]. These coatings are based on a single-component aliphatic polyurethane resin system, offering ease of application while providing robust performance [36]. A primary feature of these coatings is their resistance to chemical warfare agents, allowing for effective decontamination and ensuring continued operational readiness of vehicles in contaminated environments. The specification covers various types with different volatile organic compound (VOC) content to meet environmental regulations. Type IV has a maximum VOC content of 120 g/l (1.0 lb/gal), while Type IX permits up to 420 g/l (3.5 lb/gal) [37]. These coatings are typically applied by spray methods in controlled industrial environments to achieve the required layer thickness and uniformity [38]. They are designed to provide resistance to a range of environmental factors, including solvents, atmospheric conditions (UV exposure, temperature fluctuations), as well as the physical wear and damage that occur during operational use. These coatings are available in various camouflage colors, including

Green 383, which corresponds to Federal Standard (FS) 34094. This particular shade of green is a standard color used in US military camouflage patterns. CARC coatings are designed to provide visual and near-infrared camouflage, minimizing detection by both visual and NIR sensors [39]. Specific IRR values may vary depending on the exact formulation and color. These coatings are generally free from volatile organic hazardous air pollutants (VOHAP) and inorganic hazardous air pollutants (HAP) other than trace amounts of cobalt and non-hexavalent chromium, reflecting a trend toward more environmentally friendly formulations. They are also free from lead, cadmium, and hexavalent chromium [40]. Compliance with MIL-DTL-53039E indicates that a product has been tested and certified to meet the performance standards established by the US Army. Examples of manufacturers offering CARC coatings compliant with MIL-DTL-53039F Type IV include Sherwin-Williams. NCP Coatings provides CARC coatings compliant with MIL-DTL-53039E Type IX in Green 3837 and other types. Hentzen Coatings' portfolio also includes various coatings compliant with MIL-DTL-53039 in Green 383 in different types and classes [41].

MIL-DTL-64159C specifies water-dispersible aliphatic polyurethane chemical agent resistant coatings (CARC) that provide visual and near-infrared camouflage, offering an alternative to solvent-based systems [42]. These coatings utilize a two-component water-dispersible polyurethane resin system, reducing VOC emissions compared to traditional solvent-based paints. Like MIL-DTL-53039, these coatings are designed for easy and effective decontamination after exposure to chemical warfare agents, ensuring safety and operational readiness of military assets. A significant advantage of water-dispersible CARC coatings is their low volatile organic compound (VOC) content, typically below 1.8 lbs/gal (when mixed) for products such as NCP Coatings DynaSpec™ H2O Olive Drab [43]. This makes them more environmentally friendly. These coatings can be applied by various methods, with spraying as the primary one, while brush and roller applications are generally recommended only for touch-ups and small areas. They offer good resistance to a range of chemicals, solvents, and atmospheric conditions, providing long-term protection and camouflage effectiveness in demanding military environments. NCP Coatings offers MIL-DTL-64159 Type II coatings in Olive Drab (Federal Standard # 34088) and Green #34094 [44]. Olive Drab is another standard green shade used by the US Army. These coatings are specifically designed to provide visual and near-infrared camouflage, reducing the signature of military vehicles across various detection spectra. Meeting MIL-DTL-64159C Type II standards indicates that the coating has passed tests for chemical resistance, durability, and camouflage effectiveness according to US Army requirements [45]. NCP Coatings is a supplier of water-dispersible

CARC coatings compliant with MIL-DTL-64159 Type II, offering them in various green shades such as Olive Drab and Green #34094 [46].

5.2. Poland

The Polish defense industry adheres to its own national military standards, particularly NO-80-A200 and NO-83-A204, which may align with or differ from NATO standards (Fig. 2).

Products meeting these standards include specialized paints manufactured by the Polish company BARWA Kielce and certified by WITI OiB (Military Institute of Engineering Technology) [47]. This set of paints constitutes the BP450-1000/N and BW400 camouflage system [48], which is designed for use on a wide range of substrates commonly found in military vehicles, including ordinary steel, alloy steels, galvanized steel, aluminum, plastics, and existing coatings. The system provides anti-corrosion protection, which is crucial for the durability of military vehicles operating in various environmental conditions. A key feature is its camouflage effectiveness in the optical range (visible light, ultraviolet (UV), and near infrared (NIR)). BARWA Kielce also offers a direct camouflage system (BW420) with green paint BW420-6031 for anti-corrosion protected surfaces, providing single-layer application and similar camouflage properties. Additionally, a flexible version (BWE410-6031) is available for flexible substrates such as tarpaulins, compliant with NO-83-A204 standards.



Fig. 2. A military vehicle coated with a camouflage paint scheme utilizing certified Polish-manufactured paints (photograph by the author)

5.3. Germany

Germany, a NATO member, heavily relies on the national RAL color system for standardization across various industries, including military applications. The Bundeswehr (German Armed Forces) also has its own set of technical requirements (TL – Technische Lieferbedingungen) that specify performance criteria for military materials, including coatings.

Brillux Industrial Coatings has developed a high-performance powder coating, Premium Polyester Powder 5936, specifically for military applications. The RAL 6031 F9 (bronze green) variant is certified for use by the Bundeswehr [49]. This coating is based on premium polyester powder, known for its durability and weather resistance, making it suitable for the harsh conditions faced by military vehicles. It conforms to the RAL 6031 F9 color standard, which in the RAL system is designated as bronze green and is a key color in Bundeswehr camouflage schemes. A significant advantage of this coating is its camouflage effect not only in the visible spectrum but also in the near infrared (NIR). This is achieved through specially tailored color pigments that minimize detection by infrared night vision devices, which is an important aspect of modern military camouflage. The powder coating offers weather resistance, maintaining gloss and color stability over long periods of exposure to sunlight, rain, and temperature fluctuations. It also provides good corrosion protection and exhibits high surface hardness and good chemical resistance, ensuring the durability of the coating on military vehicles. It is applied as a powder coating using electrostatic spray techniques and requires appropriate preparation of metal substrates to ensure optimal adhesion and performance. It is suitable for various metal components of military vehicles. This particular variant (RAL 6031-F9) meets all Bundeswehr requirements (TL 8010-0002 Class IV, Type 3) and has approval from the defense equipment standard VG 95211. It has also been tested and certified by the military research institute WIWeB (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe) in Erding, confirming its suitability for military applications. The coating provides a smooth, matte finish that is essential for minimizing reflections and maximizing the effectiveness of the camouflage pattern [50].

Germany's reliance on the RAL color system for military camouflage paints ensures a high degree of standardization and potentially facilitates interoperability with other countries that also use RAL standards. The Bundeswehr's specific technical requirements (TL) further refine these standards for military-grade performance. The development and certification by Brillux of Premium Polyester Powder 5936 in key NATO camouflage colors (RAL 6031 F9, 8027 F9, 9021 F9) – with a particular focus on NIR camouflage effectiveness and Bundeswehr acceptance – highlights the German army's commitment to advanced signature management technologies for its land vehicles.

6. Alternative Solutions

Paint coatings, even multi-layer CARC-IRR class, cannot simultaneously provide low signatures in VIS/NIR, MWIR/LWIR, and radar bands due to conflicting material requirements (pigments vs. microwave absorbers), insufficient thickness, and lack of adaptability to changing backgrounds and aging.

Therefore, modern armies use a hybrid approach: durable camouflage paint as a base layer and mobile, multispectral textile coverings that extend camouflage across the entire spectrum of sensors and allow quick adaptation of the vehicle to the operational environment.

IRR-CARC paint remains the basic anti-corrosion, chemical-resistant layer with NIR properties. Meanwhile, textile covering provides the missing MWIR/LWIR and radar attenuation, thanks to its thickness and absorbing layers. Mobile systems are typically constructed from sets of panels in woodland, desert, and snow variants. Their replacement in field conditions takes less than 4 hours. Paint is permanent – it requires no logistical maintenance but does not change color. Additionally, the textile covering separates the hull from the environment, which significantly affects the effectiveness of camouflage in the thermal range. Moreover, during driving, airflow disperses engine heat. In the radar range, relatively thin paint coatings (below 0.5 mm) cannot sufficiently reduce RCS, while relatively lightweight mobile coverings provide attenuation of a dozen decibels. CARC paint withstands decontamination, but loses IRR properties after several cycles; mobile coverings can be replaced with a new module without repainting the entire vehicle.

Manufacturers of mobile sets include Barracuda (Saab) and Miranda (Lubawa Group).

Saab Barracuda offers advanced Mobile Camouflage Systems (MCS) that provide protection against a broad spectrum of battlefield sensors. Barracuda MCS systems are designed to reduce the probability of visual detection as well as by sensors operating in near infrared (NIR), short-wave infrared (SWIR), mid-wave infrared (MWIR), far infrared (LWIR), and radar.

Key features of Barracuda MCS systems include:

- Signature reduction: the systems effectively reduce vehicle signatures across multiple spectral ranges, making them harder to detect and identify.
- Adaptability: the systems are tailored to specific vehicle platforms and can be configured to match various operational environments.
- Modularity: a modular design allows for easy replacement of damaged camouflage elements.
- Thermal comfort: materials used in MCS systems help reduce internal heating of the vehicle, increasing crew comfort and extending the life of onboard electronics.
- Ease of use: the systems are designed not to impede vehicle operation, performance, or maintenance.

An example application is the Danish army's equipment with the Barracuda MCS system for their CV90 infantry fighting vehicles to enhance their stealth capabilities on the battlefield [51]. Barracuda systems are also used by many other armies around the world [52].

Miranda, part of the Polish Lubawa Group, offers advanced multispectral mobile camouflage systems (Fig. 3), providing protection in the VIS, NIR, SWIR, LWIR, and radar ranges. These systems aim to reduce the probability of vehicle detection by reducing their signatures and disorienting sensors and identification algorithms.



Fig. 3. Miranda multispectral mobile camouflage on KTO Rosomak [54]

The main features of Miranda/Lubawa mobile camouflage systems are:

- Multispectral protection providing effective camouflage across a wide range of the electromagnetic spectrum.
- Durability and low weight while maintaining high tensile and tear strength.
- Quick assembly and disassembly allowing rapid preparation of the vehicle for operation in conditions requiring camouflage or changing camouflage to, e.g., a different color.
- Easy access to all vehicle panels for maintenance or repairs.
- Customization to individual customer requirements in terms of shape adaptation to the vehicle, patterns, and colors to perfectly fit the specific operational environment.

Mobile camouflage coverings are an advanced solution that effectively complements the capabilities of traditional camouflage paints, providing comprehensive protection against modern detection systems in various spectral ranges. Their adaptability, mobility, and multispectral nature make them an important element increasing the survivability and combat effectiveness of modern military vehicles.

7. Conclusions

1. Synergy of paint coating systems and textile covering – a hybrid model in which the IRR-CARC coating system serves as a CBRN-resistant base layer, while the 3-layer covering (VIS/NIR + IR + RF) provides adaptable signature reduction;

tests on the CV90 demonstrated a decrease in IR contrast by > 60% and RCS attenuation ≥ 12 dB, with a marginal mass increase.

2. RAM miniaturization limit in paint coating – thicknesses < 0.15 mm do not allow for attenuation above 3 dB; effective microwave layers require structures > 2 mm or high content of ferrite-carbon fillers, which reduces IRR properties and adhesion.
3. Need for selectively emissive coatings – maintaining $\epsilon \approx 0.5$ with $\alpha < 0.4$ allows minimizing LWIR contrast without overheating the hull; this requires new ceramizing resins or Si-O-C polymers. Current PU-CARC coatings ($\epsilon \approx 0.85$) do not meet this criterion.
4. Standardization of spectral data – lack of a unified reference base of background reflection curves (e.g., vegetation in different climate zones) hinders international validation of IRR paints; extension of AEP-31 with a standardized set of environmental spectral profiles is recommended.
5. Ecology and toxicology – gradual withdrawal of chromates (VI) and lead in military pigments forces the transition to chromium-free corrosion inhibitors and low-VOC water systems (MIL-DTL-64159 Type II), which, however, shortens lifespan in desert conditions; research is needed on nanophosphates and graphene as alternatives.
6. Integration with vehicle sensors – “intelligent skin” concepts are being developed, in which the coating measures its own temperature/reflectance and controls local cooling or electrochromic properties; initial TRL-4 demonstrators indicate a possible reduction of thermal signature by another 2–3 K.
7. Cost-life cycle dimension – LCC analysis shows that the “paint coating + modular covering” system reduces painting costs by ~35% in a 20-year cycle, thanks to easy panel replacement and less frequent hull painting; however, it is necessary to account for the amortization of textile panels every 5–7 years.

Authors' statement

Collection and assembly of data, developing an article: W.P., M.M.; development of concept and assumptions, content supervision: N.R.

Source of funding for the work

This work was funded under the mission of the Kielce University of Technology.

Wojciech Przybył <https://orcid.org/0000-0002-0384-3463>

Marek Michalski <https://orcid.org/0000-0003-0419-7886>
e-mail: mmichalski@barwa.kielce.pl

Norbert Radek <https://orcid.org/0000-0002-1587-1074>
e-mail: norrad@tu.kielce.pl

References

- [1] MAKHLOUF A.S.H., *Protective coatings for automotive, aerospace and military applications: Current prospects and future trends*, [in:] *Handbook of Smart Coatings for Materials Protection*, Woodhead Publishing, 2014, 121–131.
- [2] CHEN Y., CHEN X., ZHOU J., JI Y., SHEN W., *Camouflage target detection via hyperspectral imaging plus information divergence measurement*, [in:] *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics Technology and Application*, vol. 10244, SPIE, 2017, January, 88–92.
- [3] MARA J., BODNÁR A.E., TRIF L., TELEGDI J., *Development of Effective Infrared Reflective Coatings*, *Applied Sciences*, 13, 23, 2023, 12903.
- [4] POMERLEAU M., *Signature management is key tenet of Army's digital transformation*, 17.08.2023, Defensescoop, <https://defensescoop.com/2023/08/17/signature-management-is-key-tenet-of-armys-digital-transformation/> [accessed: 14.04.2025].
- [5] JABBAR M., ADNAN M., SHAKER K., ABDULLAH T., NAWAB Y., HUSSAI R., MALIK A.U., *Strength and durability that last – Mechanical properties of polyurea and polyurethane coated composites*, *Polymer Composites*, 44, 7, 2023, 4324–4335.
- [6] KIM S.H., LEE S.Y., ZHANG Y., PARK S.J., GU J., *Carbon-based radar absorbing materials toward stealth technologies*, *Advanced Science*, 10, 32, 2023, 2303104.
- [7] *Intermat. Stealth Capability Coatings & Materials*, Army Technology, <https://www.army-technology.com/contractors/camouflage/intermat/>, [accessed: 14.05.2025].
- [8] PRZYBYŁ W., JANUSZKO A., RADEK N., SZCZEPANIAK M., BOGDANOWICZ K.A., PLEBANKIEWICZ I., SZCZODROWSKA B., MAZURCZUK R., *Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications*, *Defence Technology*, 22, 2023, 1–9.
- [9] ZHU H., LI Q., TAO C., HONG Y., XU Z., SHEN W., QIU M., KAUR S., GHOSH P., *Multispectral camouflage for infrared, visible, lasers and microwave with radiative cooling*, *Nature Communications*, 12, 1, 2021, 1805.
- [10] HONG S., SHIN S., CHEN R., *An adaptive and wearable thermal camouflage device*, *Advanced Functional Materials*, 30, 11, 2020, 1909788.
- [11] WINKELMANN M., *Spectral characterization of natural backgrounds*, [in:] *Target and background signatures III*, vol. 10432, SPIE, October 2017, 1043202.
- [12] AMIR M., CHEN J., CHEN B., et al., *Reflectance and chlorophyll fluorescence-based retrieval of photosynthetic parameters improves the estimation of subtropical forest productivity*, *Ecological Indicators*, 131, 2021, 108133.
- [13] CUI D., LI M., ZHANG Q., *Development of an optical sensor for crop leaf chlorophyll content detection*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 69, 2, 2009, 171–176.
- [14] PN-EN ISO/CIE 11664-6 *Kolorymetria. Część 6: CIEDE2000 reguła obliczania różnicy barwy*, Polski Komitet Normalizacyjny, marzec 2023.
- [15] ZHU H., LI Q., ZHENG C., HONG Y., XU Z., WANG H., SHEN W., KAUR S., GHOSH P., QIU M., *High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management*, *Light: Science & Applications*, 9, 1, 2020, 60.
- [16] MAHULIKAR S.P., SONAWANE H.R., RAO G.A., *Infrared signature studies of aerospace vehicles*, *Progress in Aerospace Sciences*, 43, 7-8, 2007, 218–245.
- [17] ZHAO L., BHATIA B., YANG S., STROBACH E., WEINSTEIN L., COOPER T.A., WANG E.N., CHEN G., *Harnessing heat beyond 200°C from unconcentrated sunlight with nonevacuated transparent aerogels*, *ACS Nano*, 13, 7, 2019, 7508–7516.
- [18] ZHOU Y., RATHER L.J., YU K., YANG M., LU M., LI Q., *Research Progress and Recent Advances in Development and Applications of Infrared Stealth Materials: A Comprehensive Review*, *Laser & Photonics Reviews*, 18, 12, 2024, 2400530.
- [19] PENG L., LIU D., CHENG H., ZHOU S., ZU M., *A multilayer film based selective thermal emitter for infrared stealth technology*, *Advanced Optical Materials*, 6, 23, 2018, 1801006.
- [20] ZHOU L., SONG H., LIANG J., et al., *A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling*, *Nature Sustainability*, 2, 8, 2019, 718–724.
- [21] MANDAL J., FU Y., OVERVIG A.C. et al., *Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling*, *Science*, 362, 6412, 2018, 315–319.
- [22] ZENG X., LI L., TAN Y., LI L., *A review of applied research on microwave absorption and stealth technology*, [in:] *Second International Conference on Optical Communication and Optical Information Processing (OCOIP 2024)*, vol. 13548, SPIE, 2025, March, 31–45.
- [23] SAHOO P., SAINI L., DIXIT A., *Microwave-absorbing materials for stealth application: a holistic overview*, *Oxford Open Materials Science*, 3, 1, 2023, itac012.
- [24] AYTAÇ A., İPEK H., AZTEKIN K., AYTAV E., ÇANAĞCI B., *A review of the radar absorber material and structures*, *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, 52, 2020.
- [25] ZHENG W., YE W., YANG P., WANG D., XIONG Y., LIU Z., QI J., ZHANG Y., *Recent progress in iron-based microwave absorbing composites: A review and prospective*, *Molecules*, 27, 13, 2022, 4117.
- [26] PAL R., JHA A.K., AKHTAR M.J., KAR K.K., KUMAR R., NAYAK D., *Enhanced microwave processing of epoxy nanocomposites using carbon black powders*, *Advanced Powder Technology*, 28, 4, 2017, 1281–1290.
- [27] ELMAHAISHI M.F., AZIS R.A.S., ISMAIL I., MUHAMMAD F.D., *A review on electromagnetic microwave absorption properties: their materials and performance*, *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2022, 2188–2220.
- [28] JORWAL S., DUBEY A., GUPTA R., AGARWAL S., *A review: Advancement in metamaterial based RF and microwave absorbers*, *Sensors and Actuators A: Physical*, 354, 2023, 114283.
- [29] SORATHIA U., *Materials in Military Applications. Handbook of Building Materials for Fire Protection*, 2004.
- [30] RADEK N., MICHALSKI M., MAZURCZUK R., SZCZODROWSKA B., PLEBANKIEWICZ I., SZCZEPANIAK M., *Operational tests of coating systems in military technology applications*, *Eksploatacja i Niezawodność*, 25, 1, 2023.
- [31] KOLESKE J.V., *Paint and Coating Specifications and Standards*, ASTM International 2012.
- [32] USA Department of Defense, April 30, 2025, <https://quicksearch.dla.mil/>.
- [33] Wojskowe Centrum Normalizacji, Jakości i Kodyfikacji, April 30, 2025, <https://wcnjik.wp.mil.pl/>.
- [34] Ausrüstung BAAINBw, Bundeswehr, May 14, 2025, <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/ausruestung-baainbw>.
- [35] Military & Defense Coating Services, Rhinehart Finishing, April 30, 2025, <https://rhinehartfinishing.com/industries/military-defense/>.
- [36] MIL-DTL-53039, ADDEV Materials Aerospace & Defense Ltd., April 30, 2025, <https://eu.addevmaterials-aerospace.com/product/mil-dtl-53039/>.

- [37] MIL-DTL-53039E Single Component Aliphatic Polyurethane (CARC) Coating – 1 Gallon, Superior Sales Dist., April 30, 2025, https://www.superiorsalesdist.com/store/p266/1_Gallon_-MIL-DTL-53039E_Single_Component_Aliphatic_Polyurethane%28CARC%29_Coating_-_Stock_Item.html.
- [38] MIL-DTL-53039E, Type IV Aliphatic Polyurethane CARC, Sherwin-Williams, April 30, 2025, <https://industrial.sherwin-williams.com/na/us/en/general-industrial/catalog/product/products-by-industry.11543145/mil-dtl-53039f-type-iv-aliphatic-polyurethane-carc.9515908.html>.
- [39] National Coatings & Supplies, April 30, 2025, What is Chemical Agent Resistant Coating (CARC), <https://ncsssi.com/paint-news/what-is-chemical-agent-resistant-coating-carc/>.
- [40] MIL-DTL-53039E Single Component Aliphatic Polyurethane (CARC) Coating – 1 Gallon, April 30, 2025, https://www.superiorsalesdist.com/store/p266/1_Gallon_-_MIL-DTL-53039E_Single_Component_Aliphatic_Polyurethane_%28CARC%29_Coating_-_Stock_Item.html.
- [41] MilSpec – Hentzen Coatings, Inc., April 30, 2025, <https://www.hentzen.com/defense-coatings/milspec/>.
- [42] Specialty Coatings Inc., MIL-DTL-53039E-TY IX-34094 NSN 8010-01-576-2878, April 30, 2025, <https://specialtycoatingsinc.com/products/mil-prf-22750g-ty-2-cl-h-gr-b-17929>.
- [43] Chemical Agent Resistant Coating (CARC) – How the US Marine Corps Paints its Tactical Equipment – DAU, April 30, 2025.
- [44] N-8445A/H2OB DynaSpec™ H2O Olive Drab Waterborne CARC Camouflage Top Coat MIL-DTL-64159 Type II Polymeric Based Flattening Agent – Technical Data Sheet, April 30, 2025.
- [45] Mil-Spec – NCP Coatings, April 30, 2025, <https://www.ncp-coatings.com/mil-spec/>.
- [46] TDS Technical Data Sheets – Downloads – NCP Coatings, April 30, 2025, <https://www.ncpcoatings.com/downloads/>.
- [47] NCP Coatings, April 30, 2025, Mil-Spec., NCP Coatings, <https://www.ncpcoatings.com/mil-spec/>.
- [48] WITI, Wydane aktualne, Certyfikaty OiB, April 30, 2025, <https://witi.wroc.pl/wydane-aktualne-certyfikaty/>.
- [49] F.H. BARWA – Kielce, Military Paints F.H. Barwa – Kielce, April 30, 2025, <https://barwa.kielce.pl/en/paints/military>.
- [50] Camouflage coating for special military equipment Excellent performance for individual requirements, April 30, 2025, <https://www.brillux-industrial-coatings.com/branches/military/>.
- [51] Premium Polyester Powder 5936 – F9 for the military (smooth, dull matt), April 30, 2025, https://www.brillux-industrial-coatings.com/products/132063_premium-polyester-powder-5936-f9-for-the-military-smooth-dull-matt/.
- [52] Denmark equips its CV90 with Saab Barracuda Camouflage System to enhance stealth, Army Recognition, 2025, <https://armyrecognition.com/news/army-news/2025/denmark-equips-its-cv90-with-saab-barracuda-camouflage-system-to-enhance-stealth>.
- [53] Mobile camouflage system in use by the U.S. Army in Europe, Saab, 2017, <https://www.saab.com/newsroom/press-releases/2017/mobile-camouflage-system-in-use-by-the-u.s.-army-in-europe>.
- [54] Kamuflaż mobilny, Miranda Military, April 30, 2025, <https://mirandamilitary.pl/kamuflaz-mobilny/>.

Współczesne powłoki lakiernicze pojazdów wojskowych w kontekście ich ochrony i skuteczności maskowania

Wojciech Przybył, Marek Michalski, Norbert Radek

Streszczenie. W artykule przekrojowo przeanalizowano współczesne powłoki lakiernicze stosowane na pojazdach lądowych z punktu widzenia ich skuteczności maskowania w pasmach VIS/NIR, MWIR/LWIR oraz 1–18 GHz, a także odporności mechanicznej i eksploatacyjnej. Wskazano standardy NATO (STANAG 2338) i narodowe MIL-DTL-53039/64159, NO-80-A200, TL 8010-0002 oraz kart technicznych certyfikowanych farb IRR-CARC (USA, Polska, Niemcy). Na podstawie dostępnych testów i studiów przypadków omówiono ograniczenia pojedynczych warstw lakierniczych (brak możliwości jednoczesnej kontroli sygnatury optycznej, termicznej i radarowej) oraz uzasadniono zastosowanie mobilnych pokryć multispektralnych (Saab Barracuda MCS, Lubawa Miranda) jako rozwiązania hybrydowego.

Słowa kluczowe: powłoki lakiernicze, maskowanie wielospektralne, radar, IRR, RAM

Publikacja 6



Article citation info:

Radek N, Michalski M, Mazurczuk R, Szczodrowska B, Plebankiewicz I, Szczepaniak M. Operational tests of coating systems in military technology applications. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2023; 25(1) <http://doi.org/10.17531/ein.2023.1.12>

Indexed by:



Operational tests of coating systems in military technology applications

Norbert Radek^{a*}, Marek Michalski^b, Robert Mazurczuk^c, Bogusława Szczodrowska^c,
Ireneusz Plebankiewicz^c, Marcin Szczepaniak^c

^a Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering, Kielce University of Technology, 25-314 Kielce, Poland

^b F.H. Barwa, 25-253 Kielce, Poland

^c Military Institute of Engineer Technology, 50-961 Wrocław, Poland

Highlights

- Military green paint was modified with carbon nanotubes and spherical iron.
- An original technology for the production of multi-layer coating systems was developed.
- Satisfactory attenuation coefficients for radar waves were noted for the radar-absorbing coating systems.
- Good adhesion of the coating systems and their low roughness were demonstrated.
- An original multi-criteria method of testing the operational properties of paint systems was used.
- Paint systems can potentially be used on armaments and military equipment.

Abstract

The paper presents an analysis of the functional operational properties of multilayer coatings for use in military technology in the field of masking. The developed coating systems are characterized by operational innovation due to their small thickness when compared to those currently used by global defence contractors while maintaining the re-emission coefficient required for camouflage to be effective in the optical range. Their service life and durability were assessed in terms of functional properties based on measurements of attenuation coefficients, surface geometric structure, adhesion, specular gloss and colour parameters. The tests were carried out for coating systems fabricated in five variants: a two-layer paint system (SP1), a three-layer paint system (SP2), a laser-modified three-layer paint system (SP3) and a four-layer paint system in two variants (SP4 and SP5), with the former being modified with carbon nanotubes and the later – with spherical iron. Coating systems are characterized by low roughness and good adhesion and have appropriate attenuation coefficients for radar waves. Due to their operational properties, the developed coating systems can be used on armaments and military equipment.

Keywords

coating system, functional properties, armaments and military equipment

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1. Introduction

The dynamic development of technology related to the operation of electronic products and information technology results in imposing new, higher operational and technical requirements on radars. In the 1950s, the Polish Armed Forces were equipped with NYSA-A radars operating in the 600 MHz band and on a 50 cm wavelength, and NYSA-B radar (Radiolocation Altitude Measurement Station) with a range of 150 km and equipped with parabolic antennas.

Currently, works are underway to equip the Polish Army with modern TRS-15 surveillance radars for detecting and tracking targets, and RZRA LIWIEC counter-battery radars

intended for detecting and identifying active enemy artillery fire stations. Modern TRS-15 radars are three-coordinate radars, capable of determining the range, altitude and azimuth and operating in the S-band frequency range (2÷4 GHz). They allow simultaneous tracking of 255 targets at a maximum distance of 240 km and an altitude of up to 30 km. A vital component of contemporary radars is the "friend or foe" identification system.

A natural defensive reflex is to create an effective system to delay the detection of objects in the area of operation thus reducing the probability of detection. This process can be

(*) Corresponding author.

E-mail addresses:

N. Radek (ORCID: 0000-0002-1587-1074) norrad@tu.kielce.pl, M. Michalski (ORCID: 0000-0003-0419-7886), mmichalski@barwa.kielce.pl, R. Mazurczuk (ORCID: 0000-0001-7791-9929) mazurczuk.r@witi.wroc.pl, B. Szczodrowska (ORCID: 0000-0001-5480-8046) szczodrowska@witi.wroc.pl, I. Plebankiewicz (ORCID: 0000-0002-0077-5225) plebankiewicz@witi.wroc.pl, M. Szczepaniak (ORCID: 0000-0003-4313-3703) szczepaniak@witi.wroc.pl

implemented already at the technical design stage, but this applies to newly developed devices only. In the case of equipment which already is in service with the Polish Armed Forces, the coating systems containing materials with a high microwave radiation absorption coefficient should be used, ones with a structure guaranteeing a high scattering coefficient. Awareness of the above-mentioned coefficients is the basis for developing appropriate camouflage solutions in this area.

The basic factor determining the detectability of the object in the radar range is the possibility of recording the signal generated by the transmitter after it has been reflected from objects in the field of view. The reflection intensity depends mainly on the material with which the object was manufactured and its shape and orientation in space in relation to the radar station. These factors determine the so-called radar cross-section (also known as radar signature) of the object (expressed in units of surface area), the value of which affects the possibility of distinguishing the object from its background by a given radar station.

It can be generally stated that an object with a larger radar cross-section is more easily distinguished from its background (with other detectability conditions remaining unchanged). The detection range depends on the following factors:

- transmitter power;
- antenna directive gain;
- the effective surface of the receiving antenna;
- the object radar cross-section.

The first three factors characterize the surveillance device. The users of the equipment that is under surveillance have no direct impact on them. In this situation, the only means of counteracting is to reduce the radar cross-section of the object, limiting its detection range.

Assuming that the detection of objects depends on their ability to reflect waves, the general range equation assumes the following form [6]:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_n \times G \times \delta \times A}{(4 \times \pi)^2 \times P_{o_{min}}}} \quad (1)$$

where:

R_{max} – maximum detection range [m],

A – effective aperture (area) of the receiving antenna [m²],

G – antenna gain [-],

P_t – power transmitted by the radar [W],

δ – target radar cross-section [m²],

$P_{o_{min}}$ – min. power received at which the object can still be distinguished from the noise (threshold power – one of the properties of the receiver) [W].

Decrease of the radar cross-section of the given object can be done via [9, 19]:

- the change of the spatial arrangement of the object;
- the use of highly lossy materials (with low reflectivity) for the housings/casings;
- use of barriers made of highly lossy materials (not directly connected with the object) to conceal the object,
- the use of additional layers (cladding) made with materials characterised by high loss (low reflectivity) on the external surface of the objects.

Most of these recommendations were used as part of the "stealth" technology used in the production of the American so-

called stealth bombers and fighters [3]. Their radar cross section has been reduced by about a hundred times (from 100 m² to about 1m²). Indeed, aircrafts made with stealth technology are not completely invisible to the radar, but their detection range has been reduced several times. Figure 1 shows the American Lockheed *F-117 Nighthawk* stealth attack aircraft (in the "bomber" version), while Figure 2 shows the Lockheed *SR-71 Blackbird* strategic reconnaissance and patrol aircraft. The *F-117 Nighthawk* and *SR-71 Blackbird* aircrafts have appropriate angled surfaces of the flat sheets, which results in partial scattering of radio waves and are more difficult to detect by radars.



Fig. 1. Lockheed F-117 Nighthawk bomber [2]



Fig. 2. Lockheed SR-71 Blackbird strategic reconnaissance and patrol aircraft [14]

Stealth technology is widely used in the design of modern devices for which a reduction of the detection distance is required. In the case of products that have already been put into operation, obtaining the scattering of the reflected beam (reducing the radar cross-section of the object) via modification of the shape of the surface is most often impossible, and in such cases, external coatings can be used in the form of, for example, paint systems or shields attached to the object.

Currently, there is a dynamic development of coating production processes using various surface engineering technologies, such as: plasma spraying [39], HVOF spraying [40], ESD method [33], laser cladding [43], laser alloying [32], physical vapor deposition [12], chemical vapor deposition [8], which mainly perform protective and anti-wear functions.

The evolution of paint coatings is quite rapid, multidirectional and most interesting [11]. The progress in the field of polymer coating technology stems from the three most important functions, i.e. the decorative function [34], the

protective function [10, 21] and the informative function [17]. Paint systems account for approximately 50% of all coating systems. It is estimated that about 95% of steel structures are safeguarded against corrosion with protective coatings, including as much as 90% – with paint coatings [4]. The service life of paint systems ranges from several months to several years [13].

A special group of paint systems are paint coatings for military applications, mainly for camouflaging weapon systems and military equipment [41]. Paint coatings are fundamentals of camouflage – they camouflage vehicles/objects in the optical range, both in visible light (VIS) and in the near-infrared (NIR) range [31]. The main task of effective camouflage is to eliminate those features, which may cause the object to be differentiated from its surroundings [30], i.e. those that make it possible to distinguish one's own assets from the background, and these may include, for example, colour, shape, size, gloss and texture [37, 42]. Test methods can be used to assess the operational properties of paint coatings [35, 36].

As part of the cooperation between the F.H. BARWA company, Kielce University of Technology and the Military Institute of Engineer Technology (WITI) in Poland the companies have attempted to modify the green paint commonly used for camouflage paintings applied on the surface of objects. The aim behind their activities was to develop a coating system that would meet the camouflage requirements both in terms of spectral characteristics in the range from 350 nm to 1200 nm, colour coordinates, and camouflage objects in the radar range.

When selecting the composition of the paint and the method of its application, in order to create a coating system effective in camouflaging objects and protecting them against radar reconnaissance, the following were taken into account:

- reflection coefficient – reflection of the wave at the boundary of the media (mismatch of the wave impedance of the media), reflections at the boundaries between the media should also be taken into account;
- absorption coefficient – absorption of wave energy by the material;
- transmission coefficient – penetration of the wave through the material.

The analysis of the state of the art revealed that there are no scientific papers, neither published in Poland nor in international journals, on operational testing of radar-absorbing paint systems for military applications.

The paper presents the results of functional tests of paint systems developed with the use of carbon nanotubes and innovative spherical iron particles of appropriately selected shape and size and applied in a properly tailored multi-layer coating system. It is due to this solution that camouflage minimizing the detection of objects via radar reconnaissance is made possible using a system with a much smaller thickness compared to the currently used ones, and which can be employed in products for the military. As part of the ongoing research, reference was made to the measurements of attenuation coefficients, geometric structure of the surface, adhesion, specular gloss and colour parameters.

2. Experimental procedure

Samples for the application of coatings were made of S355 structural steel with dimensions of 300 mm x 300 mm x 1 mm. The surfaces of the steel samples were polished using a rotary machine with P80 sandpaper and washed with a solvent.

To prepare the surface and apply the paint systems, Festool's rotary polisher with abrasive paper from the same company, SATA GmbH & Co. KG spray guns with nozzles, and a Blowtherm spray booth were used. The cabin had the function of extracting the excess sprayed paint and was covered with foil and secured with a gel preventing dust from settling on the surface of the applied coating. In addition, it was equipped with a thermostat maintaining a constant temperature, with the possibility of increasing it to a temperature of about 60°C, which is required for drying large samples. For drying smaller samples, a WKL 64/70 temperature and climate test chamber with adjustable temperature and humidity by Weiss Umwelttechnik GmbH was used.

Five variants of radar-absorbent coating systems were applied onto the prepared steel samples via pneumatic spraying. These include:

1. A two-layer coating system (SP1): anti-corrosion primer, camouflage paint layer (green);

2. A three-layer coating system (SP2): anti-corrosion primer + carbon nanotubes (0.5 wt%), interlayer coating + carbon nanotubes (2 wt%), camouflage paint layer (green) + carbon nanotubes (0.5 wt%);

3. A three-layer coating system (SP3): anti-corrosion primer + carbon nanotubes (0.5 wt%), interlayer coating + carbon nanotubes (2 wt%), camouflage paint layer (green) + carbon nanotubes (0.5 wt%). The coating system was laser-modified;

4. A four-layer coating system (SP4): anti-corrosion primer, interlayer coating + spherical iron (min. content), anti-corrosion primer, camouflage paint layer (green);

5. A four-layer coating system (SP5): anti-corrosion primer, interlayer coating + spherical iron (max. content), anti-corrosion primer, camouflage paint layer (green).

In the technological process, the following parameters for applying the camouflage topcoat (green paint) were used:

- surface temperature: 24÷26°C;
- working pressure 0.2÷0.25 MPa;
- evaporation time in between layer application: 15 minutes;
- dry film thickness: 60÷70 µm;
- application technique: pneumatic spraying;
- no. of applications: two layers;
- drying temperature: 60 °C;
- drying time: 60 minutes.

The remaining layers were applied following the technical data sheets provided by the manufacturer of a given paint.

Measurements of the thickness of paint systems were conducted using the magnetic induction method. Twelve measurements were made for each coating system, and that allowed the thickness results to be averaged. The average thicknesses of the applied systems was in the range of 1129÷2785 µm. The smallest thickness was found for the SP1 paint system (averaged thickness was $g_{avr}=1129$ µm), while the SP5 coating system was the thickest - $g_{avr}=2785$ µm. What is

more, the highest thicknesses were found for the SP4 ($g_{avr}=2549 \mu\text{m}$) and SP5 paint systems, both of which contained spherical iron.

3. Experimental test results

3.1. Measurement of attenuation coefficient

The test stand with the SD-203TMS reflectometer was used to measure the attenuation of microwave radiation (Fig. 3). The SD-203TMS reflectometer is offered by the Geozondas company as a portable measurement system [1, 16]. However, the number of connections between individual devices, and most importantly, the need to precisely position the antennas in relation to each other and the measured sample, so far limits the scope of its application to laboratory measurements [44].

The walls of the laboratory room (Fig. 3a) were covered with a damping cover [7], ensuring a minimum microwave attenuation at the level of 12 dB. The positioning of the antennas and the reference plate in relation to the walls, the ground and the ceiling provides space for the propagation of radio waves (the principle of the Fresnel zone was maintained) [20, 38].

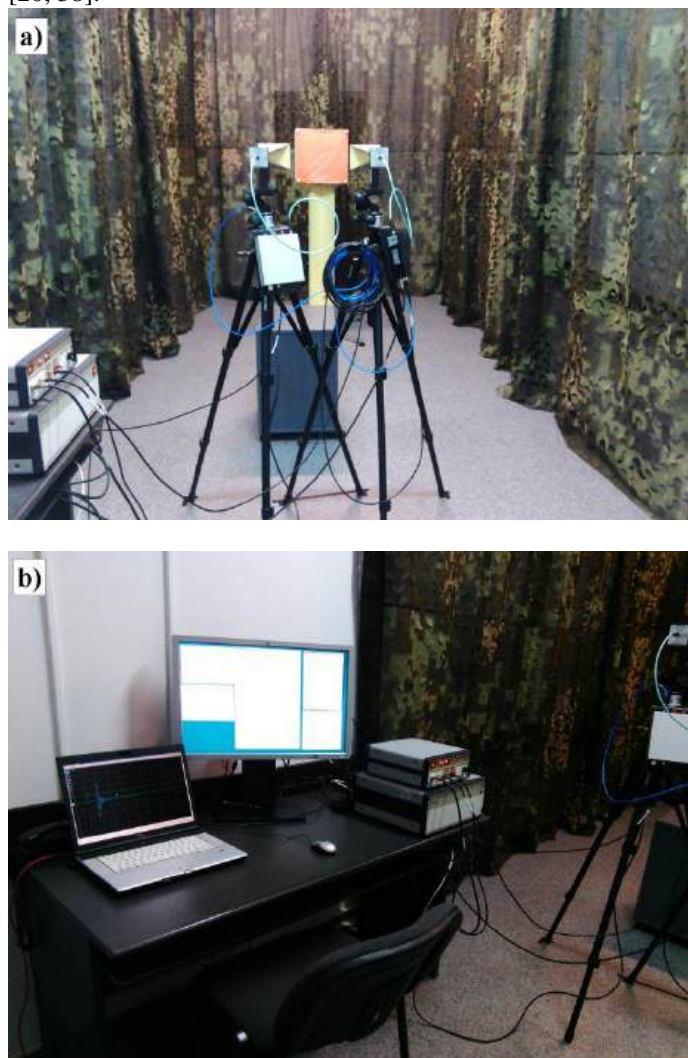


Fig. 3. Test stand at WITI for measuring the attenuation of microwave radiation with the SD-203TM reflectometer: a) antenna set, b) signal recording and processing station

The system enables the measurement of the reflection coefficient or attenuation of the absorbers in the frequency

range from 4 to 18 GHz. The system operating principle is based on a picosecond pulse transmitted by the transmitting antenna, received by the receiving antenna as a signal reflected by the object and converted by the sampling head of the oscilloscope [2, 15].

In order to assess the effectiveness of the course of action taken, we examined whether the currently used paint system applied with the recommended thicknesses of the primer layer and the topcoat layer (SP1) maintained, provides any attenuation. The result of the attenuation measurement is presented in Figure 4. You can see that the level of attenuation of radar waves in the frequency range of 4÷18 GHz [5] was between -0.09 dB for 8.5 GHz and -0.41 dB for 13.0 GHz.

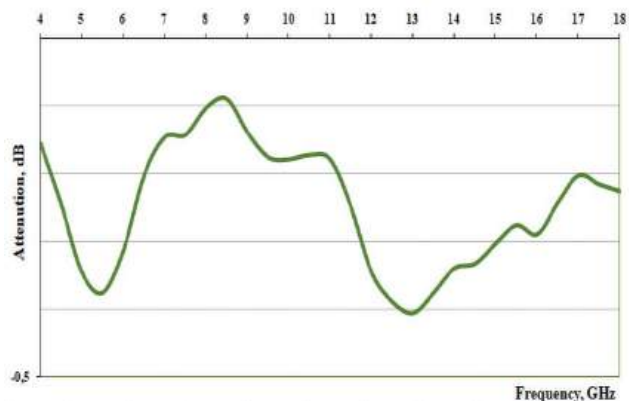


Fig. 4. Attenuation value for the SP1 coating system

In the course of further analyses on the increase in the attenuation of radar waves by the paint systems, we recognised that it was reasonable to perform tests with the use of additives in the form of absorbers added to the liquid product. In the first stage, the focus was on carbon nanotube-doped topcoat (SP2). The measurement result is shown in Figure 5.

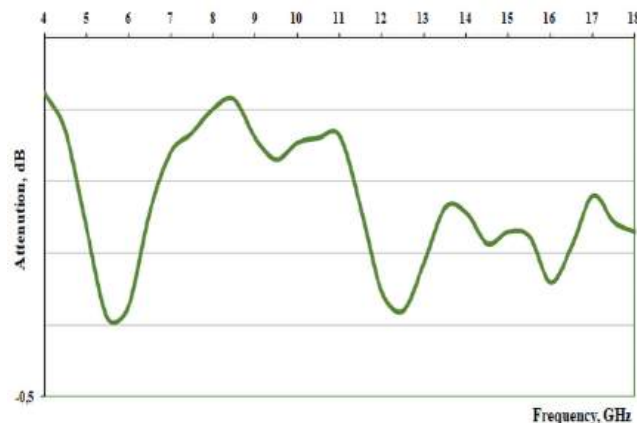


Fig. 5. Attenuation value for the SP2 coating system

For the coating with carbon nanotubes, the radar radiation attenuation was also insufficient and only a slight improvement in attenuation in the 16 GHz range was obtained.

Then, an attempt was made to check whether the modification of the topcoat (SP3) using a laser beam would increase the attenuation. Laser processing was performed with a model *ECL SS 200M* fibre laser, with the following parameters: laser output power $P = 100 \text{ W}$, feed rate $v = 1 \text{ m/min}$, pulse repetition rate $f = 20 \text{ kHz}$, rectangular beam size $1 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, wavelength $\lambda = 1064 \text{ nm}$, pulse mode. The measurement results are shown in Figure 6.

The attenuation curve (Fig. 6) changed somewhat,

maintaining the same tendency as the attenuation curve in Figure 4. Laser modification of the paint coating did not result in a noteworthy improvement of the attenuation value.

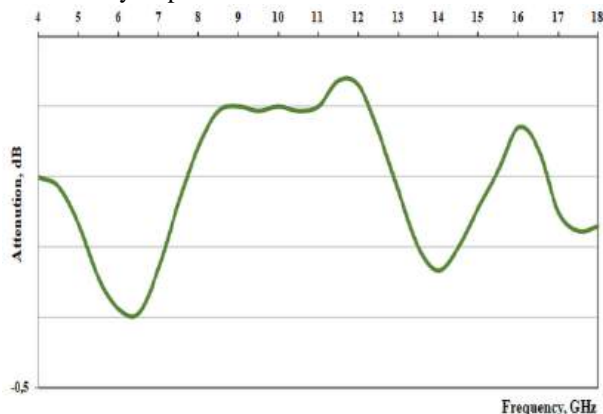


Fig. 6. Attenuation value for the SP3 coating system

The next stage involved tests using an absorber in the form of iron with a spherical molecular structure. The absorber was added to the intermediate coat under the topcoat. The SP4 coating system was prepared in accordance with the manufacturer's recommendations concerning the coating thickness and drying time. The results of the radar radiation suppression by the coating system consisting of, among others, an interlayer coating containing an absorber and a topcoat are shown in Figure 7.

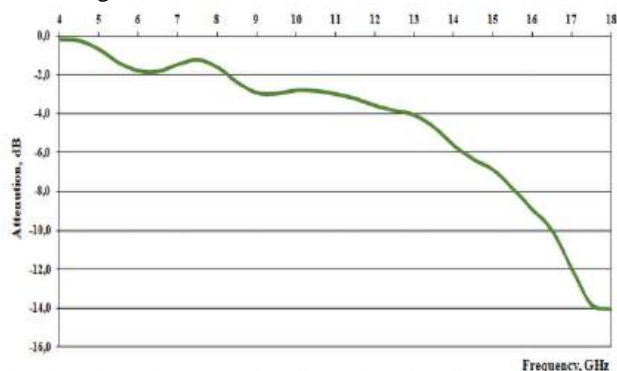


Fig. 7. Attenuation value for the SP4 coating system

Bearing in mind the results obtained so far and after extensive analysis, a decision was made to fabricate a sample with a coating of increased thickness and variable composition of individual layers (the content of spherical iron was increased). Following this theory, a SP5 coating system of larger thickness was manufactured. Figure 8 illustrates the results of the radio wave attenuation measurements for this particular coating system configuration.

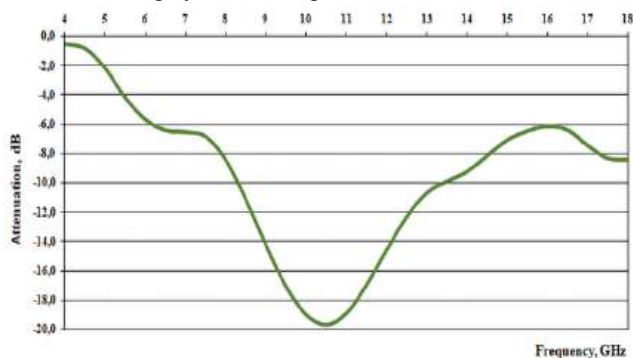


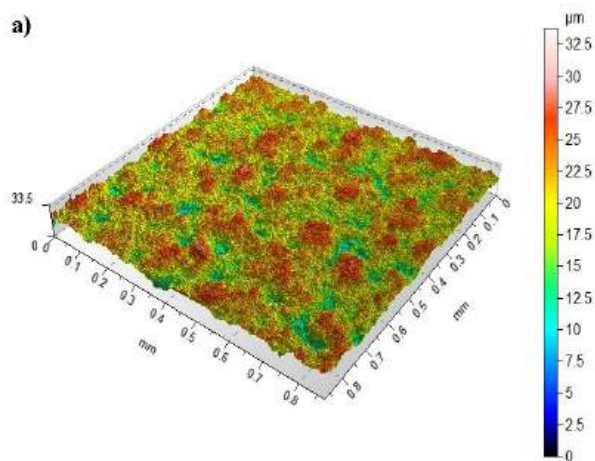
Fig. 8. Attenuation value for the SP5 coating system

The findings on the radar signal attenuation graph of paint coatings containing spherical iron are very promising (Fig. 7 and 8). The attenuation values obtained for frequencies above 6 GHz are within the range required for camouflage covers known as the Mobile Camouflage Kit (Polish acronym ZKM). In the course of further work, attempts should be made to increase the attenuation efficiency for bandwidths in the range below 6 GHz by e.g. optimizing the concentration of spherical ferrous material in the liquid product, monitoring the effect of the topcoat thickness and the number of layers (using wave reflection at the boundary of the media) on the attenuation of radar-absorbing coating systems.

3.2. Measurements of the surface geometric structure

Measurements of surface geometric structure (SGS) and roughness were carried out at the Laboratory of Computer Measurements of Geometric Quantities of the Kielce University of Technology. Measurements of surface stereometry were made using the Talysurf CCI optical profiler using the method of coherent correlation interferometry, enabling measurement with a z-axis resolution of up to 10 μm . The measurement result is saved in a matrix of 1024 x 1024 measurement points, which, with the lens used with a magnification of x50, gives the measured area of 0.33 mm x 0.33 mm and a horizontal resolution of 0.33 μm x 0.33 μm . Measurements were made using the function of numerical combination of nine measurements into a single surface (stitching). 10 measurements were made on each sample with radar-absorbing coating systems and S355 steel, which allowed to average the test results. The analysis of the obtained surface stereometry using the TalyMap Platinum software allowed for the assessment of the geometric structure of the tested surfaces.

Figures 9a-9e show exemplary isometric images of the S-L surface geometrical structure (roughness) of the SP1, SP2, SP3, SP4, SP5 radar-absorbing coating systems obtained after applying the Gaussian filter 0.08 mm x 0.08 mm.



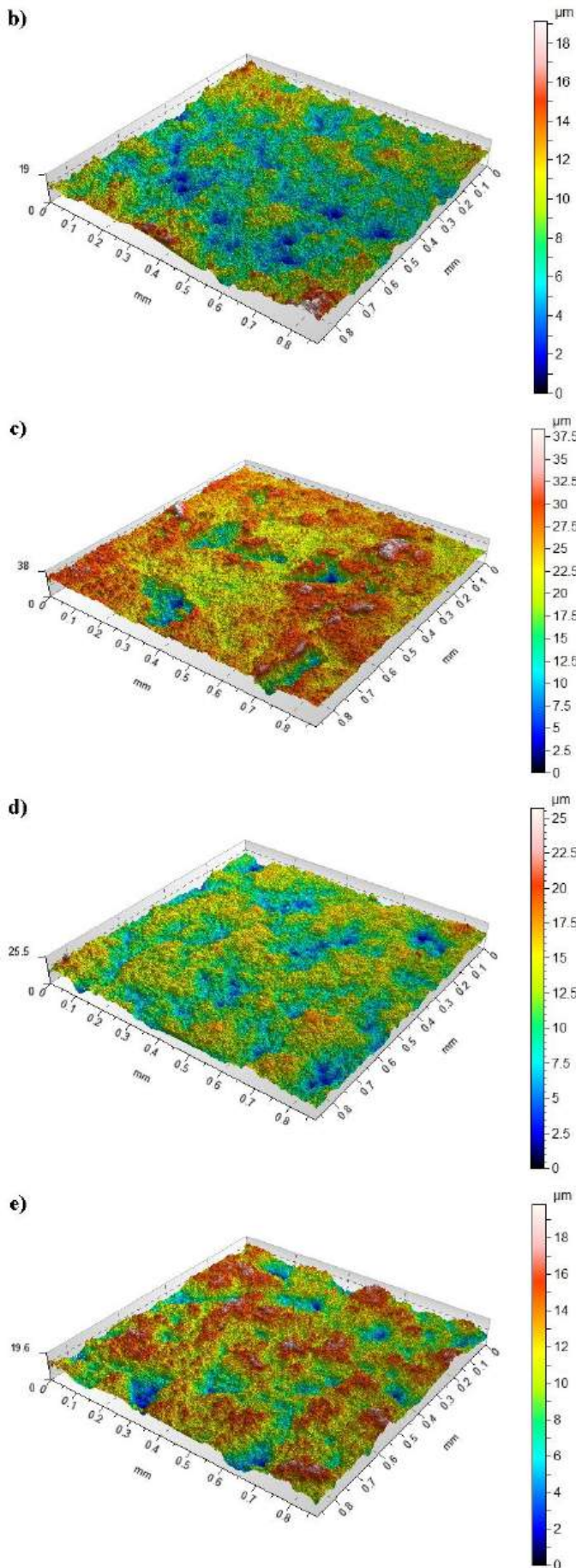


Table 1 summarizes the most important averaged values of SGS parameters for the S-L surface.

