

dr inż. Dariusz Kowalski¹⁾

ORCID: 0000-0002-0393-8366

dr inż. Beata Grzyl¹⁾

ORCID: 0000-0002-0395-5190

dr inż. Adam Kristowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-5281-1217

dr inż. Marcin Szczepański^{1)*}

ORCID: 0000-0001-6049-2391

Zabezpieczenia antykorozyjne stalowych barierek ochronnych na obiektach mostowych w ujęciu kosztów cyklu ich życia

Life cycle costs of selected anti-corrosion solutions for steel protective barriers on bridge structures

DOI: 10.15199/33.2021.07.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę kosztów cyklu życia (*Life Cycle Costs*) stalowych barierek ochronnych, eksploatowanych w warunkach pasa drogowego, zlokalizowanych na wybranym obiekcie mostowym. Zaproponowano trzy systemy zabezpieczenia antykorozyjnego, analizując je w aspekcie kosztów nakładów początkowych i planowanych związanych z utrzymaniem. Na podstawie przeprowadzonej analizy LCC trzech wariantów, z uwzględnieniem 25-letniego okresu eksploatacji barierki, wskazano rozwiązanie optymalne, tj. najtańsze (analiza wykazała, że jest to zabezpieczenie barierki stalowych powłoką cynkową). Przedstawiono również case study. Na jego przykładzie wskazano zakres uszkodzeń, które stwierdzono w okresie 5 lat od rozpoczęcia eksploatacji barierki stalowych zabezpieczonych antykorozyjnie, zamontowanych na obiekcie mostowym. Przedstawiono rzeczywisty koszt ich utrzymania, uwzględniający koszt usunięcia usterek.

Słowa kluczowe: koszt cyklu życia; zabezpieczenie antykorozyjne; stalowe barierki ochronne; obiekt mostowy.

Abstract. The article presents the Life Cycle Costs analysis of steel safety barriers operated in road lane conditions, located on a selected bridge structure. Three corrosion protection systems were proposed, analyzing them in terms of the cost of initial and planned outlays related to maintenance. Based on the LCC analysis for three options, taking into account the 25-year lifetime of the barriers, the optimal solution was indicated, i.e. the cheapest one (the analysis showed that it is a protection of steel barriers with a zinc coating). A case study was also presented. On its example the range of defects were indicated that were found within 5 years from the beginning of operation of anti-corrosive steel barriers, mounted on the bridge structure. The actual cost of their maintenance, including the cost of removing defects was presented.

Keywords: life cycle cost; anti-corrosion solutions; steel protective barriers; bridge structures.

Od wielu lat transport drogowy powoduje wzmożoną ingerencję środowiskową, co pośrednio przyspiesza m.in. szybką degradację stalowych elementów konstrukcyjnych i pomocniczych w obiektach infrastruktury drogowej [6, 10]. Gotowe elementy stalowe cechują się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi i w praktyce są często stosowane w konstrukcjach obiektów infrastrukturalnych, a także przy wykonywaniu różnego rodzaju ustrojów nośnych i elementów bezpieczeństwa ruchu drogowego. Zasadniczą wadą materiału jest jednak jego duża podatność na korozję w warunkach atmosferycznych – w kontakcie z tlenem, wodą i zanieczyszczeniami środowiska. Zjawisko to ma już miejsce na

etapie wytwarzania. Podczas eksploatacji degradacja materiału stalowego, na skutek zachodzących procesów korozyjnych, jest różna w zależności od lokalizacji elementu i występujących realnych narażeń korozyjnych. W obiektach infrastruktury drogowej stalowe elementy konstrukcyjne i pomocnicze są narażone na szczególnie intensywne oddziaływanie środowiskowe. Jest to związane z nietypowymi warunkami ich eksploatacji, panującymi w obszarze pasa drogowego.

Stosowane w praktyce powłokowe zabezpieczenia malarskie i metalizacyjne podlegają procesom destrukcji podczas ich eksploatacji, dlatego też w celu zapewnienia właściwej ochrony nośnych elementów stalowych konieczne jest okresowe ich odnawianie [7]. Dodatkowo, na niektórych obszarach, należy uwzględnić aspekt zimowego utrzymania dróg i obiektów drogowych, co w efekcie przyczynia się do zwiększenia

agresywności środowiska korozyjnego w otoczeniu drogi.

Problem zabezpieczenia antykorozyjnego elementów stalowych powinien być brany pod uwagę już na etapie planowania i projektowania inwestycji [12], gdyż ma on istotny wpływ na koszty utrzymania obiektu podczas eksploatacji. Błędy popełnione w procesie projektowania mogą w praktyce okazać się kosztowne dla użytkownika [8].