Table 1. Averaged values of parameters of surface geometric structure S-L (roughness)

SGS parameters	Coating system				
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
$Sq, \mu\text{m}$	3.208	2.448	4.605	2.782	2.928
Ssk	-0.358	0.500	-1.148	-0.304	-0.356
Sku	3.059	3.614	5.439	2.973	2.949
$Sp, \mu\text{m}$	13.644	11.211	13.951	14.158	8.556
$Sv, \mu\text{m}$	20.126	7.909	24.360	11.531	11.244
$Sz, \mu\text{m}$	33.770	19.120	38.311	25.688	19.800
$Sa, \mu\text{m}$	2.563	1.932	3.328	2.239	2.349

The tested radar-absorbing coating systems had averaged values of the arithmetic mean deviation of the surface roughness from the average surface $Sa=1.932\div 3.328 \mu\text{m}$. The samples of S355 steel after grinding with P80 grain sandpaper, on which the coatings were applied, had $Sa=1.131\div 1.367 \mu\text{m}$. The Sa parameter is the basic amplitude parameter for quantitative assessment of the condition of the analyzed surface. A similar tendency in the measurement results of radar-absorbing coating systems and S355 steel was observed for the mean square deviation of the surface roughness Sq , which was characterized by a strong correlation with the Sa parameter. As a result of the application of the masking topcoat, the surface roughness significantly increased.

Supplementary information on the shape of the surface of the tested elements is provided by the amplitude parameters: the coefficient of skewness - asymmetry Sku and the coefficient of concentration - kurtosis Ssk . These parameters are sensitive to the presence of local elevations or depressions on the surface, as well as defects (e.g. scratches, delaminations).

The obtained kurtosis values close to $Sku = 3$ prove that the distribution of ordinates for all samples is close to the normal distribution. The analysis of Table 1 shows that only the SP2 paint system has a positive value of the surface asymmetry coefficient Ssk (skewness), which proves that we are dealing with a smooth surface without deep scratches. Other masking coating systems have negative values of the skewness coefficient. The smallest value of the Ssk parameter measured for the SP3 radar-absorbing coating system results from the fact that there are numerous elevations and depressions on its surface, which is the result of the laser treatment.

3.3. Pull-off test adhesion measurements

In order to determine the adhesion strength with which the individual layers forming the coating system adhere to each other, adhesion measurements were carried out. The performed tests made it possible to determine the force with which the coating system should be acted on to lead to its tearing. An analysis of the nature of the rupture after the adhesion tests was also carried out. Adhesion measurements were made using an industry-standard pull-off test.

Pull-off test adhesion measurements according to EN ISO 4624:2016 [24] were performed in the laboratory of F. H. Barwa. The tests were carried out using the PosiTest AT handheld adhesion meter by DeFelsko. The measurements consisted in gluing a standardized stamp to the surface of the coating

Fig. 9. Isometric images of S-L surfaces (roughness) of paint coating systems: a) SP1, b) SP2, c) SP3, d) SP4, e) SP5

system using epoxy glue. Appropriate arrangement of punches on the surface of the system was maintained so that they were not too close to each other and to the edge of the sample. After 48 hours, complete cross-linking of the adhesive with the topcoat is considered. Then, after cleaning the coating surrounding the punch, the punch was broken using a measuring device and the value of the force was read. Two-component epoxy adhesive Araldite was used in the tests. Full

cross-linking time acc. manufacturer is 48 hours at 23 °C. Aluminum punches with a diameter of $\phi 20$ mm were used. Radar-absorbing coating systems were applied to S355 steel samples with dimensions of 150 mm x 100 mm x 1 mm. 5 measurement tests were made for each coating system, which allowed for the averaging of test results. The obtained adhesion results along with the standard deviation are summarized in Table 2.

Table 2. Results of pull-off test adhesion measurements

Coating system	Adhesion, MPa	Adhesion average value, MPa	Standard deviation, MPa	Breakup type
SP1	2.16	2.31	0.40	Cohesive in the primer layer
	2.68			
	2.57			
	1.69			
	2.46			
SP2	2.44	2.68	0.20	Cohesive in the primer layer
	2.50			
	2.79			
	2.92			
	2.74			
SP3	3.04	2.41	0.44	Cohesive in the primer layer
	1.81			
	2.33			
	2.52			
	2.35			
SP4	1.87	2.35	0.60	Cohesive in the primer layer
	2.24			
	1.95			
	2.34			
	3.37			
SP5	3.13	3.42	0.60	Cohesive in the primer layer
	3.14			
	3.80			
	4.27			
	2.78			

The adhesion results of the coating systems were similar. The obtained test results show that the highest average value of adhesion (3.42 MPa) was characteristic of the SP5 paint system. The SP1 paint system with the lowest average value of adhesion (2.31 MPa) had approx. 33% less adhesion compared to the SP5 radar-absorbing coating system. The results of the adhesion measurements were characterized by low values of the standard deviation, which proves the high repeatability of the measurements. Figure 10 shows an exemplary view of the sample after the pull-off test adhesion measurements.

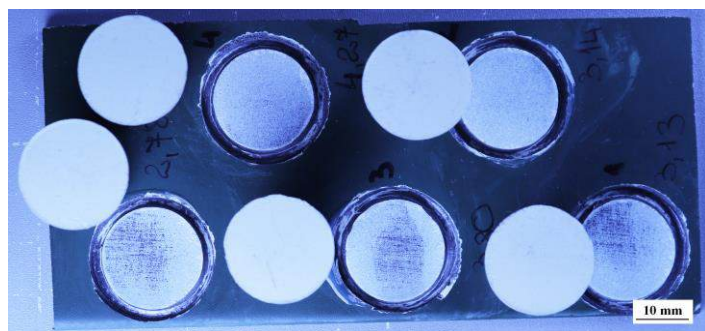


Fig. 10. View of the sample after measuring the adhesion of the SP5 paint coating system

3.3.1. Statistical analysis of adhesion measurement results

The adhesion test of the coating system was designed as a one-factor test, whereby, as in the case of the thickness test, the radar-absorbing coating system (SPP) was a factor controlled at 5 levels (painting systems SP1, SP2, SP3, SP4, SP5), and the adhesion was measured by pull-off test was the observed quantity (ADHESION designation). In order to reduce the impact of random uncontrolled factors, 5 replications were assumed (Table 3).

Table 3. Experimental design

Controlled size		Observed size
SPP		ADHESION
Horizontal	SP1	5 replications
	SP2	5 replications
	SP3	5 replications
	SP4	5 replications
	SP5	5 replications

After the tests, a total of 25 results were obtained (Table 4).

Table 4. Results of pull-off test adhesion measurements

SPP		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
Replication	1	2.16	2.44	3.04	1.87	3.13
	2	2.68	2.50	1.81	2.24	3.14
	3	2.57	2.79	2.33	1.95	3.80
	4	1.69	2.92	2.52	2.34	4.27
	5	2.46	2.74	2.35	3.37	2.78

The results were subjected to routine statistical analysis, taking into account the grouping according to the SPP factor.

Table 5. Descriptive statistics of adhesion by SPP groups

SPP	ADHESION								
	Cardinality	Mean	SE *)	S *)	Minimum	Q1*)	Median	Q3*)	Maximum
SP1	5	2.31	0.18	0.40	1.69	1.93	2.46	2.63	2.68
SP2	5	2.68	0.09	0.20	2.44	2.47	2.74	2.86	2.92
SP3	5	2.41	0.20	0.44	1.81	2.07	2.35	2.78	3.04
SP4	5	2.35	0.27	0.60	1.87	1.91	2.24	2.86	3.37
SP5	5	3.42	0.27	0.60	2.78	2.96	3.14	4.04	4.27

*) SE – standard error (standard deviation of the mean), S – standard deviation of a single measurement, Q1 – lower quartile, Q3 – upper quartile

Homogeneity of variance

Prior to the analysis of variance, a homogeneity of variance test within the groups was performed to determine whether a variance-smoothing Box-Cox transformation was necessary. Due to the small size of the groups and the lack of reliable information about the normality of the distribution, Leven's test was used. The conducted analysis showed (significance level of the test $p = 0.77$) that there is no need to perform variance stabilization. At the same time, the asymmetry of the positions of the medians in relation to the quartiles observed in the box-plot plot (Fig. 11) justified a posteriori not applying the assumption about the normality of the distribution of results, especially since the group size of 5 is not large.

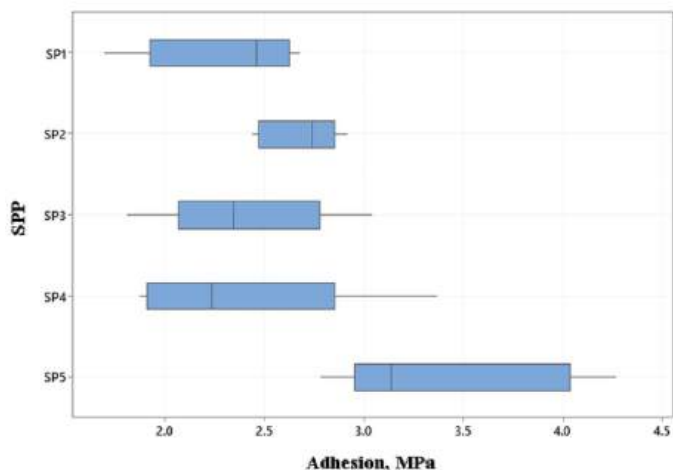


Fig. 11. Box-plot of adhesion against SPP groups

Univariate Anova analysis of variance

The differentiation of the impact of SPP systems was verified using a one-way analysis of variance performed at five levels. It was confirmed that there is a significant differentiation of adhesion depending on the SPP system used (test significance level $p = 0.007$; Table 6).

This included the calculation of typical descriptive statistics, testing for homogeneity of variance across SPP groups, one-way ANOVA by SPP classification, determination of homogeneous outcome groups, and box-plot plotting.

Descriptive statistics

Descriptive statistics (Table 5) included determination of mean values, standard errors (standard deviation of the mean), standard deviations, smallest and largest values, quartiles and medians.

Table 6. Results of one-factor analysis of adhesion variance with respect to SPP groups

Source	df	SS	MS	F	p
SPP	4	4.29	1.07	4.81	0.007
Error	20	4.46	0.22		
Total	24	8.75			

Homogeneous groups of results

After establishing through the analysis of variance that there is a statistically significant differentiation of adhesion depending on the SPP system used, the question arose between which groups of SPP these differences occur. This means that the so-called homogeneous groups of results.

To determine these groups, Tukey's HSD test of simultaneous testing of differences in mean values was used (Table 7), the results of which were illustrated by a graph (Fig. 12) comparing the position of the confidence intervals of differences with respect to the zero value.

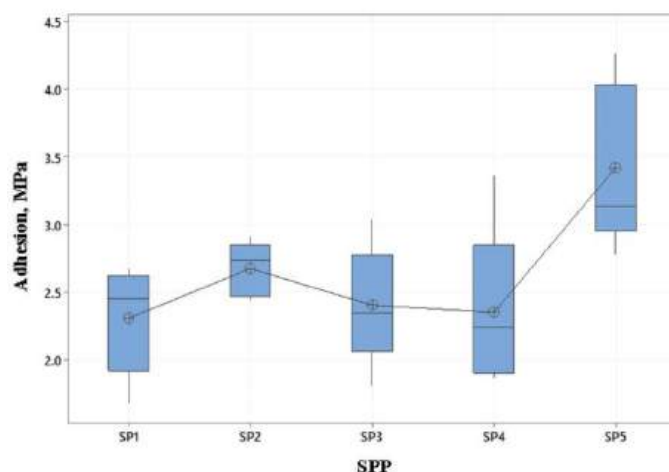


Fig. 12. Box-plot of adhesion against SPP groups with the location of average values in individual groups

Table 7. Table of significance p values of significant differences in SPP groups tested with Tukey's HSD test (significant pairs for $p < 0.05$)

SPP	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
SP1	–	0.74	1.00	1.00	0.01
SP2	0.74	–	0.89	0.81	0.13
SP3	1.00	0.89	–	1.00	0.02
SP4	1.00	0.81	1.00	–	0.01
SP5	0.01	0.13	0.02	0.01	–

The interpretative criterion is checked in one of two ways:

- whether the value of the significance level p (Table 7) is lower or greater than the assumed significance level α (usually 0.05): if lower, the difference is statistically significant; if greater, the difference is statistically insignificant,
- whether the zero value (Fig. 13) is contained within the confidence interval of the difference of the average values of a given pair: if it is contained, the difference is statistically insignificant; if not, the difference is significant.

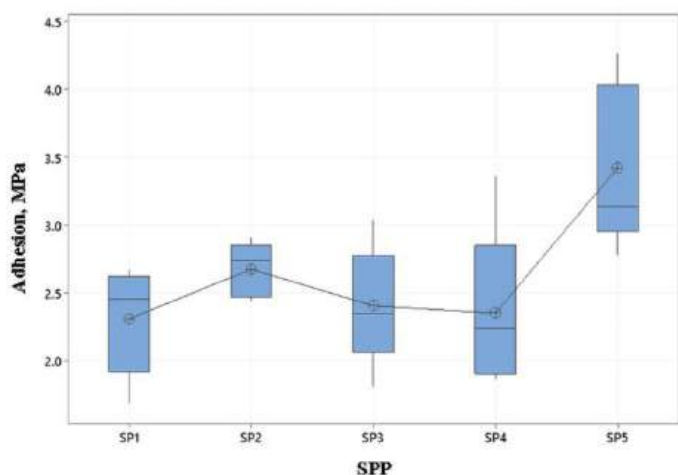


Fig. 13. Differences in mean values in SPP pairs with confidence intervals calculated using the Tukey method

The analysis of the obtained results (Table 7 and Fig. 13) led to the conclusion that there are two homogeneous groups of results (Table 8): one containing SP2 and SP5 and the other consisting of SP1, SP2, SP3, SP4. This pattern of results suggests that it would be advisable to consider additional measurements for SP2 and SP5 to determine whether or not the two painting techniques are statistically different.

Table 8. Determination of homogeneous adhesion groups in SPP grouping

SPP	Cardinality	Average adhesion, MPa	Grouping
SP5	5	3.42	A
SP2	5	2.68	A B
SP3	5	2.41	B
SP4	5	2.35	B
SP1	5	2.31	B

It can therefore be concluded that the SP2 and SP5 coating systems were characterized by the highest adhesion.

3.4. Measurements of specular gloss and colour parameters

A Byk Micro-Tri-Gloss glossmeter (by BYK-Gardner GmbH)

was used to assess the specular gloss of the coatings. The tests were performed at the angles of incidence of light radiation (20° , 60° , 85°) in accordance with the standard EN ISO 2813:2014 [23]. There were made 10 measurements for each coating system, which enabled the averaging of test results. Small deviations in the measurement results obtained during the tests resulted from various places where the gloss measurement was made on the test sample. The results of surface gloss measurements of radar-absorbing coatings are shown in Figures 14÷16.

Radar-absorbing coating systems were marked by low gloss of values in the range of $0.2 \div 9.9$ gloss units (GU). The lowest gloss values were found in paint coating systems at the angle of incidence of light $\alpha=20^\circ$ (Fig. 14), and their averaged values were in the range of $0.2 \div 0.4$ GU. On the samples, tarnishing and chalking of the surface layer (SL) of the tested radar-absorbing coating systems were observed. Radar-absorbing coating systems at $\alpha=60^\circ$ obtained average gloss values from 1.4 to 4.0 GU (Fig. 15).

The highest gloss values were found in paint coating systems at the angle of incidence of light $\alpha=85^\circ$ (Fig. 16). According to the assumptions of the Polish Defence Standard NO-80-A200:2021, the gloss of paint coatings made with masking paints should not exceed 8 GU for the observation angle of 85° [29]. The average values of the tested systems ranged from $3.1 \div 9.9$ GU. For the SP1, SP2 and SP4 systems, the gloss values were below 8 GU units, while for the SP3 and SP5 systems they slightly exceeded this value.

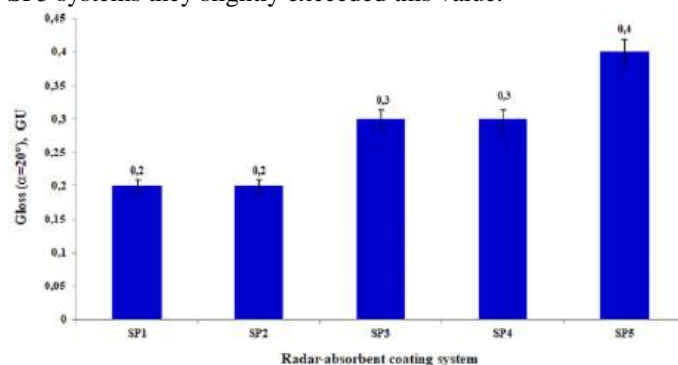


Fig. 14. Gloss of paint surfaces of coating systems at the angle of incidence of light $\alpha=20^\circ$

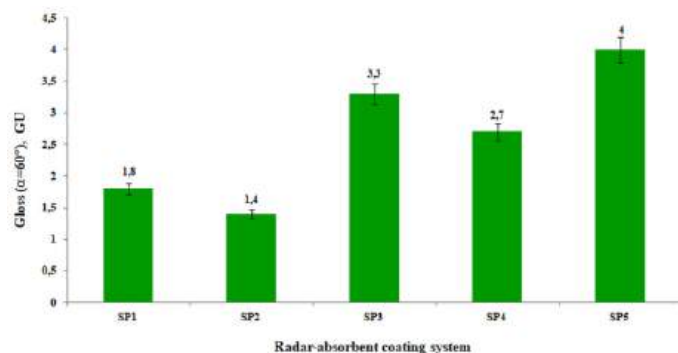


Fig. 15. Gloss of paint surfaces of coating systems at the angle of incidence of light $\alpha=60^\circ$

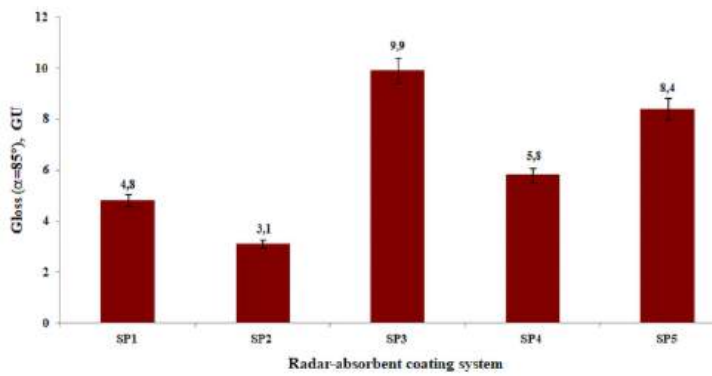


Fig. 16. Gloss of paint surfaces of coating systems at the angle of incidence of light $\alpha=85^\circ$

Colour is mathematically described with three components: L^* – brightness (luminance); a^* – component determining the shade from green to magenta; b^* – component determining the shade from blue to yellow. The CIELAB colour space is described with the following equations [25]:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad (2)$$

$$a^* = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) \quad (3)$$

$$b^* = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right) \quad (4)$$

where:

$X_n=94.81$ $Y_n=100.00$ $Z_n=107.30$ are the colour coordinates of the standard white body.

The method of describing colour using $L^*a^*b^*$ coordinates is currently the most popular and is the basis of colour management systems.

The colour parameters were measured using a CM-700d spectrophotometer (Konica Minolta). During the measurements, the values of individual colour parameters were determined: L^* , a^* , b^* with D65 light and 10° observer [26]. Then, the parameter of colour difference ΔE_{ab}^* relative to the standard was calculated (CIELab values for green color, standard NO-80-A200:2021) according to formula [27]:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5)$$

where:

ΔE_{ab}^* – colour difference between the test sample and the reference sample,

ΔL^* – brightness parameter,

Δa^* – colour parameter,

Δb^* – colour parameter.

From the literature [18, 22] it is known that the colour difference parameter ΔE_{ab}^* with the following values is characterized with:

$0 < \Delta E_{ab}^* < 1$ – the observer does not notice the difference;

$1 < \Delta E_{ab}^* < 2$ – only an experienced observer notices the difference;

$2 < \Delta E_{ab}^* < 3,5$ – the difference is also noticed by an inexperienced observer;

$3,5 < \Delta E_{ab}^* < 5$ – the observer perceives a distinct colour difference;

$5 < \Delta E_{ab}^*$ – the observer perceives two different colours.

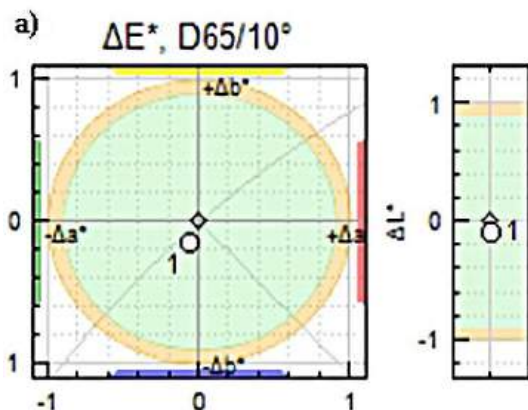
Table 9 shows the colour parameters: L^* , a^* , b^* and the

calculated parameters ΔE_{ab}^* for the tested radar waves absorbing coating systems.

Tabela 9. Parametry koloru lakierniczych systemów powłokowych

Sample	Parameters	L^*	a^*	b^*	ΔE_{ab}^*
Standard green CIELab according NO-80-A200:2021		35.17	-5.14	5.56	-
SP1		35.09	-5.20	5.42	0.17
SP2		37.12	-4.47	7.52	2.85
SP3		33.62	-4.55	4.05	2.24
SP4		34.67	-5.23	4.99	0.76
SP5		34.75	-5.29	5.07	0.67

All tested radar-absorbing coating systems were characterized with ΔE_{ab}^* values below 3.0 (Table 9), which is in accordance with the assumptions of the NO-80-A200:2021 standard. Figure 17 shows the location of the L^* , a^* , b^* components of the tested radar-absorbing coating systems in the CIELab space. The most favourable mapping of colour parameters was obtained for the SP1 paint system $-\Delta E_{ab}^* = 0.17$ (fig. 17a). Despite a slight colour deviation towards blue tones, the parameter ΔE_{ab}^* of the SP4 and SP5 paint systems was below 1 (Fig. 17d and Fig. 17e). The colour difference was within the measurement tolerance, which means that even an experienced observer would not notice the difference between the tested sample and the standard. In the case of two paint systems, i.e., SP2 and SP3, the values of ΔE_{ab}^* were significantly higher than the other systems and amounted to 2.85 and 2.24, respectively. The SP2 paint system was brighter (parameter $L^* = 37.12$) and more yellow (parameter $b^* = 7.52$) compared to the standard parameters, which shows the location of the colour components (Fig. 17b). In the CIELab colour space, the colour of the SP3 radar-absorbing coating system (Fig. 17c) compared to the reference sample was darker (parameter $L^* = 33.62$) and bluer (parameter $b^* = 4.05$).



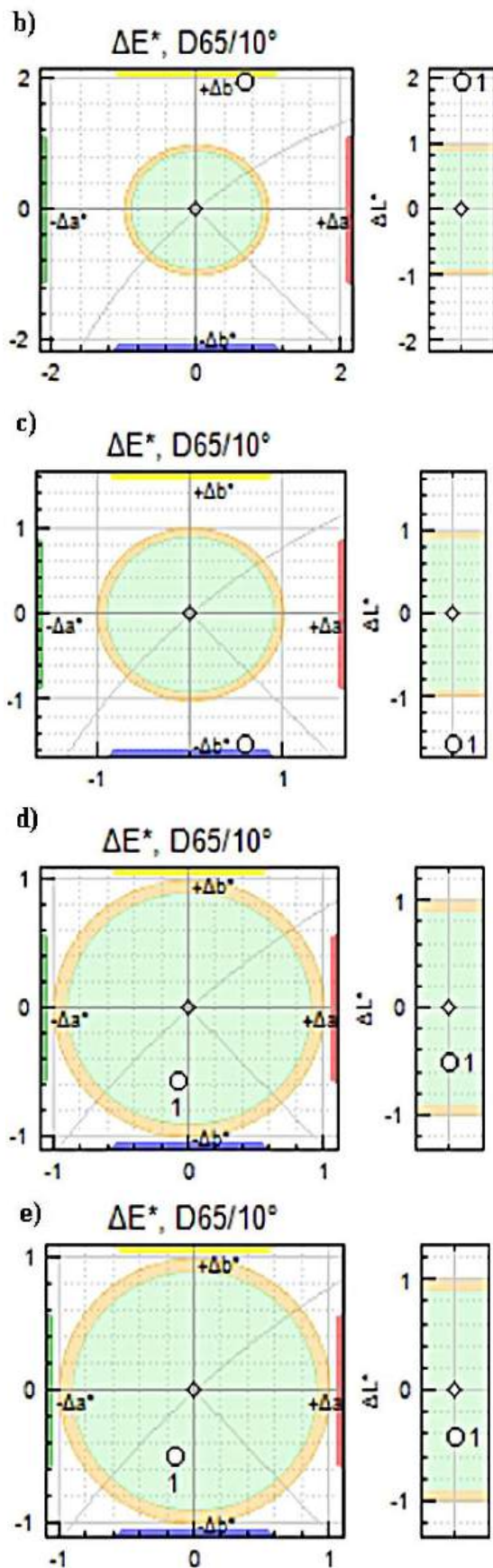


Fig. 17. Location of L^* , a^* , b^* components of paint coating systems in the CIE Lab space: a) SP1, b) SP2, c) SP3, d) SP4, e) SP5

In the next stage of the research, spectral characteristics of the reflectance were performed using the Jasco V-770

spectrophotometer with 8/d geometry (Jasco). Figure 18 presents the values of the reflectance coefficients of the discussed radar-absorbing coating systems depending on the wavelength of the incident light in the 350-1200 nm range, taking into account the limit values for green special paints for camouflage painting [29].

In the visible light range, the spectral characteristics of the tested radar-absorbing coating systems were within the set parameters, with the exception of the SP2 paint system. SP1, SP4 and SP5 paint systems in the wavelength range of 350-780 nm had a similar course of the reflectance spectrum. In the case of the SP2 and SP3 coating systems, in the above-mentioned wavelength range, a different course can be observed in relation to the other paint systems, which is confirmed by the values of the L^* , a^* , b^* components. At wavelengths of 800÷1200 nm, the lowest reflectance values were obtained for samples SP2 and SP3. Among all the tested radar-absorbing coating systems, the best values of the reflectance coefficient, in relation to the requirements of the NO-80-A200:2021 standard, were shown by the SP1 and SP5 paint systems.

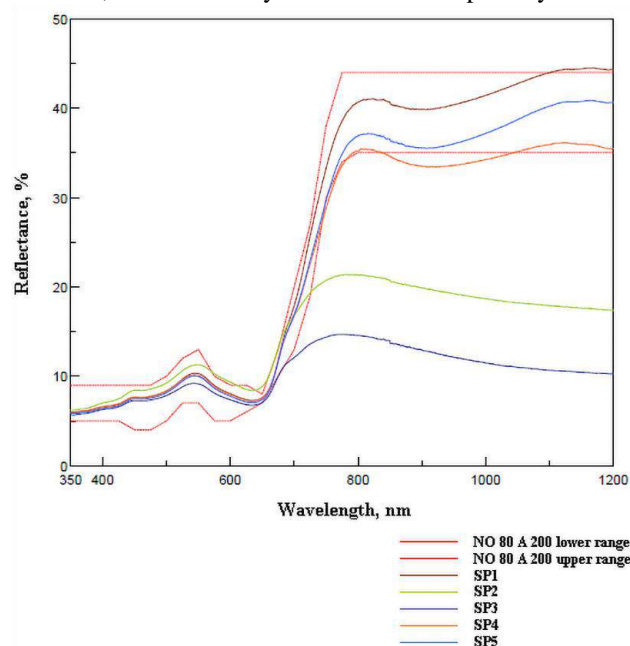


Fig. 18. Values of reflectance coefficients of paint coating systems

4. Conclusions

The analysis and interpretation of the obtained results of operational tests of coating systems allowed the following conclusions to be drawn:

1. The attenuation of radio waves by paint coating systems (containing spherical iron) with increased thickness and variable composition of individual layers exceeds the attenuation of radio waves in the range from 9 GHz to 12.5 GHz currently used in the Polish Armed Forces by multi-band camouflage coatings [28]. The attenuation values obtained for frequencies above 12.5 GHz and in the range from 6 GHz to 9 GHz are within the range required for camouflage coverings known as the Mobile Camouflage Kit (MCK). An undoubted advantage of paint coatings in relation to multi-range camouflage coatings is the integrity of the system with the military facility. It seems reasonable to carry out further work

aimed at optimizing the coating system in terms of operation and determining the zones of a military vehicle that should be protected with a new coating in order to reduce the probability of detection and identification.

2. The SP2 and SP5 radar-absorbing coating systems are characterized by the highest adhesion, while the SP1 system has the lowest adhesion.

3. A very important factor affecting the geometric structure of the coating system is the proper preparation of the base material. Paint systems have a higher roughness in relation to the base material (more than twice). Low values of surface inclination coefficient Sku (kurtosis) indicate a large dispersion of surface ordinates. Positive values of the surface asymmetry coefficient Ssk (skewness) provide information that

we are dealing with a smooth surface without deep scratches (SP2 coating system).

4. The highest gloss values have paint coating systems at the angle of incidence of light $\alpha=85^\circ$, and their average values are in the range of 3.1÷9.9 GU.

5. Optimal values of the reflectance coefficient in relation to the requirements of the NO-80-A200: 2021 standard are demonstrated by the SP1 and SP5 radar-absorbing coating systems.

6. In the future, the possibility of doping components improving thermal conductivity should be considered. The designed radar-absorbing coating system (taking into account thermal aspects) would make it possible to verify the current view on multispectral camouflage.

References


1. Alenkowicz H, Levitas B. Measurement of complex permittivity and complex permeability of materials. 12th International Conference on Microwaves and Radar. MIKON - 98, Cracow, Poland, 20-22.05.1998: 668-672 (no paper link available).
2. Ašmontas S, Kiprijanovič O, Levitas B, Matuzas J, Naidionova I. Estimation of electrical properties of hidden objects using microwave signals. *Materials Science* 2014; 2(20): 232-234, <https://doi.org/10.5755/j01.ms.20.2.6331>.
3. Balakrishnan P, John MJ, Pothen L, Sreekala MS, Thomas S. Natural fibre and polymer matrix composites and their applications in aerospace engineering. Book: *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. Woodhead Publishing Limited, Duxford - Cambridge - Kidlington 2016: 365-383, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00012-2>.
4. Burakowski T. *Areologia – podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2013 (no paper link available).
5. Bury M. *Obrazowanie obiektów na podstawie wielopunktowej akwizycji mikrofalowych sygnałów szerokopasmowych*. Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2009 (no paper link available).
6. Chrzanowski J, Gućma M, Jankowski S, Juszkiewicz Z, Montewka J, Przywarty M. *Urządzenia radarowe w praktyce nawigacyjnej*. Seria Wydawnicza: *Urządzenia Nawigacji Technicznej nr 1*, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2010 (no paper link available).
7. Chung DDL. Materials for electromagnetic interference shielding. *Materials Chemistry and Physics* 2020; 255: Article 123587, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123587>.
8. Frank F, Tkadletz M, Czettl C, Schalk N. Microstructure and mechanical properties of ZrN, ZrCN and ZrC coatings grown by Chemical Vapor Deposition. *Coatings* 2021; 11: Article 491, <https://doi.org/10.3390/coatings11050491>.
9. Jayalakshmi CG, Inamdar A, Anand A, Kandasubramanian B. Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts. *Journal of Applied Polymer Science* 2019; 136: Article 47241, <https://doi.org/10.1002/app.47241>.
10. Kotnarowska D. Analysis of polyurethane top-coat destruction influence on erosion kinetics of polyurethane-epoxy coating system. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2019; 1(21): 103-114, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.12>.
11. Kotnarowska D. *Powłoki ochronne*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2010 (no paper link available).
12. Kowalski S. The influence of selected PVD coatings on fretting wear in a clamped joint based on the example of a rail vehicle wheel set. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2018; 1(63): 1-8, <https://DOI:10.17531/EIN.2018.1.1>.
13. Kozłowska A. *Węzłowe zagadnienia naukowe i techniczne warunkujące rozwój technologii powłok ochronnych w XX wieku*. Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa 1987 (no paper link available).
14. Kumar N, Vadera SR. *Stealth Materials and Technology for Airborne Systems*. Book: *Aerospace Materials and Material Technologies*. Volume 1: *Aerospace Materials*. Springer, Singapore 2017: 519-537, <https://DOI:10.1007/978-981-10-2134-3>.
15. Lazaro A, Girbau D, Villarino R. Analysis of vital signs monitoring using an IR-UWB Radar. *Progress in Electromagnetics Research* 2010; 100: 265-284, <https://DOI:10.2528/PIER09120302>.
16. Levitas B, Matuzas J. UWB radar high resolution ISAR imaging. *Second International Workshop Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (IEEE Cat. No.04EX925)* 204: 231-233 (no paper link available).
17. Malshe VC, Sangaj N. Fluorinated acrylic copolymers Part I: Study of clear coatings. *Progress in Organic Coatings* 2005; 53: 207-211, <https://doi:10.1016/j.porgcoat.2005.03.003>.
18. Mokrzycki WS, Tatol M. Color, difference Delta E - A survey. *Machine Graphics and Vision* 2011; 20: 383-411 (no paper link available).
19. Mouritz AP. *Introduction to aerospace materials*. Book: *Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead Publishing Limited, Oxford - Cambridge - Philadelphia - New Delhi 2012: 1-14 (no paper link available).
20. Ondrejka AR, Kanda M. A time-domain method for measuring the reflection coefficient of microwave absorbers at frequencies below 1 GHz. *Antennas and Propagation Society Symposium Digest (IEEE - INSPEC Accession Number: 4239209)* 1991: 1656-1659 (no paper link available).
21. Pasiecznyński Ł, Radek N, Radziszewska-Wolińska J. Operational properties of anti-graffiti coating systems for rolling stock. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2018; 1(12): 127-134, <https://DOI:10.12913/22998624/85705>.
22. Plebankiewicz I, Mazurczuk R, Szczodrowska B. Selection and verification of camouflage colours. *Materials Research Proceedings* 2020; 17: 79-85, <https://DOI:10.21741/9781644901038-12>.
23. EN ISO 2813:2014 *Paints and varnishes - Determination of gloss value at 20 degrees, 60 degrees and 85 degrees*.
24. EN ISO 4624:2016 *Paints and varnishes - Pull-off test for adhesion*.
25. EN ISO 7724-1:2003 *Paints and varnishes - Colorimetry - Part 1: Principles*.
26. EN ISO 7724-2:2003 *Paints and varnishes - Colorimetry - Part 2: Colour measurement*.
27. EN ISO 7724-3:2003 *Paints and varnishes - Colorimetry - Part 3: Calculation of colour differences*.
28. Norma Obronna NO-10-A208:2014/NO-10-A208:2014/A1:2020 - *Pokrycia i komplety maskujące. Wymagania ogólne*.
29. Norma Obronna NO-80-A200:2021 - *Farby specjalne do malowania maskującego. Wymagania i metody badań*.


30. Przybył W, Mazurczuk R, Szczepaniak M, Radek N, Michalski M. Virtual methods of testing automatically generated camouflage patterns created using cellular automata. *Materials Research Proceedings* 2022; 24: 69-77, <https://DOI: 10.21741/9781644902059-11>.
31. Przybył W, Radosz W, Januszko A. Colour management system: Monte Carlo implementation for camouflage pattern generation. *Coloration Technology* 2020; 136: 407-416, <https://doi.org/10.1111/cote.12483>.
32. Radek N, Szczotok A, Gądek-Moszczak A, Dwornicka R, Bronček J, Pietraszek J. The impact of laser processing parameters on the properties of electro-spark deposited coatings. *Archives of Metallurgy and Materials* 2018; 2(63): 809-816, <https://DOI: 10.24425/122407>.
33. Radek N. Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2009; 4(44): 10-16 (no paper link available).
34. Selvakumar N, Barshilia HC, Rajam KS. Effect of substrate roughness on the apparent surface free energy of sputter deposited superhydrophobic polytetra-fluoroethylene coatings: A comparison of experimental data with different theoretical models. *Journal of Applied Physics* 2010; 108: Article 013505, <https://doi.org/10.1063/1.3456165>.
35. Świdorski A, Józwiak A, Jachimowski R. Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2018; 2(20): 292-299, <https://DOI:10.17531/ein.2018.2.16>.
36. Świdorski A, Borucka A, Grzelak M, Gil L. Evaluation of machinery readiness using Semi-Markov processes. *Applied Sciences* 2020; 10: Article 1541, <https://doi:10.3390/app10041541>.
37. Toh KB, Todd P. Camouflage that is spot on! Optimization of spot size in prey-background matching. *Evolutionary Ecology* 2017; 31: 447-461, <https://DOI 10.1007/s10682-017-9886-3>.
38. Tyrawa P, Kałuski M. Procedury wzorcowania anten pomiarowych. *Telekomunikacja i techniki informacyjne* 2005; 1-2: 96-115 (no paper link available).
39. Wang D, Zhang B, Jia CC, Gao F, Yu Y, Zhao X, Bai Z. Microstructure and tribological properties of plasma-sprayed WC-17Co coatings with different carbide grain size distribution. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy* 2016; 63(7): 688-696, <https://doi.org/10.2497/jjspm.63.688>.
40. Wang H, Qiu Q, Gee M, Hou C, Liu X, Song X. Wear resistance enhancement of HVOF-sprayed WC-Co coating by complete densification of starting powder. *Materials & Design* 2020; 191: Article 108586, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108586>.
41. Wysocki K, Dąbrowska I, Idziek M. Maskowanie wojsk i obiektów na przykładzie doświadczeń wybranych państw. *Akademia Sztuki Wojennej, Warszawa* 2020 (no paper link available).
42. Yang X, Xu W, Liu J, Jia Q, Liu H, Ran J, Zhou L, Zhang Y, Hao Y, Liu C. A small-spot deformation camouflage design algorithm based on background texture matching. *Defence Technology* 2021; 13 October: 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.10.001>.
43. Zhang P, Pang Y, Yu M. Effects of WC particle types on the microstructures and properties of WC-reinforced Ni60 composite coatings produced by laser cladding. *Metals* 2019; 9: Article 583, <https://doi.org/10.3390/met9050583>.
44. <https://www.geozondas.it/list/Seminaras%20Lietuva-Baltarusija.pdf> [on-line access 07.09.2022].

Publikacja 7

Physical properties of masking coating systems used in military technology

Marek Michalski¹✉, Norbert Radek²

¹  <https://orcid.org/0000-0003-0419-7886>

²  <https://orcid.org/0000-0002-1587-1074>

^{1,2} Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering
7 1000-lecia P.P. Ave., 25-314 Kielce, Poland

¹ Firma Handlowa Barwa Jarosław Czajkowski
3-5 Warkocz St., 25-253 Kielce, Poland

e-mail: ¹mmichalski@barwa.kielce.pl

✉ corresponding author

Keywords: camouflage, coatings system, hardness, surface roughness, military equipment and vehicles

JEL Classification: L69, O31, M11, L15

Abstract

This paper presents the results of experimental tests on coating systems for military applications. The evaluation of properties is performed based on measurements of thickness, gloss, hardness, and surface roughness. The spectral characteristics of the tested systems and color parameters are presented. The tests are conducted for two-layer masking coating systems made in three variants: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2), and coating system modified with glass microspheres (SP3). Analysis of the obtained results reveals that these coating systems exhibit similar thickness, gloss, and spectral characteristics. The SP2 system is characterized by lower hardness, while the SP2 and SP3 systems have higher roughness.

Introduction

Camouflage is a broad concept encompassing the strategic, operational, and direct levels (MON, 2010). This article refers to direct camouflage, one of the elements of which is camouflage painting, i.e., a durable coating system applied to military equipment, including some equipment used in the Navy. Camouflage coatings, along with temporary measures such as leaves, branches, and camouflage nets, constitute the basis of contemporary camouflage techniques (Auerbach, 1979). The main purpose of camouflage is to prevent the camouflaged object from being distinguished from the surrounding terrain background, especially in visible light as well as ultraviolet and near-infrared light. These coatings should be characterized by an appropriate

color similar to the surrounding terrain background, a suitable gloss to prevent directional (mirror) light reflection, and appropriate characteristics for electromagnetic radiation reflection in the range subject to camouflage. The specific properties of radiation re-emission are used in the design of camouflage coatings. Depending on the application, they can be designed to absorb radiation or evenly disperse it, making the object covered with such a coating more difficult to detect, both with the naked eye and with optical systems that utilize the ultraviolet and infrared ranges (Åkerlind et al., 2015).

Camouflage coatings on military equipment, based on a combination of several colors, are an indispensable element of modern camouflage strategies (Andersson & Åkerlind, 2014; Talas, Baddeley & Cuthill, 2017). In recent years, scientists

have been working intensively on creating coatings that can effectively camouflage objects in various environments. Currently, intensive research is underway on coatings inspired by adaptive mechanisms observed in nature, especially in animals such as chameleons or octopuses (Kim et al., 2021). During use, polymer coatings are exposed to the impact of physical, chemical, mechanical, and biological factors, causing the generation of their destruction processes, ultimately leading to the wear of the coatings (Kotnarowska, 2013). During operation, camouflage coatings are exposed to the effects of variable atmospheric conditions such as temperature, humidity, sunlight, and precipitation. They are subject to exposures related to their intended use, such as warfare agents, contamination removal agents, and petroleum products, as well as during operations. They are also susceptible to damage such as scratching, impact with stones, etc. (Michalski et al., 2023). Currently, there is a rapid development of coatings (metallic, ceramic, and paint) that can be successfully applied to armaments and military equipment (Radek, 2009; Michalski et al., 2023; Radek, 2023a; 2023b; Radek et al., 2023).

This article presents the results of experimental tests on camouflage coating systems, which were created from modified paint materials necessary for their production. The modifying materials were carbon nanotubes and glass microspheres introduced into paint materials in appropriate proportions. The experimental tests covered the basic physical properties of the systems, taking into account their military purpose.

Materials and methods

Samples were prepared from DC01 steel and sanded with P80 grit sandpaper, which is commonly used to prepare the surface of steel substrates before applying paint coatings. Then, the samples were blown off with compressed air and degreased using XPA10006 aggressive remover. The BP450-1000/N epoxy primer was applied to the prepared samples in a dry film thickness of $60 \pm 10 \mu\text{m}$. Then, after 4 hours at room temperature, some of the samples were covered with BW400-6031 masking paint, some with BW400-6031 masking paint modified with carbon nanotubes, and the remaining part with BW400-6031 masking paint modified with glass microspheres. As a result of this application, masking systems were created in three variants:

a) Two-layer coating system (SP1): BP450-1000/N primer and BW400-6031 masking coating.

b) Two-layer coating system (SP2): BP450-1000/N primer, BW400-6031 masking coating, and modification with carbon nanotubes.

c) Two-layer coating system (SP3): BP450-1000/N primer, BW400-6031 masking coating, and modification with glass microspheres.

The application of the primer and masking paints was performed with a conventional gun using the pneumatic method. The samples prepared in this way with the applied coating systems were aged for 21 days under conditions of $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ and relative humidity of $50 \pm 5\%$. After the aging period, the samples were tested for selected properties. The following measurements were taken: thickness, gloss, color, re-emission, hardness, and roughness.

An analysis of the experimental data requires the use of appropriate statistical methods (Pietraszek & Goroshko, 2014; Gądek-Moszczak et al., 2015; Skrzypczak-Pietraszek et al., 2017) as well as taking into account the appropriate material (Radek et al., 2020; Siwiec, Dwornicka & Pacana, 2020) and technological context (Dwornicka et al., 2017; Dudek et al., 2022; Orman et al., 2020). It is also necessary to consider appropriate production procedures, which have their specific operating algorithms (Czerwińska, Dwornicka & Pacana, 2022; Pacana, Siwiec & Dwornicka, 2023) and – last but not least – economic costs (Djokovic et al., 2022; Siwiec, Pacana & Gazda, 2023) and environmental costs (Orman et al., 2022; Orman et al., 2023).

The obtained quantitative measurements were subjected to statistical processing, including the identification of descriptive statistics, comparison of means using the ANOVA method, and additionally, in connection with the assumptions of the ANOVA method, testing for conformity with the normal distribution and testing for equality of variances in measurement groups. In the case of conformity with the normal distribution and equality of variances, ANOVA analysis with the F test and Tukey grouping were used. In the case of the lack of conformity with the normal distribution, ANOVA analysis with the Welch test and Games-Howell grouping were used.

Results

Thickness measurements

Dry film thickness (DFT) measurement refers to the thickness of the coating after it has fully hardened (ISO2808, 2019). The results of dry film thickness measurements presented in this article

were made using the magnetic-inductive method using an Elcometer thickness gauge (model 456T). The thickness of the coating system is measured based on the change in the magnetic field. After the probe of the device is brought close to the surface of the coating, the force necessary to dissipate the magnetic field is measured, which depends on the distance between the probe and the substrate (i.e., depends on the thickness of the coating) (Francis, 2009).

Thickness measurements were performed for each system using 20 replications. The distributions of values for each system were then assessed using the Ryan–Joiner test to check for conformity with the normal distribution. For systems SP1 and SP2, p values > 0.1 were obtained, while for system SP3, the p value was 0.072. In the next step, a test for equality of variances was performed, for which Levene’s test returned a value of $p=0.26$, which means that it is consistent with the assumption of variances’ equality in the compared groups. Since it has been shown to be consistent with a normal distribution and assumption of equal variances, ANOVA and F-test were used to compare the mean thickness values for the individual systems. The results of the ANOVA analysis are shown in Table 1.

Table 1. ANOVA table for thickness comparison

Source	DF	SS	MS	F	p
System	2	1810	905.2	7.07	0.002
Error	57	7300	128.1		
Total	59	9111			

A summary of the means, standard deviations, and confidence intervals is presented in Table 2, while the identification of homogeneous groups using Tukey’s test is presented in Table 3. The obtained results show that although the SP1 and SP3 systems are clearly different in terms of thickness, the SP2 system is statistically indistinguishable from either of them due to a very large scatter of values. Figure 1 shows a comparison of the thickness results supplemented with the shape of the distribution, which is visualized using a box plot.

Table 2. Descriptive statistics for the thickness of the coatings systems

Coating system	N	Thickness means	Std dev.	95% CI
SP1	20	154.09	8.35	(149.03; 159.16)
SP2	20	159.47	12.94	(154.40; 164.54)
SP3	20	167.46	12.13	(162.40; 172.53)

Table 3. Thickness homogeneous groups identified by Tukey’s method at a 95% confidence interval

Coating system	N	Thickness means	Grouping	
SP3	20	167.46	A	
SP2	20	159.47	A	B
SP1	20	154.09		B

The dry film thicknesses of the tested systems were similar. The SP3 system was characterized by the greatest thickness, which resulted from the increased content of solids in the paint material, relating to the presence of the glass microspheres.

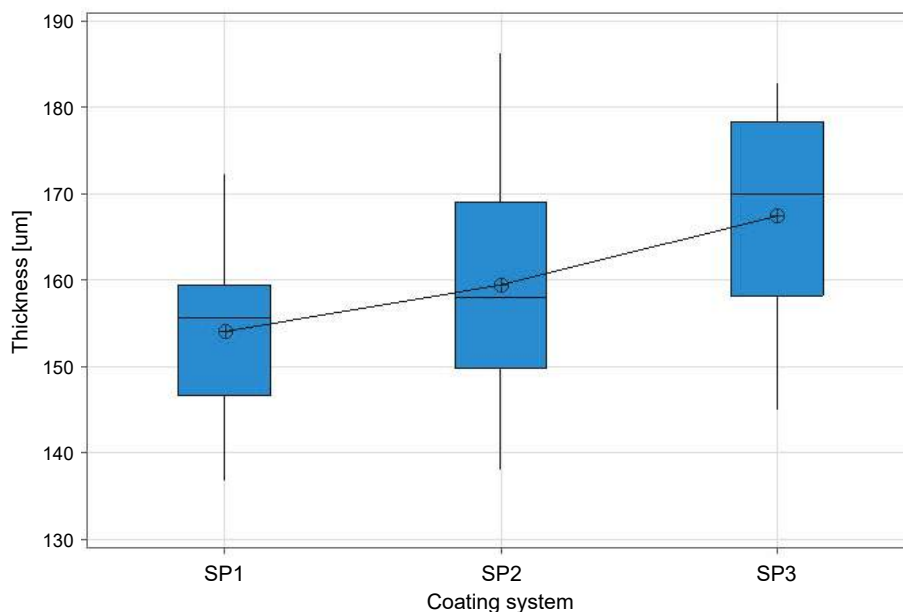


Figure 1. Average thicknesses of the coating systems

Gloss measurements

Gloss can be defined as an optical property of a surface that characterizes its ability to specularly reflect light (ISO4618, 2014). This parameter affects the aesthetic reception of the coating and may be related to the technical functions of the coating and, in the case of masking systems, affects the effectiveness of masking. The gloss value is the ratio of the light flux reflected from the sample to that reflected by a glass surface with a refractive index of 1.567 at a wavelength of 587.6 nm in the specular direction, for a fixed angle of reflection and fixed angles of the light source and receiver apertures (ISO2813, 2019). The gloss value is expressed in gloss units (GU). The measurement consists of the fact that a beam of light incident on the coating undergoes partial specular reflection and partial dispersion, resulting from the surface profile or as a result of penetration of the absorption substrate. Since the gloss value strongly depends on the angle of incidence of the illuminating beam, three standardized measurement geometries are used, as shown in Table 4.

Table 4. Selection of the measurement geometry for the type of coating finish according to ISO 2813

Gloss level	Reading in geometry 60°	Suggested measurement geometry
medium	10–70	60°
high	> 70	20°
low	< 10	85°

Table 5 presents the results of gloss measurements for the tested coating systems. The measurements were taken using a Rhopoint IQ-S glossmeter. The results presented are the average value of 20 measurements.

Table 5. Gloss measurement results of the coating systems

Coating system	Gloss, GU		
	Geometry 85°	Geometry 60°	Geometry 20°
SP1	4.6	2.6	0.5
SP2	3.8	2.1	0.4
SP3	5.3	4.9	0.8

Due to the fact that the tested coating systems have a matte finish, the analysis of the results focused mainly on the measurement angle of 85°. Samples containing the addition of carbon nanotubes showed the highest degree of mattness (3.8 GU). The addition of microspheres caused a slight increase in gloss

(5.3 GU) compared with the standard samples (4.6 GU). SP3 samples are also characterized by higher gloss values (4.9 GU) at the measurement angle of 60° compared with the SP1 and SP2 systems. The gloss of all the tested samples measured in the measurement geometry of 85° obtained results < 8 GU, which is the requirement of the defense standard NO-80-A200 (MON, 2008).

Color measurements

Color perception is a complex process that depends on several elements. These are a light source, an object, and a detector, i.e., the human eye or a professional measuring instrument (Fairchild, 2013). Light is a form of energy that spreads in space in the form of electromagnetic waves. It is part of a broad electromagnetic spectrum that includes various types of radiation, such as radio waves, microwaves, infrared, ultraviolet, X-rays, and gamma rays. However, only a small part of this spectrum is visible to the human eye – this is visible light (Ditchburn, 1952). The same color can be perceived by different observers in a completely different way. This is due to both biological and environmental factors (Ozat, Tuncel & Eroğlu, 2013). All people have different proportions of photosensitive cells (cones and rods) responsible for color perception (Roorda & Williams, 1999). The lighting in which the object is observed also has a huge impact. Colors can look different to an observer in daylight and under artificial lighting. To standardize and simplify processes related to color analysis, color can be expressed using numerical values. This approach allows for a precise description or comparison of two colors, which eliminates the subjective perception of color by the observer. Thanks to this, color consistency can be maintained in the coating production processes. One of the most popular methods for presenting color in a quantitative way is the model developed by the International Commission on Illumination (CIE), i.e., the L^* , a^* , and b^* color space (Figure 2). The aforementioned color space consists of three axes (Gilchrist & Nobbs, 2000):

- L^* is the vertical axis representing brightness. The value 100 indicates a sample of perfect white, while 0 indicates perfect black;
- a^* is the axis perpendicular to L^* , which represents the quality of red-green color. Positive values indicate redness, and negative values indicate greenness;
- b^* is the axis normal to L^* and a^* , representing the quality of yellow-blue color.

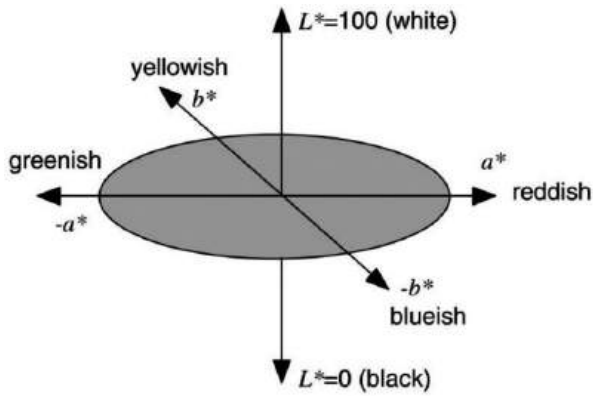


Figure 2. Color space CIELAB (Ohno, 2000)

The CIELAB color space was designed to standardize and simplify the determination of the total color difference between two colors. The total color difference is the distance between two points representing these colors in the color space. The distance expressed as ΔE_{ab}^* is given as follows (Gilchrist & Nobbs, 2000):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

where

$$\Delta L^* = L_1^* - L_0^* \quad (2)$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_0^* \quad (3)$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_0^* \quad (4)$$

The device used to measure color is a spectrophotometer, which measures the reflection (or

Table 6. Color parameters for the tested coating systems

Coating system	Color			Color difference
	L^*	a^*	b^*	ΔE_{ab}^*
SP1	35.41	-5.25	5.01	-
SP2	35.11	-5.49	4.73	0.48
SP3	35.79	-5.68	5.55	0.76

transmission) characteristics of an object at different wavelengths of the visible spectrum. The color measurements of the samples in this work were performed using a Konica Minolta CM-700d spectrophotometer. Table 6 presents the color measurement results of the tested coating systems and the color difference ΔE_{ab}^* of the SP2 and SP3 systems relative to the SP1 system.

The SP1 system, which is the standard system, was chosen as the reference color. The SP2 system containing carbon nanotubes is slightly darker, greener, and bluer. The SP3 coating system containing microspheres was slightly lighter, greener, and more yellow. The color differences are not significant and ΔE_{ab}^* is within the range of 0.48–0.76.

Spectral characteristics

The process of color perception described in the previous section occurs due to the reflection and absorption of visible light (wavelength range from about 380 to 750 nm), i.e., a fragment of the electromagnetic radiation spectrum visible to the human eye (Yalçın et al., 2020). Figure 3 presents the spectral characteristics of SP1, SP2, and SP3 coating systems

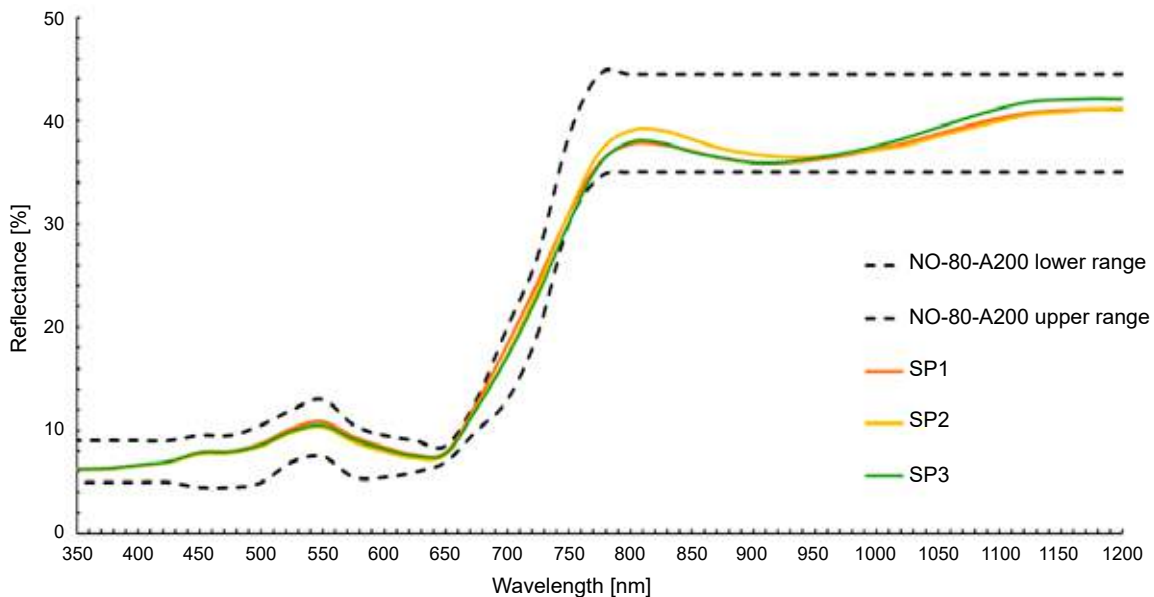


Figure 3. Spectral characteristics of the coating systems

in the wavelength range of 350–1200 nm, determined using a Jasco V770 spectrophotometer with a photometric sphere (Ulbrich sphere), with the possibility of measurements at 8/d geometry with directional reflection turned on, using the white standard as a spectral reference, in the wavelength range from 350 to 1200 nm. Figure 3 shows the lower and upper range of the NO-80-A200 defense standard requirements, marked with a dashed line. All the obtained results meet the requirements of the NO-80-A200 standard regarding re-emission.

Hardness measurements

The hardness of paint coatings directly affects their durability, scratch resistance, and mechanical wear. It is usually defined as resistance to permanent deformation or damage (Špírková et al., 2006). One of the hardness measurement methods is the pendulum damping method, which involves measuring the time needed to damp a pendulum placed in motion resting on the sample surface (ISO1522, 2000). The tests presented in this article were performed on a hardness tester using the König/Persez byko-swing pendulum method (BYK-Gardner GmbH), and a glass plate from the same manufacturer was used as a reference standard.

The Koenig pendulum hardness measurement was performed in triplicate for three different samples in each coating system, resulting in nine measurements for each coating system. The distributions of values for each system were then assessed using the Ryan–Joiner test to check for conformity with the normal distribution. For all systems, p values

> 0.1 were obtained. In the next step, a test for equality of variances was performed, for which Levene’s test returned a p value of 0.28, which means that it is consistent with the assumption of variances’ equality in the compared groups. Since it was shown to be consistent with a normal distribution and assumption of equal variances, ANOVA and F-test were used to compare the mean thickness values for the individual systems. The results of the ANOVA analysis are shown in Table 7.

Table 7. ANOVA table for hardness comparison

Source	DF	SS	MS	F	p
System	2	268.9	134.44	12.24	0.000
Error	24	263.5	10.98		
Total	26	532.4			

A summary of the means, standard deviations, and confidence intervals is presented in Table 8, and the identification of homogeneous groups using Tukey’s test is presented in Table 9. The obtained results show that the SP1 and SP2 coating systems are statistically indistinguishable in terms of hardness, while the SP3 coating system has a significantly lower hardness. Figure 4 shows a comparison of the hardness results supplemented with the shape of the distribution, which is visualized using a box plot.

The SP1 and SP2 systems achieved similar oscillation time results. The smallest oscillation result was obtained by the system modified with nanotubes, indicating that it is characterized by a lower hardness.

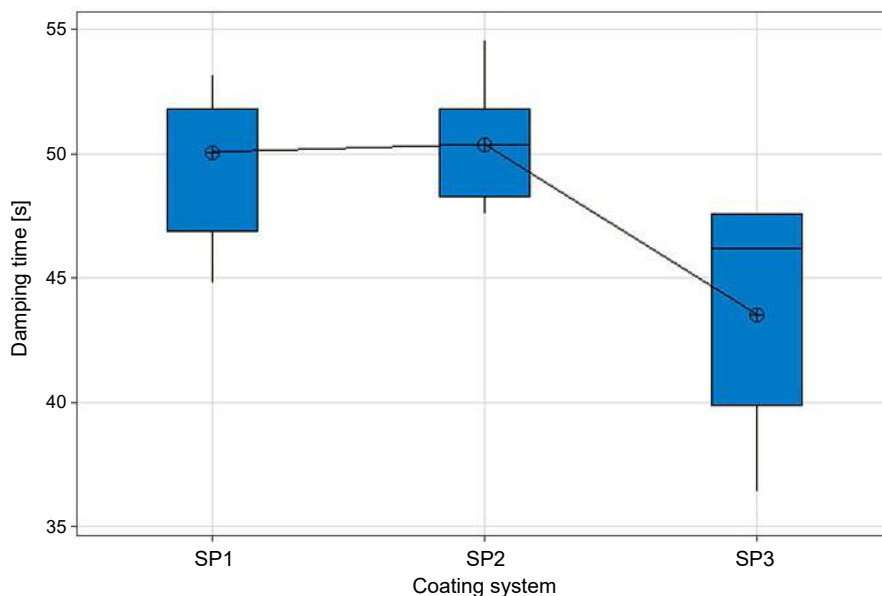


Figure 4. Averaged results of the hardness measurements using the König pendulum damping method

Table 8. Descriptive statistics for hardness of the coatings systems

Coating system	N	Thickness means	Std dev.	95% CI
SP1	9	50.1	3.0	(47.8; 52.4)
SP2	9	50.4	2.2	(48.1; 52.7)
SP3	9	43.6	4.3	(41.3; 45.8)

Table 9. Hardness homogeneous groups identified by Tukey's method at a 95% confidence interval

Coating system	N	Thickness means	Grouping
SP2	9	50.4	A
SP1	9	50.1	A
SP3	9	43.6	B

Surface roughness profile measurements

Roughness is a measure of the irregularity of the surface microstructure; it affects not only the aesthetics of the product but, above all, its functionality. Surface roughness refers to very small irregularities that result not only from the geometry of the object but, above all, from the type of processing and the tool used, and also the type of coating system employed and the method of its application. In industrial practice, roughness control is crucial because it determines how effectively the elements will cooperate with each other and operate in difficult environmental conditions.

The measurement methods utilized, such as contact and optical profilometers, allow for precise determination of parameters such as Ra (the arithmetic mean of the profile ordinate values), Rq (the root mean square deviation), and Rz (the maximum profile height). In assessing surface roughness, standards were used to define the measurement methodology and standards for interpreting results, and basic roughness parameters were assessed, including:

- Ra – the most commonly used parameter in most industrial applications, where the general characteristics of roughness are important.
- Rq – thanks to which we obtain a more precise image when it is crucial to take into account the extremes of the profile.
- Rz – used when it is required to determine the maximum fluctuations of the surface height, which is important in many production processes, such as painting or coating, in which elevations or depressions can affect the quality of the coating adhesion.

The research was carried out based on the EN ISO 21920-2:2021 standard (ISO21920-2, 2021), which

defines surface roughness parameters and methods of their calculation. The MITUTOYO SJ-210 device was used in the research used in this article. Roughness measurements were performed three times for each system; the parameters Ra , Rq , and Rz were then analyzed.

Roughness parameter measurements were performed for each system using three replications. Due to the small number of samples, the normality of the distribution and equality of the variances in groups were not assumed. Therefore, the analysis of variance based on Welch's test was used, while grouping was performed using the Games-Howell test. The results of the analysis of variance (ANOVA) are presented in Table 10, while the grouping results for Ra , Rq , and Rz , together with descriptive statistics, are presented in Tables 11, 12 and 13, respectively. In the case of the Ra and Rq parameters, no statistically significant differences were observed between the coating systems, while in the case of the Rz parameter, a significant difference occurred between the SP1 and SP2 systems, while the SP3 system was statistically indistinguishable from the other two due to a large scatter, which can be visually observed in the interval plots in Figure 5.

Table 10. ANOVA table for roughness

Source	DF Num	DF Den	F	p
Ra	2	2.838	4.62	0.13
Rq	2	2.848	5.67	0.10
Rz	2	3.307	19.80	0.014

Table 11. Descriptive statistics and grouping information for Ra

Coating system	N	Mean	Std Dev	95% CI	Grouping
SP1	3	1.83	0.17	(1.42; 2.24)	A
SP2	3	2.06	0.03	(1.99; 2.13)	A
SP3	3	2.28	0.16	(1.88; 2.68)	A

Table 12. Descriptive statistics and grouping information for Rq

Coating system	N	Mean	Std Dev	95% CI	Grouping
SP1	3	2.25	0.16	(1.85; 2.65)	A
SP2	3	2.57	0.04	(2.49; 2.66)	A
SP3	3	2.763	0.23	(2.21; 3.32)	A

Table 13. Descriptive statistics and grouping information for Rz

Coating system	N	Mean	Std Dev	95% CI	Grouping
SP2	3	12.40	0.42	(11.35; 13.4)	A
SP3	3	11.81	0.99	(9.34; 14.3)	A
SP1	3	10.55	0.22	(10.0; 11.1)	B

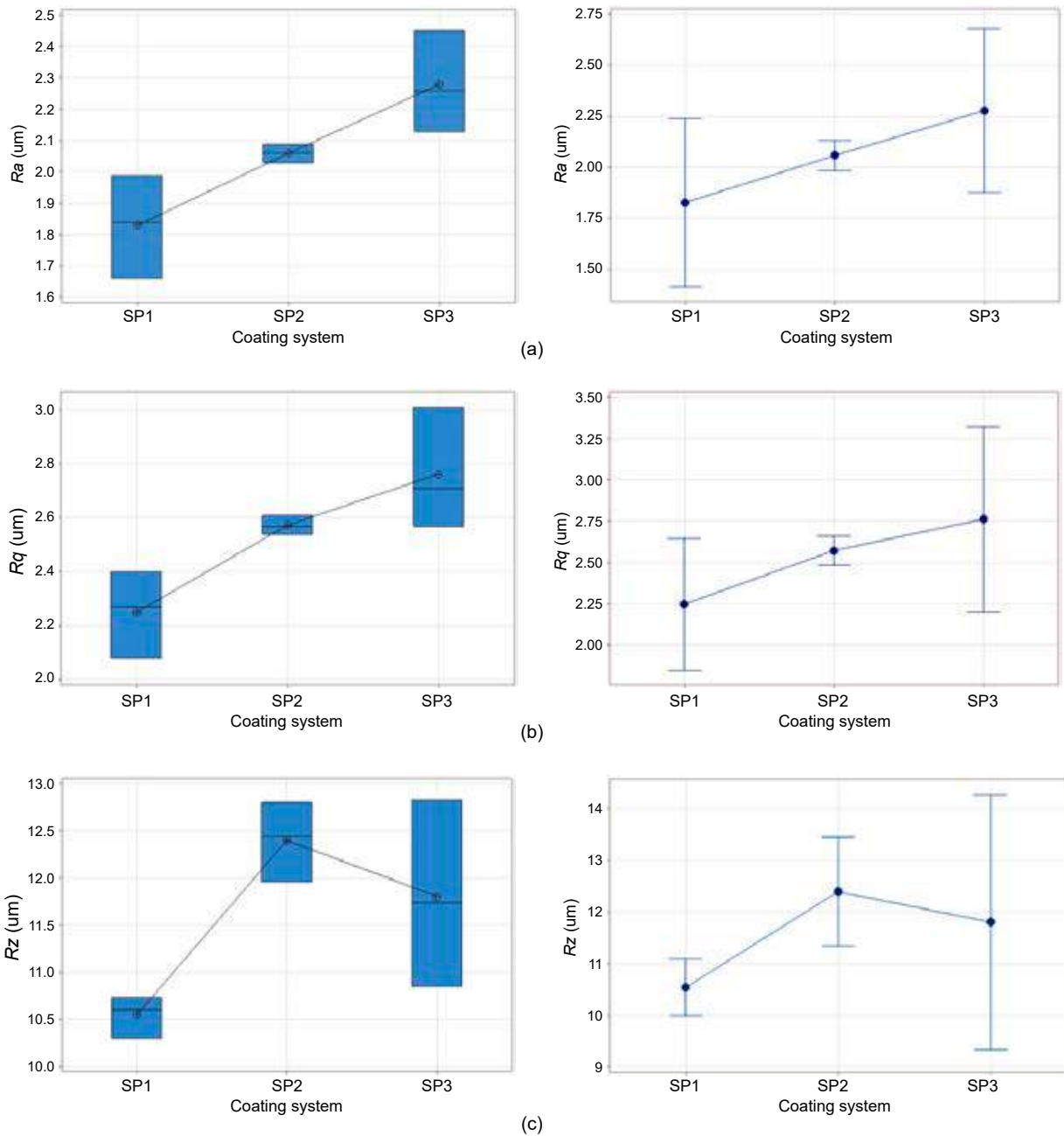


Figure 5. Results of the selected roughness parameters of the painting systems: (a) Ra , (b) Rq , and (c) Rz . The box plot is used for visualizing the distribution shape, and the interval plot is for the ANOVA explanation

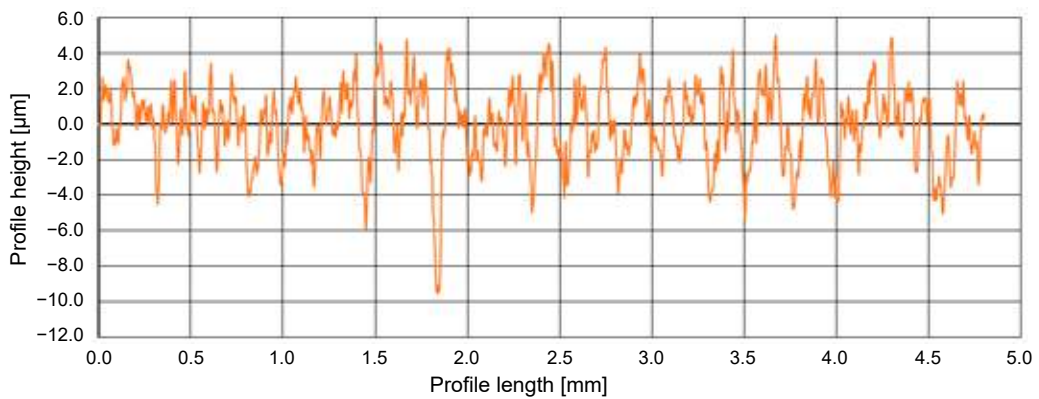


Figure 6. Roughness profile of the SP1 coating system

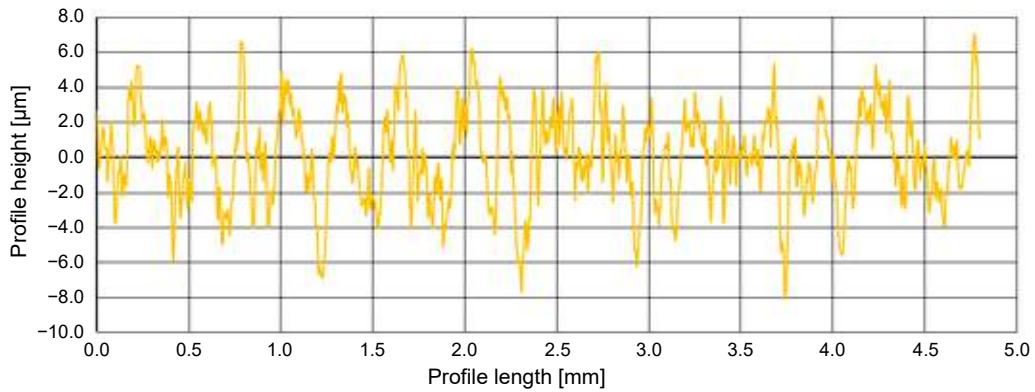


Figure 7. Roughness profile of the SP2 coating system

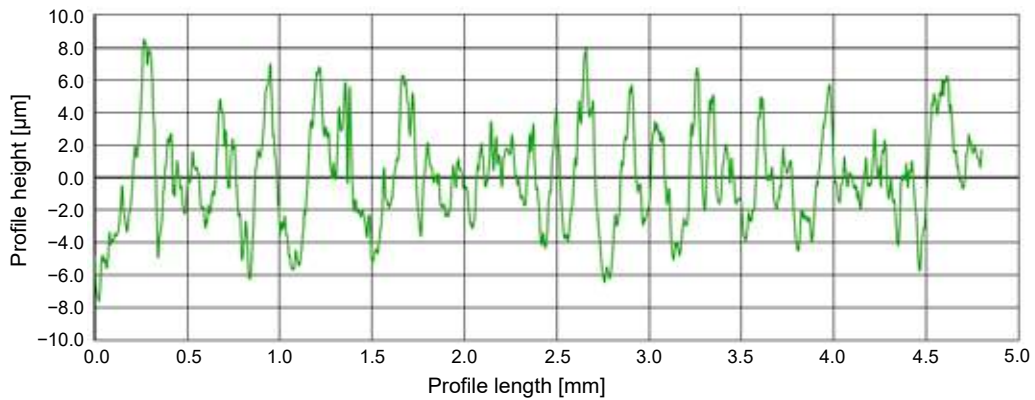


Figure 8. Roughness profile of the SP3 coating system

Figures 6–8 present the illustrated results of the roughness profile measurement for the selected systems. The analysis of the presented data shows that the SP1 system was characterized by the lowest value of the Ra parameter. The SP2 system, modified with carbon nanotubes, had the highest value of the Rz parameter, which indicates more

pronounced unevenness on the surface, especially in the form of elevations and depressions. To present the appearance of the coating, microscopic photographs were taken using a ZEISS Stemi 508 stereoscopic microscope with a magnification of 5. The appearance of the coatings is presented in Figures 9–11.

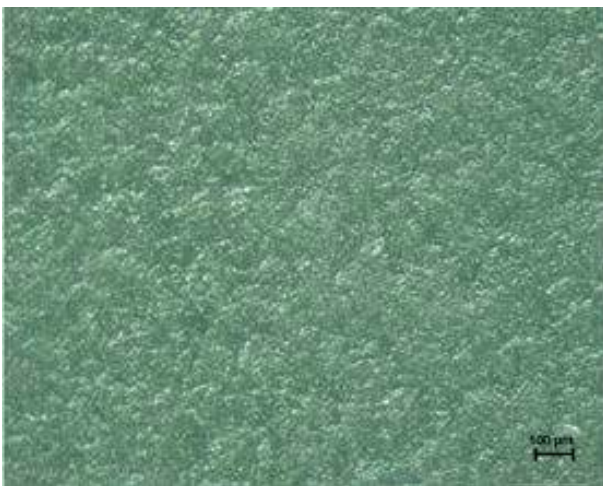


Figure 9. View of the surface of the topcoat of the SP1 masking system



Figure 10. View of the surface of the topcoat of the SP2 masking system

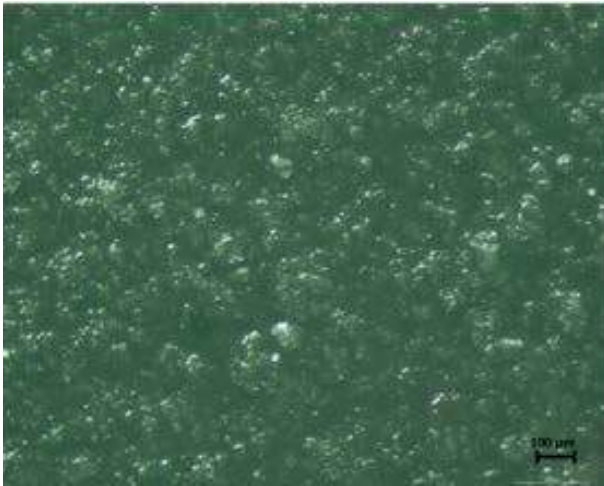


Figure 11. View of the surface of the topcoat of the SP3 masking system

Conclusions

Based on the obtained results, the following was determined:

- The thickness of the coating systems has similar values. The SP3 system containing glass microspheres was characterized by a greater thickness. This is due to the higher content of solids in the paint material before application.
- The gloss of the tested paint systems is at a similar level. The SP3 system containing glass microspheres obtained the highest results in the test at 85° geometry as well as at 60° geometry.
- The color of the masking paint systems is similar. The modified SP2 and SP3 systems differ slightly, obtaining a color difference ΔE_{ab}^* in relation to the SP1 system of 0.48 and 0.76, respectively.
- The re-emission of the SP1, SP2 and SP3 coating systems is within the range of the requirements of the NO-80-A200 standard for the wavelength of 350–1200 nm.
- The hardness of the SP1 and SP3 two-layer coatings is at a similar level of oscillation time, i.e., 50 s, while the SP2 coating modified with carbon nanotubes obtained a lower result of 43.6 s.
- Analyzing the surface roughness through the R_a parameter, it can be seen that each modification increases this parameter. Moreover, the analysis of the R_z parameter revealed greater maximum surface fluctuations relative to the unmodified SP1 masking system.
- Based on the research results, it can be concluded that the SP1, SP2, and SP3 coating systems are suitable for use on military vehicles and equipment.

Acknowledgments

This work was carried out as part of the project of the Ministry of Science and Higher Education “Implementation Doctorate I” (5th edition) No. DWD/5/0043/2021 – entitled “The influence of modifying additives on the operational properties of paint coating systems used in military technology”.

References

1. ÅKERLIND, C., FAGERSTRÖM, J., HALLBERG, T. & KARIIS, H. (2015) Evaluation criteria for spectral design of camouflage. *Proceedings SPIE* 9653, Target and Background Signatures, 965303 (21 October 2015), doi: 10.1117/12.2194828.
2. ANDERSSON, K.E. & ÅKERLIND, C. (2014) A review of materials for spectral design coatings in signature management applications. *Proceedings SPIE* 9253, Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence X; and Optical Materials and Biomaterials in Security and Defence Systems Technology XI, 92530Y, 31 October 2014, doi: 10.1117/12.2067167.
3. AUERBACH, W. (1979) *Leksykon wiedzy wojskowej*. Warszawa: Ministerstwo Obrony Narodowej.
4. CZERWIŃSKA, K., DWORNICKA, R. & PACANA, A. (2022) Improving the quality of castings used in light vehicles. *Proceedings 31st International Conference on Metallurgy and Materials*, 18–19 May 2022, pp. 841–847, doi: 10.37904/metal.2022.4523.
5. DITCHEBURN, R.W. (1952) *Light*. Dover Publications.
6. DJOKOVIC, J., NIKOLIC, R., BUJNAK, J., HADZIMA, B., PASTOREK, F., DWORNICKA, R. & ULEWICZ, R. (2022) Selection of the optimal window type and orientation for the two cities in Serbia and one in Slovakia. *Energies* 15, 323, doi: 10.3390/en15010323.
7. DUDEK, A., LISIECKA, B., RADEK, N., ORMAN, L. & PIETRASZEK, J. (2022) Laser surface alloying of sintered stainless steel. *Materials* 15 (17), 6061, doi: 10.3390/ma15176061.
8. DWORNICKA, R., RADEK, N., KRAWCZYK, M., OSOCHA, P. & POBEDZA, J. (2017) The laser textured surfaces of the silicon carbide analyzed with the bootstrapped tribology model. *Proceedings 26th International Conference on Metallurgy and Materials*, 24–26 May 2017, Brno Czech Republic, EU, pp. 1252–1257.
9. FAIRCHILD, M.D. (2013) *Color Appearance Models*. Wiley.
10. FRANCIS, R.A. (2009) Through thick and thin: some observations on dry film thickness of paint coatings. *Proceedings Corrosion & Prevention* 2009, 15–19 November 2009, Coff's Harbour, Australia, pp. 846–856.
11. GADEK-MOSZCZAK, A., PIETRASZEK, J., JASIEWICZ, B., SIKORSKA, S. & WOJNAR, L. (2015) The bootstrap approach to the comparison of two methods applied to the evaluation of the growth index in the analysis of the digital x-ray image of a bone regenerate. In: Camacho, D., Kim, S.W., Trawiński, B. (eds) *New Trends in Computational Collective Intelligence. Studies in Computational Intelligence* 572, pp. 127–136, doi: 10.1007/978-3-319-10774-5_12.
12. GILCHRIST, A. & NOBBS, J. (2000) Colorimetry, theory. In: Lindon, J., Holmes, J. & Tranter, G. (eds) *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, pp. 337–343, Academic Press.

13. ISO1522 (2000) ISO 1522:2000 – *Paints and varnishes – Determination of the hardness of coatings – Pendulum hardness test*. Geneva: ISO.
14. ISO21920-2 (2021) ISO 21920-2:2021 – *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. Geneva: ISO.
15. ISO2808 (2019) ISO 2808:2019 – *Paints and varnishes – Determination of film thickness*. Geneva: ISO.
16. ISO2813 (2019) ISO 2813:2019 – *Paints and varnishes – Determination of gloss value*. Geneva: ISO.
17. ISO4618 (2014) ISO 4618:2014 – *Paints and varnishes – Terminology for paint and varnish materials and their applications*. Geneva: ISO.
18. KIM, H., CHOI, J., KIM, K.K., WON, P., HONG, S. & KO, S.H. (2021) Biomimetic chameleon soft robot with artificial crypsis and disruptive coloration skin. *Nature Communications* 12 (1), 4658, doi: 10.1038/s41467-021-24916-w.
19. KOTNAROWSKA, D. (2013) *Destrukcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych*. Radom: Wydawnictwo UT-H.
20. MICHALSKI, M., PISAREK, U., RADEK, N., PRZYBYŁ, W. & SZCZEPANIAK, M. (2023) The influence of operational exposure on changes in parameters of effective camouflage of coatings used in military technology. *Advances in Science and Technology – Research Journal* 17 (1), pp. 182–196, doi: 10.12913/22998624/156940.
21. MON (2008) NO-80-A200:2008 – *Powłoki malarskie. Wymagania i badania*. Poland.
22. MON (2010) *Maskowanie wojsk i wojskowej infrastruktury obronnej*. DD/3.20. Warszawa: MON/SG WP.
23. OHNO, Y. (2000) CIE fundamentals for color measurements. *Proceedings International Conference on Digital Printing Technologies* 16, 16–20 October 2000, Vancouver, CA.
24. ORMAN, L., KRAWCZYK, N., RADEK, N., HONUS, S., PIETRASZEK, J., DEBSKA, L., DUDEK, A., KALINOWSKI, A., NOCERA, F. & KURNITSKI, J. (2023) Comparative analysis of indoor environmental quality and self-reported productivity in intelligent and traditional buildings. *Energies* 16, 6663, doi: 10.3390/en16186663.
25. ORMAN, L., RADEK, N., PIETRASZEK, J. & SZCZEPANIAK, M. (2020) Analysis of enhanced pool boiling heat transfer on laser-textured surfaces. *Energies* 13, 2700, doi: 10.3390/en13112700.
26. ORMAN, L., MAJEWSKI, G., RADEK, N. & PIETRASZEK, J. (2022) Analysis of thermal comfort in intelligent and traditional buildings. *Energies* 15, 6522, doi: 10.3390/en15186522.
27. OZAT, P.B., TUNCEL, I. & EROĞLU, E. (2013) Repeatability and reliability of human eye in visual shade selection. *Journal of Oral Rehabilitation* 40 (12), pp. 958–964, doi: 10.1111/joor.12103.
28. PACANA, A., SIWIEC, D. & DWORNICKA, R. (2023) Pro-quality method improving industrial products toward sustainable development with criteria of circular economy. *Proceedings 32nd International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, EU, 17–19 May 2023, pp. 697–702, doi: 10.37904/metal.2023.4743.
29. PIETRASZEK, J. & GOROSHKO, A. (2014) The heuristic approach to the selection of experimental design, model and valid pre-processing transformation of DoE outcome. *Advanced Materials Research* 874, pp. 145–149, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.874.145.
30. RADEK, N. (2009) Determining the operational properties of steel beaters after electro spark deposition. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 4 (44), pp. 10–16.
31. RADEK, N. (2023a) Properties of WC-Co coatings with Al₂O₃ addition. *Production Engineering Archives* 29 (1), pp. 94–100.
32. RADEK, N. (2023b) *Powłoki do zastosowań w technice wojskowej – technologie wytwarzania i właściwości*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
33. RADEK, N., MICHALSKI, M., MAZURCZUK, R., SZCZODROWSKA, B., PLEBANKIEWICZ, I. & SZCZEPANIAK, M. (2023) Operational tests of coating systems in military technology applications. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 25 (1), 12, doi: 10.17531/ein.2023.1.12.
34. RADEK, N., PIETRASZEK, J., GADEK-MOSZCZAK, A., ORMAN, L. & SZCZOTOK, A. (2020) The morphology and mechanical properties of ESD Coatings before and after laser beam machining. *Materials* 13, 2331, doi: 10.3390/ma13102331.
35. ROORDA, A. & WILLIAMS, D.R. (1999) The arrangement of the three cone classes in the living human eye. *Nature* 397 (6719), pp. 520–522.
36. SIWIEC, D., DWORNICKA, R. & PACANA, A. (2020) Improving the process of achieving required microstructure and mechanical properties of 38MnVS6 steel. *Proceedings 29th International Conference on Metallurgy and Materials*, 20–22 May 2020, Brno, Czech Republic, EU, pp. 591–596, doi: 10.37904/metal.2020.3525.
37. SIWIEC, D., PACANA, A. & GAZDA, A. (2023) A new QFD-CE method for considering the concept of sustainable development and circular economy. *Energies* 16, 2474, doi: 10.3390/en16052474.
38. SKRZYPCZAK-PIETRASZEK, E., KWIECIEŃ, I., GOLDYN, A. & PIETRASZEK, J. (2017) HPLC-DAD analysis of arbutin produced from hydroquinone in a biotransformation process in *Origanum majorana* L. shoot culture. *Phytochemistry Letters* 20, pp. 443–448, doi: 10.1016/j.phytol.2017.01.009.
39. SPÍRKOVÁ, M., ŠLOUF, M., BLÁHOVÁ, O., FARKAČOVÁ, T. & BENEŠOVÁ, J. (2006) Submicrometer characterization of surfaces of epoxy-based organic-inorganic nanocomposite coatings. A comparison of AFM study with currently used testing techniques. *Journal of Applied Polymer Science* 102 (6), pp. 5763–5774, doi: 10.1002/app.25218.
40. TALAS, L., BADDELEY, R.J. & CUTHILL, I.C. (2017) Cultural evolution of military camouflage. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 372 (1724), doi: 10.1098/rstb.2016.0351.
41. YALÇIN, R.A., BLANDRE, E., JOULAIN, K. & DRÉVILLON, J. (2020) Colored radiative cooling coatings with nanoparticles. *ACS Photonics* 7 (5), pp. 1312–1322, doi: 10.1021/acsp Photonics.0c00513.

Cite as: Michalski, M., Radek, N. (2025) Physical properties of masking coating systems used in military technology. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, Zeszyty Naukowe Politechniki Morskiej w Szczecinie* 82 (154), 69–79.



© 2025 Author(s). This open access article is licensed under the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Publikacja 8

FUNCTIONAL PROPERTIES OF COATING SYSTEMS FOR WEAPONS AND MILITARY VEHICLES

¹Norbert RADEK, ^{1,2}Marek MICHALSKI, ³Jacek PIETRASZEK, ⁴Marcin SZCZEPANIAK

¹Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering, Kielce, Poland, EU, norrad@tu.kielce.pl

²Firma Handlowa Barwa Jarosław Czajkowski, Kielce, Poland, EU, mmichalski@barwa.kielce.pl

³Cracow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Cracow, Poland, EU, jacek.pietraszek@pk.edu.pl

⁴Military Institute of Engineer Technology, Wrocław, Poland, EU, szczepaniak@witi.wroc.pl

<https://doi.org/10.37904/metal.2025.5137>

Abstract

The evolution of paint coatings is rapid, multidirectional, and most interesting. Progress in the field of polymer coating technology stems from the three most important functions: the decorative function, the protective function, and the informative function. Paint systems account for approximately 50% of all coating systems. About 95% of steel structures are estimated to be safeguarded against corrosion with protective coatings, including as much as 90% – with paint coatings. The service life of paint systems ranges from several months to several years. A special group of paint systems is paint coatings for military applications, mainly for camouflaging weapon systems and military equipment. Paint coatings are fundamentals of camouflage – they camouflage vehicles/objects in the optical range, both visible light (VIS) and the near-infrared (NIR) range. The main task of effective camouflage is to eliminate those features that may cause the object to be differentiated from its surroundings, i.e., those that make it possible to distinguish one's assets from the background, and these may include, for example, color, shape, size, gloss, and texture. The paper analyzes the functional operational properties of two-layer coatings for use in military technology. The properties were evaluated based on microstructure analysis and measurements of surface geometric structure, nanohardness, and adhesion. The tests were carried out for two-layer masking coating systems made in three variants: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2), coating system modified with glass microspheres (SP3). Paint coating systems were applied by pneumatic spraying to DC01 steel samples using SATA guns. Due to their operational properties, the developed coating systems can be used on weapons and military vehicles.

Keywords: Coating system, properties, surface geometric structure, adhesion, nanohardness, weapons and military vehicles

1. INTRODUCTION

The properties of the surface layer affect the service life of machines and devices. The surface fundamentally affects the functional properties of objects and products. This is important both for quality reasons [1,2] and in connection with the durability of protected objects, especially important in terms of the circular economy [3], resulting from, among others, increasingly stringent energy, production [4], and consumption [5,6] limitations. Regardless of this, research related to the surface layer [7] significantly influences the development of technology [8] and materials [9], including socially important biomaterials [10-12]. Several physicochemical phenomena, such as chemical catalysis, corrosion, wear (abrasive, adhesive, abrasive-adhesive, erosive, cavitation, fatigue), adhesion, adsorption (physical and chemical), flotation, depend on and occur on the

surface of the material or with its participation. The operational durability of the surface layer depends on many complex structural, operational, and material factors, which include, among others [13]:

- chemical and phase composition, microstructure, and mechanical properties of the material, state and values of residual stresses, crack resistance, and corrosion resistance.
- conditions and type of operation.
- method and nature of loading.

Currently, there is a dynamic development of coating production processes using various surface engineering technologies. The process of evolution of paint coatings is interesting. It is very fast and multidirectional [14]. The progress in the field of polymer coating technology is caused by three of the most important functions. i.e., decorative [15], protective [16], and information [17]. A special group of paint coatings is paint coating systems for military applications, mainly for masking weapons and military equipment [18].

The paper presents the results of operational tests of paint coating systems developed using carbon nanotubes and glass microspheres. The current research includes analysis of the microstructure and measurements of the geometric structure of the surface, adhesion, and nanohardness.

2. MATERIALS

The specimens with dimensions of 150 mm x 100 mm x 1 mm were made of low-carbon steel DC01. The steel samples were first washed with XPA10006 remover to degrease the surfaces. Then, a grinding operation was performed using a rotary machine and P80 grit sandpaper. The final stage of surface preparation was washing the surface with XPA10006 solvent. Masking coating systems were applied in a Blowtherm spray booth, using SATA guns. Masking coating systems were applied by air spray in three options:

- paint system (SP1): primer coating, masking coating (green),
- paint system (SP2): primer coating, masking coating (green) + carbon nanotube modification (0.02% by weight),
- paint system (SP3): primer coating, masking coating (green) + modification with glass microspheres (2.4% mass share).

3. RESULTS AND DISCUSSION

A microstructure analysis was conducted for masking coating systems using the HITACHI S-3500N scanning electron microscope. The thickness of the obtained masking paint systems for military facilities was from approx. 141 to approx. 157 μm . **Figure 1** shows an example of the SP2 masking system. Analysis of the microstructure of the masking systems confirmed clear boundaries between individual layers, the paint system, and the steel substrate. It was also found that the masking paint systems were free from structural defects. i.e., microcracks and pores.

A scratch test was conducted to test the adhesion of the paint systems without putty. Adhesion tests were conducted using the Revetest Scratch Xpress instrument (CSM Instruments, Switzerland). The measurements were performed at a load increase rate of 11 N/min, a table feed rate of 4.49 mm/min, and a scratch length of 20 mm.

A special Rockwell diamond cone indenter with a corner radius of 200 μm was used to scratch the samples at a gradually increasing normal load. The information about the cracking or peeling of layers was obtained based on the measurements of the material resistance (tangential force) and the registration of acoustic emission signals. The lowest normal force causing a loss of adhesion of the coating to the substrate is called a critical force and is assumed to be the measure of adhesion. The results are presented in **Table 1**.

From the obtained data, it becomes evident that coating systems have good adhesion with the substrate material. The mean value of the critical force calculated from three measurements performed on the individual

masking coating systems was from 41.38 to 46.49 N. In addition, the low scatter of critical stylus loads indicates that the layers are homogeneous and very tight.

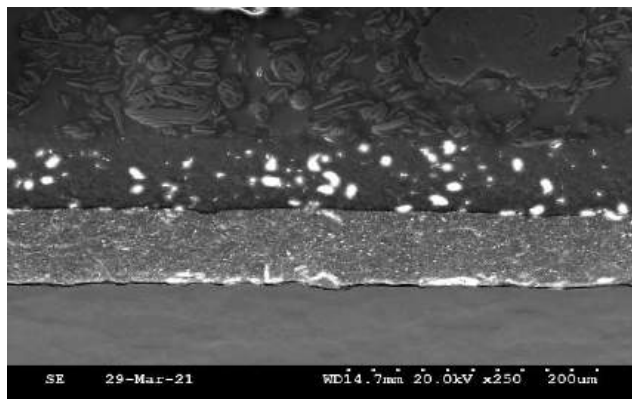


Figure 1 Microstructure of the SP2 masking system

Table 1 Results of scratch adhesion tests

Masking coating systems	Critical stylus load (N)			Mean value [†] (N)
	Measurement			
	1	2	3	
SP1	45.15	38.71	40.27	41.38 ± 3.36
SP2	44.92	45.39	47.35	45.89 ± 1.29
SP3	47.48	46.83	45.16	46.49 ± 1.20

[†]scatter intervals estimated at 90% confidence level

The hardness and elastic modulus were investigated using the nanoindentation technique. This measurement technology was possible due to the development of instruments that continuously measure force and displacement. In the measurement, the load force was 20 mN, and the unload rating was 40 mN/min due to the type of material tested, which used creep for about 5 seconds. The hardness is determined by the penetration depth of the indenter, and the modulus of elasticity is determined by the slope of the unload curve. Hardness measurements were carried out in several selected places on the surface of the paint coating. On the basis of 10 measurements, the values of average hardness and elasticity modulus were determined. **Table 2** contains the average values of hardness and elastic modulus, together with the standard error.

Table 2 Value of hardness and modulus of elasticity with errors

Coating systems/material	Hardness (GPa)	Elastic modulus (GPa)
SP1	0.335 ± 0.003	7.637 ± 0.021
SP2	0.216 ± 0.008	5.394 ± 0.053
SP3	0.302 ± 0.005	5.859 ± 0.037
steel DC01	9.700 ± 0.800	121.00 ± 5.200

The highest nanohardness was found in steel DC01, and it amounted to 9.7 GPa. The Young's modulus was also the highest for low-carbon steel DC01, and its value was at the level of 121 GPa. Analyzing the data included in **Table 2**, it can be concluded that all paint coatings had similar nanohardness values. The nanohardness measured on the surface of the coating systems was in the range of 0.216 GPa to 0.302 GPa. A similar analogy can be observed when analyzing the values of Young's moduli for the tested paint layers (**Table 2**). The highest value of the longitudinal elasticity modulus was found in the SP1 paint system in relation

to the other two coating systems. The Young's modulus measured on the surface of the masking system was 7.637 GPa.

Measurements of surface geometric structure (SGS) were carried out at the Laboratory of Computer Measurements of Geometric Quantities of the Kielce University of Technology. Tests were performed using a Talysurf CCI optical profilometer using the coherent correlation interferometry method, enabling a resolution of 0.01 nm with a z-axis resolution. The measurement result is recorded in a matrix of 1024x1024 measuring points using the x10 lens, giving a measured area of 1.65 mm x 1.65 mm and a horizontal resolution of 1.65 μm x 1.65 μm. Ten measurements were made on samples of coating systems and steel DC01, allowing averaging of the results. The images obtained from surface stereometry and their analysis using the software TalyMap Platinum allowed us to evaluate the geometrical structure of the examined surfaces. **Figure 2** shows a sample isometric roughness of the surface of the steel DC01, while (**Figure 3**) shows the isometric image of the wavy surface of the steel. **Table 3** summarizes the most important SGS parameters of the tested masking coating systems.

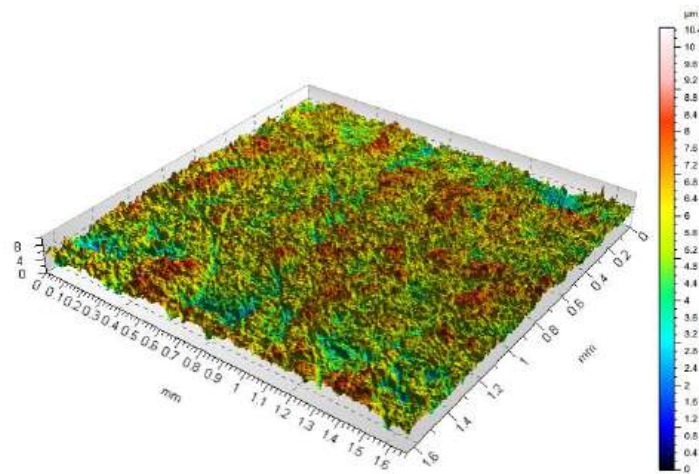


Figure 2 Isometric view of the surface roughness of the steel DC01

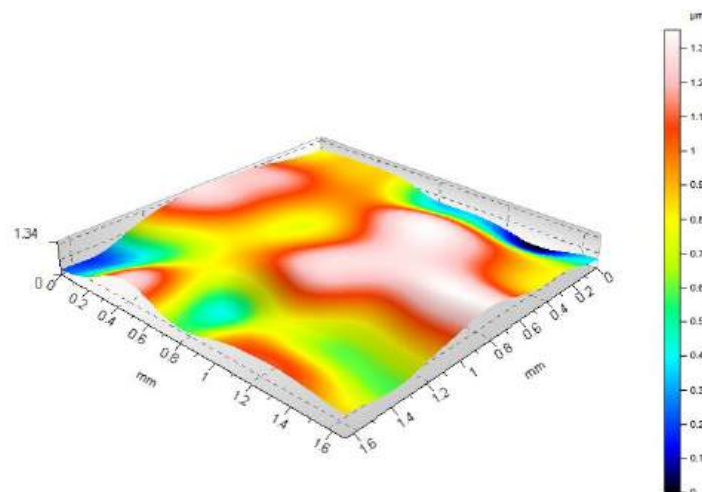


Figure 3 Isometric view of the waviness surface of the steel DC01

The tested coating systems had an average mean arithmetic surface roughness deviation from the average surface area $S_a = 2.272\text{-}3.111 \mu\text{m}$. Samples of steel DC01 sanded with P80 grain sandpaper on which coatings were applied had $S_a = 0.798\text{-}0.883 \mu\text{m}$. Parameter S_a is the basic amplitude parameter for quantifying the state of the surface being analyzed. A similar trend in the measurement of paint coatings and low-carbon

steel was observed for the quadratic surface roughness Sq , which has a strong correlation with the Sa parameter. Additional information on the surface shape of the tested modifications is provided by the amplitude parameters: skewness coefficient Sku and the concentration coefficient Ssk . These parameters are sensitive to the occurrence of local elevations or depressions on the surface, including defects. The obtained kurtosis values close to $Sku = 3$ indicate that the ordinate distribution for all samples is close to the normal distribution. The highest value was obtained for the modification of the masking system with glass microspheres. Analyzing **Table 3**, it results that only the SP3 paint system had a positive value of the surface asymmetry coefficient Ssk (skewness), which indicates that we are dealing with a smooth surface devoid of deep scratches. The coating without modification (SP1) and the coating modified with carbon nanotubes (SP2) had negative Ssk values, which indicated rather a plateau shape of these surfaces in comparison to the coating modified with glass microspheres (SP3). The lowest value of the Ssk parameter was measured for the SP1 coating system.

Table 3 Averaged parameters of the surface geometric structure of coating systems

SGS Parameters	Masking coating systems		
	SP1	SP2	SP3
Sq [μm]	2.841	3.110	3.949
Ssk	-0.217	-0.169	0.393
Sku	3.285	2.954	3.565
Sp [μm]	29.616	18.150	22.781
Sv [μm]	50.238	21.323	30.112
Sz [μm]	79.853	39.473	52.893
Sa [μm]	2.272	2.486	3.111

4. CONCLUSIONS

Based on the study, the following conclusions can be formulated:

- as a result of the microstructure analysis, it was found that the paint systems were free from pores and microcracks,
- the two-layer coatings were characterized by good mechanical properties,
- masking coating systems had higher parameters of the geometric structure of the surface in relation to the substrate material (more than three times),
- the SP3 painting system had a positive value of the surface asymmetry coefficient Ssk , which indicates that we are dealing with a smooth surface without deep scratches.

ACKNOWLEDGEMENTS

Work carried out as part of the project of the Ministry of Science and Higher Education "Implementation Doctorate I" (5th edition) No. DWD/5/0043/2021 - entitled "The influence of modifying additives on the operational properties of paint coating systems used in military technology".

REFERENCES

- [1] KLIMECKA-TATAR, D., INGALDI, M. Digitization of processes in manufacturing SMEs – value stream mapping and OEE analysis. *Procedia Comp. Sci.* 2022, vol.200, pp. 660-668. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.264>
- [2] CZERWIŃSKA, K., PIWOWARCZYK, A. The use of combined quality management instruments to analyze the causes of non-conformities in the castings of the cover of the rail vehicle bearing housing. *Prod. Eng. Arch.* 2022, vol.28, pp.289-294. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.36>

- [3] SIWIEC, D., PACANA, A., GAZDA, A. A New QFD-CE Method for Considering the Concept of Sustainable Development and Circular Economy. *Energies*. 2023, vol.16, art. 2474. <https://doi.org/10.3390/en16052474>
- [4] DWORNICKA, R. The Impact of the Power Plant Unit Start-Up Scheme on the Pollution Load. *Adv. Mater. Res.* 2014, vol.874, pp.63-69. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.874.63>
- [5] OPYDO, M., DUDEK, A., KOBYLECKI, R. Characteristics of solids accumulation on steel samples during co-combustion of biomass and coal in a CFB boiler. *Biomass & Bioenergy*. 2019, vol.120, pp.291-300. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.027>
- [6] DJOKOVIC, J., NIKOLIC, R., BUJNAK, J., HADZIMA, B., PASTOREK, F., DWORNICKA, R., ULEWICZ, R. Selection of the Optimal Window Type and Orientation for the Two Cities in Serbia and One in Slovakia. *Energies*. 2022, vol.15, art. 323. <https://doi.org/10.3390/en15010323>
- [7] KLIMECKA-TATAR, D., BORKOWSKI, S., SYGUT, P. The Kinetics of Ti-1Al-1Mn Alloy Thermal Oxidation And Characteristic of Oxide Layer. *Arch. Metall. Mater.* 2015, vol.60, pp.735-738. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0199>
- [8] SYGUT, P., KLIMECKA-TATAR, D., BORKOWSKI, S. Theoretical analysis of the influence of longitudinal stress changes on band dimensions during continuous rolling process. *Arch. Metall. Mater.* 2016, vol.61, pp.183-188. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0032>
- [9] SIWIEC, D., DWORNICKA, R., PACANA, A. Improving the process of achieving required microstructure and mechanical properties of 38MnVS6 steel. In: *METAL 2020 – 29th Int. Conf. Metall. Mater.* 2020, pp. 91-596. <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3525>
- [10] DUDEK, A., KOLAN, C. Assessments of shrinkage degree in bioceramic sinters HA+ZrO₂. *Solid State Phenom.* 2010, vol.165, pp.25-30. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.165.25>
- [11] DUDEK, A. Investigations of microstructure and properties in bioceramic coatings used in medicine. *Arch. Metall. Mater.* 2011, vol.56, 135-140. <https://doi.org/10.2478/v10172-011-0015-y>
- [12] KLIMECKA-TATAR, D., RADOMSKA, K., PAWLOWSKA, G. Corrosion resistance, roughness and structure of Co₆₄Cr₂₈Mo₅(Fe, Si, Al, Be)₃ and Co₆₃Cr₂₉Mo_{6.5}(C, Si, Fe, Mn)_{1.5} biomedical alloys. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2015, vol.21, 204-210.
- [13] BURAKOWSKI, T., WIERZCHOŃ, T. *Inżynieria powierzchni metali*. Warszawa: WNT, 1995.
- [14] KOTNAROWSKA, D. *Powłoki ochronne*. Radom: Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2010.
- [15] SELVAKUMAR, N., BARSHILIA, H.C., RAJAM, K.S. Effect of substrate roughness on the apparent surface free energy of sputter deposited superhydrophobic polytetra-fluoroethylene coatings: A comparison of experimental data with different theoretical models. *Journal of Applied Physics*. 2010, vol. 108, art. 013505. <https://doi.org/10.1063/1.3456165>
- [16] KOTNAROWSKA D. Analysis of polyurethane top-coat destruction influence on erosion kinetics of polyurethane-epoxy coating system. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2019, vol. 1, 21, pp. 103-114. <https://doi.org/10.17531/ein.2019.1.12>
- [17] MALSHE, V.C., SANGAJ, N. Fluorinated acrylic copolymers Part I: Study of clear coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2005, vol. 53, pp. 207-211. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2005.03.003>
- [18] RADEK, N., MICHALSKI, M., MAZURCZUK, R., SZCZODROWSKA, B., PLEBANKIEWICZ, I., SZCZEPANIAK, M. Operational tests of coating systems in military technology applications. *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2023, vol. 25, art. 12. <https://doi.org/10.17531/ein.2023.1.12>

Publikacja 9

Analiza struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych do zastosowań militarnych

Analysis of the surface geometric structure of camouflage coating systems for military applications

MAREK MICHALSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.10.20>

The paper presents the results of experimental tests of coating systems for military applications. The determination was based on measurements of surface geometric structure. The tests were carried out for two-layer masking coating systems made in three variants: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2), coating system modified with glass microspheres (SP3). Paint coating systems were applied by pneumatic spraying to DC01 steel samples using SATA guns. Due to their properties, painting systems can be used on military equipment and vehicles.

KEYWORDS: camouflage, coatings system, surface geometric structure, military equipment, military vehicles

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych systemów powłokowych do zastosowania w technice wojskowej. Ocenę właściwości oparto na pomiarach struktury geometrycznej powierzchni. Badania przeprowadzono dla dwuwarstwowych maskujących systemów powłokowych wykonanych w trzech wariantach: system powłokowy (SP1), system powłokowy modyfikowany nanorurkami węglowymi (SP2), system powłokowy modyfikowany mikrosferami szklanymi (SP3). Lakiernicze systemy powłokowe nanoszono metodą natrysku pneumatycznego na próbki ze stali DC01 za pomocą pistoletów firmy SATA. Ze względu na swoje właściwości systemy malarskie mogą być stosowane na sprzęcie i pojazdach wojskowych.

SŁOWA KLUCZOWE: maskowanie, system powłokowy, struktura geometryczna powierzchni, sprzęt wojskowy, pojazdy wojskowe

Maskujące systemy powłokowe są wystawiane na różne oddziaływania eksploatacyjne, które mogą powodować utratę ich właściwości ochronnych oraz funkcji specjalnych. Wśród kluczowych czynników wpływających na degradację powłok znajdują się czynniki klimatyczne, takie jak ciepło, promieniowanie ultrafioletowe (UV) oraz wilgoć. Ekspozycja na promieniowanie UV może powodować fotochemiczne reakcje w materiałach powłokowych, prowadząc do ich uszkodzenia, pęknięcia oraz osłabienia struktury. W warunkach wysokiej wilgotności maskujące systemy powłokowe mogą stopniowo tracić przyczepność do podłoża. Powoduje to pęcherzenie, łuszczenie się lub odpryskiwanie farby, co zmniejsza jej skuteczność maskującą i ochronną. Oprócz oddziaływań klimatycznych maskujące systemy powłokowe są narażo-

ne na działanie agresywnych mediów, takich jak olej napędowy, benzyna, smary i płyny eksploatacyjne, zanieczyszczenia przemysłowe oraz substancje do usuwania skażeń stosowane w wojsku. Kontakt z tymi substancjami może prowadzić do reakcji chemicznych na powierzchniach powłok, zmniejszając ich zdolność do maskowania i trwałość eksploatacyjną [1–4].

Struktura geometryczna powierzchni (SGP) odgrywa istotną rolę w wielu procesach zachodzących w warstwie wierzchniej. Należy do głównych czynników determinujących jakość powierzchni, a co za tym idzie również trwałość i funkcjonalność gotowego produktu. Wpływ SGP na właściwości użytkowe materiału jest szczególnie widoczny w kontekście odporności korozyjnej oraz odporności na zarysowanie. Powierzchnia o optymalnie dobranej strukturze może skutecznie minimalizować ryzyko wystąpienia korozji, co jest niezwykle ważne w przypadku materiałów narażonych na działanie agresywnych środowisk. Podobnie struktura geometryczna wpływa na odporność powierzchni na zarysowania. W zależności od jej ukształtowania materiał może wykazywać większą lub mniejszą podatność na uszkodzenia mechaniczne.

Strukturą geometryczną powierzchni określa się zbiór wszystkich nierówności, tj. odchyłek kształtu i położenia, wad powierzchni, falistości i chropowatości powstałych w wyniku procesów nakładania powłoki polimerowej i jej zużycia w trakcie eksploatacji. Składowe SGP to: chropowatość powierzchni, falistość powierzchni i odchyłki kształtu. Podział ten jest oparty na proporcjach wysokości i długości fali nierówności. W celu kompleksowego scharakteryzowania chropowatości powierzchni stosuje się parametry profilu powierzchni: wysokościowe, odległościowe i hybrydowe (Ra , Rc , Rz , Rt , Rp , Rv , Rq , RSm , Rdq) oraz funkcje: krzywą gęstości amplitudowej, krzywą udziału materiału i funkcję gęstości widmowej mocy [5]. W charakterystyce stereometrii powierzchni wykorzystuje się najczęściej parametry: Sa , Sz , Sp , Sv , Sq , Ssk , Sku [6]. Dane dotyczące zasad filtracji wyników pomiarów topografii powierzchni znajdują się w normie PN-EN ISO 25178-3 [7].

Analiza SGP obejmuje trzy etapy: metodę (technikę) pomiaru, przedstawienie powierzchni oraz jej ocenę parametryczną. Problematyce metod pomiarów oraz oceny chropowatości i falistości powierzchni poświęcono wiele publikacji [8–15].

* Mgr inż. Marek Michalski – mmichalski@barwa.kielce.pl – F H Barwa, Kielce, Polska

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych przeznaczonych do zastosowania w technice wojskowej.

Materiały i parametry obróbki

Próbki do badań wykonano ze stali stopowej DC01 o wymiarach: 150 mm × 100 mm × 1 mm.

Powierzchnie próbek stalowych przygotowano w następujący sposób: zmyto zmywaczem XPA10006, przeszlifowano maszynką rotacyjną z papierem ściernym o uziarnieniu P80 i przemyto rozpuszczalnikiem XPA10006. Do nanoszenia systemów malarskich wykorzystano pistolety firmy SATA z dyszami oraz kabine lakierniczą firmy Blowtherm.

Na przygotowane próbki stalowe naniesiono metodą natrysku pneumatycznego maskujące systemy powłokowe w trzech wariantach:

1) system powłokowy dwuwarstwowy (SP1): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031,

2) system powłokowy dwuwarstwowy (SP2): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031 + modyfikacja nanorurkami węglowymi,

3) system powłokowy dwuwarstwowy (SP3): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031 + modyfikacja mikrosferami szklanymi.

Wytworzone systemy powłokowe wygrzano w temperaturze 60°C przez 60 min. Tak wykonane próbki były starzone przez 21 dni w temperaturze pokojowej. Schemat powłoki okazano na rys. 1.

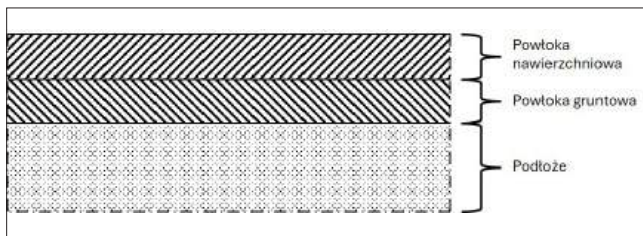


Fig. 1. Scheme of the masking coating system
Rys. 1. Schemat maskującego systemu powłokowego

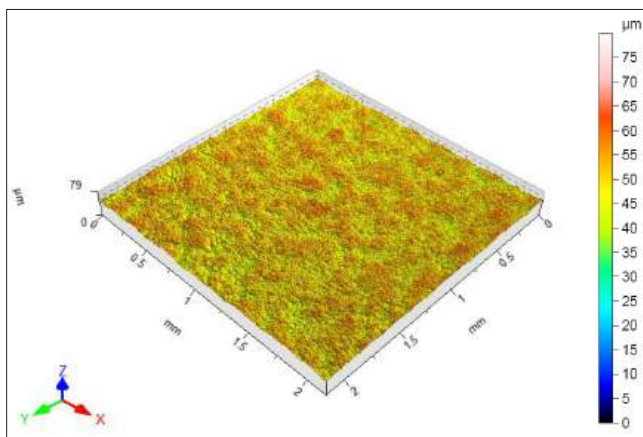


Fig. 2. Isometric image of the S-L surface (roughness) of the SP1 masking coating system
Rys. 2. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) maskującego systemu powłokowego SP1

Omówienie wyników badań

■ Pomiary struktury geometrycznej powierzchni

Pomiary SGP przeprowadzono w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej. Badania wykonano z użyciem przyrządu optycznego Talysurf CCI, wykorzystującego metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej, umożliwiającego pomiar z rozdzielczością w osi z dochodzącą do 10 pm. Wynik pomiarów jest zapisywany w macierzy 1024 × 1024 punktów pomiarowych, co przy zastosowanym obiektywie o powiększeniu ×50 daje zmierzony obszar 0,33 mm × 0,33 mm i rozdzielczość poziomą 0,33 μm × 0,33 μm. Wykonano 10 pomiarów na każdej próbce z systemami powłokowymi.

Analiza otrzymanej stereometrii powierzchni z użyciem oprogramowania TalyMap Platinum pozwoliła na ocenę struktury geometrycznej badanych powierzchni.

Na rys. 2–4 przedstawiono obrazy izometryczne struktury geometrycznej powierzchni S-L (chropowatości) uzyskanej po zastosowaniu filtra Gaussa 0,08 mm × 0,08 mm dla maskujących systemów powłokowych.

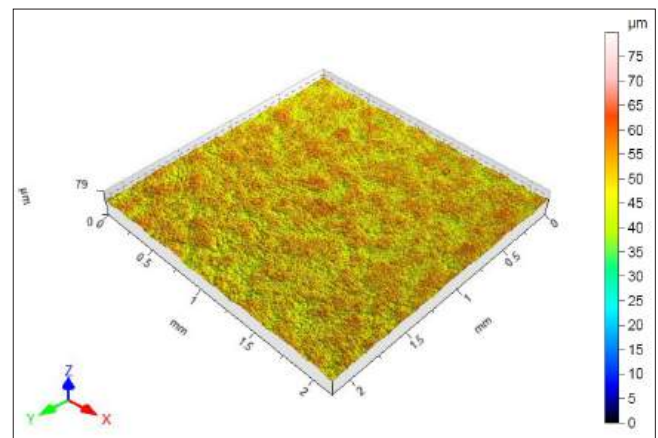


Fig. 3. Isometric image of the S-L surface (roughness) of the modified SP2 masking coating system

Rys. 3. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego SP2

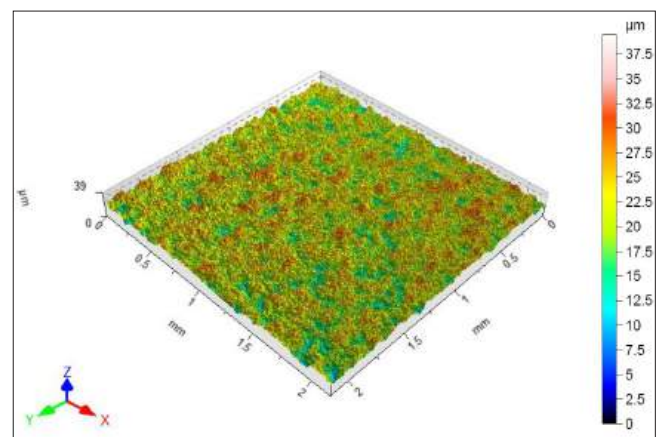


Fig. 4. Isometric image of the S-L surface (roughness) of the modified SP3 masking coating system

Rys. 4. Obraz izometryczny powierzchni S-L (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego SP3

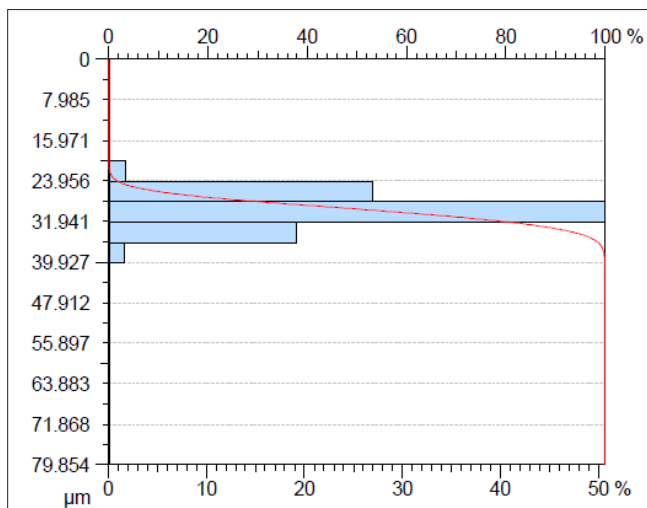


Fig. 5. Distribution of ordinates and load-bearing curve of the *S-L* surface (roughness) of the *SP1* masking coating system
Rys. 5. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni *S-L* (chropowatości) maskującego systemu powłokowego *SP1*

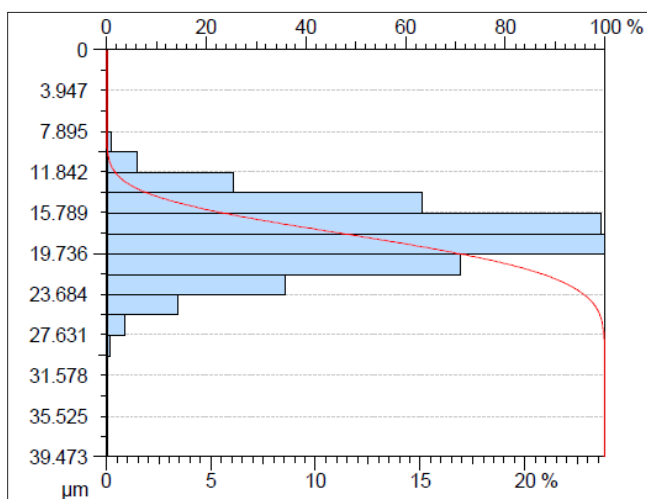


Fig. 6. Distribution of ordinates and load-bearing curve of the *S-L* surface (roughness) of the modified *SP2* masking coating system
Rys. 6. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni *S-L* (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP2*

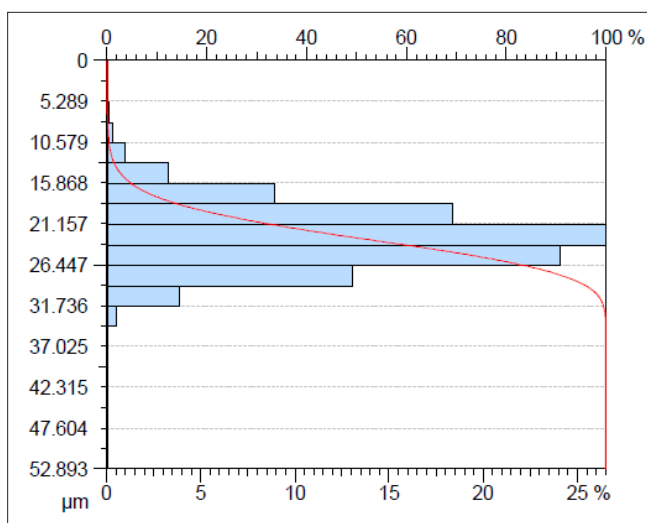


Fig. 7. Distribution of ordinates and load-bearing curve of the *S-L* surface (roughness) of the modified *SP3* masking coating system
Rys. 7. Rozkład rzędnych i krzywa nośności powierzchni *S-L* (chropowatości) zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP3*

Na rys. 5–7 zaprezentowano rozkłady rzędnych z krzywą nośności badanych systemów powłokowych dla powierzchni *S-L* (chropowatości).

Na rys. 8–10 pokazano przykładowe profile chropowatości powierzchni badanych systemów malarskich.

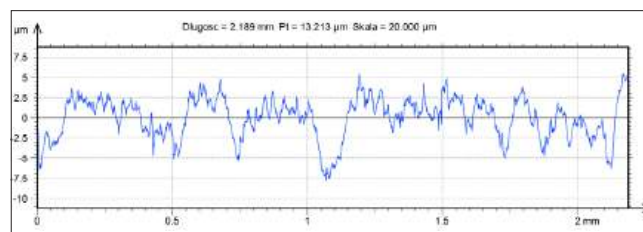


Fig. 8. Roughness profile of the *SP1* masking coating system
Rys. 8. Profil chropowatości maskującego systemu powłokowego *SP1*

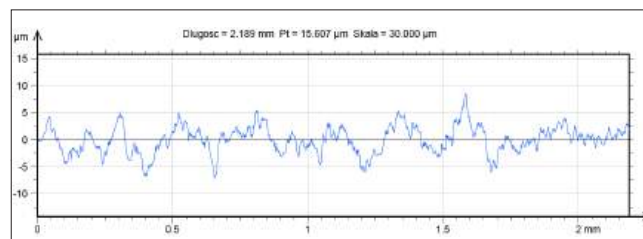


Fig. 9. Roughness profile of the modified *SP2* masking coating system
Rys. 9. Profil chropowatości zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP2*

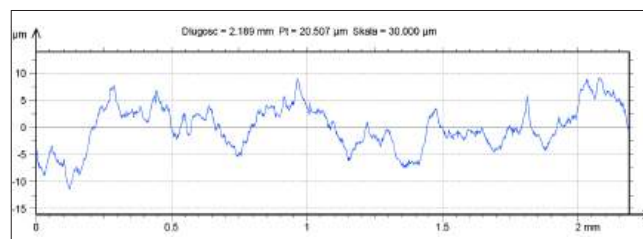


Fig. 10. Roughness profile of the modified *SP3* masking coating system
Rys. 10. Profil chropowatości zmodyfikowanego maskującego systemu powłokowego *SP3*

TABLE I. Average values of parameters of the geometric structure of the *S-L* surface (roughness)
TABLICA I. Uśrednione wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni *S-L* (chropowatości)

Parametry SGP	Maskujący system powłokowy		
	SP1	SP2	SP3
Sq [μm]	2,841	3,110	3,949
Ssk	-0,217	-0,169	0,393
Sku	3,285	2,954	3,565
Sp [μm]	29,616	18,150	22,781
Sv [μm]	50,238	21,323	30,112
Sz [μm]	79,853	39,473	52,893
Sa [μm]	2,272	2,486	3,111

W tabl. I zestawiono najważniejsze uśrednione wartości parametrów SGP dla powierzchni *S-L*.

Badane maskujące systemy powłokowe miały uśrednione wartości średniego arytmetycznego odchylenia chropowatości powierzchni od powierzchni średniej $Sa = 2,3 \div 3,1 \mu\text{m}$. Próbkę ze stali DC01 po szlifowaniu papierem ściernym o uziarnieniu P80, na które

nanoszono powłoki, miały $Sa = 0,8 \pm 0,9 \mu\text{m}$. Sa jest podstawowym parametrem amplitudowym do ilościowej oceny stanu analizowanej powierzchni. Podobną tendencję w wynikach pomiaru maskujących systemów powłokowych i stali DC01 zaobserwowano dla średniokwadratowego odchylenia chropowatości powierzchni Sq , które charakteryzowało się silną korelacją z parametrem Sa . W wyniku naniesienia powłoki nastąpił nieznaczny wzrost chropowatości powierzchni.

Dodatkową informację na temat ukształtowania powierzchni badanych modyfikacji dają parametry amplitudowe: współczynnik skośności Sku oraz współczynnik skupienia Ssk . Parametry te są wrażliwe na występowanie na powierzchni miejscowych wzniesień czy wgłębień, w tym również defektów. Uzyskane wartości kurtozy zbliżone do $Sku = 3$ świadczą o tym, że rozkład rzędnych dla wszystkich próbek jest zbliżony do rozkładu normalnego. Najwyższą wartość uzyskano dla modyfikacji systemu maskującego mikrosferami szklanymi.

Z analizy tabl. I wynika, że tylko system malarski SP3 miał dodatnią wartość współczynnika asymetrii powierzchni Ssk (skośność), co świadczy o tym, że mamy do czynienia z powierzchnią gładką, pozbawioną głębokich rys. Powłoka bez modyfikacji (SP1) oraz powłoka modyfikowana nanorurkami węglowymi (SP2) miały wartości ujemne Ssk , co świadczyło raczej o płaskowyzowym ukształtowaniu tych powierzchni w porównaniu z powłoką modyfikowaną mikrosferami szklanymi (SP3). Najmniejszą wartość parametru Ssk zmierzono dla systemu powłokowego SP1.

Parametry profilu chropowatości zostały obliczone jako wartości średnie ze 102 profili. Maskujące systemy powłokowe charakteryzowały się wartością parametru $Ra = 1,8 \pm 2,3 \mu\text{m}$. Próbkę ze stali DC01 (po szlifowaniu papierem ściernym P80), na które nanoszono powłoki dwuwarstwowe, miały chropowatość $Ra = 0,5 \pm 0,7 \mu\text{m}$.

W tabl. II zestawiono najważniejsze uśrednione parametry profilu chropowatości badanych systemów powłokowych. Z analizy przedstawionych wyników wychodzi, że najniższą wartość parametru Ra uzyskano dla systemu powłokowego SP2, natomiast największą wartość parametru Ra uzyskał system malarski SP3. Również wspomniany lakierniczy system maskujący miał najwyższą wartość parametru Rz .

TABLE II. Average roughness profile parameters
TABLICA II. Uśrednione parametry profilu chropowatości

Parametr	Maskujący system powłokowy		
	SP1	SP2	SP3
Rp [μm]	5,496	5,252	7,487
Rv [μm]	6,766	7,200	5,947
Rz [μm]	12,262	12,452	13,435
Rc [μm]	5,092	8,356	6,006
Rt [μm]	12,262	15,329	13,435
Ra [μm]	2,219	1,761	2,257
Rq [μm]	2,716	2,289	2,693
Rsk	-0,826	-0,408	-0,010
Rku	2,660	3,374	2,563
RSm [μm]	0,100	0,153	0,134
Rdq [$^\circ$]	15,365	15,541	12,986

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- maskujące systemy powłokowe miały większe parametry struktury geometrycznej powierzchni niż materiał podłoża (ponad trzykrotnie),
- najmniejszą wartość parametru chropowatości Ra zmierzono dla lakierniczego systemu SP2,
- uzyskane wartości kurtozy dla powłok dwuwarstwowych były zbliżone do rozkładu normalnego,
- system malarski SP3 miał dodatnią wartość współczynnika asymetrii powierzchni Ssk , co świadczy o tym, że mamy do czynienia z powierzchnią gładką, pozbawioną głębokich rys.

LITERATURA

- [1] Kotnarowska D. „Destrakcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych”. Radom: Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego (2013).
- [2] Pasiecznyński Ł., Radek N., Radziszewska-Wolińska J. “Operational properties of anti-graffiti coating systems for rolling stock”. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 12, 1 (2018): 127–134, <https://doi.org/10.12913/22998624/85705>.
- [3] Radek N., Pasiecznyński Ł., Makrenek M., Dudek A. “Mechanical properties of anti-graffiti coating systems used in the railway industry”. *Materials Research Proceedings*. 5 (2018): 243–247, <https://dx.doi.org/10.21741/9781945291814-43>.
- [4] Michalski M., Pisarek U., Radek N., Przybył W., Szczepaniak M., The influence of operational exposure on changes in parameters of effective camouflage of coatings used in military technology. *Advances in Science and Technology Research Journal* 17 (2023): 182–196, <https://doi.org/10.12913/22998624/156940>.
- [5] PN-ISO 4287:1999/A1:2010 – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa – Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [6] PN-EN ISO 25178-2:2012 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [7] PN-EN ISO 25178-3:2012 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna Część 3: Specyfikacje operatorów.
- [8] Adamczak S., Makieła W. “Analyzing variations in roundness profile parameters during the wavelet decomposition process using the MATLAB environment”. *Metrology and Measurement Systems*. XVIII, 1 (2011): 25–34, <https://doi.org/10.2478/v10178-011-0003-6>.
- [9] Adamczak S., Świdorski J., Dobrowolski T. “Analiza wpływu gęstości próbkowania poziomego na parametry chropowatości”. *Mechanik*. 4 (2017): 332–334, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.52>.
- [10] Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B. “Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry”. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. 65, 1 (2017): 53–61, <https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0007>; ISSN 2300-1917.
- [11] Oczko K., Lubimov V. „Struktura geometryczna powierzchni”. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej (2003).
- [12] Grzesik W. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): 587–593, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2015.8-9.493>.
- [13] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B. “Analiza struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem krzywej udziału materiału”. *Mechanik*. 11 (2016): 1728–1729, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.11.512>.
- [14] Pawlus P. „Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie”. Rzeszów: Oficyna. Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej (2006).
- [15] Stout K.J., Blunt L. “Three-Dimensional Surface Topography”. London: Penton Press (2000). ■

Praca wykonana w ramach projektu MNiSW „Doktorat wdrożeniowy I” (V edycja) Nr DWD/5/0043/2021 – pt. „Wpływ dodatków modyfikujących na właściwości eksploatacyjne lakierniczych systemów powłokowych stosowanych w technice wojskowej”.

Publikacja 10

Analysis of the performance properties of coating systems for military applications

Norbert Radek¹ , Marek Michalski^{1,2}, Janusz Kamiński³,
Marcin Szczepaniak⁴, Stanisław Kowalkowski⁵

¹ Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering, Kielce University of Technology, Al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Poland

² Firma Handlowa Barwa Jarosław Czajkowski, ul. Warkocz 3-5, 25-253 Kielce, Poland

³ Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw University of Technology, Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Poland

⁴ Military Institute of Engineer Technology, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, Poland

⁵ Higher School of Professional Education, Plac Powstańców Śląskich 1/201, 53-329 Wrocław, Poland

* Corresponding author's e-mail: norrad@tu.kielce.pl

ABSTRACT

The article contains an assessment of the physicochemical properties of two-layer masking coatings with the possibility of application in military technology. The fabricated double-layer camouflage coatings have innovative features, in particular, a small thickness in relation to those currently offered by global armaments companies. Masking paint systems were tested for performance properties based on microstructure analysis and measurements of surface roughness, adhesion, hardness, and corrosion and erosion resistance tests. Performance tests were conducted for paint systems manufactured with three options: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2), and coating system modified with glass microspheres (SP3). The microstructure analysis showed that the above-mentioned paint systems are characterized by continuity and homogeneity and are free of pores and microcracks. In addition, the paint masking systems have low roughness parameters, good mechanical properties, and high corrosion resistance. The developed and manufactured two-layer coatings can be successfully applied to armaments and military vehicles.

Keywords: camouflage, coating, microstructure, performance properties, weapons and military vehicles.

INTRODUCTION

Since the appearance of people on Earth, there have been battles between them. They will continue to do so in the present and future as well. Masking is one of the effective methods of achieving an advantage over the opponent, both in offensive and defensive actions [1]. Camouflage, by definition, is a type of security for all combat operations and consists of hiding one's own resources and forces from the enemy's reconnaissance or continuously misleading him about the deployment of his own troops [2]. Masking is a very broad term and, depending on the level of command and scope of tasks, can include three

levels: strategic, operational, or tactical (direct) [3, 4]. In turn, due to the means, forces, or specifications used, concealment, posturing, and disinformation are distinguished [5]. Figure 1 presents the division of camouflage and its types.

Temporary camouflage paint systems are related to direct camouflage, defined as “concealing or changing the appearance of individual or group of objects, devices, equipment, weapons and people using handy camouflage means and materials and standard camouflage means during combat operations” [7]. Among the main tasks of effective camouflage with coatings is correcting the unmasking properties [8], i.e., those that allow distinguishing friendly objects from the terrain

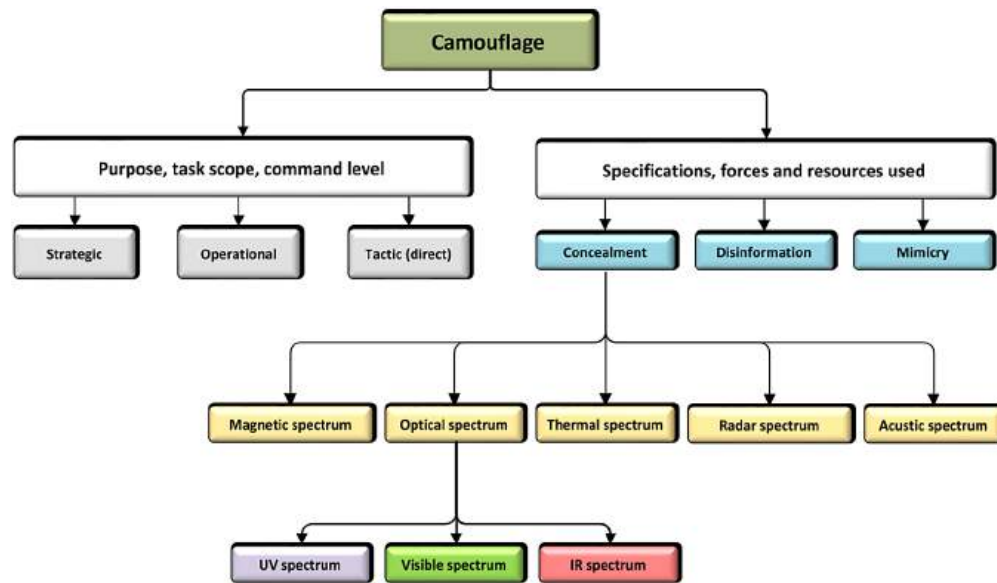


Figure 1. Division of masking and its types [6]

background [9–12] and in the extensive area of electromagnetic radiation: thermal, radiolocation, or optical (UV, visible, IR).

On the modern battlefield, in addition to reconnaissance using the human eye carried out by, for example, reconnaissance units, a number of devices equipped with various sensors are used, including integrated observation heads that may contain, for example, visible light, UV and near-infrared cameras, thermal cameras, multi- and hyperspectral cameras, or radars operating in various bands. As the experience of recent armed conflicts shows (e.g., the war in Ukraine in 2022), the use of consumer UAVs with great success, equipped with sensors used in civilian applications for geodetic or agricultural work, is also becoming common.

At present, there is a rapid development of processes for manufacturing coatings that mainly perform protective and anti-wear functions [13, 14].

It is interesting to note the dynamic progress in the development of paint coatings, which is very fast and multidirectional. Progress in polymer coating technology is due to the following functions: i.e., decorative, protective, and informational. Varnish coating systems account for about 50 percent of paint systems. According to the literature, about 95 percent of all structures made of steel are protected against corrosion by coatings with protective functions, including about 90 percent by paint coatings [15]. It is assumed that the applied coatings perform their operational functions for up to several years.

An important utility property of paint coatings is their low free surface energy, which will make the coatings more resistant to dirt [16, 17].

An important group of coatings are paint coating systems for camouflaging military armaments and vehicles [18, 19]. Lacquer coating systems are the basis of camouflage – hiding military objects in the optical range in both visible VIS light and near-infrared NIR. Effective masking, the main purpose of which is to level the unmasking features, is to not distinguish our own objects from the surrounding terrain to which we can include, for example, texture, color, shape, and gloss [20].

The innovative research attempted to modify green paint, which is commonly used to coat military facilities. The aim of the undertaken activities was to develop formulations and produce camouflage coating systems in the range of spectral characteristics in the range of 350 nm to 1200 nm and color coordinates, as well as provide camouflage in terms of radar recognition.

In the domestic and foreign literature, there is a large gap in scientific work on performance testing of camouflage coating systems for use on military armaments and vehicles.

The work discusses the results of experimental studies of varnish coating systems developed with carbon nanotubes and glass microspheres used in a properly selected coating system. With such a solution, it is possible to achieve camouflage (in terms of optical recognition) in coating systems, which can find application in military technology. The current research refers to

microstructure analysis and measurements of surface roughness, adhesion, hardness, and corrosion and erosion resistance tests.

MATERIALS AND PARAMETERS OF COATING SYSTEM APPLICATION

The specimens with dimensions of $150 \times 100 \times 1$ mm were made of low-carbon steel DC01. The steel samples were first washed with XPA10006 remover to degrease the surfaces. Then, a grinding operation was performed using a rotary machine and P80 grit sandpaper. The final stage of surface preparation was washing the surface with XPA10006 solvent. Masking coating systems were applied in a Blowtherm spray booth and using SATA guns. Masking coating systems were applied by air spray in three options:

- paint system (SP1): primer coating BP450-100/N, masking coating BW400-6031,
- paint system (SP2): primer coating BP450-100/N, masking coating BW400-6031 + carbon nanotube modification (0.02% by weight),
- paint system (SP3): primer coating BP450-100/N, masking coating BW400-6031 + modification with glass microspheres (2.4% mass share).

Masking coating systems were applied according to the scheme shown in Figure 2.

On the basis of our own research, the following parameters for the application of the masking topcoat (green paint) were assumed:

- application technique: pneumatic spray,
- application: two layers,
- surface temperature: 21–23 °C,
- operating pressure: 0.22–0.24 MPa,
- evaporation time between layers: 15 minutes,

- evaporation before baking: 15 minutes,
- annealing temperature: 60 °C,
- annealing time: 60 minutes,
- thickness of dry film: 70–80 μm .

The primer coat was produced according to the paint manufacturer’s technical data. The test was conducted in accordance with the principles of experimental design [21, 22], especially due to the significant contribution of the strongly noising human factor [21, 23]. Statistical analyses included both qualitative [24] and quantitative [25] components.

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

Morphology

Metallographic examination of the tested samples included grinding and polishing processes to obtain a flat surface. The test samples were cut using a precision cutting machine with a diamond disc Isomet Low Speed from Buehler. The test samples were taken from cross-sections. Abrasive papers (SiC) with grain sizes of 500, 800, 1000, 1200, 2000, 4000, and 5000 were used for grinding. A polishing cloth with a $\frac{1}{4}$ μm silicon suspension was used for polishing. A HITACHI S-3500N scanning electron microscope equipped with a NORAN 986B-1SPS EDS X-ray spectrometer was used to study the morphology of the coating systems.

Figures 3a and 3b show the morphology of carbon nanotubes and glass microspheres. Analysis of the microstructure of carbon nanotubes (Fig. 3a) using electron microscopy showed that they are composed of carbon atoms arranged in one plane and forming a hexagonal structure. Detailed

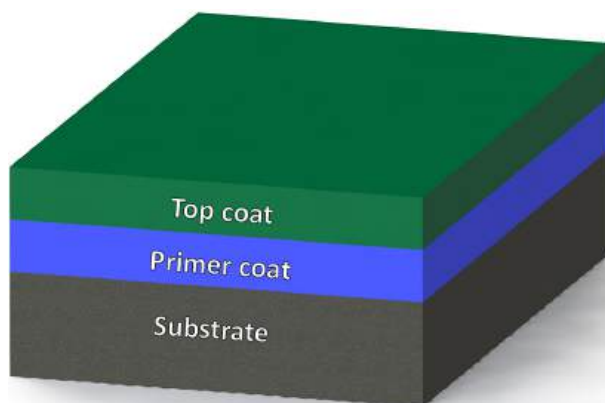


Figure 2. Two-layer coating system

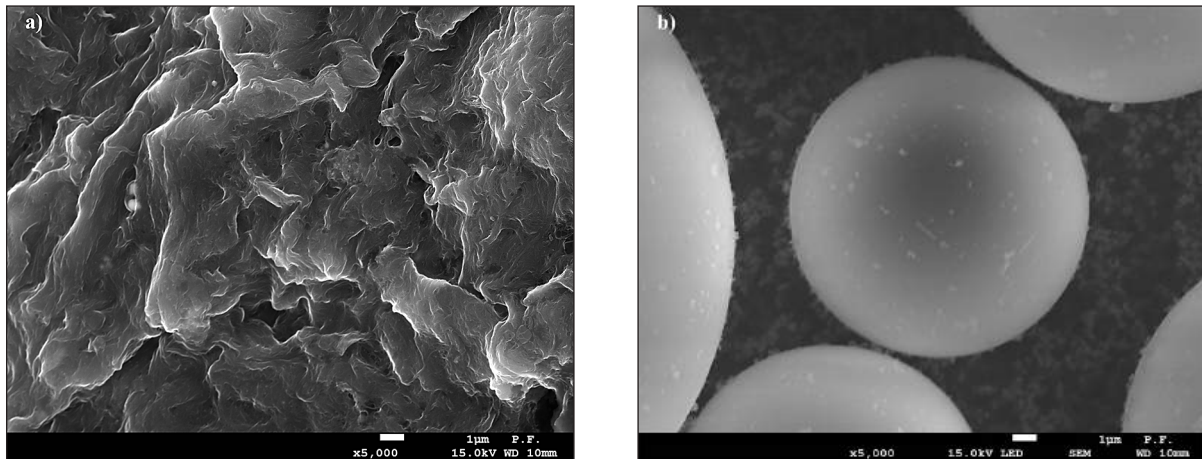


Figure 3. SEM microstructure: a) carbon nanotubes, b) microspheres

SEM studies of microspheres (Fig. 3b) revealed glass, ideal spherical objects with thin walls.

An example of the SEM microstructure of the SP1 coating system is shown in Figure 4. The observations made determined that the minimum thickness of the paint system was about 148 µm. The SP1 coating system had a maximum thickness of about 154 µm. In addition, the primer coating was found to have a thickness in the range of 72–77 µm. Microstructure analysis of the masking system confirmed clear boundaries between the individual layers, the paint system, and the steel substrate (Fig. 4). It was also found that the masking paint system was free of structural defects, i.e., microcracks and pores.

By analyzing the morphology of the remaining SP2 and SP3 coating systems, it was found that the thicknesses of the individual layers included in a given painting system were comparable to the

thicknesses of the layers of the SP1 coating system. The applied masking paint systems for military facilities had thicknesses ranging from about 141 µm to about 157 µm.

Surface roughness measurements

Surface roughness measurements of the coating systems were made using a Talysurf CCI optical instrument. The aforementioned instrument uses the method of coherent correlation interferometry, which gives the possibility of measurement with a z-axis resolution reaching 10 pm. For each paint system, 15 measurements were taken, and the average value was calculated. Roughness profile parameters were calculated as average values from 102 profiles. Masking coating systems for military applications had parameter values of $Ra = 1.8\text{--}2.3\ \mu\text{m}$. Steel samples (after grinding) to

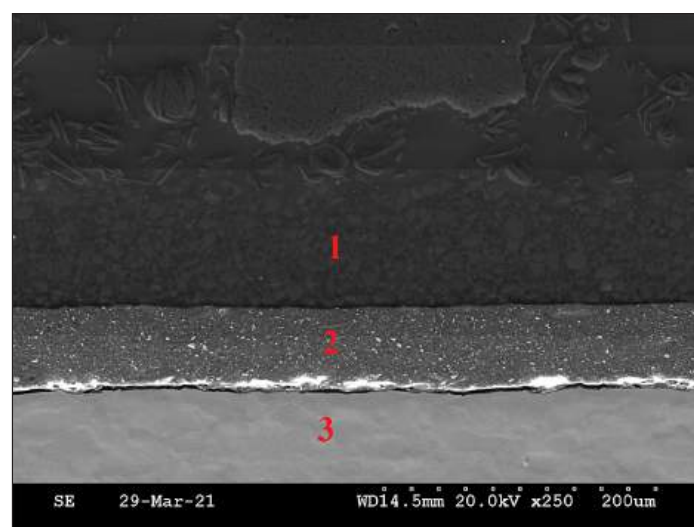


Figure 4. Microstructure of the SP1 masking system: 1– surface layer, 2 – epoxy primer, 3 – steel substrate

which two-layer coatings were applied were characterized by arithmetic mean deviation $Ra = 0.5–0.7 \mu\text{m}$. The averaged parameters of the roughness profile of the studied coating systems are shown in Table 1. The analysis of the results presented (Table 1) shows that the lowest value of the Ra parameter was obtained for the SP2 coating system. The Ra and Rz parameters of the SP3 paint system had the highest values. Figures 5–7 show example surface roughness profiles of the tested paint systems.

Adhesion tests

Measurements of adhesion by scratching were made using a Revetest Xpress Scratch Tester instrument. The test allowed the characterization of

the paint layer/substrate system and the determination of parameters such as friction force and adhesion strength. The characteristics of the scratch tester used are:

- optical observations, friction force, and scratch depth,
- critical load evaluation parameters,
- Rockwell spherical indenter,
- automated microscopic observations.

The measure of adhesion is the value of the critical force, which causes the coating (coating system) to lose adhesion with the substrate.

Two-layer masking coatings SP1, SP2, and SP3 were tested. The parameters of the paint system scratch test were as follows: load growth rate

Table 1. Averaged roughness profile parameters

Parameter	Masking coating system		
	SP1	SP2	SP3
$Rp, \mu\text{m}$	5.496	5.252	7.487
$Rv, \mu\text{m}$	6.766	7.200	5.947
$Rz, \mu\text{m}$	1.262	12.452	13.435
$Rc, \mu\text{m}$	5.092	8.356	6.006
$Rt, \mu\text{m}$	12.262	15.329	13.435
$Ra, \mu\text{m}$	2,219	1.761	2.257
$Rq, \mu\text{m}$	2.716	2.289	2.693
Rsk	-0.826	-0.408	-0.010
Rku	2.660	3.374	2.563
$RSm, \mu\text{m}$	0.100	0.153	0.134
$Rdq, ^\circ$	15.365	15.541	12.986

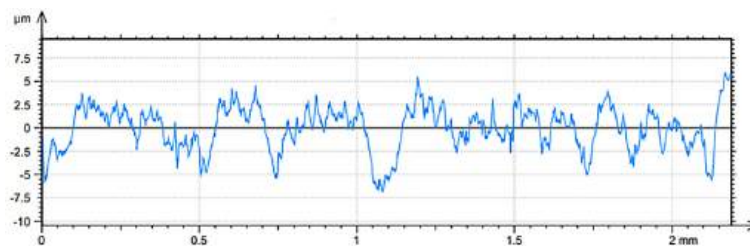


Figure 5. Roughness profile of the SP1 paint system

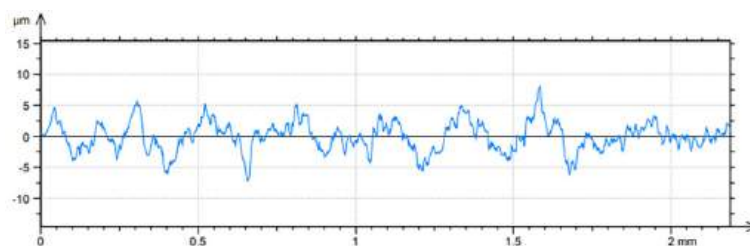


Figure 6. Roughness profile of the SP2 paint system

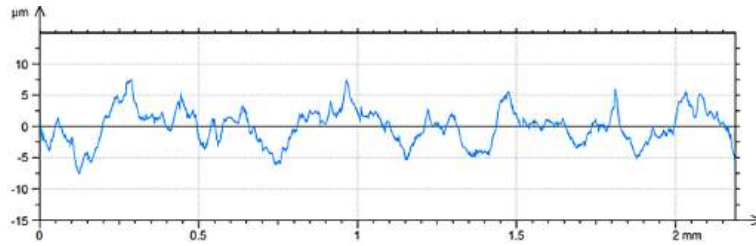


Figure 7. Roughness profile of the SP3 paint system

11 N/min; sample table travel speed 4.49 mm/min; load 50 N; length of scratch 20 mm.

A record of changes in frictional force and microscopic testing (an optical microscope built into an adhesion measuring device) were used to evaluate the value of the critical force. Sample test results are shown in the graph (Figure 8). Meanwhile, Table 2 contains the critical force values from the 5 measurements for a given coating system, as well as their calculated mean values and standard deviation. The obtained results were analyzed by one-way ANOVA. The differentiation of mean values was confirmed (one-way ANOVA, $p = 0.006$) with the assumption of equality of variances (Levene’s test, $p = 0.12$). The mean values of SP1 differ significantly from SP2 and SP3,

while SP2 and SP3 form an indistinguishable homogeneous group (Tukey’s test, SP1-SP2 $p = 0.02$, SP1-SP3 $p = 0.01$, SP2-SP3 $p = 0.90$).

Analyzing the data in Table 2, it was found that the paint systems had good adhesion with the steel substrate. Calculated from three measurements, the average critical force value for each paint system ranged from 41.38 to 46.49 N. It was found that the paint coating systems were characterized by high homogeneity and tightness due to the low dispersion of critical loads.

The highest adhesion to the substrate was demonstrated by the SP3 coating system. The calculated average value of the critical force of the aforementioned paint system was 46.49 N. In contrast, the SP1 coating system had the lowest

Table 2. Adhesion measurement results

Coating system	Critical force, N					Average value and standard deviation, N
	Replication					
	1	2	3	4	5	
SP1	45.15	38.71	40.27	39.36	43.39	41.38±3.36
SP2	44.92	45.39	47.35	44.73	47.05	45.89±1.29
SP3	47.48	46.83	45.16	45.29	47.69	46.49±1.20

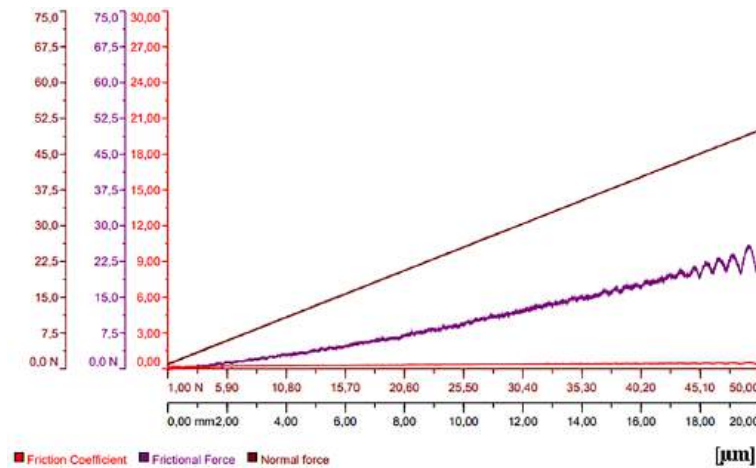


Figure 8. Adhesion measurement record for SP2 coating system

adhesion, with an average critical force value of 41.38 N, 11% lower than that of the SP3 system. For a more accurate determination of the critical forces that cause the loss of adhesion of the coating to the substrate, microscopic methods should be used, which will allow more conclusive results.

There is no information in the world or domestic literature on adhesion testing of masking coating systems using the scratch method. The obtained measurement data will undoubtedly be a valuable source of information for people dealing with the topic of masking coatings used in military technology. The issues related to adhesion measurements using the scratch method are discussed in research works [26].

Adhesion tests of the masking systems carried out showed very similar behavior of the paint coatings and, at the same time, little effect of the thickness of the tested paint systems on the values of critical forces. An example of a Hirox KH-8700 light microscope (LM) image of the topcoat of the SP2 coating system under test after adhesion testing is shown in Figure 9. Hardness measurement by pendulum damping method

The hardness measurement was performed in accordance with PN-EN ISO 1522. In the study, the damping time of the pendulum is measured. The legs of the pendulum are placed on the surface of the sample. The Koenig pendulum was used for the measurements. During the measurement, the number of oscillations during the damping time of the

pendulum was counted from the level of deflection of 6° to 3° from the vertical. A photocell was used to count the oscillations. The number of oscillations was converted to the damping time of the pendulum. In a properly calibrated device using the Koenig pendulum, one oscillation corresponds to 1.4 seconds. Three measurements were made on each sample to average the hardness results obtained according to the thickness of the coating system. The principle of the measurement was to change the friction surface between the coating under test and the pendulum legs, which translates into the damping time of the pendulum. Coatings with lower hardness more easily yield to the weight of the pendulum, whose legs penetrate the coating more deeply, resulting in an increase in friction surface area.

The hardness measurement results using the Koenig pendulum damping method are presented in Table 3. The obtained results were analyzed by one-way ANOVA. The differentiation of mean values was confirmed (one-way ANOVA, $p = 0.006$) with the assumption of equality of variances (Levene's test, $p = 0.15$). The mean values of SP3 differ significantly from SP1 and SP2, while SP1 and SP2 form an indistinguishable homogeneous group (Tukey's test, SP1-SP2 $p = 1.00$, SP1-SP3 $p = 0.01$, SP2-SP3 $p = 0.01$).

The SP3 coating system was characterized by the lowest pendulum damping value (61 s) compared to the SP1 and SP2 painting systems, which had the longest pendulum damping time (70 s).

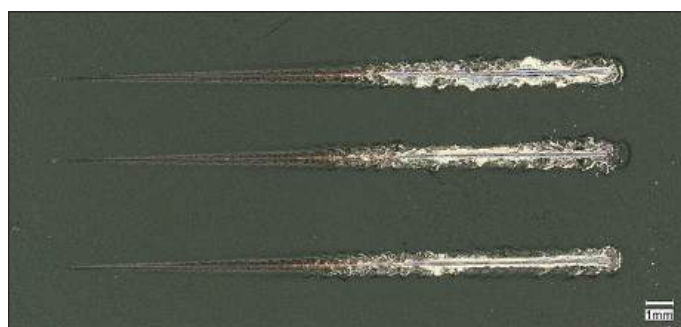


Figure 9. LM image of SP1 coating system after scratch test

Table 3. Hardness measurement results – Koenig pendulum

Coating system	Mean damping time of the Koenig pendulum, s					Average value and standard deviation, N
	Replication					
	1	2	3	4	5	
SP1	73	67	71	67	73	70±3
SP2	69	69	73	68	72	70±2
SP3	54	63	66	54	67	61±6

Tests of resistance to erosion wear

The erosive wear process is a very unfavorable phenomenon that causes the degradation of machine elements in a way that is difficult to predict at the design stage. The process of impact erosion occurs due to the impact of fine particles of abrasive material against the surface of a structural element. The medium in which the particles move can be air or liquid. The intensity of the erosive wear process is influenced by many factors, such as size, hardness, shape of the abrasive material, pressure, speed, temperature of the mixture, and the angle at which the abrasive material hits the eroding element.

Erosion also stimulates gradual abrasion (scratching) of the coating until it is completely removed. Cyclically repeated impacts of hard particles cause fatigue chipping of coating fragments [27]. Destruction of coatings by particles, in the form of scratches and coating defects, intensifies the

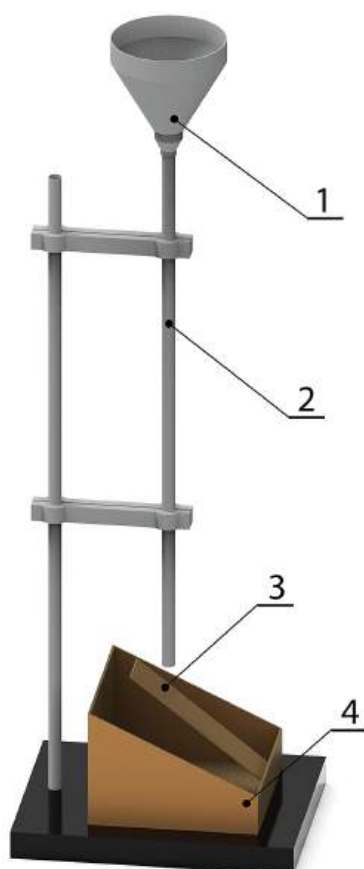


Figure 10. Schematic diagram of the device for testing the erosion resistance of polymer coatings: 1 – hopper, 2 – pipe transporting the abrasive material, 3 – holder for mounting the sample, 4 – container for receiving the abrasive material

corrosive wear of the coating under the impact of aggressive media. The development of subcoating corrosion of the metal substrate results in blistering of the coating and loss of its adhesion [28]. In the study of the erosion wear process of varnish masking systems, the device (Fig. 10) recommended in PN-C-81516:1976 was used. The method consisted of rubbing an elliptical hole in the tested paint coating using a stream of abrasive material. Erosive wear measurements were performed on coating systems SP1, SP2, SP3. Three measurement tests were performed for each paint system, and then the average value of erosive wear was calculated.

The abrasiveness of the tested sample was determined by the ratio of the mass of the abrasive material used to rub the paint coating onto the substrate, expressed in kg, to the average thickness of the tested coating, expressed in μm . During the test, the abrasive material was poured into the hopper, from where it was transported through a pipe set in a vertical position, and by gravity, it fell onto the sample at an angle of 45° . The abrasive material was poured in portions weighing 3.5 kg. The abrasive material used was noble electrocorundum 99A with a grain size of 0.5–0.6 mm. The test was carried out until an elliptical hole in the coating was rubbed through, the larger diameter of which should be 3.6–3.7 mm. After every 10 pourings of the abrasive material, its mass was replenished to the initial 3.5 kg. However, after each hundredth pouring of the abrasive material, the whole was replaced, and the test was continued using 3.5 kg of new corundum. Figure 11 shows a comparison of the erosion resistance of the tested paint systems. The result of erosion resistance was the number of kilograms of erosion material (in this case, electrocorundum) to reduce the thickness of the coating system by one micrometer, expressed by the equation:

$$E = \frac{K}{T} \quad (1)$$

where: E – erosion resistance [$\text{kg}/\mu\text{m}$], K – mass of the abrasive material used for measurement [kg], T – average thickness of the tested coating system [μm].

Paint coating systems (SP1, SP2, SP3) did not differ significantly in terms of erosion resistance, and the results were within the range of 0.77–0.84 $\text{kg}/\mu\text{m}$. The highest erosion resistance was characteristic of the SP1 system (0.84 $\text{kg}/\mu\text{m}$), while the lowest was characteristic of the

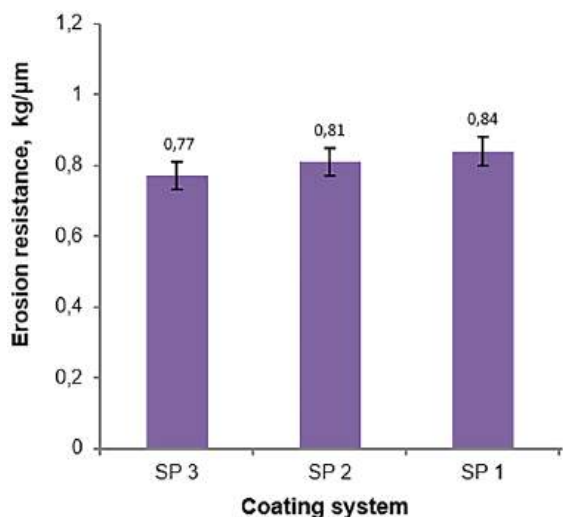


Figure 11. Comparison of erosion resistance of masking coating systems

SP3 system (0.77 kg/μm). The erosion resistance result of the paint systems was most influenced by the applied masking coatings. In practice, the aim is to increase the erosion resistance of the masking coating (while maintaining its good flexibility), which will come into contact with abrasive material (pebbles, sand, etc.) during operation. The destruction of the topcoat layer and then the priming layer will result in a loss of protection against aggressive environmental factors, which may lead to, for example, an accelerated corrosion process. It should be remembered that the intensity of wear of paint coatings increases under the impact of an aggressive environment in the form of brine or acid rain [29].

Corrosion resistance tests

The corrosion resistance tests of paint masking systems were performed using the potentiodynamic method (linear sweep voltammetry – LSV) and the impedance spectroscopy method (electrochemical impedance spectroscopy – EIS) using the AutoLab PGSTAT 100 potentiostat. The electrochemical tests LSV and EIS were performed using a Faraday cage. For the tests, the acid rain solution was used, which was prepared based on the work [30]. Corrosion resistance tests were performed at 21 ± 1 °C.

The tests were performed on samples measuring $80 \times 20 \times 1$ mm on which masking coating systems were applied. Additionally, a blind hole of $\varnothing 1$ mm in diameter and 0.5 mm deep was drilled in the center of each sample. The purpose

of this operation was to penetrate the substrate material in order to speed up corrosion tests.

Potentiodynamic polarization curves were used to designate the corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current density (j_{corr}). The extrapolation of Tafel lines is one of the most popular DC techniques for estimating the corrosion rate. The extrapolation of anodic and/or cathodic Tafel lines for charge transfer controlled reaction gives the E_{corr} and j_{corr} , at the corrosion potential. According to the Tafel's law [31]:

$$E - E_{0,c} = b_c \log (j_c/j_0) \quad (2)$$

is the linear cathodic branch of the polarization curve and:

$$E - E_{0,a} = b_a \log (j_a/j_0) \quad (3)$$

is the linear anodic branch of the polarization curve. In Equations 2 and 3 $E_{0,c}$, $E_{0,a}$, j_0 , b_c , and b_a are constant parameters characterizing polarization curves.

During potentiodynamic testing, cathodic and anodic polarization curves were made by polarizing the samples at a potential change rate of 0.2 mV/s. Samples with an isolated area of 10 mm in diameter were polarized to a potential of 500 mV. The obtained polarization curves of the tested materials are shown in Figure 12.

The shape of the potentiodynamic curve (Fig. 12) indicates uniform corrosion of the tested low-carbon steel in all analyzed cases. The obtained result is caused by the chemical composition of the DC01 steel as well as the acidic pH of the solution (pH4). Both of these factors cause the tested steel to be in an active state, according to the Pourbaix diagram. The cathodic processes, in this case, are the dominant process of oxygen reduction and hydrogen production. The presence of hydrogen gas can cause, in the damage zone, disruptions in the continuity of the tested paint coatings.

Analysis of the graph (Fig. 12) shows that the polarization curves of the masking coating systems are located below the polarization curve of steel. They are characterized by a higher corrosion potential and a significantly lower corrosion current compared to the substrate material. Both of these factors indicate a significant enhancement in the corrosion resistance of varnish systems compared to the starting material. Table 4 summarizes the main electrochemical parameters of the tested materials. The assessment of corrosion resistance of the tested coating systems carried out based on the results of classical electrochemical tests

showed comparable values of corrosion potential of $-0.655\text{ V} \div -0.645\text{ V}$ for the tested coating systems. In comparison, DC01 steel was characterized by a corrosion potential value of -0.680 V . The obtained E_{corr} value indicates when the corrosion processes will start on the tested steel substrate. The lower the potential, the greater the material's tendency to corrosion.

The j_{corr} analysis indicates that the highest resistance of corrosion was possessed by the SP2 coating system, whose corrosion current density was $1.37\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$, and that of the substrate material $9.82\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$. The above-mentioned paint system increased the corrosion resistance by more than six times compared to the starting material (DC01 steel). The remaining coating systems were also characterized by low corrosion current densities and clearly indicated an increase in corrosion resistance in relation to the steel.

Impedance studies (EIS) were conducted in a three-electrode system in the frequency range of $10^5\text{--}10^{-3}\text{ Hz}$, with a sinusoidal signal amplitude of 20 mV , and an open circuit potential. Impedance spectra were analyzed using the EQUIVCRT Baukampa program. The selection of an electrical

equivalent circuit for the obtained impedance spectra was determined by both the image of corrosion damage and the smallest errors in matching the system elements (determined by the least squares method). The obtained spectra were presented in the form of Nyquist plots (Figures 13–16).

Analyzing the graphs (Figures 13–15), we can observe, in addition to the typical capacitive loop, the presence of an inductive loop. The occurrence of an inductive loop in EIS tests can be caused by several processes, including active and intensive dissolution of the substrate (accelerated anodic processes), adsorption processes of corrosion products, hydrogen release, and pitting corrosion. In the cases analyzed (on the basis of corrosion damage), it can be assumed that there is intensive substrate dilution within the damaged coating. The electrochemical values of the capacitive loop do not depend on the type of coating.

In the case of the substrate material (Fig. 16), due to significant differences in the size of the active surface compared to the analyzed coating systems, the resistance values of DC01 steel are much smaller. On the other hand, the shape of the Nyquist plot is similar to the spectra observed in

Table 4. The main electrochemical parameters

Materials	E_{corr} , mV	j_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$-b_c$, mV/dec	b_a , mV/dec
steel DC01	-680	9.82	573	105
SP1	-650	1.67	1543	154
SP2	-645	1.37	1223	95
SP3	-655	1.41	1851	124

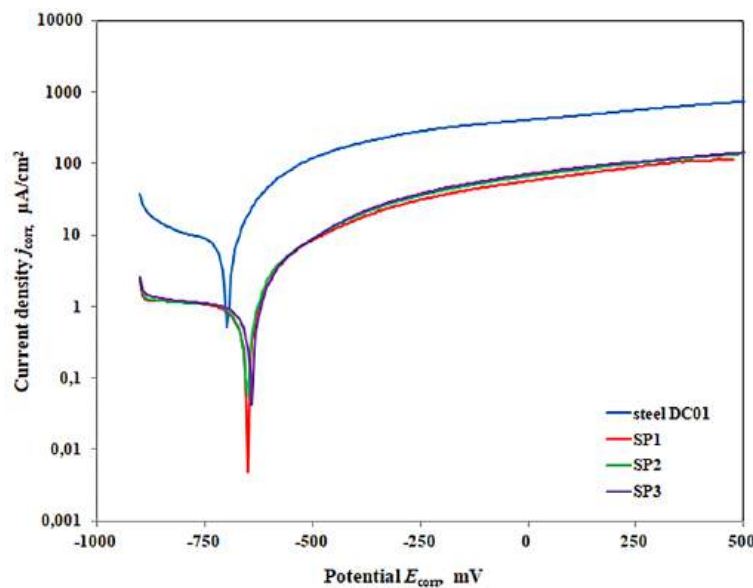


Figure 12. Polarization curves of the tested samples

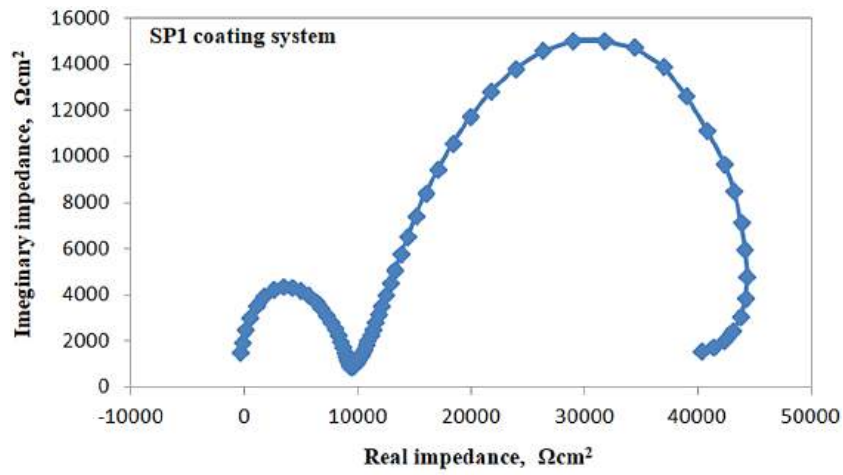


Figure 13. Nyquist impedance spectrum for the SP1 coating system

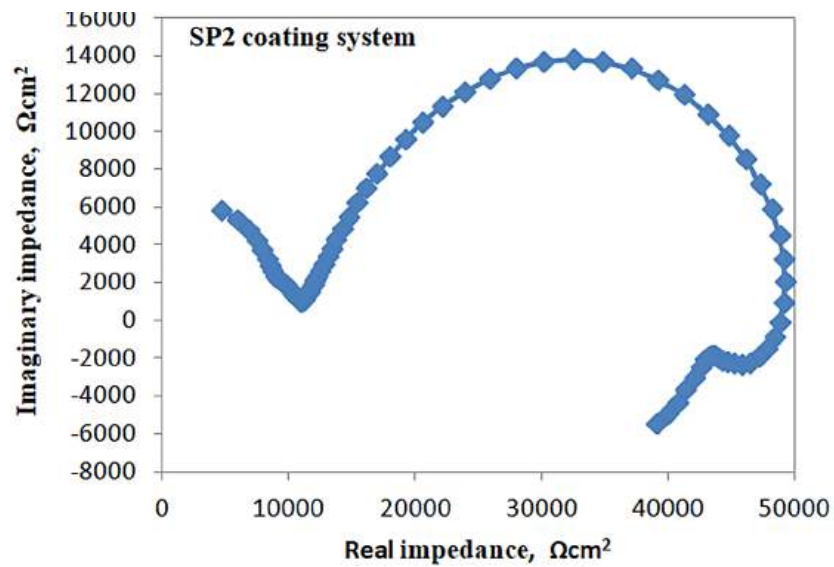


Figure 14. Nyquist impedance spectrum for the SP2 coating system

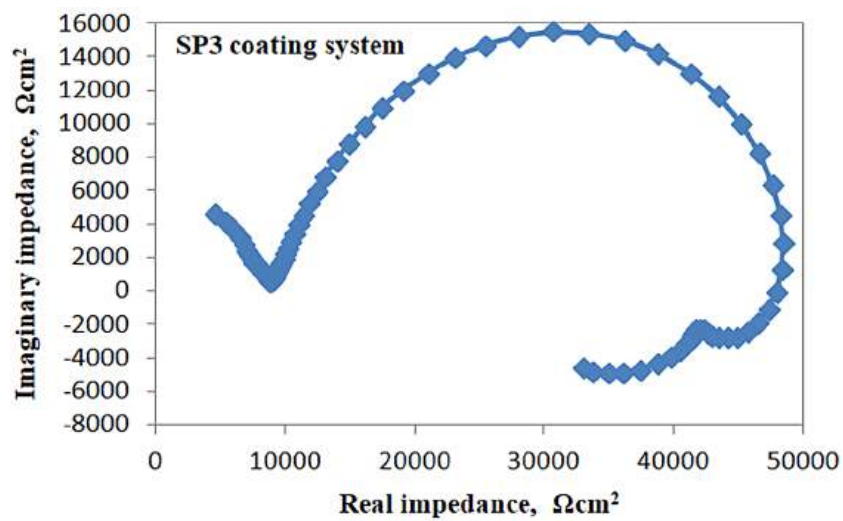


Figure 15. Nyquist impedance spectrum for the SP3 coating system

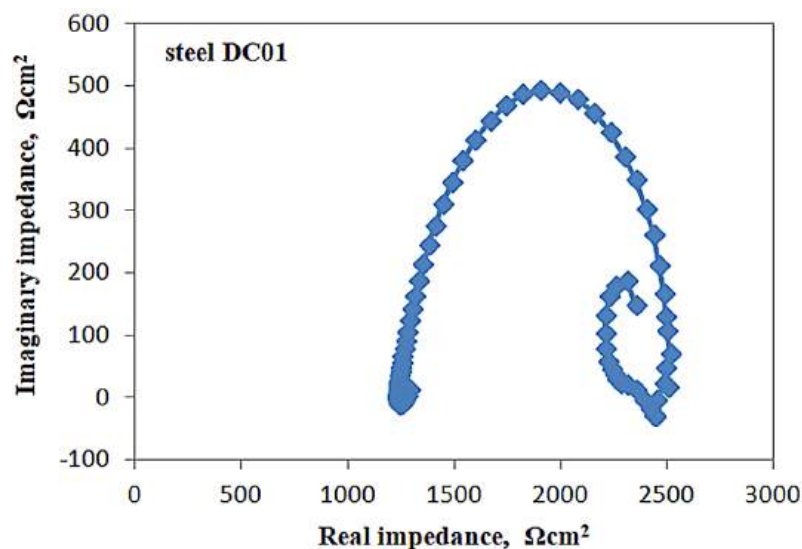


Figure 16. Nyquist impedance spectrum for DC01 steel

the case of two-layer paint coatings. The presence of an induction loop indicates, on the one hand, active dissolution of the steel substrate, while the appearance of an additional capacitive loop (in the low-frequency range) indicates the creation of a layer of solid corrosion products, the presence of which may contribute to the slowing down of corrosion processes.

CONCLUSIONS

As a result of the conducted experimental studies of masking systems, the following conclusions can be drawn:

1. As a result of the microstructure analysis, it was found that the thickness of the coating systems ranged from 141 to 157 μm . It was also observed that the coating systems were free of structural defects, i.e. microcracks and pores.
2. Proper preparation of the substrate material is an important factor affecting the surface roughness of the coating system. The roughness parameters of the two-layer coatings were characterized by higher values compared to the steel substrate (about three times).
3. Analysis of the hardness measurement results using the Koenig pendulum damping method showed that the tested paint systems had similar hardness.
4. The masking systems had good adhesion to the substrate. SP2 two-layer coating had the highest bonding strength.
5. The SP1 and SP2 varnish systems had the

highest erosion resistance, while the SP3 system had the lowest erosion resistance.

6. The paint systems tested were characterized by similar corrosion parameters during exposure. The polarization curves of the paint systems after exposure to acid rain solution were located below the polarization curve of DC01 steel. They were characterized by lower E_{corr} and j_{corr} values relative to the polarization curve of the substrate material.
7. Implementation of innovative two-layer coatings in the Polish Armed Forces will increase the safety of soldiers and military equipment and weapons in the event of combat operations.

REFERENCES

1. Wysocki K., Dąbrowska, I., Idziek, M. Camouflage of troops and facilities based on the experience of selected countries. Warsaw: Faculty of Military, War Studies University; 2020. (in Polish)
2. Cieślak P. Camouflage of troops and facilities. *Przegląd Sił Zbrojnych*. 2017; 2: 8–13. (in Polish)
3. Camouflage of troops and military defense infrastructure, DD/3.20: MON/SG WP; 2010. (in Polish)
4. Przybył W., Mazurczuk, R., Szczepaniak, M., Radek, N., Michalski, M. Virtual methods of testing automatically generated camouflage patterns created using cellular automata. *Materials Research Proceedings*. 2022; 24: 69–77. <https://doi.org/10.21741/9781644902059-11>
5. Derlatka J. Masking - new trends. *Przegląd Sił Zbrojnych*. 2017; 2: 14–17. (in Polish)

6. Plebankiewicz I., Januszko A., Kwak A., Musiał G., Przybył W. Analysis of imagery and spectral data from selected locations in the northern hemisphere and examples of camouflage pattern implementations for these locations. In: Kamyk Z., editor. *Military Engineering - Problems and Perspectives*. Wrocław: Military Institute of Engineer Technology; 2018: 375–384. (in Polish)
7. Bębenek B. Engineering aspects of troop camouflage. *Obronność. Zeszyty Naukowe*. 2017; 1: 5–17. (in Polish)
8. Dojlitko M. Visual message deconstruction theory: military camouflage design tools. Gdańsk: Academy of Fine Arts in Gdańsk; 2015. (in Polish)
9. Newark T. *The Book of Camouflage: The art of Disappearing*. Bloomsbury: Osprey Publishing; 2013.
10. Talas L., Baddeley R.J., Cuthill I.C. Cultural evolution of military camouflage. *Philos TR Soc B*. 2017; 372(1724): art.20160351. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0351>
11. Toh K.B., Todd P. Camouflage that is spot on! Optimization of spot size in prey-background matching. *Evol Ecol*. 2017; 31(4): 447–461. <https://doi.org/10.1007/s10682-017-9886-3>
12. Yang X., Xu W.-D., Liu J., et al. A small-spot deformation camouflage design algorithm based on background texture matching. *Def Technol*. 2023; 19: 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.10.001>
13. Radek N. Determining the Operational Properties of Steel Beaters after Electrospark Deposition. *Eksploatacja Niezawodn.* 2009(4): 10–16.
14. Radek N. Properties of WC-Co coatings with Al₂O₃ addition. *Prod Eng Arch*. 2023; 29(1): 94–100. <https://doi.org/10.30657/pea.2023.29.11>
15. Burakowski T. *Areology - theoretical foundations*. Radom: Scientific Publishing. House of the Institute for Sustainable Technologies - National Research Institute; 2013. (in Polish)
16. Kłonica M. Application of the ozonation process for shaping the energy properties of the surface layer of polymer construction materials. *Journal of Ecological Engineering*. 2022; 23(2): 212–219. <https://doi.org/10.12911/22998993/145265>
17. Kłonica M., Kuczmaszewski J. Modification of Ti6Al4V titanium alloy surface layer in the ozone atmosphere. *Materials*. 2019; 12(13): 2113. <https://doi.org/10.3390/ma12132113>
18. Michalski M., Pisarek U., Radek N., et al. The influence of operational exposure on changes in parameters of effective camouflage of coatings used in military technology. *Adv Sci Technol-Res*. 2023; 17(1): 182–196. <https://doi.org/10.12913/22998624/156940>
19. Radek N., Michalski M., Mazurczuk R., et al. Operational tests of coating systems in military technology applications. *Eksploatacja Niezawodn.* 2023; 25(1): 1–13. <https://doi.org/10.17531/ein.2023.1.12>
20. Przybył W., Januszko A., Radek N., et al. Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications. *Def Technol*. 2023; 22: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.06.013>
21. Pietraszek J., Goroshko A. The heuristic approach to the selection of experimental design, model and valid pre-processing transformation of DoE outcome. *Adv Mater Res-Switz*. 2014; 874: 145–149. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.874.145>
22. Styrylska T., Pietraszek J. Numerical modeling of non-steady-state temperature-fields with supplementary data. *Z Angew Math Mech*. 1992; 72(6): T537–T539.
23. Skrzypczak-Pietraszek E., Pietraszek J. Seasonal changes of flavonoid content in L. (Lamiaceae). *Chem Biodivers*. 2014; 11(4): 562–570. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201300148>
24. Szczotok A., Sozanska M. A comparison of grain quantitative evaluation performed with standard method of imaging with light microscopy and EBSD analysis. *Prakt Metallogr-Pr M*. 2009; 46(9): 454–468. <https://doi.org/10.3139/147.110043>
25. Orman L.J., Radek N., Pietraszek J., Szczepaniak M., et al. Analysis of enhanced pool boiling heat transfer on laser-textured surfaces. *Energies*. 2020; 13(11): art.2700. <https://doi.org/10.3390/en13112700>
26. Madej M. The effect of TiN and CrN interlayers on the tribological behavior of DLC coatings. *Wear*. 2014; 317(1–2): 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.008>
27. Kotnarowska D. Types of polymer coating wear processes. Monograph No. 60. Radom: Radom University of Technology Publishing House; 2003. (in Polish)
28. Kotnarowska D., Wojtyniak, M. Influence of ageing on mechanical properties of epoxy coatings. *Solid State Phenomena*. 2009; 147–149: 825–830.
29. Kotnarowska D. Destruction of polymer coatings under the influence of operating factors. Monograph. Radom: University of Technology and Humanities Publishing House; 2013. (in Polish)
30. Liu F., Song, Y. W., Shan, D. Y., Han, E. H. Corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy in simulated acid rain solution. *T Nonferrous Metal Soc*. 2010; 20: S638–S642.
31. Poorqasemi E., Abootalebi O., Peikari M., Haqdaret F. Investigating accuracy of the Tafel extrapolation method in HCl solutions. *Corros Sci*. 2009; 51(5): 1043–1054. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.001>

Publikacja 11

Abrasion resistance of camouflage coating systems

Marek Michalski

mmichalski@barwa.kielce.pl |  <https://orcid.org/0000-0003-0419-7886>

F.H. Barwa company,
Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering,
Kielce University of Technology

Scientific Editor: Grzegorz Filo,
Cracow University of Technology

Technical Editor: Aleksandra Urzędowska,
Cracow University of Technology Press

Typesetting: Anna Pawlik,
Cracow University of Technology Press

Received: August 29, 2024

Accepted: October 17, 2024

Copyright: © 2024 Michalski. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

Funding: Work carried out as part of the project of the Ministry of Science and Higher Education “Implementation Doctorate I” (5th edition) No. DWD/5/0043/2021 – entitled “The influence of modifying additives on the operational properties of paint coating systems used in military technology”.

Citation: Michalski, M. (2024). Abrasion resistance of camouflage coating systems. *Technical Transactions*, e2024011. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2024011>

Abstract

The aim of this article is to evaluate the abrasion resistance of camouflage coating systems according to the D4060-10 standard using the Taber Abraser. The method is a standard test for assessing the resistance of coatings to mechanical wear by simulating the abrasion process that occurs during exploitation. The abrasion resistance of camouflage coatings is crucial, especially in the context of military applications. Camouflage coatings are used on military vehicles, equipment and devices to ensure their ability to camouflage in various environments. High abrasion resistance ensures that the camouflage pattern does not wear out quickly, which is important for effective camouflage. The study analyzed three different coating camouflage systems that were subjected to a test to determine their durability and effectiveness under conditions of intensive abrasion. The results obtained allowed for a comparison of the resistance of these systems. The obtained data provide valuable information for further development of camouflage coating systems with increased abrasion resistance, which is of great importance for military and industrial applications.

Keywords: camouflage, coatings system, abrasion, military equipment and vehicles

1. Introduction

Polymer coatings are part of the system: surroundings – coating – substrate. Coating protects the substrate against the destructive influence of operating environment factors. In many cases, the coating determines the safe operation of a technical facility. Polymer coatings are applied to various types of substrates such as metals, wood, concrete, plastics, ceramics in order to protect the substrate against the effects of external factors (mechanical, chemical, environmental, thermal and others) and to give these substrates appropriate decorative and specific properties depending on destination. In most applications, the main purpose of polymer coatings is to protect the substrate against corrosion. The coatings are intended to significantly extend the service life of the protected substrate. Due to their different purposes, they have various structures (Radek, 2023). Figure 1 shows the structure of a typical two-layer coating system.

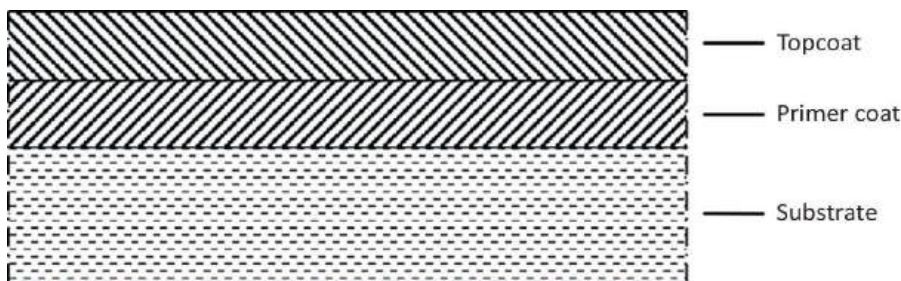


Fig. 1. Typical coating system

The mechanical durability of coating system is important for coated products. One of the most important properties is abrasion resistance, especially for military equipment. Abrasive wear notably contributes to the damage to protective coatings on military vehicles and equipment during service time. Coating systems for military equipment usually consist of a primer coat and a topcoat. The latter coat is exposed to the environment and subjected to abrasive wear. For outside areas, typically the topcoats are based on polyurethane. This is basically because of their good resistance against ultraviolet light and their high color stability. Primer coats are almost entirely made of epoxy as the base polymer. Epoxies provide a good adhesion, corrosion protection including barrier resistance, but they are not resistant to ultraviolet light and deteriorate once the protective topcoat is damaged or abraded. Therefore, the resistance of topcoats against abrasive wear is an important lifetime parameter for corrosion protection and special properties like camouflage. Abrasion resistance may be defined generally as the ability of a material to withstand mechanical action, such as rubbing, scraping, or erosion, that tends progressively to remove material from its surface (Sward, 1972; Suzuki, 1999; Momber, 2021; Rossi, 2009).

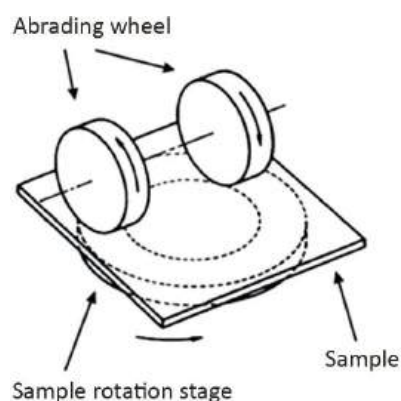


Fig. 2. Principle of Taber abrasion test (Sward, 1972)

One of the methods of measuring abrasion is the method using rotating wheels and an example is Taber abraser test. This is one of the best known and most widely specified methods of measuring abrasion or wear, yet it lacks interlaboratory reproducibility, as pointed up in ASTM D4060-10. In the abrasion test procedure coating system is applied at uniform thickness to the plane, rigid panel. After curing coatings system is abraded by rotating the panel under weighted abrasive wheels. Figure 2 shows the principle of Taber test.

Abrasion resistance is calculated as loss in weight at a specified number of abrasion cycles or as loss in weight per cycle or as number of abrasion cycles required to remove a unit amount of coating thickness (ASTM D4060-10).

2. Materials and treatment parameters

The test samples were made of DC01 alloy steel measuring 150 mm × 100 mm × 1 mm. The surfaces of the steel samples were prepared as follows: washed with XPA10006 remover, sanded with a rotary grinder with P80 sandpaper and washed with XPA10006 remover. SATA guns with nozzles and a Blowtherm spray booth were used to apply the coating systems. Camouflage coating systems were applied to the prepared steel samples using the pneumatic spray method in three variants:

1. Two-layer coating system (SP1): BP450-100/N primer, BW400-6031 camouflage coat.
2. Two-layer coating system (SP2): BP450-100/N primer, BW400-6031 camouflage coat + carbon nanotube modification.
3. Two-layer coating system (SP3): BP450-100/N primer, BW400-6031 camouflage coat + glass microsphere modification.

Coating systems were heated at 60°C for 60 minutes. The samples prepared in this way were aged for 21 days at room temperature.

The abrasion test was carried out on the DT-523 Rotary Abrasion Tester (model: AN 141 523). Calibrase type discs (CS-17) were used for the test – flexible wheels made of rubber containing abrasive material in the form of aluminum oxide particles. Every 500 cycles, the abrasive discs were regenerated using the S-11 abrasive disc. A 1000 g weight was used for each arm. Each sample was weighed before the test and the thickness of the coating system was measured. The thickness was measured after every 500 abrasion cycles. When the first coating (topcoat) of the system was removed, the sample was weighed. The sample was also weighed when the whole coating system was completely removed from the sample. Figure 3 shows used rotary abrasion tester.



Fig. 3. DT-523 Rotary Abrasion Tester

Figure 4 shows the appearance of samples with SP1, SP2, SP3 coating systems applied after the abrasion test.

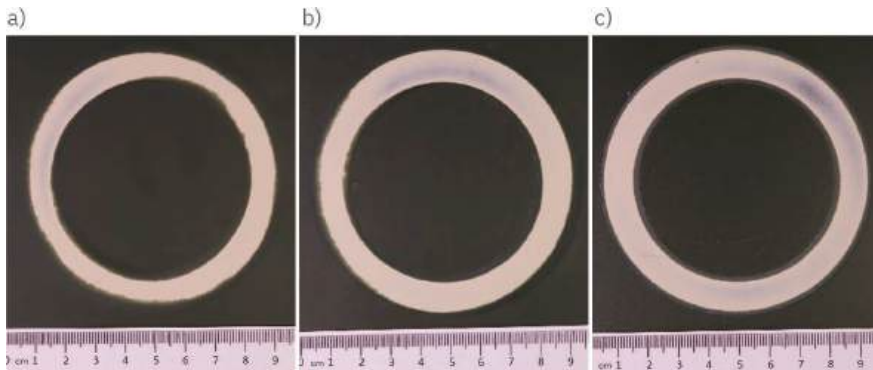


Fig. 4. Coating system after Taber test. a) SP1, b) SP2, c) SP3

3. Results and discussion

The abrasion resistance test conducted using the Taber Abraser device allowed us to determine the durability of three camouflage coating systems in the context of mechanical wear. Figure 5 shows the change in the thickness of coating systems depending on the number of abrasion cycles on the Taber tester. The presented curves have an inflection point resulting from the difference in abrasion resistance of the primer and topcoat included in the coating system.

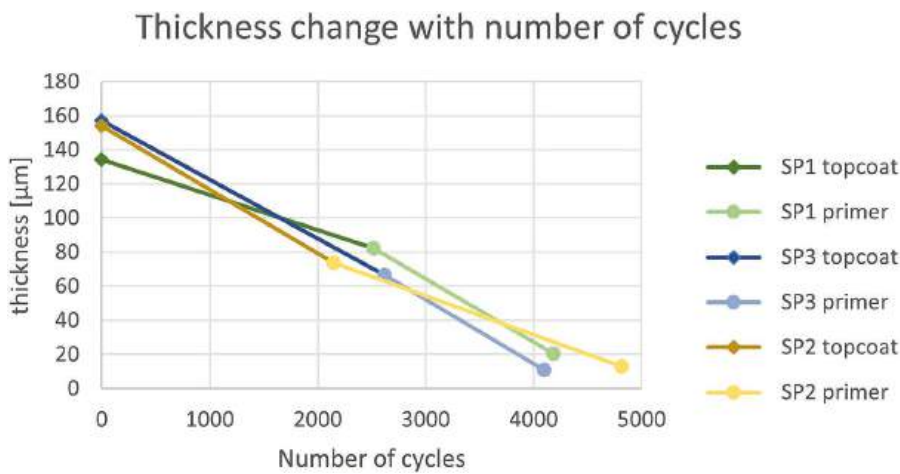


Fig. 5. Thickness change with number of cycles

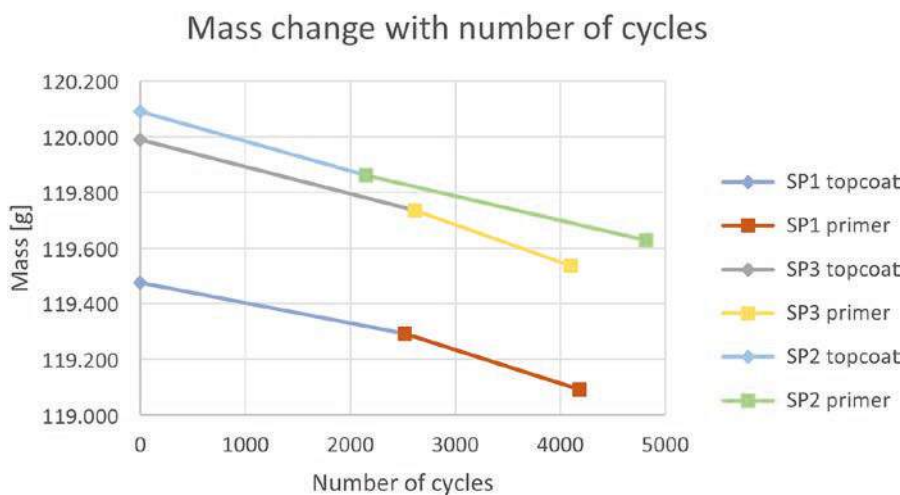


Fig. 6. Weight change with number of cycles

Analyzing the obtained results, it can be stated that the coating without modification is the most resistant to Taber abrasion test, this is related to the fact that it was characterized by the smallest loss of thickness in relation to the number of abrasion cycles.

Figure 6 presents the weight loss of the tested coating system depending on the number of cycles.

The average mass loss per cycle for the entire coating system is presented in Table 1.

Table 1. The average mass loss per cycle for the entire coating system

Parameters	Systems		
	SP1	SP2	SP3
Weight loss [mg]	384	463	455
Weight loss per 1 cycle [mg]	0.092	0.096	0.111

The lowest mass loss per 1 abrasion cycle was obtained for the unmodified SP1 coating system. This is significant because it indicates its highest resistance to mechanical wear compared to the other tested systems. The SP2 coating system shows a slightly higher mass loss compared to SP1, which suggests that it is less resistant to abrasion. Although the difference in mass loss between SP1 and SP2 is minimal, it may affect the long-term durability of the coating in difficult operating conditions. The highest mass loss per 1 abrasion cycle was shown by the SP3 coating system, which indicates that it is the most susceptible to mechanical wear among the analyzed coating systems. The results of the abrasion resistance tests of camouflage coatings are crucial for military equipment used in difficult combat conditions. The equipment is exposed to various external factors, such as sand, mud, stones, bushes and tree branches, which can lead to rapid coating wear. Choosing coatings with high resistance to mechanical wear, such as the SP1 coating system, ensures long service life of equipment and equipment without the need for frequent re-coating of the camouflage coating. This is particularly important in combat conditions, where repair or maintenance options are limited or even impossible. Equipment that can be used longer in the field reduces maintenance and repair costs and increases operational capacity.

4. Summary

The applied modification of the masking coating system using carbon nanotubes or glass microspheres had a negative impact on the abrasion resistance of the masking coating system. The best abrasion resistance was characteristic of the unmodified coating system, while the system modified with glass microspheres obtained the lowest abrasion resistance in the tests. In the next stage, hardness should be checked as another property influencing the operational durability of camouflage coating systems.

References

- Momber, A., Irmer, M. (2021). Taber abrasive wear resistance of organic offshore wind power coatings at varying normal forces. *J. Coat. Technol. Res.* 18(3), 729–740. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00437-x>
- Radek, N. (2023). *Powłoki do zastosowań w technice wojskowej – technologie wytwarzania i właściwości*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- Rossi, S., Deflorian, F., Scrinzi, E. (2009). Comparison of different abrasion mechanisms on aesthetic properties of organic coatings. *Wear* 267, 1574–1580.
- Suzuki, S., Ando, E. (1999). *Abrasion of thin films deposited onto glass by the Taber test*, (pp. 194–200). *Thin Solid Films* 340.
- Sward, G.G. (1972). *Paint Testing Manual* (pp. 301–315). ASTM Special Technical Publication 500, Thirteenth Edition.
- Standard ASTM: D4060-10. Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser.

Publikacja 12

The Influence of Operational Exposure on Changes in Parameters of Effective Camouflage of Coatings Used in Military Technology

Marek Michalski¹, Urszula Pisarek¹, Norbert Radek^{2*}, Wojciech Przybył³,
Marcin Szczepaniak³

¹ Firma Handlowa Barwa Jarosław Czajkowski, ul. Warkocz 3–5, 25-253 Kielce, Poland

² Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering, Kielce University of Technology, Al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Poland

³ Military Institute of Engineer Technology, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław, Poland

* Corresponding author's e-mail: norrad@tu.kielce.pl

ABSTRACT

The paper presents an assessment of the effect of artificial aging conditions on the properties of varnish coating systems used for effective masking of military equipment and the service life of this type of coating protections was determined. As part of the research, operational exposures were simulated in the form of: accelerated corrosion tests in an artificial atmosphere in accordance with PN-EN ISO 12944–6, a continuous condensation environment at elevated temperature in accordance with the PN-EN ISO 6270–2 standard and short-term temperature impact up to 250 °C. The evaluation of the properties was carried out on the basis of measurements of the surface geometric structure and adhesion by the peel-off method. On the other hand, measurements of specular gloss, color in the range of 400–700 nm and reflectance in the range of 350–1200 nm were made in relation to the requirements of the Polish Defence Standard NO-80-A200. The operational durability of the paint coatings was assessed in terms of damage in accordance with PN-EN-ISO 4628.

Keywords: camouflage coating, special paint, aging, gloss, colour, reflectance.

INTRODUCTION

The protection of a manufactured product against external influences which can cause all kinds of damage is taken into account from the very beginning of the design and construction of vehicles, equipment or installations. As technology progressed, coatings began to be assigned newer and newer functions. In the first instance, the aesthetic and decorative qualities were enhanced, while in the second, care was taken to provide additional reinforcement as well as to adjust the surface.

The production of protective coatings on machine parts is economically justified when their parts or surface layer is worn out and when different characteristics are required from the surface layer than from the core. Currently, there is

a dynamic development of coating manufacturing with various surface engineering technologies [6, 12, 18]. With particular emphasis on coatings produced by beam technologies using concentrated energy stream [24–26].

Varnish coating systems account for approximately 50 % of all coating systems. It is estimated that about 95 % of steel structures are protected against corrosion by protective coatings, of which as much as 90 % by paint coatings [5]. The service life of paint coating systems ranges from several months to several years [13].

Camouflage is a broad concept and can include strategic, operational or direct levels [14, 23]. The subject of the article relates to direct camouflage, and in particular camouflage painting (permanent coating systems), which alongside ad hoc measures such as leaves, branches and camouflage

coverings (camouflage nets) forms the basis of modern camouflage. It is one of the cheaper and more effective way of concealing one’s own forces from the enemy and thus gain an advantage in both defence and attack [3]. The main task of effective camouflage is to eliminate unmasking features [8], i.e. those that enable one’s own objects to be distinguished from the background terrain, and these may include colour, shape, size, gloss, texture [17, 27, 28]. On the modern battlefield, observed an increasing in the use of multispectral sensors, which enable reconnaissance in many ranges of electromagnetic radiation, but the human eye still remains the basic observation “instrument” [9], where the visible range is assumed to be from 400 nm to 700 nm (Figure 1).

In the natural environment, the sun is the primary light source characterised by a uniform spectral distribution. All objects absorb part of the energy at characteristic frequencies [7], so that reflectance curves for individual substances can be determined (Figure 2).

The receptors (cones) [10] in the human eye do not perceive a continuous spectral characteristic, but depending on the receptor type are sensitised to particular frequencies [4]: the L receptor – maximum sensitivity around 565 nm, the M receptor – around 530 nm, the S receptor – maximum around 420 nm (Figure 3).

Based on this property of the human sense of vision, among other things, a perceptually reasonably uniform CIE L*a*b* colour model was built

[11] – used to describe and compare colours seen by humans according to the formula:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

where: ΔL – difference in brightness for compared colours,
 Δa – difference of the chromatic component a ,
 Δb – difference of the chromatic component b

The optical impression, which in the case of coatings refers to the smoothness of the surface, depends on the degree of reflection and diffusion of light. It is assumed that the more light is diffused, the more matt the surface is, and where there is a greater proportion of reflected light, the more glossy the surface is [20].

The parameters of colour, gloss and spectral characteristics for paint coatings should be similar to those for the terrain background and, in addition, maintain their ranges throughout the service life, in accordance with the parameters described in the Polish Defence Standards [21].

Military equipment is subjected to many operational exposures during its service life. The main exposures include:

- the impact of atmospheric conditions such as solar radiation, which includes ultraviolet

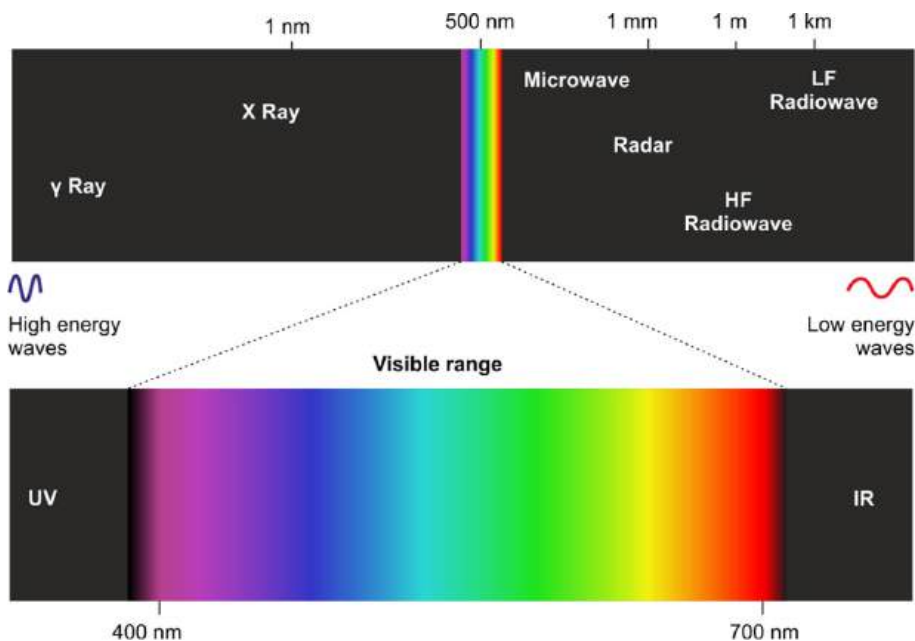


Fig. 1. Diagram of the electromagnetic radiation spectrum [22]

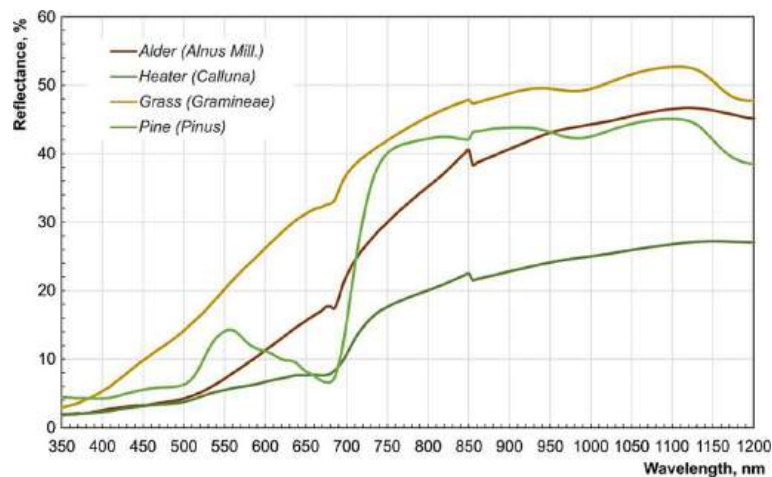


Fig. 2. Spectral characteristics of vegetation in Poland

radiation, which has a particularly negative effect on the camouflage coating,

- rainfall,
- cyclic condensation on the surface causing penetration of the coating,
- operation over a wide temperature range from -60 °C to +70 °C,
- exposure to a wide range of operating media such as diesel, unleaded petrol and petroleum-based lubricants,
- exposures resulting from the type of operation of military equipment, which include decontamination measures,
- possibility of scratching the coating.

In addition to the above operational exposures, there are other specific exposures resulting from the intended use of the equipment or its components, e.g. short-term exposure to temperatures of up to 250 °C occurring in the area of the rocket launcher.

The paper presents study of the influence of various operational exposures on parameters such as gloss, colour and reflectance, which are

decisive for the effective camouflage of military equipment. The effects of artificial ageing conditions were analysed, including temperatures up to 250 °C, ultraviolet radiation, a corrosive atmosphere and condensation humidity.

MATERIALS AND METHODOLOGY

Specimens were prepared from DC01 steel with a thickness of 3 mm which were then ground with P80-grit sandpaper. On such preparing samples epoxy primer BP450–1000 which is part of the special paints set was applied with a dry film thickness of 60 μm ± 10 μm. After 4 hours special paints BW400–6031 (green), BW400–8027 (brown), BW400–9021 (black) were then applied in two layers at room temperature. The dry film thickness of the special paints was 60 μm ± 10 μm. The application of primer as well as special paints was carried out with a conventional pneumatic gun. Such prepared samples were aged for 21 days at 23 °C ± 1 °C and 50% ± 5% relative humidity.

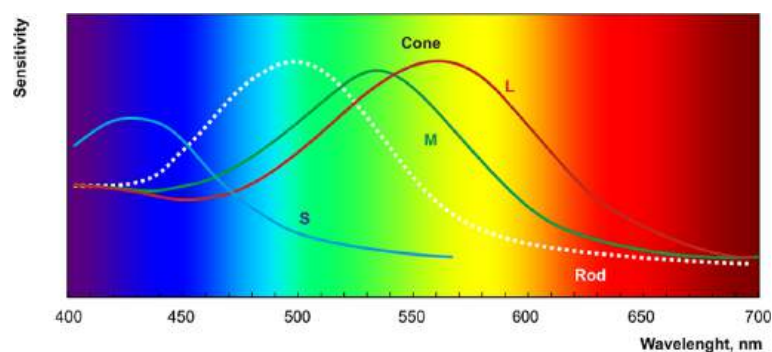


Fig. 3. Sensitivity of S, M, L receptors in relation to frequency [16]

After ageing time, samples were tested for selected properties according to the applicable standards. The following measurements were made: geometrical structure of the surface, adhesion by pull-off test, gloss, colour, reflectance and artificial aging tests: salt, light, condensation and climatic ageing chambers.

Measurements of surface geometric structure (SGS) were carried out at the Laboratory of Computer Measurements of Geometric Quantities of the Kielce University of Technology. The tests were carried out using a Talysurf CCI optical profilometer using the coherent correlation interferometry method, enabling a resolution of 0.01 nm with a z axis [15]. The measurement result was recorded in a matrix of 1024×1024 measuring points using the $\times 10$ lens, which gave a measured area of $1.65 \text{ mm} \times 1.65 \text{ mm}$ and a horizontal resolution of $1.65 \text{ }\mu\text{m} \times 1.65 \text{ }\mu\text{m}$.

The pull-off measurements was carried out using the manual PosiTest AT pull-off device (DeFelsko Corporation). 3 mm thickness abrasive blasted steel substrate with camouflage coating system were tested. The measurements involved bond a standardised dolly to the surface of the coating system using epoxy adhesive. After 48 hours, the excess glue surrounding the dolly was removed and the dolly break was performed and the tensile stress value was read.

Gloss measurements were taken using a Byk micro-Tri-gloss (BYK-Gardner) fitted with polished black glass as the working measurement standard.

The measurements of colour parameters was conducted using Minolta Spectrophotometer CM-700d (Konica Minolta).

The spectral characteristics of the reflected radiation (reflectance) were performed with a Jasco V-770 spectrophotometer (Jasco) at the following measurement parameters: measuring range 350–1200 nm, measurement every 0.2 nm.

A study of the effect of ultraviolet radiation on the camouflage coating system was carried out in Q-LAB's QUV/spray chamber.

Accelerated corrosion tests were carried out in accordance with the WKD SC450 chamber of Weiss Umwelttechnik GmbH.

The low temperature resistance test was carried out in a WKL64/70 climate chamber from Weiss Umwelttechnik GmbH.

The resistance to condensation moisture was tested in the Kohler HK310 humidity chamber.

RESULTS AND DISCUSSION

Measurements of the surface geometric structure

Ten measurements were made on samples camouflage coating system and DC01 steel, allowing averaging of the results. The obtained images of surface stereometry and their analysis using the TalyMap Platinum software allowed to evaluate the geometrical structure of the examined surfaces [1, 2].

Figure 4 shows a sample isometric roughness of the surface of the of the camouflage coating system, while Figure 5 shows the isometric view of the wavy surface of the coating system. Table 1 summarizes the most important SGS parameters of the tested camouflage coating systems.

The tested camouflage coating system had averaged mean arithmetic surface roughness deviations from the average surface area $Sa = 2.6 \div 2.9 \text{ }\mu\text{m}$. Samples of DC01 steel, after grinding with P80-grit sandpaper on which the coatings were applied, had $Sa = 1.9 \div 2.3 \text{ }\mu\text{m}$. The Sa parameter is the basic amplitude parameter for quantifying the state of surface being analysed. A similar trend in the measurement of the camouflage coating system and DC01 steel was observed for the quadratic surface roughness Sq , which has a strong correlation with the Sa parameter. As a result of coating application, the surface roughness was slightly increased.

As a result of the tests simulating operational exposures, the SGS parameters of masking coating systems increased from about 20% to 30%. The varnish coating systems were characterized by the value of the $Sa = 3.13 \div 3.78 \text{ }\mu\text{m}$ parameter.

Pull-off test for adhesion measurement

In order to determine the degree of adhesion of individual layers of coatings system to each other and to metal surfaces an pull-off test was carried out. The test determined the tensile strength which must be impacted to the camouflage coating system in order to cause rupture the coating in a direction perpendicular to the substrate. Table 2 shows the pull-off adhesion results according to PN-EN ISO 4624, while Figure 6 shows the surface of the samples and the surface of the dolly.

Based on the results obtained, it can be concluded that the camouflage coating system has

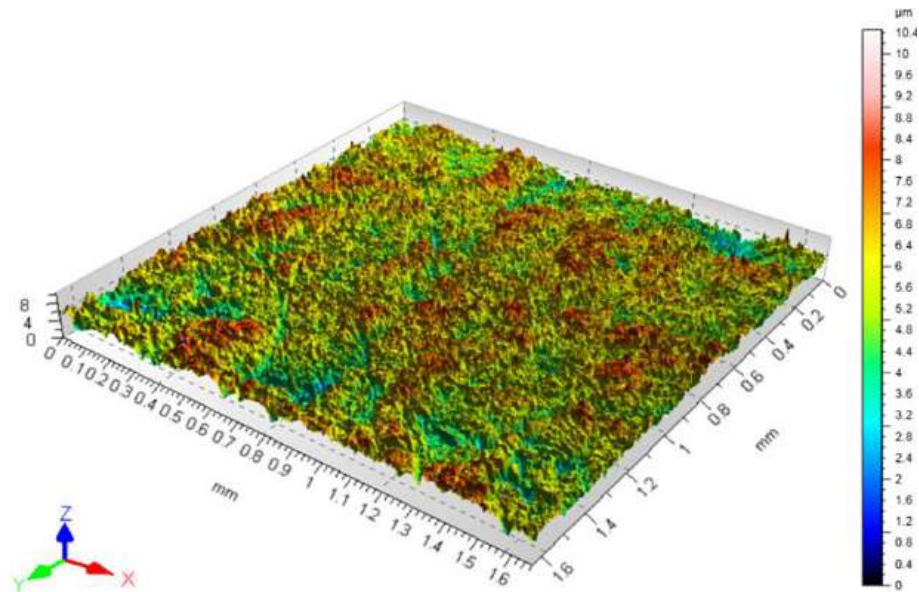


Fig. 4. Isometric view of the S-L surface (roughness) of the camouflage coating system

very good adhesion to the substrate (Figure 6). The fracture was cohesive failure of the BP450–1000 primer layer and the mean tensile stress oscillated around 7 MPa (Table 2).

Short-term exposure to temperatures up to 250 °C

Gloss measurement

Gloss measurements were performed according to PN-EN ISO 2813 using a measurement geometry of 85°, which is designed for surfaces

with a matte finish. Table 3 shows the results of gloss measurements of the tested samples.

Based on the obtained results, there was no effect of temperature change in the studied range on the gloss of the camouflage coating in all tested colours. In every case the tested parameter was below 8 GU which is a requirement of the NO-80-A200 standard.

Colour measurements

Colour measurements were carried out with measurement parameters: d/8, SCI, 10°. The colour difference ΔE^* was determined by measuring

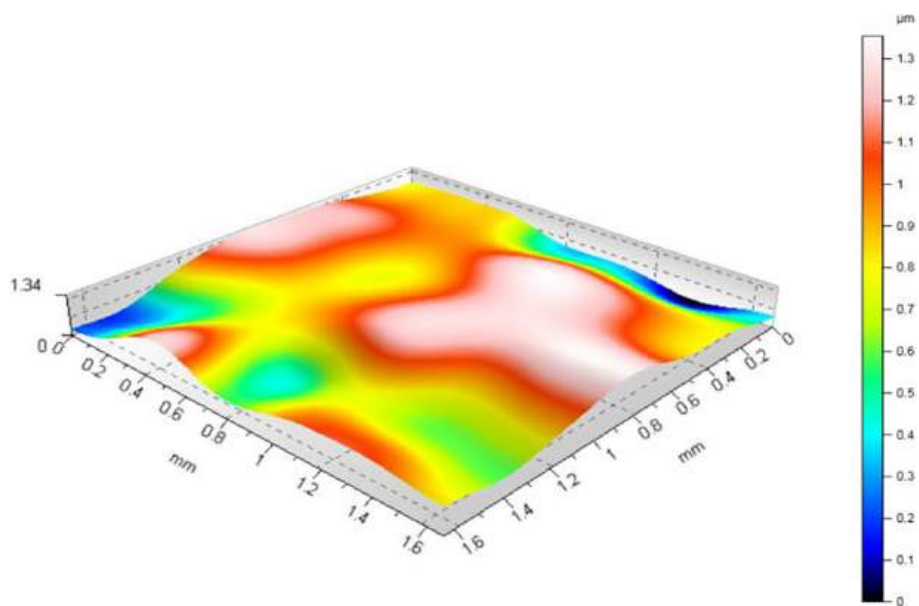


Fig. 5. Isometric view of the waviness surface of the camouflage coating system

Table 1. Averaged parameters of the surface geometric structure

SGS parameters	Camouflage coating system
Sq [μm]	3.6
Ssk	-0.4
Sku	3.3
Sp [μm]	12.2
Sv [μm]	18.5
Sz [μm]	30.6
Sa [μm]	2.8

the samples before and after temperature exposure. The results are summarized in Tables 4–6 and in Figure 7–9.

The analysis of the obtained results showed that in the case of the camouflage coating system with green paint, up to a temperature of 190 °C, the colour change is small and equal to $\Delta E^*=0.94$ at 190 °C. At higher temperatures the colour of the coating becomes more yellow and red and the change increases to $\Delta E^*=2.86$ at 250 °C.

For a camouflage coating system with brown paint, the colour changes slightly toward more yellow. Above 210 °C the colour becomes more red and the colour change parameter ΔE^* increases to 2.18 at 250 °C.

The camouflage coating system with black paint does not change significantly over the entire

range of temperatures tested. The greatest colour difference $\Delta E^*=0.33$ occurring at 130 °C.

In all of the above cases, the colour change is below the requirements of the defence standard, which allows $\Delta E^*=3$, meaning that the requirements of the defence standard are met.

Determination of the spectral reflectance characteristics

Figures 10–12 show the effect of temperatures from 90 °C to 250 °C on the reflectance of the camouflage coating system in green, brown and black colour with reference to the requirements of defence standard NO-80-A200:2021.

On the basis of the determined spectral characteristics (Figure 10) of the camouflage coating system with a green topcoat, it can be observed that at a temperature of 250 °C there is a slight change in the reflectance of electromagnetic radiation in the range of 750–900 nm, which in the present case exceeds the lower limit of the requirements set by the defence standard.

In the case of a camouflage coating system with a brown topcoat (Figure 11), the change in electromagnetic wave reflectance is small and remains within the requirements of the defence standard.

The camouflage coating system with a black topcoat (Figure 12) also varies slightly, remaining

Table 2. Pull-off test results according to PN-EN ISO 4624

Camouflage coating system	Adhesion [MPa]	Adhesion average value [MPa]	Standard deviation [MPa]	Nature of the fracture
BP450–1000 (primer) BW400–6031 (top coat)	7.94	7.43	0.77	100% cohesive failure of BP450–1000
	6.23			
	7.18			
	6.74			
	8.17			
	7.66			



Fig. 6. Example view of sample and dolly after pull-off adhesion test

Table 3. Change of gloss parameter after temperature exposure, GU

Specification		90 °C	110 °C	130 °C	150 °C	170 °C	190 °C	210 °C	230 °C	250 °C
BW400–6031 (green)	Before	4.0	4.0	7.0	5.6	5.4	6.9	7.3	3.4	6.1
	After	3.9	4.0	6.7	6.6	6.3	7.3	7.3	3.6	5.8
	Difference	-0.1	0.0	-0.3	1.0	0.9	0.4	0.0	0.2	-0.3
BW400–8027 (brown)	Before	5.5	5.5	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.4	9.3
	After	5.3	5.2	5.2	5.2	4.7	4.7	4.6	5.5	8.9
	Difference	-0.2	-0.3	0.0	0.0	-0.5	-0.5	-0.5	0.1	-0.4
BW400–9021 (black)	Before	3.4	2.9	4.0	4.2	2.7	2.5	2.8	2.7	4.3
	After	3.4	2.8	4.0	4.4	2.7	2.7	2.9	2.6	4.2
	Difference	0.0	-0.1	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	-0.1	-0.1

Table 4. Colour parameters for BW400–6031 (green)

BW400–6031 (green)	90 °C	110 °C	130 °C	150 °C	170 °C	190 °C	210 °C	230 °C	250 °C
L*	34.72	34.69	35.15	35.20	35.07	35.69	36.09	35.27	35.12
a*	-5.53	-5.49	-5.26	-5.17	-5.38	-5.40	-5.52	-4.15	-2.72
b*	6.13	6.22	5.55	5.71	5.91	5.94	6.51	7.05	6.83
ΔE*	0.38	0.61	0.16	0.55	0.72	0.94	1.68	1.74	2.86
ΔE* in reference to NO-80-A200	0.82	0.89	0.12	0.16	0.44	0.69	1.38	1.79	2.73

Table 5. Colour parameters for BW400–8027 (brown)

BW400–8027 (brown)	90 °C	110 °C	130 °C	150 °C	170 °C	190 °C	210 °C	230 °C	250 °C
L*	46.06	46.05	45.99	45.93	45.90	45.88	45.77	44.90	44.67
a*	3.48	3.47	3.50	3.51	3.57	3.67	3.84	4.33	5.17
b*	10.76	10.77	10.87	10.90	11.05	11.15	11.23	11.47	11.50
ΔE*	0.17	0.15	0.21	0.18	0.21	0.39	0.61	1.12	2.18
ΔE* in reference to NO-80-A200	0.98	0.97	0.93	0.88	0.89	0.92	0.90	1.08	1.79

between the lower and upper limits of the defence standard requirements for black.

Resistance to cyclic ageing conditions

The durability of a paint system depends on many external factors, including: environmental aspects, the shape of the structure, surface preparation, application and drying of the individual system layers. Furthermore, the behaviour

of a coating system over time is influenced by its chemical properties, such as the type of film-forming substance, the type and quantity of pigments used, the use of additives which change the properties of the coating material (fillers, plasticisers, dispersants, etc.).

There are many tests for assessing the service life of coating systems. The commonly used are tests for resistance to condensation moisture and salt spray. It should be noted that the results

Table 6. Colour parameters for BW400–9021 (black)

BW400–9021 (black)	90 °C	110 °C	130 °C	150 °C	170 °C	190 °C	210 °C	230 °C	250 °C
L*	24.48	23.58	24.41	24.46	22.43	23.55	22.73	23.28	23.56
a*	-0.02	-0.10	-0.07	-0.09	-0.11	-0.04	-0.08	-0.10	-0.13
b*	-0.40	-0.51	-0.47	-0.51	-0.50	-0.47	-0.45	-0.47	-0.39
ΔE*	0.10	0.19	0.33	0.17	0.10	0.09	0.04	0.15	0.20
ΔE* in reference to NO-80-A200	0.90	0.53	0.88	0.94	1.34	0.49	1.05	0.62	0.43

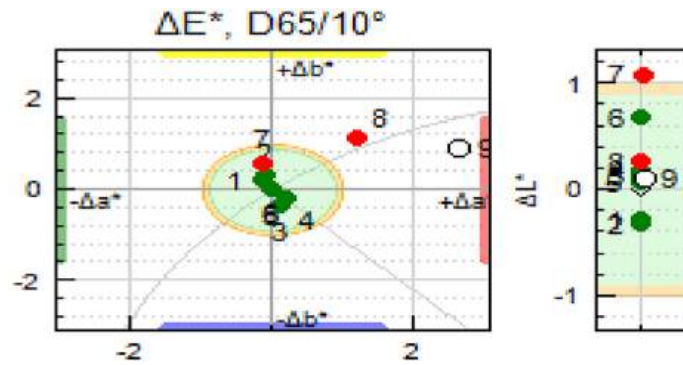


Fig. 7. Colour parameters for BW400–6031 (green). 1 – 90 °C, 2 – 110 °C, 3 – 130 °C, 4 – 150 °C, 5 – 170 °C, 6 – 190 °C, 7 – 210 °C, 8 – 230 °C, 9 – 250 °C

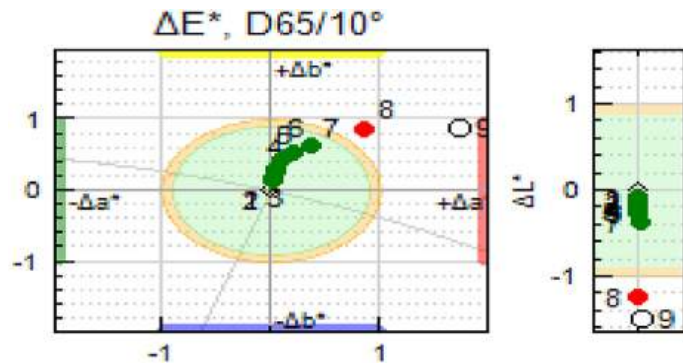


Fig. 8. Colour parameters for BW400–8027 (brown). 1 – 90 °C, 2 – 110 °C, 3 – 130 °C, 4 – 150 °C, 5 – 170 °C, 6 – 190 °C, 7 – 210 °C, 8 – 230 °C, 9 – 250 °C

obtained with artificial ageing in ageing chambers do not necessarily correspond to the actual objects exposed under natural operating conditions. In order to reflect the actual conditions, tests combining the action of different ageing chambers (humidity, salt, UV, climate) are increasingly common and these are cyclic tests. One such test is the cyclic test proposed in PN-EN ISO 12944–6, which combines the operation of three chambers: a salt spray chamber, a UV-A chamber and a climatic chamber (Figure 13). The camouflage

coating system test was carried out in accordance with PN-EN ISO 12944–6 and included 2688 h of sample exposure. The specimens were cut into the substrate with a width of 2 mm scribe in accordance with Annex A of PN-EN ISO 12944–6. The 7-day cycle was repeated until the target exposure time was reached. Cycle consisted of a test in a UV light chamber according to PN-EN ISO 16474–3 for 3 days. In next step the samples were transferred to a salt chamber according to PN-EN ISO 9227 NSS for 3 days. At the end the samples

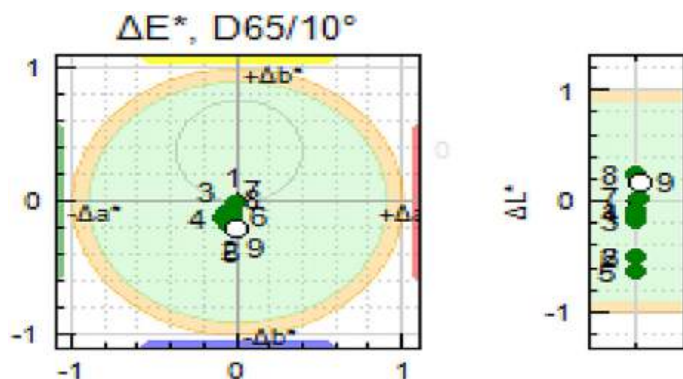


Fig. 9. Colour parameters for BW400–9021 (black). 1 – 90 °C, 2 – 110 °C, 3 – 130 °C, 4 – 150 °C, 5 – 170 °C, 6 – 190 °C, 7 – 210 °C, 8 – 230 °C, 9 – 250 °C

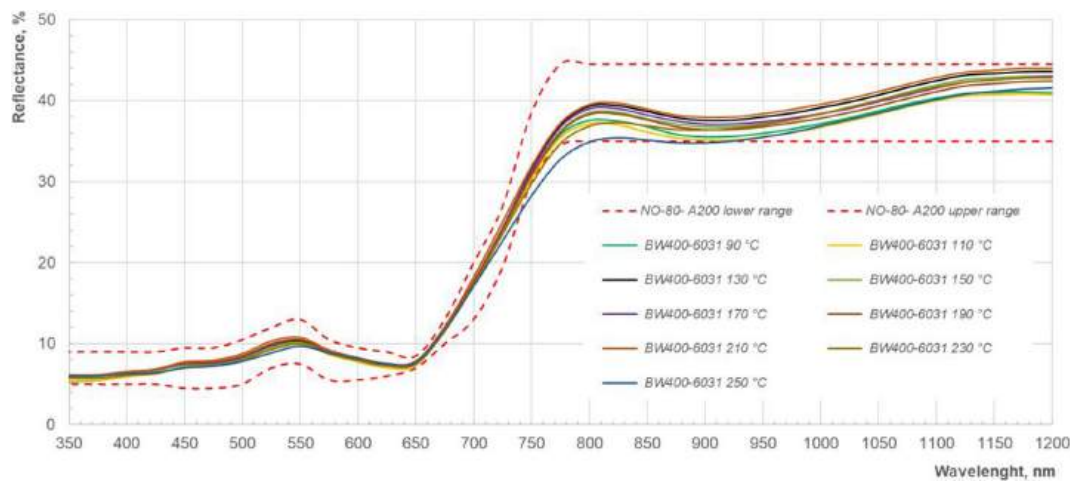


Fig. 10. Effect of temperatures from 90 °C to 250 °C on the reflectance of the BW400–6031 (green) camouflage paint coating system

were exposed in a climate chamber set at -20°C for 1 day.

The effects of atmospheric conditions on coatings exposed to daylight can be tested in chambers using fluorescent lamps at controlled temperature and humidity, with the possibility of water spray. During the research on the effect of ultraviolet radiation on the masking coating system, UVA-340 fluorescent lamps were used to simulate daylight in the ultraviolet range. The samples were irradiated for 4 h at an irradiance of 0.83 W/m²/nm. This was followed by condensation of moisture on the samples for 4 h with UV light off. The programme was repeated until the samples were exposed for 72 h.

Accelerated corrosion testing was carried out in artificial corrosion atmosphere test chambers. The atmosphere used accelerates corrosion processes on the coating system. The intensification

of corrosion processes takes place through the application of suitably selected factors such as temperature, relative humidity, moisture condensation, concentration of corrosive components. The corrosion resistance tests of the camouflage coating system were carried out according to PN-EN ISO 9227 in the WKD SC450 chamber. The samples were placed in a salt chamber where a nozzle sprays a 5% solution of sodium chloride in demineralised water (pH = 6.5–7.2). The temperature inside the chamber was 35 °C ± 2 °C. Solution mist precipitation was 1.5 cm³/h ± 0.5 cm³/h.

After exposure in the salt chamber, the samples were rinsed with demineralised water and placed in a climate chamber at -20 °C for 24 hours. The test specimens were evaluated for changes according to PN-EN ISO 4628. Table 7 shows the results of the camouflage coating system and the appearance of the coating after the test.

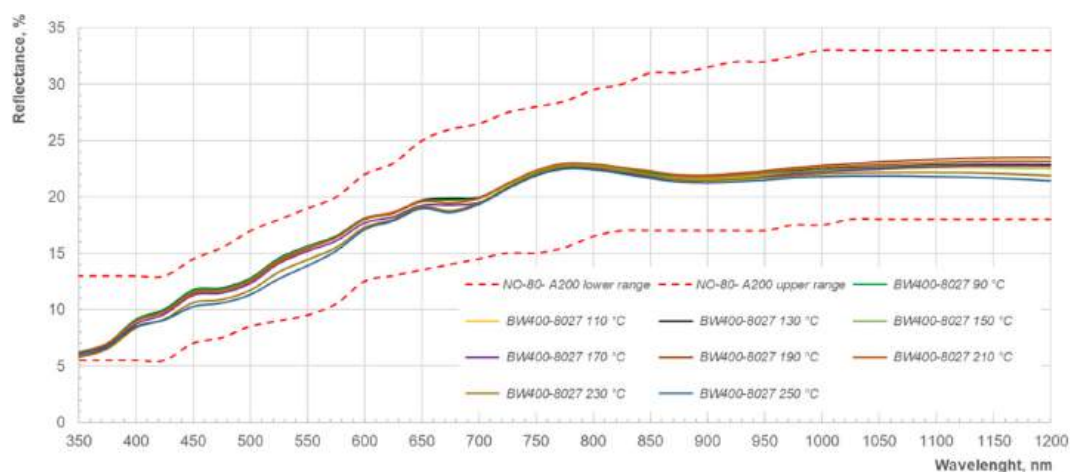


Fig. 11. Effect of temperatures from 90 °C to 250 °C on the reflectance of the BW400–8027 (brown) camouflage paint coating system

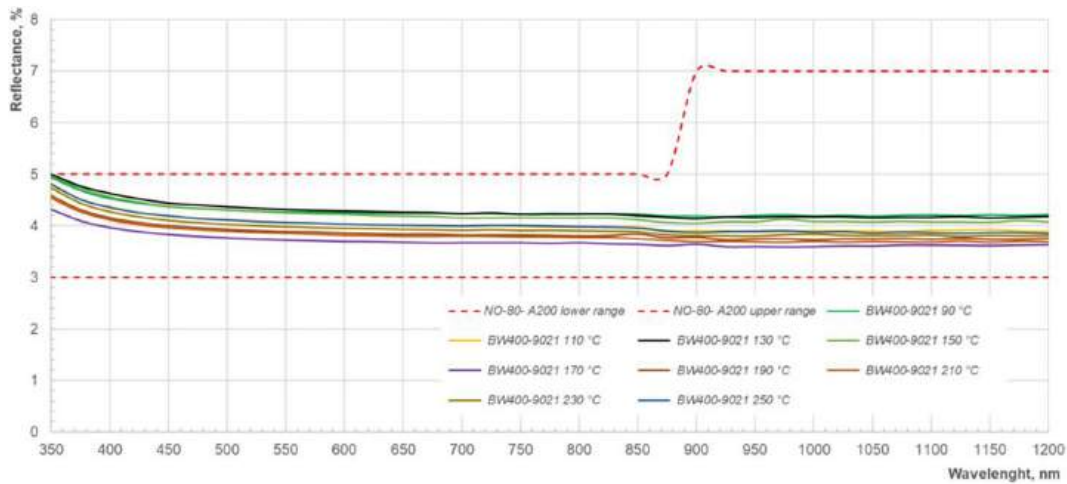


Fig. 12. Effect of temperatures from 90 °C to 250 °C on the reflectance of the BW400–9021 (black) camouflage paint coating system

The camouflage coating system after the cyclic ageing test showed no change on the surface of the specimen at an exposure time of 2688 hours excluding the area around the scratch. The average degree of corrosion of the tested samples around the scribe was 2.4 mm, which is within the range of values permitted by the PN-EN ISO 12944–6 standard. However, it is difficult to relate the obtained corrosion resistance time of the coating system to the resistance time under real conditions, because in reality there are many additional factors that are difficult or impossible to obtain under aging chamber test conditions.

Gloss measurement

The effect of cyclically changing aging conditions on the gloss parameter was investigated. Table 8 shows the results of gloss measurements of the tested samples in 85° measuring geometry. The result is the average of the measurements obtained for the three tested samples.

The test results showed an increase in the gloss of the samples in comparison to the state before the test. The gloss change was a maximum of 3 GU. However, in every case, the gloss values

were below 8 GU, which is a requirement of the NO-80-A200 defence standard.

Colour measurement

The results of the colour change of the BW400–6031 camouflage coating system under artificial ageing conditions are presented in Table 9 and Figure 14.

After an exposure time of 1680 h, the colour change was $\Delta E^*=0.99$, while after 2688 h the studied parameter increased to $\Delta E^*=1.73$. Analysis of figure 14 shows that the colour of the coating becomes bluer during the test and, as indicated by the parameter L^* the brightness of the coating increases.

The observed colour changes in relation to the appearance of the coating before the test and the requirements of the defence standard NO-80-A200 in terms of colour coordinate values was within the permissible range of $\Delta E^*=3.00$.

Determination of the spectral reflectance characteristics

Spectral characteristics of reflectance with reference to the NO-80-A200 defence standard

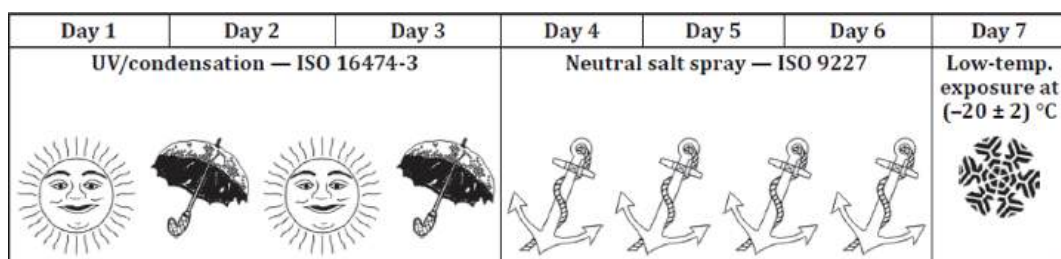
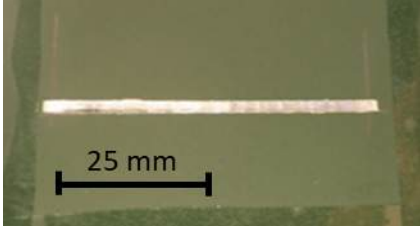
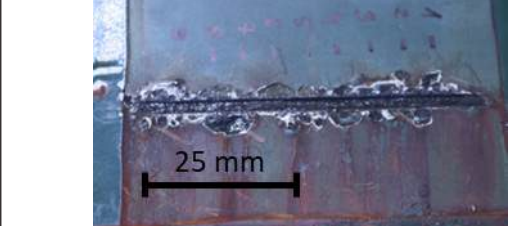


Fig. 13. Cyclic ageing test according to PN-EN ISO 12944–6 (Annex B) [19]

Table 7. Results the camouflage coating system after the cyclic corrosion test according to PN-EN ISO 12944–6

Duration of exposure to cyclic climatic conditions, h	2688
Resistance to cyclic climatic condition, h	More than 2688
Degree of blistering	0 (S0)
Degree of rusting	Ri0
Degree of flaking	0 (S0)
Degree of cracking	0 (S0)
Degree of filiform corrosion	0 (S0)
Degree of corrosion around the scribe, mm	2.4
The sample appearance before testing:	The sample appearance after testing:
	

were performed before and after an exposure time of 2688h (Figure 15).

The cyclic ageing test did not cause any changes in the course of electromagnetic radiation reflectance of the tested coatings. In the visible light wavelength range, i.e. 350–720 nm, no significant differences in the reflectance spectrum were observed. Similarly, in the near-infrared range of 750–1200 nm, the spectrum before and after exposure to ageing conditions had similar spectrum waveforms. The spectrum (Figure 15) of the reflectance of the camouflage coating with the green topcoat before and after the test cycle remains within the requirements of the defence standard.

Resistance to condensation humidity

Moisture condensing on the surface of the coating allows many ions to pass into solution and thus form an electrolyte, causing possible electrochemical corrosion of the substrate. Testing in an ageing chamber designed to create conditions of continuous condensation on the coating surface at elevated temperatures, i.e. 40 °C ± 1 °C, provides the possibility to test accelerated exposure of the resistance of a coating system to this type

Table 8. Gloss of the coating before and after exposure to cyclic ageing conditions, GU

BW400–6031 (green)	Before exposure	4.4
	After exposure	7.2
	Difference	2.8

of exposure. Table 10 shows the results of testing the camouflage coating system in humidity chamber. During the test, the changes that occurred on the surface of the coating were evaluated according to PN- EN ISO 4628.

The camouflage coating system, after testing in a humidity chamber, showed no change over an exposure time of 720 hours. No changes to the coating in the form of rusting, blistering, cracking or flaking were observed when the system was exposed to ageing conditions.

Gloss measurement

The effect of an atmosphere containing condensation moisture on the gloss parameter of a green topcoat camouflage coating was investigated. Table 11 shows the results of the measurements. The gloss was tested in a measuring geometry of 85°. The gloss value shown is the average of the measurements obtained for the three tested samples.

Table 9. Colour parameters for BW400–6031 (green) after exposure to cyclic ageing conditions

BW400–6031 (green)	Exposure time [h]	
	1680	2688
L^*	35.78	36.45
a^*	-4.87	-5.06
b^*	5.03	4.59
ΔE^*	0.99	1.73
ΔE^* in reference to NO-80-A200	0.85	1.61

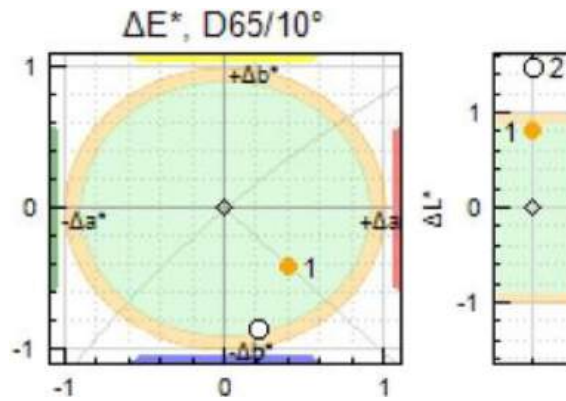


Fig. 14. Colour parameters for BW400–6031 (green). 1 – 1680h exposure, 2 – 2688h exposure

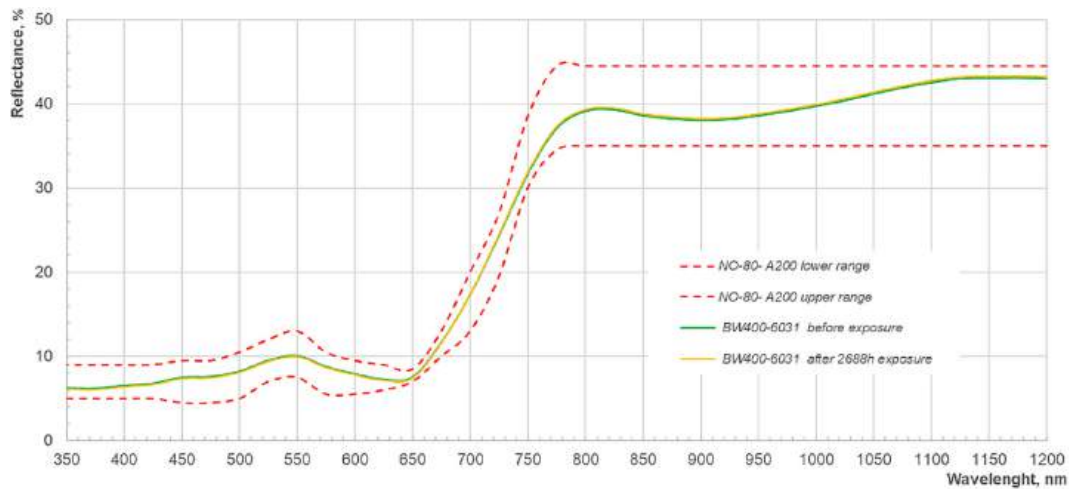



Fig. 15. Influence of cyclic changing climate conditions on the reflectance of BW400–6031 (green) camouflage coating

After exposing the samples in a humidity chamber, the gloss of the camouflage coating system was measured. The parameter tested was

Table 10. Final results for the camouflage coating system after testing in accordance with PN-EN ISO 6270–2

Exposure time to condensation moisture [h]	720
Resistance to condensation moisture [h]	More than 720
Degree of blistering	0 (S0)
Degree of rusting	Ri0
Degree of flaking	0 (S0)
Degree of cracking	0 (S0)
Appearance of the sample after testing:	
	

below 8 GU in accordance with the requirements of defence standard NO-80-A200. The increase in gloss compared to the measurements before exposure to the ageing conditions was small and amounted to about 2 GU.

Colour measurement

Table 12 shows the colour parameters of the green topcoat camouflage system after an exposure time of 720 hours in a humidity chamber. The results obtained were compared with those of the pre-exposure sample, as shown in Figure 16.

After the test, the colour change in relation to the standard – unaged sample – was $\Delta E^*=1.20$,

Table 11. Gloss of the coating before and after exposure to condensation moisture, GU

BW400–6031 (green)	Before exposure	5.5
	After exposure	7.8
	Difference	2.3

Table 12. Colour parameters for BW400–6031 (green) after exposure to condensation moisture

BW400–6031 (green)	Exposure time [h]
	720
L^*	36.40
a^*	-5.20
b^*	4.40
ΔE^*	1.20
ΔE^* in reference to NO-80-A200	1.69

while the same parameter in relation to the colour coordinate values set by the NO-80-A200 defence standard was $\Delta E^*=1.69$.

Determination of the spectral reflectance characteristics

The spectral characteristics of the reflectance of the camouflage coating system before and after an exposure time of 720 h were determined (Figure 17). The results obtained were compared with

the limits established in the NO-80-A200 defence standard for the colour green.

For coatings with a green finish, the change in electromagnetic wave reflection is small, remaining between the lower and upper requirements of the defence standard for the colour (Figure 17). Aging conditions as condensation moisture caused a slight shift in the reflectance spectrum in the range of 350–750 nm. This shift was more noticeable in the range of 750–1200 nm. However, it should be noted that the nature of the spectrum waveform did not change.

CONCLUSIONS

Based on the test results obtained, it was found that the camouflage coating system has very good adhesion to the substrate, the failure of the system occurred in the BP450–1000 primer layer. In a study of the effect of temperature in the range 90–250 °C on the effective camouflage of a

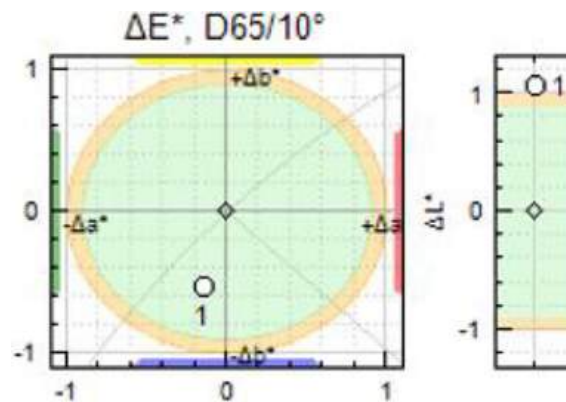


Fig. 16. Colour parameters for BW400–6031 (green). 1–720 h exposure

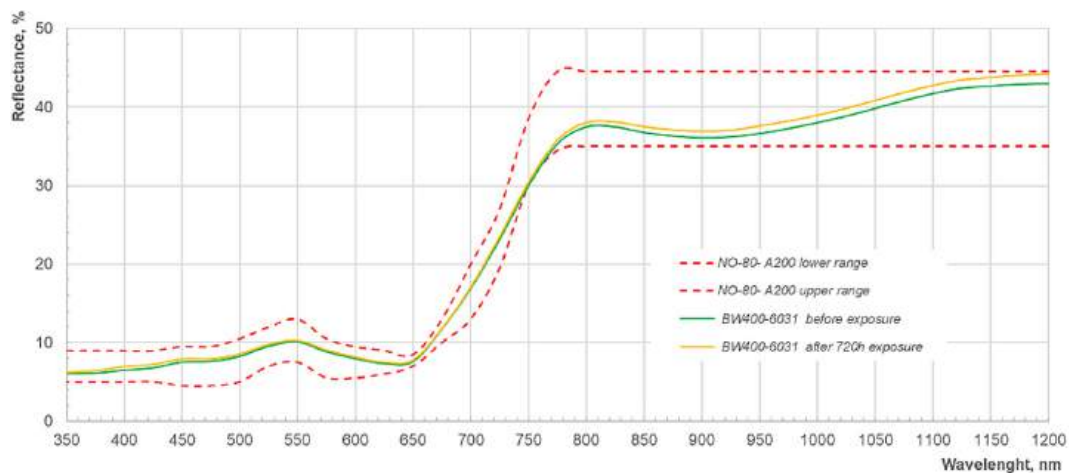


Fig. 17. Effect of condensation moisture on the reflectance of BW400–6031 (green) camouflage coating

coating consisting of BP450–1000 epoxy primer and BW400 special paints in green, brown and black, it was found that temperatures up to 250 °C do not cause visible damage to the coating in the form of flaking, blistering, cracking, etc. Over the temperature range tested there was no significant change in the gloss of the coatings. The colour of the green and brown topcoats changed towards more yellow and red, while the black colour remained without significant difference. The electromagnetic wave reflectance from the camouflage coatings in the 350–1200 nm range did not show a significant change. Temporary exposure of the camouflage coating to temperatures in the range 90–250 °C does not reduce the effective camouflage of the coating.

Cyclically changing ageing conditions taking into account the effects of UV-A radiation, corrosive atmospheres and low temperatures did not significantly deteriorate the key parameters of the camouflage coating system. The samples tested did not show any changes to the coating in the form of blistering, cracking, flaking or rusting. The average degree of corrosion of the samples after the test was 2.4 mm and was within the range permitted by PN-EN ISO 12944–6. The gloss of the exposed coatings increased by an average of 3 GU compared to the non-aged samples. Despite this, the gloss values still remained below 8 GU. The colour of the coatings changed slightly towards more blue. The spectral characteristics of the green-finish camouflage coating under the influence of cyclically changing climatic conditions did not change. The results show that, despite the use of a number of different ageing accelerators, there are no significant changes in parameters affecting the limitations of effective coating camouflage and system durability.

The test in the humidity chamber according to PN-EN ISO 6270–2 of the camouflage coating system did not cause any changes to the coating in the form of rusting, blistering, cracking or flaking. The gloss of the exposed coatings increased, but was still below 8 GU. The reflectance and colour parameters of the tested coatings were within the ranges allowed by the NO-80-A200 defence standard. The test performed confirmed the good resistance of the camouflage coating system to exposure conditions.

The operational exposures that are the subject of this article did not significantly affect the camouflage coating system tested and did not affect its effective camouflage properties

REFERENCES

1. Adamczak S., Makiela W. Analyzing variations in roundness profile parameters during the wavelet decomposition process using the matlab environment. *Metrology and Measurement Systems*. 2011; 18(1): 25–34.
2. Adamczak S., Miko E., Cus F. A model of surface roughness constitution in the metal cutting process applying tools with defined stereometry. *Strojnicki Vestnik. Journal of Mechanical Engineering*. 2009; 55: 45–54.
3. Auerbach W. *Leksykon wiedzy wojskowej*, Wydaw. Ministerstwo Obrony Narodowej; 1979.
4. Lee B.B. The evolution of concepts of color vision. *Neurociencias*. 2008; 1(4): 209–224.
5. Burakowski T. *Areologia – podstawy teoretyczne*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB; 2013.
6. Burakowski T., Wierzchoń W. *Surface engineering of metals – principle, equipment, technology*, CRC Press, Boca Raton – London – New York – Washington D. C.; 1999.
7. Chaves J. *Introduction to nonimaging optics*, CRC Press, Boca Raton – London – New York; 2008.
8. Dojlitko M. *Teoria dekonstrukcji komunikatu wizualnego. Narzędzia projektowania kamuflażu militarnego*, Akademia Sztuk Pięknych w Gdańsku; 2015.
9. Francuz P. *Imagia. W kierunku neurokognitywnej teorii obrazu*, Wydawnictwo KUL; 2013.
10. Hofer H., Carroll J., Williams D.R. *Photoreceptor mosaic*. W: Squire L. R. (red.), *Encyclopedia of neuroscience*, Elsevier; 2009.
11. ISO/CIE 11664–1:2019 (EN ISO/CIE 11664–1:2019) *Colorimetry – Part 1: CIE standard colorimetric observers*.
12. Kotnarowska D. *Powłoki ochronne*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej; 2010.
13. Kozłowska A. *Węzłowe zagadnienia naukowe i techniczne warunkujące rozwój technologii powłok ochronnych w XX wieku*, Instytut Mechaniki Precyzyjnej; 1987.
14. *Maskowanie wojsk i wojskowej infrastruktury obronnej*, DD/3.20, MON/SG WP; 2010.
15. Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B. Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. 2017; 65(1): 53–61.
16. Murphy C., Fraster B., Bunting F. *Real World Colour Management: Industrial-Strength Production Techniques 2nd Edition*, Pearson Education Inc.; 2004.

17. Newark T. *The Book of Camouflage: The art of Disappearing*, Osprey Publishing; 2013.
18. Pasiecznyński Ł., Radek N., Radziszewska-Wolińska J. Operational properties of anti-graffiti coating systems for rolling stock. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2018; 12(1): 127–134.
19. PN-EN ISO 12944-6:2018-3 Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 6: Laboratoryjne metody badań właściwości.
20. PN-EN ISO 2813:2014-11 Farby i lakiery – Oznaczenie wartości połysku pod kątem 20 stopni, 60 stopni i 85 stopni.
21. Polska Norma Obronna NO-80-A200:2021 – Farby specjalne do malowania maskującego. Wymagania i metody badań.
22. Przybył W., Mazurczuk R., Bogdanowicz K.A., Szczepaniak M. Wirtualne środowiska do oceny skuteczności maskowania i prowadzenia rozpoznania – metody badań i zastosowania, ASzWoj; 2022.
23. Przybył W., Mazurczuk R., Szczepaniak M., Radek N., Michalski M. Virtual methods of testing automatically generated camouflage patterns created using cellular automata. *Materials Research Proceedings*. 2022; 24: 69–77.
24. Radek N. Determining the operational properties of steel beaters after electrospark deposition. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2009; 4(44): 10–16.
25. Radek N., Sladek A., Bronček J., Bilka I., Szczotok A. Electrospark alloying of carbon steel with WC-Co-Al₂O₃: deposition technique and coating properties. *Advanced Materials Research*. 2014; 874: 101–106.
26. Radek N., Szczotok A., Gądek-Moszczak A., Dwornicka R., Bronček J., Pietraszek J. The impact of laser processing parameters on the properties of electro-spark deposited coatings. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018; 63(2): 809–816.
27. Toh K. B., Todd P. Camouflage that is spot on! Optimization of spot size in prey-background matching. *Evolutionary Ecology*. 2017; 31: 447–461.
28. Yang X., Xu W., Liu J., Jia Q., Liu H., Ran J., Zhou L., Zhang Y., Hao Y., Liu C. A small-spot deformation camouflage design algorithm based on background texture matching. *Defence Technology*. 2021; 13 October: 1–10.

Publikacja 13

MAREK MICHALSKI^{1,2}

e-mail: mmichalski@barwa.kielce.pl

ORCID: 0000-0003-0419-7886

PAULINA ŁABĘCKA²

e-mail: plabecka@barwa.kielce.pl

ORCID: 0009-0000-0151-0086

TOMASZ KOZIEŁ²

e-mail: tkoziel@barwa.kielce.pl

ORCID: 0009-0004-1764-9380

¹Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering, Al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce, Poland²Firma Handlowa Barwa Jarosław Czajkowski, ul. Warkocz 3-5, 25-253 Kielce, Poland

DOI: 10.15199/40.2025.5.2

Corrosion resistance of masking coating systems used in military technology

Odporność na korozję maskujących systemów powłokowych stosowanych w technice wojskowej

The results of experimental tests of coating systems for military applications were presented. The assessment of properties was carried out on the basis of accelerated ageing tests in a salt spray chamber and in corrosion resistance tests using the potentiodynamic method and impedance studies. The tests were carried out for masking two-layer coating systems made in three variants: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2) and coating system modified with glass microspheres (SP3). Analysis of the results showed that the above coating systems were characterized by similar corrosion resistance. The SP3 system was characterized by the smallest delamination and corrosion around the scratch.

Keywords: camouflage, coatings system, surface roughness, corrosion protection, salt spray chamber

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych systemów powłokowych do zastosowań militarnych. Ocenę właściwości przeprowadzono na podstawie badań przyspieszonego starzenia w komorze solnej oraz badań odporności korozyjnej metodą potencjodynamiczną i impedancyjną. Badania przeprowadzono dla maskujących dwuwarstwowych systemów powłokowych wykonanych w trzech wariantach: system powłokowy (SP1), system powłokowy modyfikowany nanorurkami węglowymi (SP2) i system powłokowy modyfikowany mikrosferami szklanymi (SP3). Analiza uzyskanych wyników wykazała, że systemy powłokowe charakteryzowały się podobną odpornością korozyjną. System SP3 charakteryzował się najmniejszym rozwarstwieniem i korozją wokół zarysowania.

Słowa kluczowe: kamuflaż, system powłokowy, chropowatość powierzchni, ochrona antykorozyjna, komora solna

1. Introduction

Corrosion is a significant economic and environmental challenge in many industrial sectors. Financial losses resulting from structural degradation, safety hazards and negative impacts on ecosystems emphasize the need for effective protective strategies. One of the solutions used in the fight against corrosion are anti-corrosion coatings, which act as a protective barrier, preventing or slowing down the corrosion processes. These coatings limit the contact of the material with corrosive factors such as moisture, oxygen, chemicals or contaminants, significantly extending its durability. There are three main types of anti-corrosion coatings: organic, inorganic and metallic. Each of them is characterized by unique properties, mechanisms of action and applications, thanks to which they can be adapted to specific corrosion challenges [1]. Organic coatings are among the most commonly used protective technologies. They are characterized by good adhesion to the substrate, which

additionally increases their protective effectiveness. The possibility of adjusting the thickness and composition of the coating makes them widely used in various industries, offering flexible and effective anti-corrosion solutions [2]. The evaluation of the effectiveness of anti-corrosion coatings includes various testing methods, both standard laboratory tests and accelerated techniques simulating operating conditions. A key aspect of the research is also the analysis of the long-term durability and reliability of coatings, which allows for a better understanding of their durability over longer periods of use. Commonly used testing methods allow for the evaluation of basic properties of coatings, such as adhesion, corrosion resistance, mechanical strength and barrier properties [3]. One of the most common tests is the salt spray test, which allows for the assessment of the corrosion resistance of coatings in an aggressive environment, accelerating the degradation processes under controlled conditions. Adhesion tests, such as the pull-off test, assess the strength of the coating's bond to the substrate, which is crucial

■ Received / Otrzymano: 06.03.2025. Accepted / Przyjęto: 07.04.2025

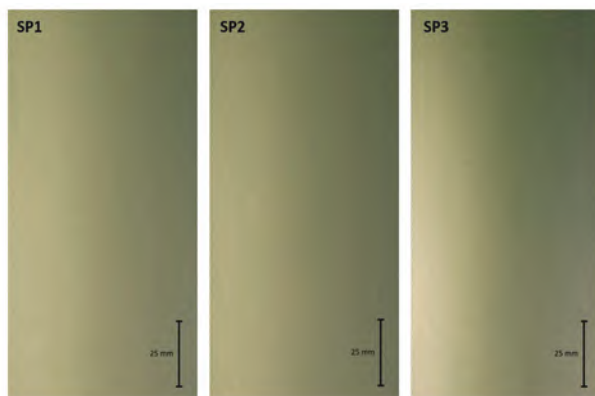


Fig. 1. View of the coating systems before tests

Rys. 1. Widok systemów powłokowych przed testami

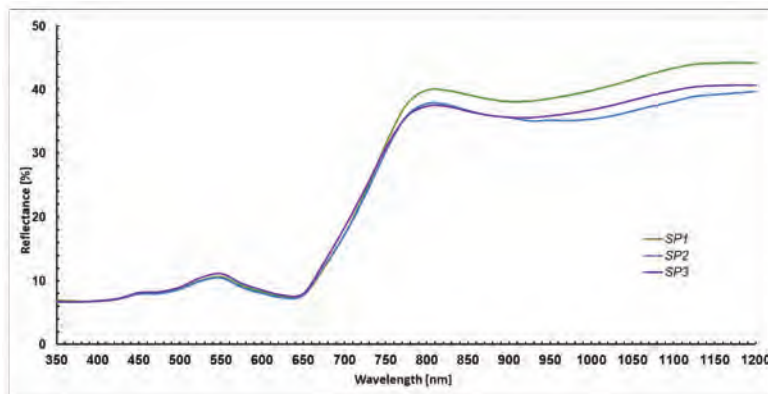


Fig. 2. Spectral characteristics of the masking coating systems

Rys. 2. Charakterystyka spektralna maskujących systemów powłokowych

for its durability in operating conditions. Mechanical tests, including hardness tests and abrasion resistance tests, allow for determining the coating's ability to withstand mechanical loads and external factors causing degradation. The appropriate selection of testing methods allows for a comprehensive evaluation of anti-corrosion coatings, which is necessary for the development of effective and durable corrosion protection systems [2]. Camouflage coating systems play a key role in securing military equipment, protecting it from environmental factors such as moisture, temperature, UV radiation, and precipitation. They are subject to exposures related to their intended use, such as warfare agents, disinfectants, petroleum products, and are also exposed to mechanical damage, including scratching. However, the most important function they perform is camouflage. The purpose of camouflage is to conceal military equipment from the enemy, prevent its recognition, and mislead the enemy all of which are extremely important during military operations [4]. Modern reconnaissance technologies use multispectral optoelectronic sensors, which allow for monitoring in a wide spectral range. Therefore, camouflage must be adapted to different types of detection, including the optical range (from ultraviolet, through visible wavelengths, to near-infrared), as well as thermal, radar, magnetic, and acoustic ranges. In the visible range, these are features such as colour, shape, size, gloss, and surface texture. Effective camouflage therefore requires such modification of these features so that the object hides in the environment as best as possible and is more difficult to detect by various observation systems [5]. Currently, there is a rapid development of coatings (metallic, ceramic and paint) that can be successfully applied to armaments and military equipment [6–9].

The aim of the work was to present the results of operational tests of paint coating systems developed using carbon nanotubes and glass microspheres of appropriately selected sizes, used in an appropriately selected multilayer coating system. Thanks to this solution, it will be possible to extend the operational durability of masking coating systems. As part of the research on operational properties, the results of corrosion tests of masking coating systems were presented.

2. Materials and methodology

The tests were performed on DC01 alloy steel samples measuring 150×100×1 mm. The sample surfaces were prepared using the following process: they were initially cleaned with XPA10006 re-

moval, then sanded using a rotary sander with P80 grit sandpaper, and then washed again with XPA10006 remover. SATA spray guns with appropriate nozzles and a Blowtherm spray booth were used to apply the paint systems. Three different coating systems were applied to the prepared steel surfaces using pneumatic spraying: (i) two-layer coating system (SP1): BP450-1000/N 2-component epoxy primer, BW400-6031 2-component polyurethane masking coat green; (ii) two-layer coating system (SP2): BP450-1000/N 2-component epoxy primer, BW400-6031 2-component polyurethane masking coat green modified with carbon nanotubes in the amount of 0.05% by mass; (iii) two-layer coating system (SP3): BP450-1000/N 2-component epoxy primer, BW400-6031 2-component polyurethane masking coat green modified with glass microspheres in the amount of 2.4% by mass. The amount of modifiers used was selected so that they did not significantly affect the basic masking parameters such as color, gloss, and spectral characteristics.

The applied coatings were cured at 60°C for 60 min, and then the samples were conditioned for 21 days at room temperature and relative humidity of 50% ± 5%. After the conditioning time, the samples were subjected to tests of selected properties.

Figure 1 shows the view of the coating systems, while Figure 2 shows the spectral characteristics of the tested coating systems.

Thickness measurements of the masking systems were performed according to standard [10] using the magnetic induction method. The test was performed using an Elcometer 456T FNF LF01085 thickness gauge with an angle probe (Elcometer).

The surface roughness test was carried out in accordance with the standard [11], which specifies roughness parameters and methods for their determination. The MITUTOYO SJ-210 profilometer was used for the tests.

Gloss measurements were taken using a Byk micro-Tri-gloss (BYK-Gardner) fitted with polished black glass as the working measurement standard. Gloss measurements were performed according to standard [12] using a measurement geometry of 85°, which is designed for surfaces with a matt finish.

Colour parameter measurements were conducted using a Minolta Spectrophotometer CM-700d (Konica Minolta). The measurements were performed with the following settings: d/8, SCI, 10°.

The spectral characteristics of the reflected radiation (reflectance) were performed with a Jasco V-770 spectrophotometer (Jasco) at the following measurement parameters: measuring range 350–1200 nm, measurement every 0.2 nm.

The salt spray resistance test was conducted based on the standard [13]. The test used a brine solution with a concentration of 50 g/L of sodium chloride (NaCl), dissolved in deionized water with a conductivity of less than 20 μS/cm at 25°C. This solution was sprayed to create a salt mist in the test chamber of the WKD SC450 chamber from Weiss Umwelttechnik GmbH, which allowed for simulating corrosive conditions. The temperature inside the chamber during the test was 35°C, while the pH of the collected solution was in the range of 6.5–7.2.

The corrosion resistance tests of the masking systems were performed using the potentiodynamic method (LSV) and the impedance spectroscopy method (EIS) using the AutoLab PGSTAT 100 potentiostat. The electrochemical LSV and EIS tests were performed using a Faraday cage. A 0.5M NaCl solution (pH 6.4) was used for the tests. The tests were conducted at room temperature. The test samples with the applied coating systems were drilled to obtain a blind hole with a diameter of φ 1 mm and a depth of 0.5 mm. The aim of this operation was to penetrate the substrate material in order to accelerate the corrosion tests. Before the electrochemical EIS and LSV tests, the potential changes over time (*E*(s)) were measured, which allowed, among others, to determine the stabilization time of the open circuit potential (EOCP). Electro-chemical studies were carried out after approximately 60 min of stabilization time in a three-electrode system (test electrode – reference electrode – auxiliary electrode (platinum)). The reference electrode used was NEK (saturated calomel electrode with a potential of *E* = +0.244 V). Impedance studies (EIS) were conducted in a three-electrode system in the frequency range of 105–103 Hz, with a sinusoidal signal amplitude of 20 mV, and an open circuit potential. Impedance spectra were analyzed using the EQUIVCRT Baukamp program. The selection of the electrical equivalent circuit for the obtained impedance spectra was based on both the observed corrosion damage and the minimal fitting errors of the circuit elements, as determined by the least squares method. Potentiodynamic studies were conducted in an identical three-electrode system up to a potential of 1000 mV. The material was polarized at a potential change rate of 0.2 mV/s.

Potentiodynamic polarization curves were used to determine the corrosion potential (*E_{corr}*) and corrosion current density (*j_{corr}*). Tafel line extrapolation is one of the most popular techniques for estimating corrosion rates. Extrapolation of the anodic and/or cathodic Tafel lines for a controlled charge transfer reaction gives *E_{corr}* and *j_{corr}* at the corrosion potential. According to Tafel's law (1) [14]:

$$E - E_{0,c} = b_c \log (j_c/j_0) \tag{1}$$

is the linear cathodic branch of the polarization curve, and (2):

$$E - E_{0,a} = b_a \log (j_a/j_0) \tag{2}$$

is the linear anodic branch of the polarization curve. In equations (1) and (2), *E_{0,c}*, *E_{0,a}*, *j₀*, *b_c* and *b_a* are constant parameters characterizing the polarization curves.

3. Results

3.1. Measuring thickness and roughness

The device was calibrated using calibration foils to the expected thickness range. Measurements were performed by placing the device probe perpendicularly to the tested surface, taking into account the measurement distance from the edge of the sample.

Table 1 presents the average thickness results obtained from 100 measurements on each coating system.

Table 1. Results of thickness measurements of coating systems
Tabela 1. Wyniki pomiarów grubości systemów powłokowych

Coating system	Thickness, μm	Standard deviation, μm
SP1	154	7
SP2	159	6
SP3	167	8

Each of the analyzed systems was subjected to triplicate measurements of the *Ra*, *Rq* and *Rz* roughness parameters. The average values of the results for the three coating systems are presented in Table 2.

Table 2. Roughness measurement results of coating systems
Tabela 2. Wyniki pomiarów chropowatości systemów powłokowych

Coating system	<i>Ra</i> , μm	<i>Rq</i> , μm	<i>Rz</i> , μm
SP1	1.83	2.25	10.55
SP2	2.06	2.57	12.40
SP3	2.28	2.76	11.80

3.2. Corrosion tests of masking systems

Tests in natural conditions fully reflect real operating conditions, and the results are directly related to the actual behaviour of coatings in given environmental conditions. However, testing coatings in natural conditions is time-consuming and expensive, which is why accelerated methods are used to assess the durability of coatings. Accelerated corrosion tests are aimed at simulating and intensifying corrosive processes that may occur in real operating conditions by using appropriately selected factors [15]. Factors influencing accelerated corrosion include: temperature, relative humidity, occurrence and concentration of corrosive components [16]. The natural method provides information on the actual behaviour of coatings in operating conditions, while the accelerated method allows for a quick and controlled resistance test in simulated conditions [15].

3.2.1. Testing in a salt spray chamber

Before placing the samples with applied coating systems in the aging chamber, one vertical cut was made on the samples to the substrate. After the exposure time, the loose coating was removed from the scratch to determine the degree of delamination and corrosion in accordance with standard [17]. Table 3 presents the

Table 3. Results of the evaluation of masking coating systems after testing in a salt spray chamber

Tabela 3. Wyniki oceny maskujących systemów powłokowych po testach w komorze solnej

Results	Masking coating system		
	SP1	SP2	SP3
Exposure time to salt spray, h	1008	1008	1008
Degree of blistering	0 (S0)	0 (S0)	0 (S0)
Degree of rust	Ri0	Ri0	Ri0
Degree of exfoliation	0 (S0)	0 (S0)	0 (S0)
Degree of cracking	0 (S0)	0 (S0)	0 (S0)
Degree of filiform corrosion	0 (S0)	0 (S0)	0 (S0)
Degree of delamination from the scratch, mm	1.5	1.6	1.0
Degree of corrosion around the scratch, mm	1.1	1.1	0.8

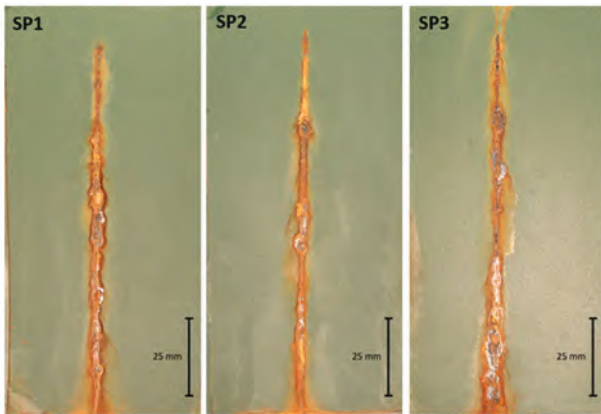


Fig. 3. View of the coating systems after salt spray test

Rys. 3. Widok systemów powłokowych po teście w komorze solnej

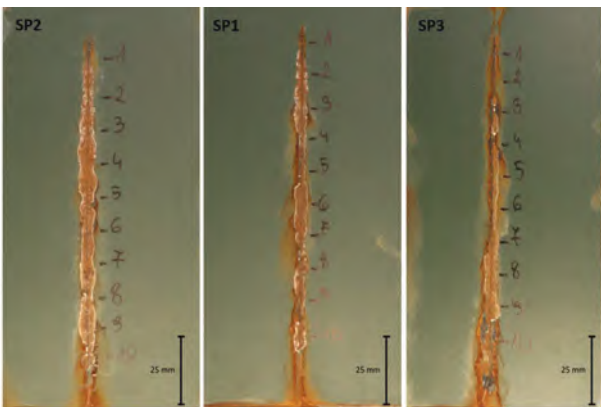


Fig. 4. View of the coating systems after removing the non-adherent part of the coating system.

Rys. 4. Widok systemów powłokowych po usunięciu nieprzylegającej części systemu powłokowego

average results from the evaluation of five samples from each masking system, Figure 3 shows the view of the coating after the test, while Figure 4 shows the view of the coating after the test and removal of the loose part of the coating.

As a result of the salt spray test, the masking coating systems did not show any significant changes on the surface after 1008 h of exposure, except for the area around the scratch. Among the tested systems, the SP3 coating system was characterized by the lowest degree of delamination and corrosion around the scratch, which indicates a higher corrosion resistance compared to the other systems. The effect of the salt spray test on gloss, colour and spectral characteristics was also examined. Table 4 presents the results of gloss measurements of the tested coating systems. The result is the average of the measurements obtained for five tested samples for each coating system.

The results of the conducted test showed a slight increase in gloss for the SP1, SP2 coating system compared to the state before the test. In the case of the SP3 masking system, the gloss decreased by 1.2 GU.

Table 5 presents the results of the colour measurements after the salt spray test, and the change in colour ΔE^*_{ab} compared to the measurement before the test. Figure 5 graphically illustrates the change in colour in the L^* , a^* , b^* coordinate system.

The spectral characteristics for the SP1, SP2 and SP3 coating systems, taken before and after exposure in the salt spray chamber, are shown in Figures 6–8.

Table 4. Gloss of coating systems before and after exposure to salt spray, measured at an 85° geometry

Tabela 4. Połysk systemów powłokowych przed i po wystawieniu na działanie mgły solnej, mierzony przy geometrii 85°

Coating system	Gloss, GU		
	before exposure	after exposure	difference
SP1	3.9	4.0	0.1
SP2	4.2	4.4	0.2
SP3	5.5	4.3	-1.2

Table 5. Colour parameters of coating systems after exposure to salt spray

Tabela 5. Parametry barwy systemów powłokowych po wystawieniu na działanie mgły solnej

Colour parameter	Coating system		
	SP1	SP2	SP3
L^*	36.22	35.89	35.56
a^*	-5.38	-5.65	-5.6
b^*	5.17	4.89	5.82
ΔE^*_{ab}	0.76	0.69	1.36

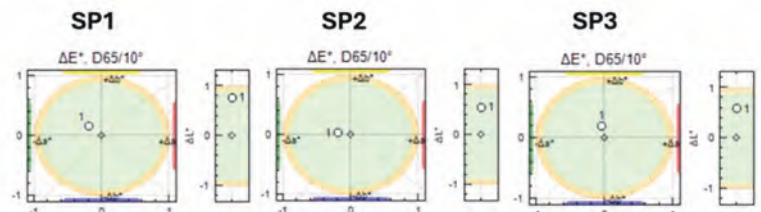


Fig. 5. Colour change for masking coating systems after exposure to salt spray. 1 – colour parameters after testing

Rys. 5. Zmiana koloru maskujących systemów powłokowych po wystawieniu na działanie mgły solnej. 1 – parametry barwy po przeprowadzeniu testów

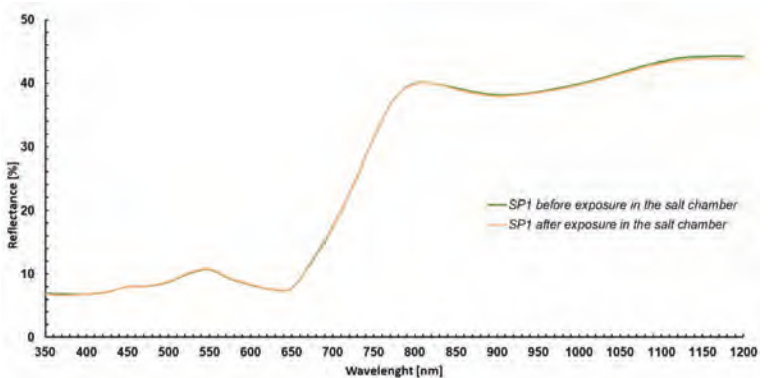


Fig. 6. Spectral characteristics of the SP1 masking system before and after testing in a salt spray chamber

Rys. 6. Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP1 przed i po testach w komorze solnej

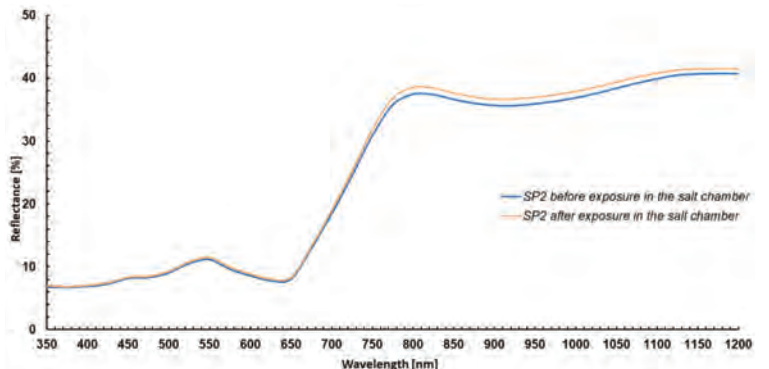


Fig. 7. Spectral characteristics of the SP2 masking system before and after testing in a salt spray chamber

Rys. 7. Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP2 przed i po testach w komorze solnej

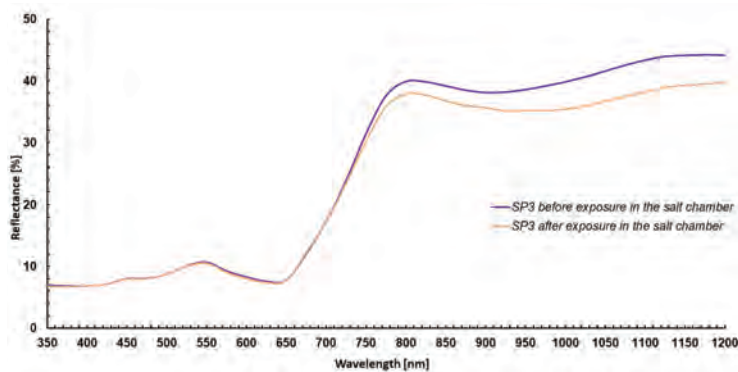


Fig. 8. Spectral characteristics of the SP3 masking system before and after testing in a salt spray chamber

Rys. 8. Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP3 przed i po testach w korozji solnej

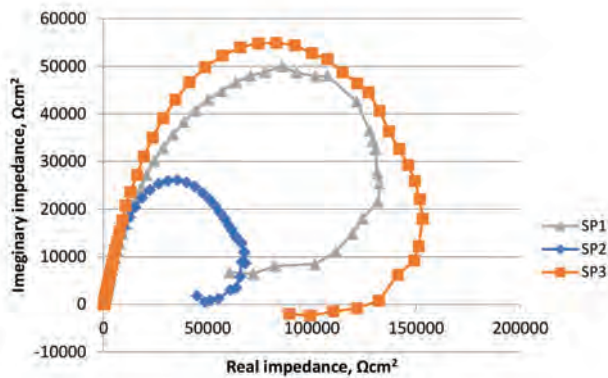


Fig. 9. Potentiodynamic curves of SP1, SP2, SP3 coating systems exposed to 0.5 M NaCl

Rys. 9. Krzywa potencjodynamiczna systemów powłokowych SP1, SP2, SP3 wystawionych na działanie 0,5 M NaCl

3.2.2. Testing of corrosion resistance by the potentiodynamic method

The corrosion resistance tests of the masking systems were performed using the potentiodynamic method (LSV) and the impedance spectroscopy method (EIS). Figure 9 shows the potentiodynamic curves for the tested coating systems.

Analysis of the graph showed that the SP3 system was characterized by the highest corrosion potential, while the SP1 system was characterized by the lowest corrosion current density. The assessment of the corrosion resistance of the tested coating systems, carried out based on the results of classical electrochemical tests, showed comparable corrosion potential values ranging from of -530 mV to -460 mV for the tested coating systems. The obtained E_{corr} value indicates when the corrosion processes will start on the tested steel substrate. The lower the potential, the greater the material's tendency to corrode, while the analysis of the corrosion current density (j_{corr}) indicates that the highest corrosion resistance was characterized by the SP1 coating system, whose corrosion current density was $0,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, while the SP2 coating system was characterized by a corrosion current density of $0,33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

An analysis of Figure 10 reveals a typical capacitive loop, as well as the presence of an inductive loop. The occurrence of an inductive loop in EIS tests can be caused by various processes, including active and intensive dissolution of the substrate (accelerated anodic

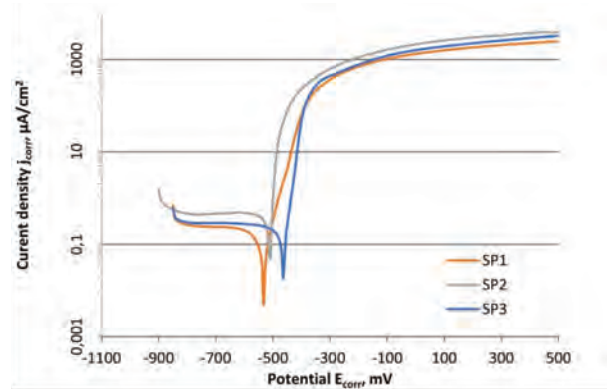


Fig. 10. Nyquist impedance spectrum of coating systems exposed to 0.5 M NaCl

Rys. 10. Widmo impedancji Nyquista systemów powłokowych wystawionych na działanie 0,5 M NaCl

processes), adsorption processes of corrosion products, hydrogen release and pitting corrosion. In the analyzed cases (based on corrosion damage), it can be assumed that intensive dissolution of the substrate occurs within the damaged coating. The resulting capacitive loop of the SP3 system has a larger diameter compared to the other systems. This suggests slightly better corrosion resistance of SP3.

4. Conclusions

In the test conducted in a salt spray chamber, the masking coating systems did not show any significant differences between each other. Among the tested systems, the SP3 coating system was characterized by the lowest degree of delamination and corrosion around the scratch. There were no significant differences in gloss after the test. The SP3 system exhibited the greatest colour change, with a ΔE_{ab}^* value of 1.36, while the spectral characteristics in the 750–1200 nm range were approximately 5% lower after the test.

In the corrosion resistance test using the potentiodynamic method, the SP3 system was characterized by the highest corrosion potential of -460 mV, while the SP1 system was characterized by the lowest corrosion current density of $0,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. In the ESI impedance spectroscopy test, the SP3 system was characterized by the largest capacitive loop, which suggests slightly better corrosion resistance of the SP3 system.

Since only the topcoats were subject to modification of the systems in these tests, no significant effect on the anti-corrosion properties of the paint systems was observed. The main role in anti-corrosion protection was played by the anti-corrosion primer BP450-1000/N, which was not subject to modification.

No significant effect on the anti-corrosion properties of the masking system was observed as a result of using additives modifying the topcoat. However, in the conducted tests, a slightly better anti-corrosion effect was observed in the masking system in which a modifier in the form of glass microspheres was used.

Acknowledgement

Work carried out as part of the project of the Ministry of Science and Higher Education "Implementation Doctorate I" (5th edition) No. DWD/5/0043/2021 – entitled "The influence of modifying additives on the operational properties of paint coating systems used in military technology".

CRediT autorship contribution statement

Marek Michalski: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing

Paulina Łabęcka: Visualization

Tomasz Kozieł: Visualization

BIBLIOGRAPHY

- [1] R. Saleh, H. Fathi, H. Shi, H. Wei. 2023. "Advanced corrosion protection through coatings and surface rebuilding." *Coatings* 13(1): 180. DOI: 10.3390/coatings13010180.
- [2] H. Aljibori, A. Al-Amiery, A. Kadhum. 2023. "Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review." *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* 12(4): 1476–1520.
- [3] A. Trentin, A. Pakseresht, A. Duran, Y. Castro, D. Galusek. 2022. "Electrochemical characterization of polymeric coatings for corrosion protection: a review of advances and perspectives." *Polymers* 14(12): 2306. DOI: 10.3390/polym14122306.
- [4] G. Grundmeier, W. Schmidt, M. Stratmann. 2000. "Corrosion protection by organic coatings: electrochemical mechanism and novel methods of investigation." *Electrochemical Acta* 45(15-16): 2515–2533. DOI: 10.1016/S0013-4686(00)00348-0.
- [5] L. Hepfinger, C. Stewardson, K. Rock, L. Leshner, F. Kramer, S. McIntosh, J. Patterson, K. Isherwood, G. Rogers, N. Hien, Nguyen. 2010. "Soldier camouflage for operation enduring freedom (OEF): Pattern-in-picture (PIP) technique for expedient human-in-the-loop camouflage assessment." Raport US Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center, Natick (MA), USA.
- [6] M. Michalski U. Pisarek, N. Radek, W. Przybył, M. Szczepaniak. 2023. "The influence of operational exposure on changes in parameters of effective camouflage of coatings used in military technology." *Advances in Science and Technology Research Journal* 17(1): 182–196. DOI: 10.12913/22998624/156940.
- [7] N. Radek. 2009. "Determining the operational properties of steel beaters after electro spark deposition." *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 4(44): 10–16.
- [8] N. Radek. 2023. "Properties of WC-Co coatings with Al₂O₃ addition." *Production Engineering Archives* 29(1): 94–100. DOI: 10.30657/pea.2023.29.11.
- [9] N. Radek, M. Michalski, R. Mazurczuk, B. Szczodrowska, I. Plebankiewicz, M. Szczepaniak. 2023. "Operational tests of coating systems in military technology applications." *Eksploracja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 25(1): 1–13. DOI: 10.17531/ein.2023.1.12.
- [10] ISO 2808:2019: Paints and varnishes. Determination of film thickness.
- [11] ISO 21920-2:2021: Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [12] PN-EN ISO 2813: Farby i lakiery. Oznaczenie polysku zwierciadlanego niemetalicznych powłok lakierowych pod kątem 20 stopni, 60 stopni i 85 stopni.
- [13] ISO 9227:2022: Corrosion tests in artificial atmospheres. Salt spray tests.
- [14] E. Poorqasemi, O. Abootalebi, M. Peikari, F. Haqdar. 2009. "Investigating accuracy of the Tafel extrapolation method in HCl solutions." *Corrosion Science* 51: 1043–1054.
- [15] F. Deflorian, S. Rossi, L. Fedrizzi, C. Zanella. 2007. "Comparison of organic coating accelerated tests and natural weathering considering meteorological data." *Progress in Organic Coatings* 59(3): 244–250. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2006.09.036.
- [16] E. M. Oliveira, J. R. G. Carneiro, V. F. Cunha Lins. 2009. "Evaluation of the atmospheric corrosion resistance of AISI A-36 steel painted with coatings based on epoxy and poly(urethane) resins using semi-accelerated testing." *Journal of Coatings Technology and Research* 6(2): 213–219. DOI: 10.1007/s11998-008-9135-3.
- [17] PN-EN ISO 4628-8:2013: Paints and varnishes. Evaluation of degradation of coatings. Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance – Part 8: Assessment of degree of delamination and corrosion around a scribe or other artificial defect.



chemik-czasopismo.pl

ODKRYWAJ
PUBLIKUJ
INSPIRUJ

CZASOPISMO PEŁNE CHEMII

Chemia stosowana: badania stosowane, technika, technologia przemysłowa, kontrola procesów, zarządzanie: jakością, środowiskiem i bezpieczeństwem oraz zagadnienia organizacyjno-prawne.

nauka technika rynek

Decyzją Zarządu Głównego SITPChem, publikacja prac naukowych jest dla autorów bezpłatna. Warunkiem przyjęcia pracy jest pozytywna ocena recenzentów (obowiązuje dwustopniowy proces recenzji).

"CHEMIK" Czasopismo Naukowo-Techniczne założone w 1948 roku. Wydawane od 2022 r. przez Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego i Politechnikę Wrocławską



Publikacja 14

MAREK MICHALSKI*

F. H. Barwa, Kielce, Polska / Politechnika Świętokrzyska, Kielce, Polska

BADANIA STARZENIOWE MASKUJĄCYCH SYSTEMÓW POWŁOKOWYCH DO ZASTOSOWAŃ W TECHNICIE WOJSKOWEJ

AGING TESTS OF MASKING COATING SYSTEMS FOR MILITARY TECHNOLOGY APPLICATIONS



ABSTRAKT: W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych systemów powłokowych do zastosowań w technice wojskowej. Ocenę właściwości przeprowadzono na podstawie przyspieszonych badań starzeniowych w komorach z promieniowaniem UV-A, UV-B, w komorze z lampami ksenonowymi i w badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych. Badania przeprowadzono dla maskujących systemów powłokowych dwuwarstwowych wykonanych w trzech wariantach: system powłokowy (SP1), system powłokowy modyfikowany nanorurkami węglowymi (SP2), system powłokowy modyfikowany mikrosferami szklanymi (SP3). Analiza uzyskanych wyników wykazała, że w/w systemy powłokowe charakteryzowały się zbliżoną odpornością na przyspieszone starzenie. System SP3 charakteryzował się najmniejszą zmianą połysku i koloru w badaniach z promieniowaniem UV-A i sztucznym świetle dziennym. Natomiast system SP2 odznaczał się najmniejszą zmianą koloru w badaniu z użyciem promieniowania UV-B.

SŁOWA KLUCZOWE: kamuflaż, system powłokowy, badania starzeniowe, UV-A, UV-B, pojazdy i sprzęt wojskowy.

ABSTRACT: The article presents the results of experimental tests of coating systems for military applications. The assessment of properties was carried out on the basis of accelerated ageing tests in UV-A and UV-B radiation chambers, in a chamber with xenon lamps and in tests in natural atmospheric conditions. The tests were carried out for masking two-layer coating systems made in three variants: coating system (SP1), coating system modified with carbon nanotubes (SP2), coating system modified with glass microspheres (SP3). The analysis of the obtained results showed that the above coating systems were characterized by similar resistance to accelerated ageing. The SP3 system was characterized by the smallest change in gloss and color in tests with UV-A radiation and artificial daylight. The SP2 system was characterized by the smallest color change in the test using UV-B radiation.

KEYWORDS: camouflage, coating system, ageing tests, UVA, UVB, vehicles and military equipment.

* mgr inż., Marek Michalski, F. H. Barwa, Kielce, Poland / Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering, Poland

 <https://orcid.org/0000-0003-0419-7886>,  mmichalski@barwa.kielce.pl

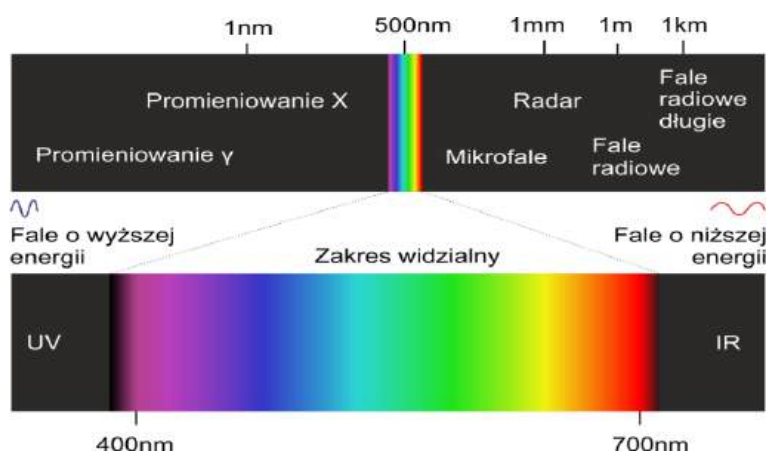
Copyright (c) 2025 Mirosław Laskowski. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

WPROWADZENIE

Współczesne pole walki charakteryzuje się dynamicznym rozwojem technologii wykrywania i identyfikacji celów, co stawia przed siłami zbrojnymi wyzwanie skutecznego ukrycia swoich wojsk. Maskowanie jest dość szerokim pojęciem i może obejmować poziom strategiczny, operacyjny czy bezpośredni¹. Maskowanie, będące jednym z kluczowych elementów taktyki wojskowej, ewoluowało od prostych metod kamuflażu wizualnego jak liście, gałęzie, siatki maskujące do zaawansowanych systemów powłokowych zdolnych do przeciwdziałania różnorodnym systemom detekcji w zakresie ultrafioletu, światła widzialnego, podczerwieni, promieniowania radarowego i termalnego. Głównym celem maskowania jest zminimalizowanie prawdopodobieństwa wykrycia przez przeciwnika, co przekłada się na zwiększenie przeżywalności jednostek na polu walki. W tym kontekście, polimerowe systemy powłokowe odgrywają istotną rolę, umożliwiając adaptację do różnych warunków środowiskowych oraz przeciwdziałanie różnym typom sensorów. Stosowane sensory multispektralne, które umożliwiają prowadzenie rozpoznania w wielu zakresach promieniowania elektromagnetycznego, nie zastąpią oka ludzkiego, które w dalszym ciągu pozostaje podstawowym „przyrządem” obserwacyjnym², gdzie przyjmuje się, że zakres widzialny to od 400 nm do 700 nm (rys. 1).

Rys. 1.

Schemat widma promieniowania elektromagnetycznego



Źródło: Przybył W., Mazurczuk R., Bogdanowicz K.A., Szczepaniak M., Wirtualne środowiska do oceny skuteczności maskowania i prowadzenia rozpoznania – metody badań i zastosowania, ASzWoj, 2022.

¹ *Maskowanie operacyjne*, DD-3.31(A), MON/CDiSzSZ, Bydgoszcz 2018.

² P. Francuz, *Imagia. W kierunku neurokognitywnej teorii obrazu*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2013.

Powłoki ochronne odgrywają fundamentalną rolę w zabezpieczaniu materiałów i konstrukcji przed szkodliwym wpływem czynników zewnętrznych. Współczesny przemysł, opierający się na zaawansowanych technologiach i materiałach, nie może funkcjonować bez skutecznych systemów ochronnych, które przedłużają żywotność komponentów, minimalizują koszty konserwacji oraz zapewniają bezpieczeństwo użytkowania. Polimerowe powłoki stanowią element systemu: otoczenie – powłoka – podłoże. Zabezpieczają one podłoże w tym metale, tworzywa sztuczne, drewno, beton przed destrukcyjnym oddziaływaniem czynników środowiska eksploatacji.

Do głównych funkcji polimerowych systemów powłokowych należą:

- zabezpieczenie przed korozją,
- zabezpieczenie przed zmiennymi warunkami atmosferycznymi,
- zabezpieczenie przed promieniowaniem słonecznym,
- zabezpieczenie przed szczególnymi warunkami eksploatacji np. woda morska, gleba, zanieczyszczenia, ścieranie, itp.

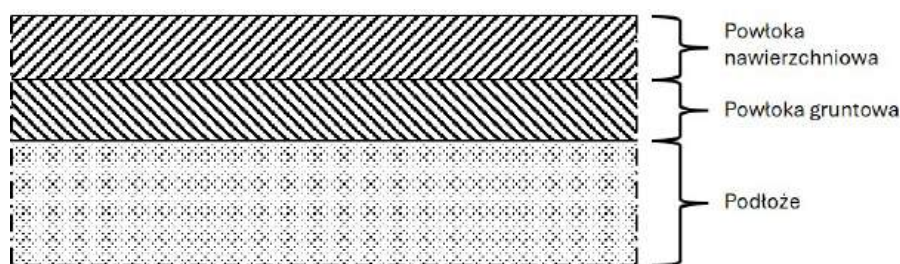
W przypadku maskujących systemów powłokowych stosowanych w technice wojskowej pełnią dodatkowe funkcje do których należą:

- maskowanie sprzętu w określonym zakresie promieniowania elektromagnetycznego,
 - odporność na media agresywne, w tym paliwa, smary,
 - odporność na środki bojowe i środki do likwidacji skażeń,
 - odporność na zarysowanie,
 - odporność na temperaturę,
- i inne.

Maskujące systemy powłokowe składają się zwykle z kilku warstw, z których każda pełni określoną funkcję. Powłoka gruntowa zapewnia dobrą przyczepność do podłoża i odporność korozyjną. Powłoka nawierzchniowa zapewnia odporność na zewnętrzne narażenia. Mogą również występować powłoki pośrednie niezbędne do zapewnienia skutecznego maskowania w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Na rysunku 2 przedstawiono typowy lakierniczy system powłokowy.

Rys. 2.

Schemat typowego polimerowego systemu powłokowego



Źródło: Michalski M, Analiza struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych do zastosowań militarnych, Mechanik, 2024.

Warunki atmosferyczne takie jak zmienna temperatura, wilgotność powietrza, opady atmosferyczne takie, jak śnieg, deszcze, grad oraz promieniowanie słoneczne wpływają na trwałość eksploatacyjną powłoki³. Promieniowanie ultrafioletowe wchodzące w skład promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi ma szczególnie destrukcyjny wpływ na trwałość maskujących systemów powłokowych. Powyższe czynniki, w połączeniu z efektami wtórnymi, takimi jak zanieczyszczenia atmosferyczne, zjawiska biologiczne i kwaśne deszcze, działając razem, powodują uszkodzenie powłoki⁴. Uszkodzenia obejmują między innymi utratę połysku, blaknięcie, żółknięcie, pękanie, łuszczenie, kruchość, utratę wytrzymałości na rozciąganie i rozwarstwianie⁵. Ekspozycja na naturalne warunki jest jedną z metod badania odporności powłok polimerowych na czynniki zewnętrzne. Testy naturalnej ekspozycji mają wiele zalet: są realistyczne, niedrogie i stosunkowo łatwe do przeprowadzenia. Ich podstawową wadą jest długi czas oczekiwania na wyniki oraz konieczność monitorowania informacji na temat wszystkich warunków wpływających na degradację (natężenie promieniowania UV, temperatura, wilgotność względna itp.). Prowadzi to do uzyskania wyników charakterystycznych i reprezentatywnych dla danej strefy klimatycznej, a w niektórych przypadkach jedynie dla danego miejsca prowadzenia testów⁶. Alternatywą dla długotrwałych

³ D. Kotnarowska, *Destrukcyjność powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych*, Wydawnictwo UT-H w Radomiu, 2013.

⁴ Rabek J.F.: *Polymer photodegradation of polymers: physical characteristic and applications*, Springer- verlag; Berlin 1996.

⁵ S.P. Pappas, *Weathering of coatings-formulation and evaluation*, Prog. Org. Coat., 17(2) (1989), 107-114.

⁶ J. Pospíšil, S. Nešpurek, *Photostabilization of coatings. Mechanisms and performance*, Prog. Polym. Sci. 25 (2000). s. 1261–1335.

testów w naturalnych warunkach stanowią komory przyspieszonego starzenia i odporności na światło. Tego typu urządzenia zapewniają szybkie i powtarzalne wyniki⁷. Badania powłok w komorach starzeniowych oraz przyspieszone testy starzeniowe to ważny element oceny trwałości i odporności powłok ochronnych na działanie czynników środowiskowych. Celem przyspieszonych testów jest ocena trwałości powłoki w krótszym czasie niż rzeczywista eksploatacja. Umożliwia to szybkie porównanie systemów powłokowych i przewidywanie ich trwałości. Typowe badania obejmują zmianę koloru, połysku, złuszczenie, spękanie, pęcherzenie, adhezja powłoki do podłoża oraz odporność. Do typowych komór starzeniowych, należą komory świetlne ze światłem ksenonowym, UV-A, UV-B, komory klimatyczne ze zmiennymi warunkami ekspozycji (temperatura, wilgotność) i komorami korozyjnymi, w tym komory z mgłą solną, komorą z ciągłą kondensacją wilgoci czy komory z cyklicznie zmieniającymi się warunkami korozyjnymi. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych maskujących systemów lakierniczych, opracowanych z użyciem mikrosfer szklanych i nanorurek węglowych o odpowiednio dobranym kształcie i wielkości oraz zastosowanych w odpowiednio dobranym systemie powłokowym. W ramach aktualnie realizowanych badań odniesiono się do analizy badań w komorze ksenonowej i z promieniowaniem UV.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Materiały

Próbki do badań wykonano ze stali stopowej DC01 wymiarach 75 mm x 100 mm x 1 mm. Powierzchnie próbek stalowych przygotowano w następujący sposób: zmyto zmywaczem XPA10006, przeszlifowano maszynką rotacyjną z papierem ściernym o uziarnieniu P80 i przemyto rozpuszczalnikiem XPA10006. Do nanoszenia systemów malarskich wykorzystano pistolety firmy SATA wraz z dyszami oraz kabinę lakierniczą firmy Blowtherm.

Na przygotowane próbki stalowe metodą natrysku pneumatycznego naniesiono maskujące systemy powłokowe w trzech wariantach:

- system powłokowy dwuwarstwowy (SP1): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031,

⁷ L.F.E. Jacques, *Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings*, Prog. Polym. Sci. 25 (2000), s. 1337–1362.

- system powłokowy dwuwarstwowy (SP2): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031 + modyfikacja nanorurkami węglowymi (0,02% udziału masowego),
- system powłokowy dwuwarstwowy (SP3): powłoka gruntująca BP450-100/N, powłoka maskująca BW400-6031 + modyfikacja mikrosferami szklanymi (2,4% udziału masowego).

Nałożone powłoki zostały wygrzane w temperaturze 60°C przez 60 minut, a następnie próbki sezonowano przez 21 dni w temperaturze pokojowej i wilgotności względnej 50% ± 5%. Po czasie sezonowania próbki były poddane badaniom wybranych własności.

Metodyka badań

Badanie w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-A

Badanie wpływu oddziaływania promieniowania ultrafioletowego UV-A na maskujące systemy powłokowe przeprowadzono w komorze QUV/spray firmy Q-LAB. Do badań wykorzystano lampy fluorescencyjne UVA-340. Cykl narażeń składał się z dwóch etapów. W pierwszym etapie próbki naświetlano przez 4 godziny przy natężeniu promieniowania 0,83 W/m²/nm. W drugim etapie bez naświetlania systemy narażone były przez 4 godziny na kondensację pary wodnej na powierzchni. Cykl był powtarzany do uzyskania 3000 godzin narażenia. W tabeli 1 przedstawiono przebieg cyklu narażenia. Natomiast na rysunku 2 przedstawiono zależność natężenia promieniowania od długości fali promieniowania zastosowanych lamp UVA-340 i promieniowania słonecznego.

Tabela 1

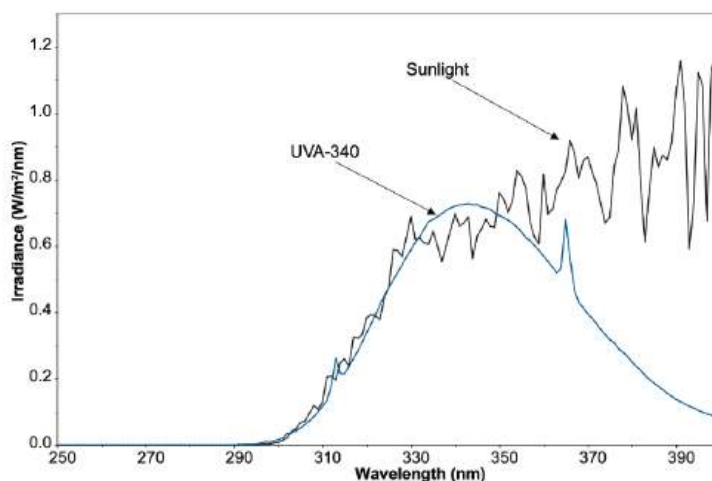
Cykle ekspozycji wg EN ISO 16474-3

Metoda/ Cykl nr	Okres ekspozycji	Typ lampy	Natężenie promieniowania	Temperatura w komorze
Metoda A cykl 1	4 godz. sucho	UVA-340	0,83 W/m ² /nm przy 340 nm	60 °C ± 3 °C
	4 godz. kondensacja		promieniowanie UV wyłączone	50 °C ± 3 °C

Źródło: Norma PN-EN ISO 16474-3 (2021), *Farby i lakiery, Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła światła*, Część 3: Lampy fluorescencyjne UV.

Rys. 3.

Zależność gęstości mocy promieniowania UVA na jednostkę powierzchni od długości fali promieniowania



Źródło: Sunlight, *Weathering & Light Stability Testing*, QLab Corporation, Technical Bulletin LU-0822, 2011.

Badanie w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-B

Badanie wpływu oddziaływania promieniowania ultrafioletowego UV-B na maskujące systemy powłokowe przeprowadzono w komorze QUV/spray firmy Q-LAB. Do badań wykorzystano lampy fluorescencyjne UVB-313. Cykl narażeń składał się z dwóch etapów. W pierwszym etapie próbki naświetlano przez 4 godziny przy natężeniu promieniowania 0,71 W/m²/nm. Drugi etap składał się z narażenia przez 4 godziny na kondensację pary wodnej na powierzchni bez naświetlania. Cykl był powtarzany do uzyskania 1000 godzin narażenia. W tabeli 2 przedstawiono przebieg cyklu narażenia. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono zależność natężenia promieniowania od długości fali promieniowania zastosowanych lamp UVB-313 i promieniowania słonecznego.

Tabela 2

Cykle ekspozycji wg EN ISO 16474-3

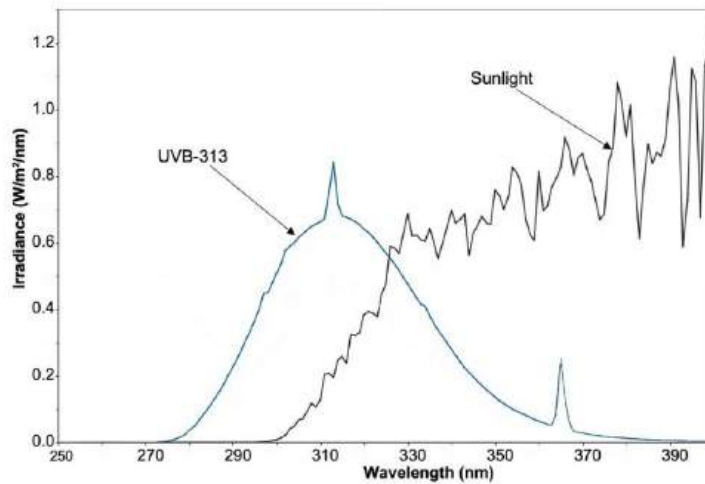
Metoda/ Cykl nr	Okres ekspozycji	Typ lampy	Natężenie promieniowania	Temperatura w komorze
Metoda C Cykl 4	4 godz. sucho	UVB-313	0,71 W/m ² /nm przy 310 nm	60 °C ± 3 °C
	4 godz. kondensacja		promieniowanie UV wyłączone	50 °C ± 3 °C

Źródło: Norma PN-EN ISO 16474-3 (2021), *Farby i lakiery, Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła światła*, Część

3: Lampy fluorescencyjne UV.

Rys. 4.

Zależność gęstości mocy promieniowania UV-B na jednostkę powierzchni od długości fali promieniowania



Źródło: Sunlight, *Weathering & Light Stability Testing*, QLab Corporation, Technical Bulletin LU-0822, 2011.

Badanie w komorze starzeniowej z lampą ksenonową

Badanie wpływu oddziaływania promieniowania z użyciem lampy ksenonowej wykonano przy użyciu komory starzeniowej Q-SUN Xe-3 firmy Q-LAB. Ekspozycję przeprowadzono z użyciem filtra światła dziennego Daylight-Q, przy temperaturze czarnego wzorca wynoszącej 65 °C. Czas trwania cyklu wynosił 120 minut. Cykl był powtarzany wielokrotnie aż do uzyskania 2000 godzin czasu badania. Cykl składał się z 102-minutowego etapu suchego przy wilgotności względnej 40-60 % i 18-minutowego etapu mokrego z natryskiem wody. Pozycje próbek zmieniano co 168 godzin w celu zapewnienia jednolitego napromieniowania próbek. Parametry cyklu zostały zaprezentowane w tabeli 3.

Tabela 3

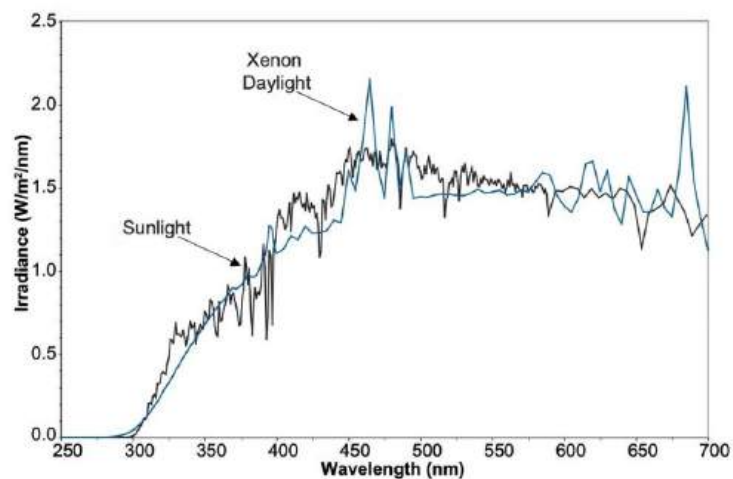
Cykle ekspozycji wg EN ISO 16474-2

Metoda/Cykl nr	Okres ekspozycji	Natężenie promieniowania		Temperatura czarnego wzorca	Temperatura w komorze	Wilgotność względna
		Zakres szerokopasmowy	Zakres wąskopasmowy			
		(od 300 nm do 400 nm)	(340 nm)			
		W/m ²	W/(m ² *nm)			
Metoda A cykl 1	102 minuty sucho	60 ± 2	0,51 ± 0,02	65 ± 3	38 ± 3	50 ± 10
	18 minut natrysk wodą	60 ± 2	0,51 ± 0,02	-	-	-

Źródło: Norma PN-EN ISO 16474-2 (2014-02/A1:2023-2), Farby i lakiery, Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła światła, Część 2: Lamy ksenonowe łukowe.

Rys. 5.

Zależność gęstości mocy promieniowania na jednostkę powierzchni od długości fali promieniowania filtra światła dziennego Daylight-Q.



Źródło: Sunlight, Weathering & Light Stability Testing, QLab Corporation, Technical Bulletin LU-0822, 2011

Badania w naturalnych warunkach atmosferycznych

Badania zostały przeprowadzone w klimacie umiarkowanym środkowoeuropejskim przy szerokości geograficznej 50°86' i długości geograficznej 20°65' w okresie od listopada 2022 r. do listopada 2024 r. Dane klimatyczne w zakładanym okresie były rejestrowane w odstępach 1 godzinnych przez stację pogodową umieszczoną na testowym terenie. W rozpatrywanym okresie średnia temperatura powietrza wyniosła 10,1 °C, temperatura maksymalna wynosiła 33,2 °C, temperatura minimalna wynosiła -17,0 °C, natomiast średnia wilgotność względna powietrza 76%. Średni czas zawilgocenia wynosił 9 godzin 25min. W tym okresie średnio rocznie energia napromieniowania wynosiła 4213,58 MJ/m², w tym promieniowania UV-A 161,45 MJ/m² i UV-B 8,5 MJ/m². Próbkę była zamontowana na stojakach ustawionych pod kątem 5° w stosunku do poziomu skierowanych w kierunku południowym. Zastosowano stojaki ze spodnią izolacją próbek wykonaną z poliwęglanu.

Badania grubości

Pomiary grubości systemów maskujących wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 2808:2020-01, stosując metodę indukcji magnetycznej. Badanie wykonano przy użyciu grubościomierza Elcometer 456T FNF LF01085 z sondą kątową (Elcometer).

Badania połysku

Pomiary połysku wykonano przy użyciu Byk micro-Tri-gloss (BYK-Gardner) wyposażonego w polerowane czarne szkło jako standard pomiarowy. Pomiary połysku wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 2813 przy użyciu geometrii pomiarowej 85°, która jest przeznaczona do powierzchni o matowym wykończeniu.

Badania koloru

Pomiary parametrów barwy przeprowadzono przy użyciu spektrofotometru Minolta CM-700d (Konica Minolta). Pomiary barwy przeprowadzono przy użyciu parametrów pomiarowych: d/8, SCI, 10°.

Badania charakterystyk spektralnych

Charakterystykę spektralną odbitego promieniowania (współczynnik odbicia) wykonano przy użyciu spektrofotometru Jasco V-770 (Jasco) przy następujących parametrach pomiarowych: zakres pomiarowy 350-1200 nm, pomiar co 0,2 nm.

WYNIKI BADAŃ

Badanie w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-A

W tabeli 4 zaprezentowano uśrednione wyniki z 15 pomiarów połysku dla każdego z trzech systemów powłokowych wykonane przed badaniem, po czasie ekspozycji wynoszącym 1500 godzin i po czasie 3000 godzin. W tabeli 5 przedstawiono parametry koloru systemów maskujących oraz zmianę koloru wyrażoną parametrem ΔE^*_{ab} po czasie ekspozycji, natomiast rysunek 6 prezentuje w postaci graficznej zmianę parametrów koloru.

Tabela 4

Wyniki pomiarów połysku maskujących systemów powłokowych w geometrii 85° w badaniach odporności na działanie promieniowania UV-A, GU

System powłokowy	Czas ekspozycji		
	0 h	1500 h	3000 h
SP1	6,5	7,8	12,5
SP2	4,4	5,5	9,5
SP3	6,8	7,5	9,7

Po 1500 godzinach badania połyski badanych systemów wzrosły o około 1 GU. Największe zmiany połysku zaobserwowano dla systemu SP1 i SP2. W omawianych przypadkach po 3000 godzin ekspozycji na promieniowanie UV-A wartość połysku wzrosła o 5-6 GU, podczas gdy dla systemu SP3 były to 3 GU.

Tabela 5

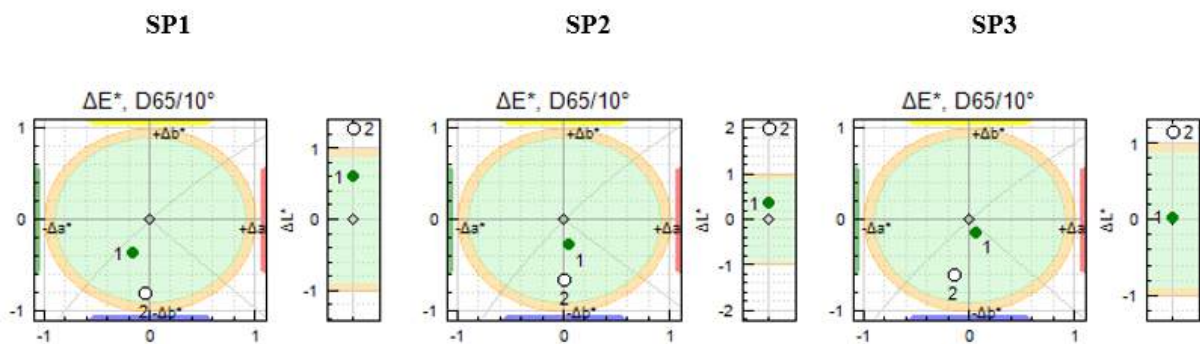
Parametry koloru systemów powłokowych przed i po narażeniu na promieniowanie UV-A

Parametry koloru	Systemy powłokowe		
	SP1	SP2	SP3
L*	35,44	35,16	35,90
a*	-5,28	-5,53	-5,64
b*	5,13	4,79	5,63
$\Delta E^*_{ab} - 1500h$	0,73	0,46	0,16
$\Delta E^*_{ab} - 3000h$	1,52	2,10	1,30

Z analizy otrzymanych danych wynika, że w przypadku narażenia 1500 godzin zmiana koloru wynosi $\Delta E^*_{ab} < 1$. Najmniejsze wartości osiągnięto dla systemu modyfikowanego mikrosferami szklanymi. Po 3000 godzinach narażenia na promieniowanie UV-A największą wartość $\Delta E^*_{ab} = 2,10$ uzyskano dla systemu SP2. SP1 charakteryzował się zmianą koloru na poziomie 1,52. Najmniejszą zmianą koloru charakteryzował się system SP3 i wynosiła $\Delta E^*_{ab} = 1,30$.

Rys. 6.

Parametry koloru dla maskujących systemów powłokowych po narażeniu na promieniowanie UV-A. 1- parametry koloru po 1500 godzinach, 2- parametry koloru po 3000 godzinach.

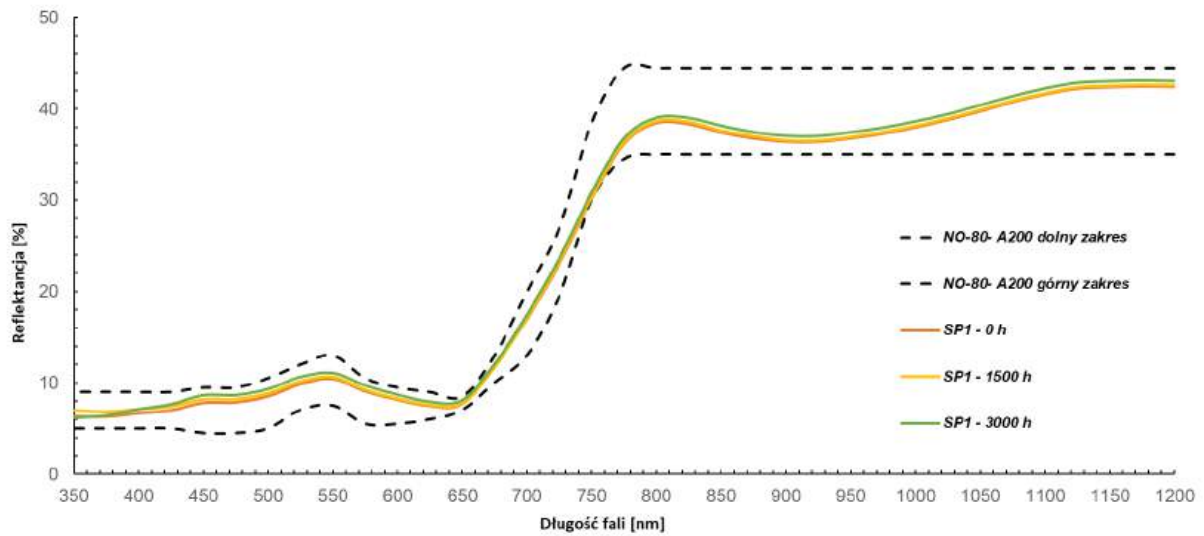


Na podstawie rysunku 6 możemy zauważyć, że wszystkie systemy powłokowe zmieniały kolor w kierunku zwiększonej składowej niebieskiej oraz charakteryzowały się wzrostem jasności koloru.

Na rysunkach 7-9 zaprezentowano charakterystyki spektralne promieniowania odbitego dla badanych systemów maskujących przed badaniem i po narażeniu na działanie promieniowania UV-A.

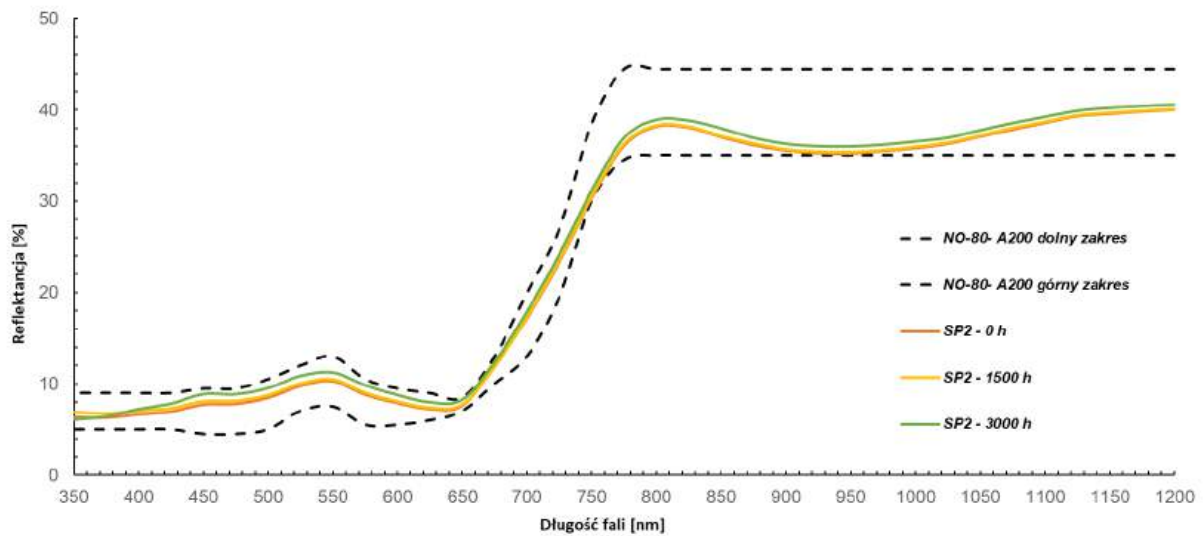
Rys. 7.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP1 przed badaniem w komorze z promieniowaniem UV-A i po czasie ekspozycji wynoszącym 1500 i 3000 godzin.



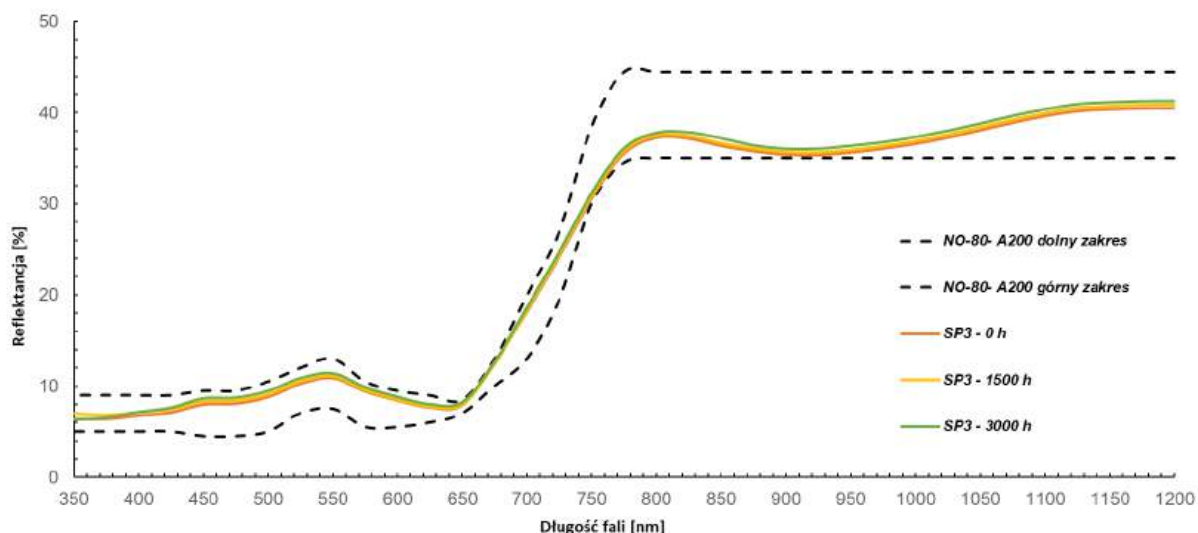
Rys. 8.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP2 przed badaniem w komorze z promieniowaniem UV-A i po czasie ekspozycji wynoszącym 1500 i 3000 godzin.



Rys. 9.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP3 przed badaniem w komorze z promieniowaniem UV-A i po czasie ekspozycji wynoszącym 1500 i 3000 godzin.



W przypadku wszystkich badanych systemów (rys. 7-9) zmiana reemisji fali elektromagnetycznej pozostaje w zakresie wymagań normy obronnej dla koloru zielonego.

Badanie w komorze starzeniowej z promieniowaniem UV-B

W tabeli 6 zaprezentowano uśrednione wyniki z 15 pomiarów połysku dla każdego z trzech systemów powłokowych wykonane przed badaniem, po czasie ekspozycji wynoszącym 500 godzin i po czasie 1000 godzin. W tabeli 7 przedstawiono parametry koloru systemów maskujących oraz zmianę koloru wyrażoną parametrem ΔE^*_{ab} po czasie ekspozycji, natomiast rysunek 10 prezentuje w postaci graficznej zmianę parametrów koloru.

Tabela 6

Wyniki pomiarów połysku maskujących systemów powłokowych w geometrii 85° w badaniach odporności na działanie promieniowania UV-B

System powłokowy	Czas ekspozycji		
	0 h	500 h	1000 h
SP1	5,1	7,3	8,9
SP2	4,6	6,6	8,7
SP3	5,4	7,1	6,9

Zmiana połysku dla wszystkich systemów po 500 godzinach testu wzrosła maksymalnie o 2 GU. Ekspozycja 1000 godzin spowodowała wzrost wartości połysku o 4 GU dla systemów SP1 i SP2. Najmniejszą zmianę zaobserwowano dla systemu SP3 która wynosiła 1,5 GU.

Tabela 7

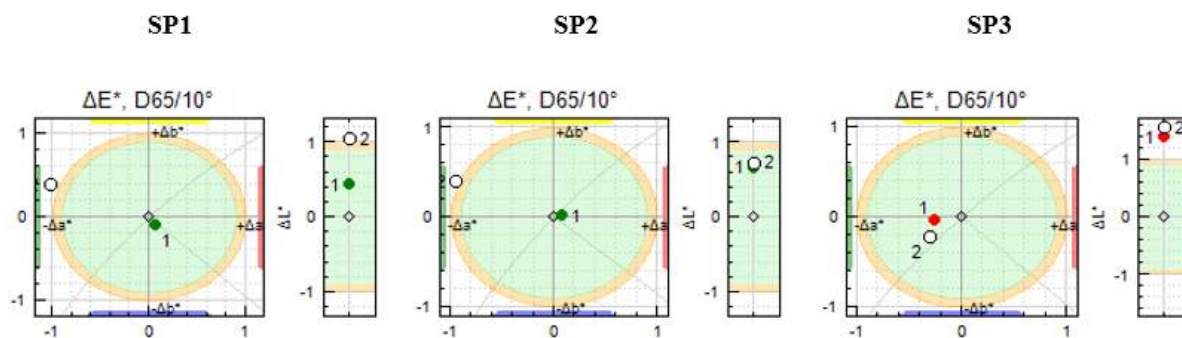
Parametry koloru systemów powłokowych po narażeniu na promieniowanie UV-B

Parametry koloru	Systemy powłokowe		
	SP1	SP2	SP3
L^*	35,33	35,10	35,84
a^*	-5,28	-5,51	-5,67
b^*	5,02	4,71	5,55
$\Delta E^*_{ab} - 500h$	0,45	0,67	1,41
$\Delta E^*_{ab} - 1000h$	1,52	1,27	1,60

Systemy SP1 i SP2 charakteryzowały się podobną zmianą koloru i wynosiły odpowiednio $\Delta E^*_{ab} = 0,45$ i $\Delta E^*_{ab} = 0,67$. Największą zmianą koloru charakteryzował się system SP3 zarówno po 500 godzinach i 1000 godzinach ekspozycji.

Rys. 10.

Parametry koloru dla maskujących systemów powłokowych po narażeniu na promieniowanie UV-B. 1- parametry koloru po 500 godzinach, 2- parametry koloru po 1000 godzinach.

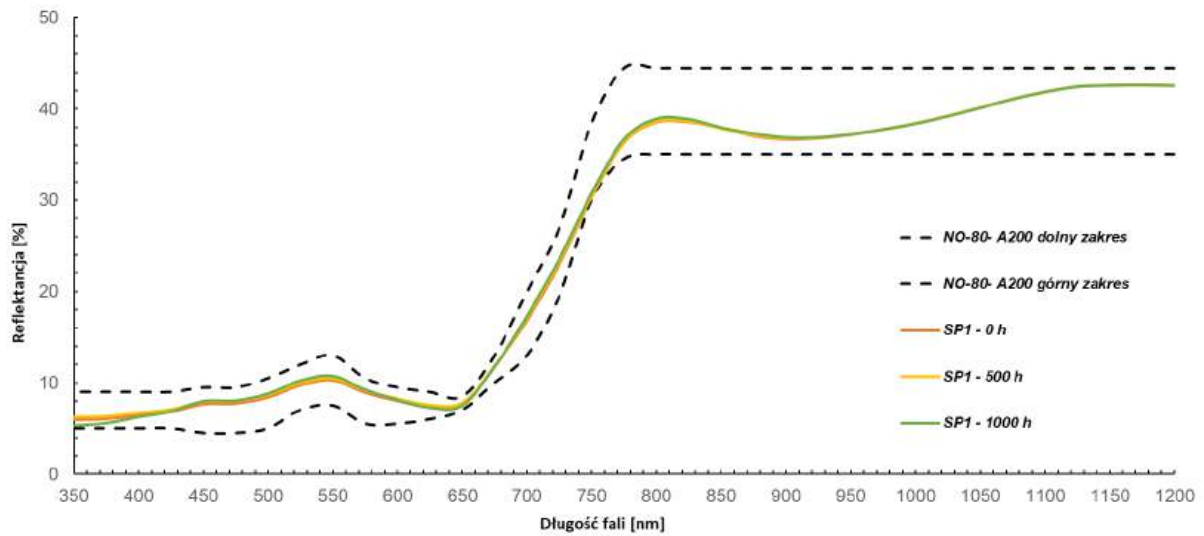


W przypadku narażenia na promieniowanie UV-B odnotowano przesunięcie barwy w kierunku zwiększonej składowej zielonej oraz wzroście jasności koloru dla wszystkich systemów powłokowych.

Na rysunkach 11-13 zaprezentowano charakterystyki spektralne promieniowania odbitego dla badanych systemów maskujących przed badaniem i po narażeniu na działanie promieniowania UV-B.

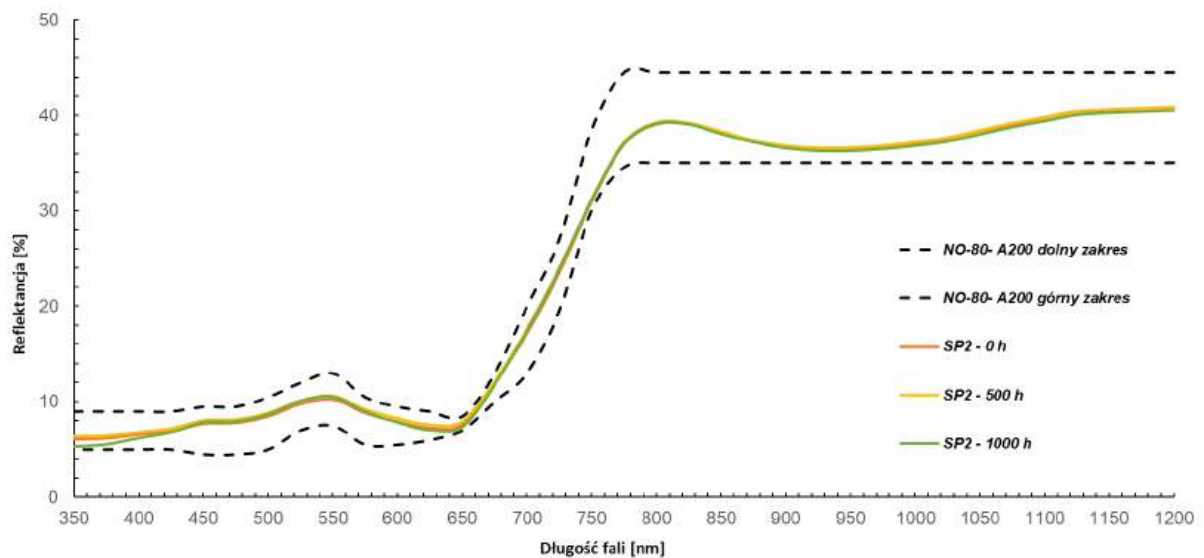
Rys. 11.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP1 przed badaniem w komorze z promieniowaniem UV-B i po czasie ekspozycji wynoszącym 500 i 1000 godzin.



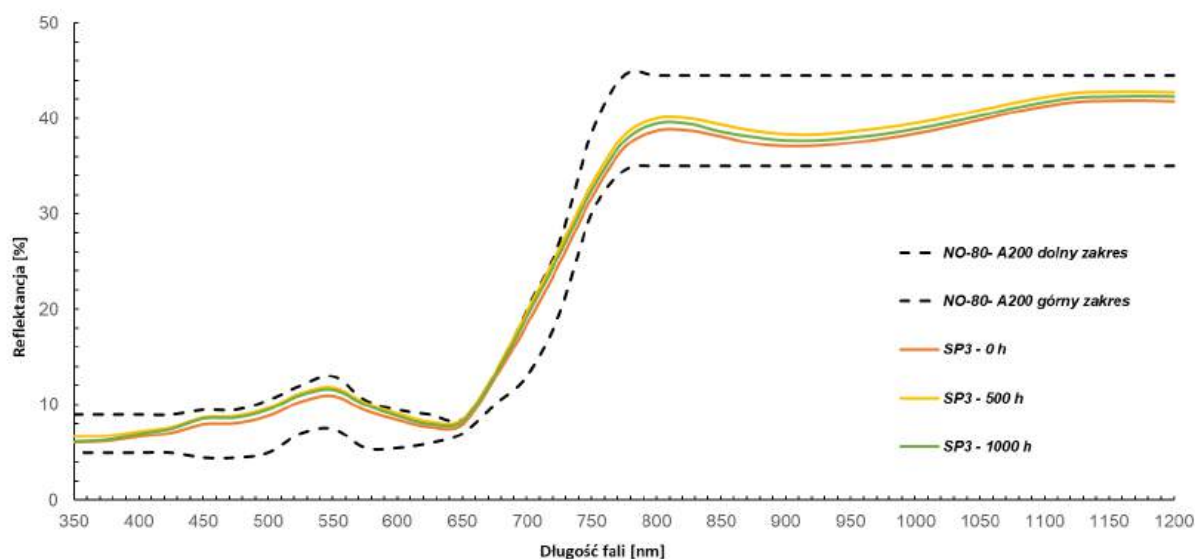
Rys. 12.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP2 przed badaniem w komorze z promieniowaniem UV-B i po czasie ekspozycji wynoszącym 500 i 1000 godzin.



Rys. 13.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP3 przed badaniem w komorze z promieniowaniem UV-B i po czasie ekspozycji wynoszącym 500 i 1000 godzin.



W przypadku wszystkich badanych systemów (rys. 11-13) zmiana reemisji fali elektromagnetycznej pozostaje w zakresie wymagań normy obronnej dla koloru zielonego.

Badanie w komorze starzeniowej z lampą ksenonową

W tabeli 8 zaprezentowano uśrednione wyniki z 15 pomiarów połysku dla każdego z trzech systemów powłokowych wykonane przed badaniem, po czasie ekspozycji wynoszącym 1000 godzin i po czasie 2000 godzin. W tabeli 9 przedstawiono parametry koloru systemów maskujących oraz zmianę koloru wyrażoną parametrem ΔE^*_{ab} po czasie ekspozycji natomiast rysunek 14 prezentuje w postaci graficznej zmianę parametrów koloru.

Tabela 8

Wyniki pomiarów połysku maskujących systemów powłokowych w geometrii 85° w badaniach odporności na działanie promieniowania w komorze z lampą ksenonową

System powłokowy	Czas ekspozycji		
	0 h	1000 h	2000 h
SP1	5,8	5,0	5,3
SP2	3,9	4,5	4,5
SP3	5,8	5,6	5,7

W badaniu w komorze z lampą ksenonową po czasie ekspozycji 1000 i 2000 godzin nie zauważono znaczących różnic połysku badanych systemów powłokowych.

Tabela 9

Parametry koloru systemów powłokowych po narażeniu na promieniowanie w komorze z lampą ksenonową

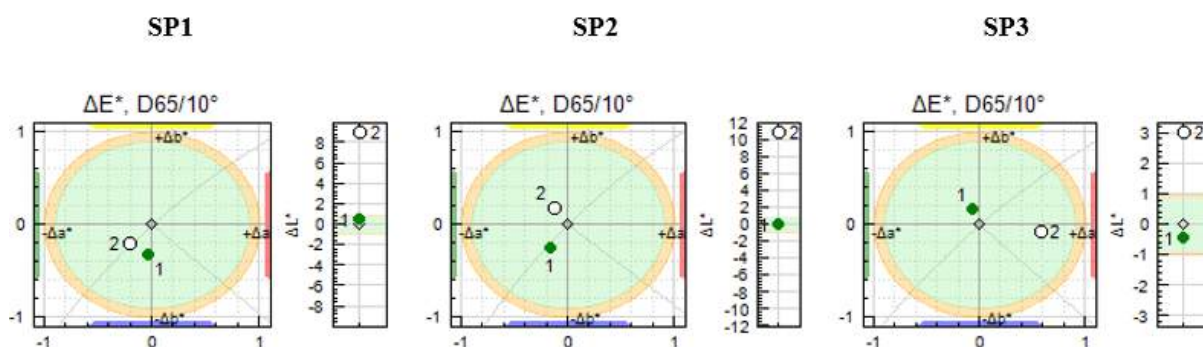
Parametry koloru	Systemy powłokowe		
	SP1	SP2	SP3
L^*	35,20	35,06	35,93
a^*	-5,24	-5,51	-5,65
b^*	5,07	4,82	5,73
$\Delta E^*_{ab} - 1000h$	0,85	0,24	0,43
$\Delta E^*_{ab} - 2000h$	2,51	1,46	0,40

Po 1000 godzinach ekspozycji próbek na warunki starzeniowe największa zmiana była dla systemu SP1 i wynosiła $\Delta E^*_{ab}=0,85$, natomiast najmniejsza zmiana koloru była dla systemu SP2 i wynosiła $\Delta E^*_{ab}=0,24$. Natomiast po 2000 godzinach ekspozycji największą zmianą koloru charakteryzował się system SP1. Najmniejsza zmiana koloru była dla systemu SP3 i wynosiła $\Delta E^*_{ab}=0,40$.

Analizując rysunek 14 obrazujący tendencje w zmianie koloru, po 2000 godzin ekspozycji próbek w komorze ksenonowej widać wzrost jasności próbek czym charakteryzowały się wszystkie systemy.

Rys. 14.

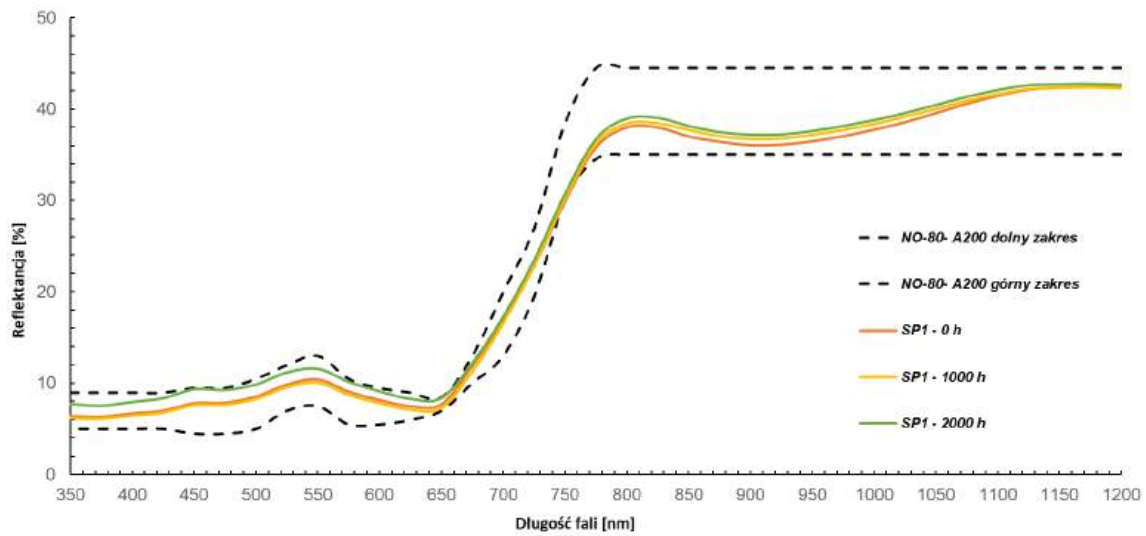
Parametry koloru dla maskujących systemów powłokowych po narażeniu na promieniowanie w komorze z lampą ksenonową. 1- parametry koloru po 1000 godzinach, 2- parametry koloru po 2000 godzinach.



Na rysunkach 15-17 zaprezentowano charakterystyki spektralne promieniowania odbitego dla badanych systemów maskujących przed badaniem i po narażeniu na działanie promieniowania z lampy ksenonowej z filtrem światła dziennego.

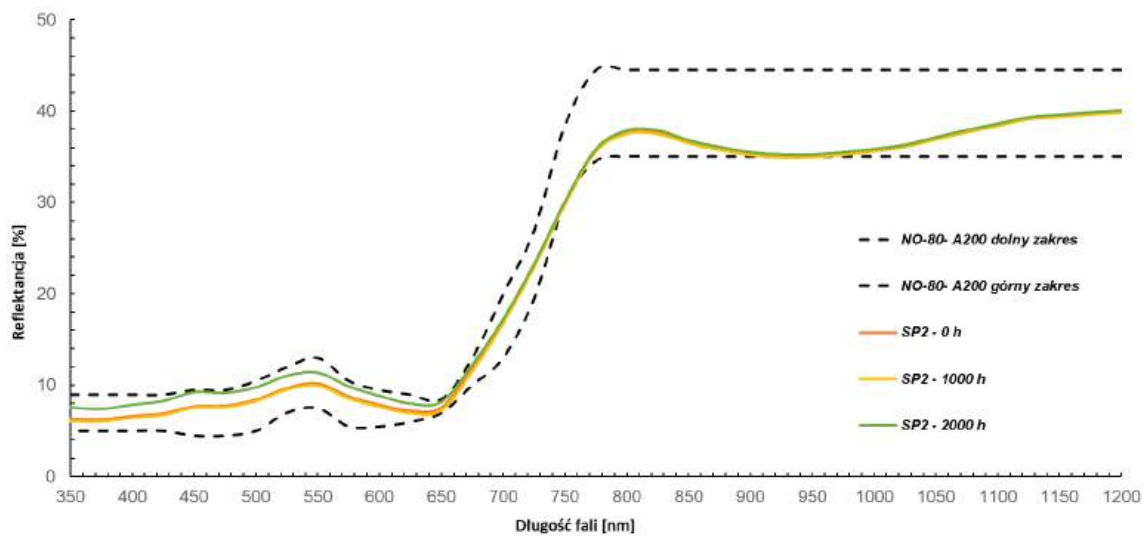
Rys. 15.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP1 przed badaniem w komorze z promieniowaniem w komorze z lampą ksenonową i po czasie ekspozycji wynoszącym 1000 i 2000 godzin.



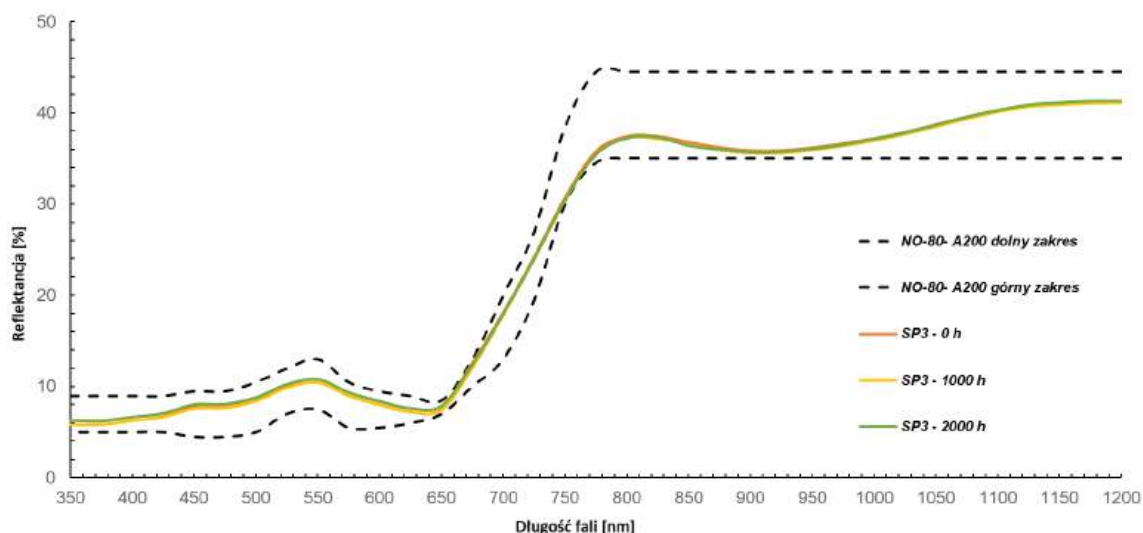
Rys. 16.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP2 przed badaniem w komorze z promieniowaniem w komorze z lampą ksenonową i po czasie ekspozycji wynoszącym 1000 i 2000 godzin.



Rys. 17.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP3 przed badaniem w komorze z promieniowaniem w komorze z lampą ksenonową i po czasie ekspozycji wynoszącym 1000 i 2000 godzin.



Po 1000 godzinach ekspozycji w przypadku wszystkich omawianych systemów nie zaobserwowano znacznych zmian w przebiegu widma reflektancji (rysunki 15-17). Narażenie 2000 godzin spowodowało zmiany w charakterystyce spektralnej systemów SP1 i SP2 w zakresie 350-700 nm, natomiast system SP3 charakteryzował się najmniejszą zmianą reemisji po badaniu.

Badania w naturalnych warunkach atmosferycznych

W tabeli 10 zaprezentowano uśrednione wyniki z 15 pomiarów połysku dla każdego z trzech systemów powłokowych wykonane przed badaniem, po czasie ekspozycji w naturalnych warunkach atmosferycznych. W tabeli 11 przedstawiono parametry koloru systemów maskujących oraz zmianę koloru wyrażoną parametrem ΔE^*_{ab} po czasie ekspozycji natomiast rysunek 18 prezentuje w postaci graficznej zmianę parametrów koloru.

Tabela 10

Wyniki pomiarów połysku maskujących systemów powłokowych w geometrii 85° w badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych.

System powłokowy	Czas ekspozycji		
	0 lat	1 rok	2 lata
SP1	5,3	6,2	6,4
SP2	4,4	4,8	5,1
SP3	5,7	5,7	5,7

W badaniach w warunkach atmosferycznych systemy SP1 i SP2 charakteryzowały się zmianą połysku o około 1GU w okresie 2 lat ekspozycji. Dla systemu SP3 nie odnotowano zmiany połysku.

Tabela 11

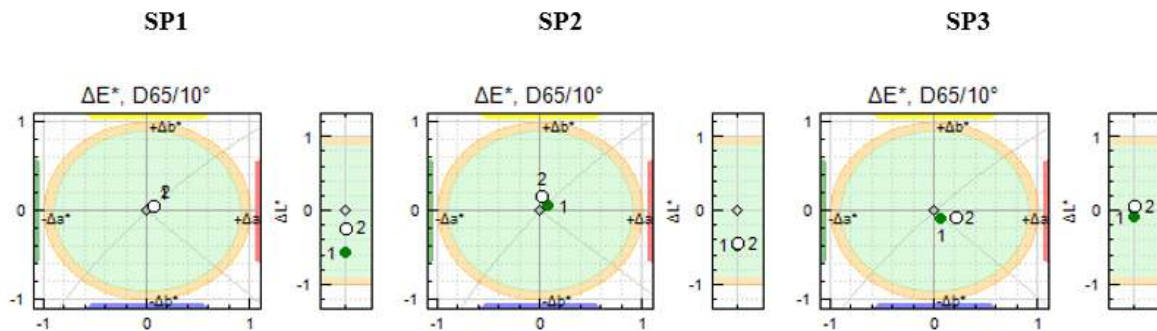
Parametry koloru systemów powłokowych po badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych.

Parametry koloru	Systemy powłokowe		
	SP1	SP2	SP3
L*	35,35	35,08	35,85
a*	-5,29	-5,53	-5,72
b*	5,03	4,75	5,57
$\Delta E^*_{ab} - 1 \text{ rok}$	0,56	0,48	0,14
$\Delta E^*_{ab} - 2 \text{ lata}$	0,25	0,48	0,22

Po 1 roku ekspozycji w warunkach atmosferycznych zmiana koloru ΔE^*_{ab} dla systemów SP1 i SP2 wyniosła około 0,5. Najmniejszą zmianę koloru miał system SP3 i różnica wynosiła $\Delta E^*_{ab}=0,14$. Kolejny rok ekspozycji próbek nie spowodował znacznych zmian ΔE^*_{ab} . Najmniejszą zmianą koloru charakteryzował się system SP3.

Rys. 18.

Parametry koloru dla maskujących systemów powłokowych po badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych. 1- parametry koloru po roku, 2- parametry koloru po 2 latach.

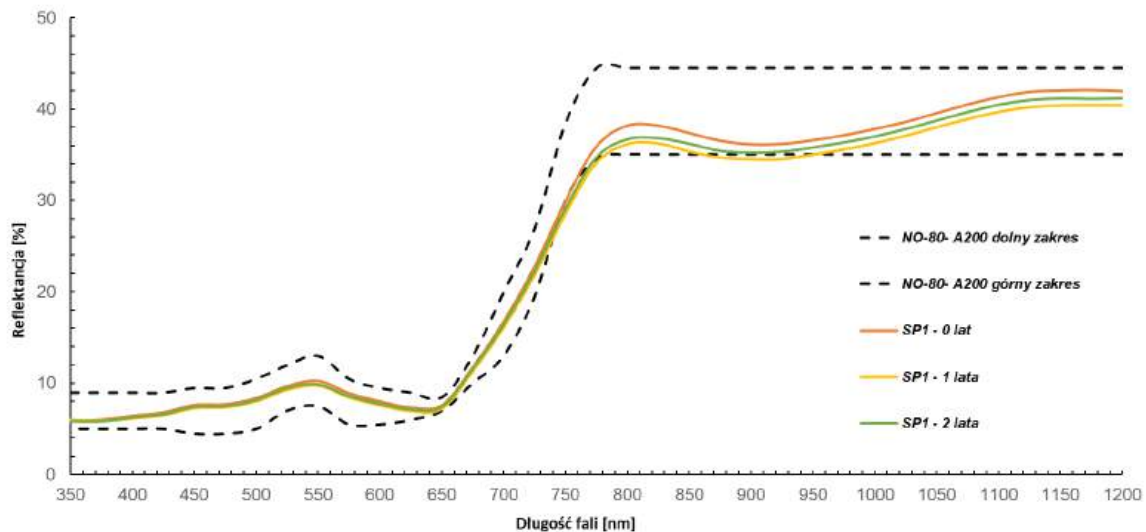


Analizując rysunek 18 nie zaobserwowano znaczącej zmiany koloru dla wszystkich systemów w okresie badania.

Na rysunkach 19-21 zaprezentowano charakterystyki spektralne promieniowania odbitego dla badanych systemów maskujących przed badaniem i po badaniu w naturalnych warunkach atmosferycznych.

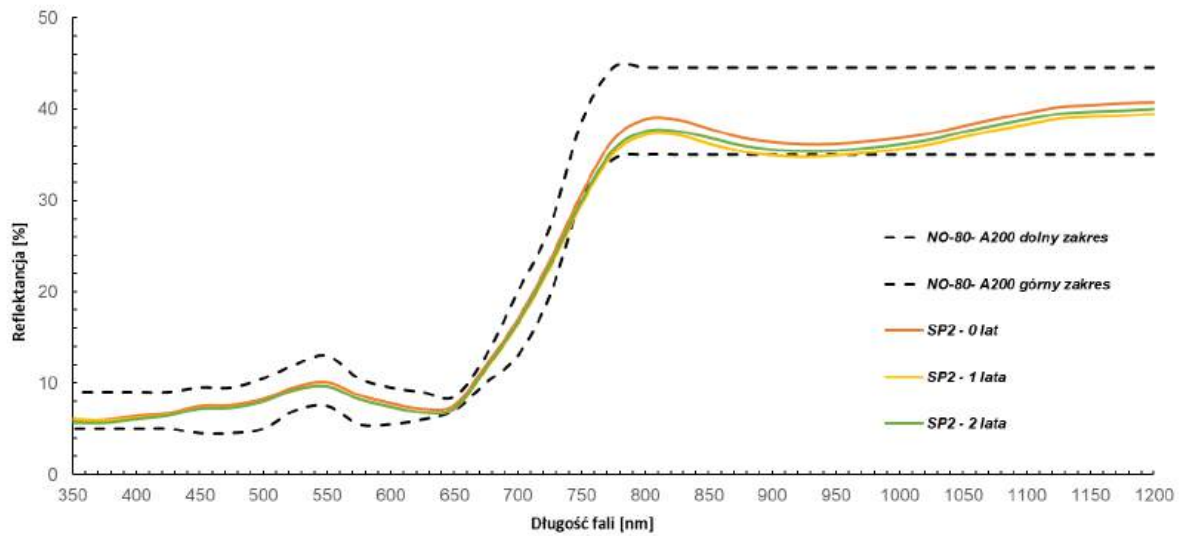
Rys. 19.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP1 przed badaniem i po badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych.



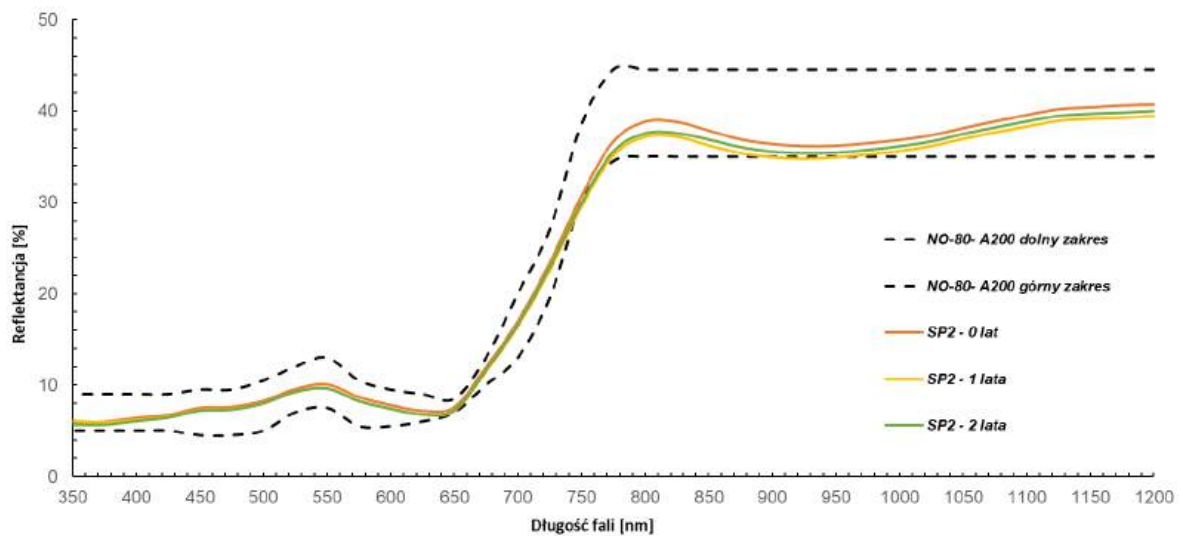
Rys. 20.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP2 przed badaniem i po badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych.



Rys. 21.

Charakterystyka spektralna systemu maskującego SP3 przed badaniem i po badaniach w naturalnych warunkach atmosferycznych.



Analizując rysunki 19-21 nie stwierdzono znaczącej zmiany w charakterystykach spektralnych systemów maskujących SP1, SP2 i SP3 w badaniu w warunkach atmosferycznych w okresie 2 lat.

PODSUMOWANIE

Na podstawie otrzymanych wyników:

- W badaniu przeprowadzonym w komorze starzeniowej z lampami UV-A stwierdzono, że najmniejszą zmianą połysku i zmianą koloru charakteryzował się system SP3. Zmiana połysku wynosiła 3 GU, a zmiana koloru $\Delta E^*_{ab}=1,30$. Wszystkie badane systemy powłokowe charakteryzowały się nieznaczną zmianą charakterystyk spektralnych. Wszystkie systemy zmieniły kolor w kierunku zwiększonej składowej niebieskiej oraz charakteryzowały się wzrostem jasności.
- W badaniu przeprowadzonym w komorze starzeniowej z lampami UV-B stwierdzono, że najmniejszą zmianą połysku charakteryzował się system SP3 i wynosiła 1,5 GU. Natomiast najmniejszą zmianą koloru odznaczał się system SP2 i wynosiła $\Delta E^*_{ab}=1,27$. Dla wszystkich systemów powłokowych odnotowano przesunięcie barwy w kierunku zwiększonej składowej zielonej oraz stwierdzono wzrost jasności. Wszystkie badane systemy powłokowe charakteryzowały się nieznaczną zmianą charakterystyk spektralnych.
- W badaniu przeprowadzonym w komorze starzeniowej z lampą ksenonową stwierdzono, że wszystkie systemy powłokowe posiadały podobną zmianę połysku na poziomie 1 GU. Natomiast najmniejszą zmianą koloru odznaczał się system SP3 i różnica koloru wynosiła $\Delta E^*_{ab}=0,40$. Wszystkie systemy charakteryzowały się wzrostem jasności koloru. Narażenie 2000 godzin spowodowało zmiany w charakterystyce spektralnej systemów SP1 i SP2 w zakresie 350-700 nm, natomiast system SP3 odznaczał się najmniejszą zmianą reemisji po badaniu.
- W badaniu przeprowadzonym w naturalnych warunkach atmosferycznych stwierdzono, że systemy SP1 i SP2 charakteryzowały się zmianą połysku o około 1GU w okresie 2 lat ekspozycji. Dla systemu SP3 nie odnotowano zmiany połysku. Natomiast najmniejszą zmianą koloru odznaczał się system SP3 i różnica koloru wynosiła $\Delta E^*_{ab}=0,14$. Nie stwierdzono znaczącej zmiany w charakterystykach spektralnych systemów maskujących SP1, SP2 i SP3 w badaniu w warunkach atmosferycznych w okresie 2 lat.

BIBLIOGRAFIA

REFERENCES LIST

PIŚMIENICTWO

LITERATURE

- Francuz P., *Imagia. W kierunku neurokognitywnej teorii obrazu*, Wydawnictwo KUL, Lublin 2013.
- Kotnarowska D., *Destrukcja powłok polimerowych pod wpływem czynników eksploatacyjnych*, Wydawnictwo UT-H w Radomiu, 2013.
- Rabek J.F.: *Polymer photodegradation of polymers: physical characteristic and applications*, Springer-Verlag, Berlin 1996.
- Pappas S.P., *Weathering of coatings-formulation and evaluation*, Prog. Org. Coat., 17(2) (1989), 107-114.
- Pospíšil J., Nešpurek S., *Photostabilization of coatings. Mechanisms and performance*, Prog. Polym. Sci. 25 (2000) 1261–1335.
- Jacques L.F.E., *Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings*, Prog. Polym. Sci. 25 (2000) 1337–1362.

ŹRÓDŁA

SOURCES

- Maskowanie operacyjne*, DD-3.31(A), MON/CDiSzSZ, Bydgoszcz 2018.
- Przybył W., Mazurczuk R., Bogdanowicz K.A., Szczepaniak M., *Wirtualne środowiska do oceny skuteczności maskowania i prowadzenia rozpoznania – metody badań i zastosowania*, ASzWoj, 2022.
- Michalski M, *Analiza struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych do zastosowań militarnych*, Mechanik, 2024.
- Norma PN-EN ISO 16474-3 (2021), *Farby i lakiery, Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła światła*, Część 3: Lampy fluorescencyjne UV.
- Sunlight, *Weathering & Light Stability Testing*, QLab Corporation, Technical Bulletin LU-0822, 2011.
- Norma PN-EN ISO 16474-2 (2014-02/A1:2023-2), *Farby i lakiery, Metody ekspozycji na laboratoryjne źródła światła*, Część 2: Lampy ksenonowe łukowe.

Praca wykonana w ramach projektu MNiSW „Doktorat wdrożeniowy I” (V edycja) Nr DWD/5/0043/2021 - pt.
„Wpływ dodatków modyfikujących na właściwości eksploatacyjne lakierniczych systemów powłokowych stosowanych w technice wojskowej”



Copyright (c) 2025 Mirosław Laskowski



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Oświadczenia współautorów

Publikacja 1: Michalski M.: Maskujące systemy powłokowe w zastosowaniu w technice wojskowej. Ogólna charakterystyka. Rozdział w monografii pt. „ Wybrane aspekty technologiczne i logistyczne w inżynierii mechanicznej”. Monografie, Studia, Rozprawy M166, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2024, pp. 126-136. ISSN 1897-2691

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako autor ww. publikacji, niniejszym oświadczam, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej mojego autorstwa. Oświadczam również, że mój udział w przygotowaniu i opracowaniu tej publikacji wynosi:

Michalski Marek: (100%)



Publikacja 2: Michalski M.: Paint coatings in military applications general characteristics. CzOTO, vol. 5, 1 (2023), pp. 285-293. DOI: <https://doi.org/10.2478/czoto-2023-0031>

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako autor ww. publikacji, niniejszym oświadczam, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej mojego autorstwa. Oświadczam również, że mój udział w przygotowaniu i opracowaniu tej publikacji wynosi:

Michalski Marek: (100%)



Publikacja 3: Przybył W., Mazurczuk R., Szczepaniak M., Radek N., Michalski M.: Virtual methods of testing automatically generated camouflage patterns created using cellular automata. Materials Research Proceedings, Vol. 24 (2022), pp. 69-77

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Przybył Wojciech: (40 %)

Mazurczuk Robert: (30 %)

Szczepaniak Marcin: (10 %)

Radek Norbert: (10 %)




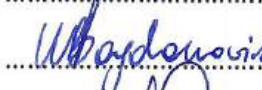
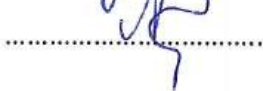
Michalski Marek: (10 %)

..... Przybył W.
..... Robert Mazurczuk.
.....
.....
.....
.....
.....

Publikacja 4: Przybył W., Michalski M., Mazurczuk R., Bogdanowicz K., Radek N.: Radar Recognition: Paint Coatings with Absorption Properties in the Microwave Range. Materials Research Proceedings 34 (2023) 169-177. (20 pkt)
DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902691-21>

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Przybył Wojciech:	(35 %)	
Michalski Marek:	(35 %)	
Mazurczuk Robert:	(10 %)	
Bogdanowicz Krzysztof:	(10 %)	
Radek Norbert:	(10 %)	

Publikacja 5: Przybył W., Michalski M., Radek N.: Contemporary Coatings for Military Vehicles in the Context of Their Protection and Masking Effectiveness. Biuletyn WAT, 2025

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Przybył Wojciech: (45%)



Michalski Marek: (45%)



Radek Norbert: (10%)



Publikacja 6: Radek N., Michalski M., Mazurczuk R., Szczodrowska B., Plebankiewicz I., Szczepaniak M.: Operational tests of coating systems in military technology applications. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, 25, 1 (2023), 1-13. (200 pkt, IF: 2,5) DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2023.1.12>,

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Radek Norbert: (10%)

.....


Michalski Marek: (50%)

.....


Mazurczuk Robert: (10%)

.....

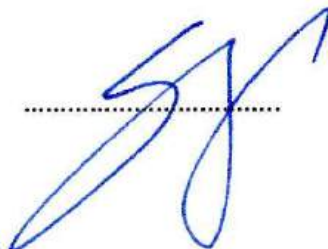

Szczodrowska Bogusława: (10%)

.....


Plebankiewicz Ireneusz: (10%)

.....


Szczepaniak Marcin: (10%)

.....


Publikacja 7: Michalski M., Radek N.: Physical properties of masking coating systems used in military technology.

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Michalski Marek: (80%)

.....

Radek Norbert: (20%)

.....

The image shows two handwritten signatures in blue ink. The top signature is for Michalski Marek, and the bottom signature is for Radek Norbert. Each signature is written over a horizontal dotted line.

Publikacja 8: Radek N., Michalski M., Pietraszek J., Szczepaniak M., „ Functional properties of coating systems for weapons and military vehicles” in METAL 2025, May 21-23, 2025, Brno, Czech Republic, EU

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Radek Norbert: (20%)

.....

Michalski Marek: (50%)

.....

Pietraszek Jacek: (15%)

.....

Szczepaniak Marcin: (15%)

.....

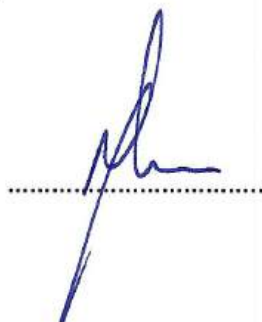
The image shows four handwritten signatures in blue ink, each positioned above a horizontal dotted line. The signatures are: 1. Radek Norbert: (20%) - a stylized signature starting with 'NR'. 2. Michalski Marek: (50%) - a signature starting with 'M'. 3. Pietraszek Jacek: (15%) - a signature starting with 'P'. 4. Szczepaniak Marcin: (15%) - a signature starting with 'S'. The signatures are written in a cursive, somewhat abstract style.

Publikacja 9: Michalski M.: Analiza struktury geometrycznej powierzchni maskujących systemów powłokowych do zastosowań militarnych. *Mechanik 10* (2024), str.1-4.
DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.10.20>,

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako autor ww. publikacji, niniejszym oświadczam, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej mojego autorstwa. Oświadczam również, że mój udział w przygotowaniu i opracowaniu tej publikacji wynosi:

Michalski Marek: (100%)



Publikacja 10: Radek N., Michalski M., Kamiński J., Szczepaniak M., Kowalkowski S., „Analysis of the performance properties of coating systems for military applications” in *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(5), 200–212, DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/201155>

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Radek Norbert: (20%)

.....


Michalski Marek: (50%)

.....


Kamiński Janusz: (10%)

.....


Szczepaniak Marcin: (10%)

.....


Kowalkowski Stanisław: (10%)

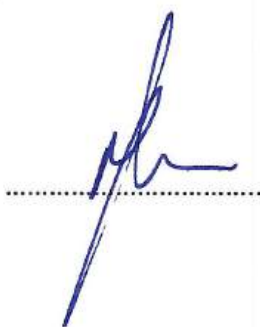
.....


Publikacja 11: Michalski M.: Abrasion resistance of camouflage coating systems. Czasopismo Techniczne/Technical Transactions.

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako autor ww. publikacji, niniejszym oświadczam, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej mojego autorstwa. Oświadczam również, że mój udział w przygotowaniu i opracowaniu tej publikacji wynosi:

Michalski Marek: (100%)



Publikacja 12: Michalski M., Pisarek U., Radek N., Przybył W., Szczepaniak M.: The Influence of Operational Exposure on Changes in Parameters of Effective Camouflage of Coatings Used in Military Technology. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2023, 17(1), 182–196. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/156940>

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisaną nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Michalski Marek: (60%)

.....


Pisarek Urszula: (10%)

.....
Urszula Pisarek

Radek Norbert: (10%)

.....


Przybył Wojciech: (10%)

.....
Przybył

Szczepaniak Marcin: (10%)

.....


Publikacja 13: Michalski M., Łabęcka P., Kozieł T., „Corrosion resistance of masking coating systems used in military technology” 2025, Ochrona przed korozją DOI:10.15199/40.2025.5.2,

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako współautorzy wyżej wymienionej publikacji, niniejszym oświadczamy, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej autorstwa Marka Michalskiego. Oświadczamy, że jesteśmy tego świadomi i wyrażamy zgodę na przypisany nam procentowy udział i wkład merytoryczny.

Michalski Marek: (80%)



Łabęcka Paulina: (10%)



Kozieł Tomasz: (10%)



Publikacja 14: Michalski M.: Badania starzeniowe maskujących systemów powłokowych do zastosowań w technice wojskowej. Wiedza Obronna, 2025

OŚWIADCZENIE O PRAWACH AUTORSKICH

Jako autor ww. publikacji, niniejszym oświadczam, że stanowi ona element rozprawy doktorskiej mojego autorstwa. Oświadczam również, że mój udział w przygotowaniu i opracowaniu tej publikacji wynosi:

Michalski Marek: (100%)