W artykule poddano analizie proces utrzymania i użytkowania stalowych drogowych barierek ochronnych zamontowanych na obiekcie mostowym i na podjazdach do niego (fotografia 1, rysunek 1). **Rozważano zastosowanie trzech systemów powłokowej ochrony antykorozyjnej drogowych barierki stalowych:**

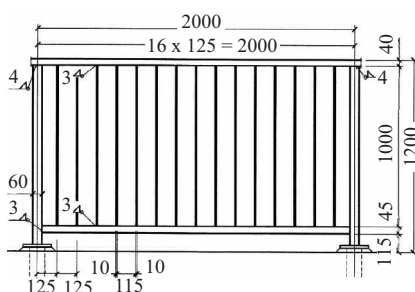
1) powłokę metalizacyjną wykonaną w procesie ogniowego cynkowania zanurzeniowego (**wariant 1**);

¹⁾ Politechnika Gdańska; Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

^{*} Adres do korespondencji: marcin.szczepanski@pg.edu.pl



Fot. 1. Barierka stalowa zamontowana na konstrukcji mostowej
Photo 1. Steel barrier mounted on the bridge structure



Rys. 1. Barierka stalowa 800 x 500
Fig. 1. Steel barrier 800 x 500

2) powłokę dwuwarstwową wykonaną w procesie ogniowego cynkowania zanurzeniowego i malowania proszkowego, która zapewnia odpowiednie walory kolorystyczne, o sumarycznej grubości dostosowanej do warunków korozyjnych panujących w środowisku eksploatacji (**wariant 2**);

3) powłokę wykonaną w procesie malowania proszkowego, która pełni funkcję ochrony antykorozyjnej i zapewnia odpowiednie walory kolorystyczne, o grubości dostosowanej do warunków korozyjnych panujących w środowisku eksploatacji (**wariant 3**).

Przyjęto, że element stalowy, zabezpieczony antykorozyjnie w określony sposób (wariant 1, 2 i 3), powinien zapewniać bezpieczne warunki eksploatacji przez czas co najmniej planowanego okresu życia obiektu.

Trwałość systemów zabezpieczenia antykorozyjnego

Każdy rodzaj powłokowego zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji stalowej podlega charakterystycznej dla niego destrukcji. W przypadku cynkowych powłok metalizacyjnych, podobnie jak i chronionego materiału stalo-

wego, jest to naturalny proces korozyjny [4, 5]. W zależności od klasy korozyjności środowiska, proces korozji chronionego materiału i powłoki cynkowej przebiega w różnym tempie (tabela 1).

Tabela 1. Porównanie ubytków korozyjnych materiałów metalowych wg normy PN-EN ISO 12499 [11]

Table 1. The comparison of corrosion losses in metallic materials according to PN-EN ISO 12499 [11]

Klasa korozyjności środowiska	Średnioroczny ubytek korozyjny materiału [µm/r.]	
	stal węglowa	cynk
C3	25 – 50	0,7 – 2,1
C4	50 – 80	2,1 – 4,2
C5	80 – 200	4,2 – 8,4

Malarski materiał powłokotwórczy podlega również procesom destrukcyjnym, czego efektem są takie zmiany, jak starzenie się powłoki, utrata elastyczności i szczelności. Do znacznego pogorszenia właściwości ochronnych powłok malarskich przyczyniają się także eksploatacyjne uszkodzenia mechaniczne, które powodują przerwanie ich ciągłości. Zapoczątkowany zostaje proces korozyjny chronionego elementu stalowego, co w efekcie skutkuje przyspieszoną destrukcją ułożonych na nim ochronnych powłok antykorozyjnych.

Jako podstawę podejmowania decyzji inwestycyjnej wskazuje się **metodę szacowania kosztu cyklu życia (LCC – Life Cycle Cost)**. Polega ona na obliczaniu całkowitego kosztu produktu, wyrobu, obiektu, usługi, generowanego w okresie od pozyskania surowców po zagospodarowanie odpadów z uwzględnieniem fazy projektowania, instalacji, eksploatacji, konserwacji, recyklingu lub utylizacji. Wyróżnia się dwie zasadnicze **metody prowadzenia analizy LCC** [3, 13]:

1) prostą;

2) złożoną, obejmującą analizę zdyskontowanych przepływów pieniężnych w okresie od montażu do wycofania elementu z eksploatacji.

Do zasadniczych czynników, które należy uwzględnić przy określaniu kosztów utrzymania stalowych barierek drogowych, należą [2]: zastosowany system zabezpieczenia antykorozyjnego; okres (zimowy, letni); warunki panujące na drodze – kategoria ruchu (typ drogi, średnie roczne natężenie dobowe pojazdów, dopuszczalna prędkość); od-

ległość barierki od krawędzi pasa ruchu; liczba pasów na drodze; lokalne warunki makro- i mikrośrodowiskowe oraz lokalizacja elementu.

Analiza kosztu eksploatacji typowych systemów ochrony antykorozyjnej

Celem analizy jest wskazanie rozwiązania optymalnego, z punktu widzenia podmiotu odpowiedzialnego za zarządzanie infrastrukturą na danym odcinku drogi, z uwzględnieniem określonych kryteriów i uwarunkowań dotyczących wykonania i utrzymania stalowych barierek drogowych. W analizie uwzględniono nakłady początkowe (związane z dostawą, montażem i zabezpieczeniem antykorozyjnym elementów stalowych) oraz koszty ich utrzymania, ponoszone w okresie 25 lat.

Na podstawie specyfikacji robót i kosztorysów udostępnionych przez zarządcę drogi ustalono, że zakres wykonanych prac obejmował: dostawę i montaż balustrad wraz z poręczami oraz podstawami z blachy, a także słupków barierek zakotwionych na kotwy wklejane, zabezpieczenie antykorozyjne w postaci powłoki ocynkowanej i malowania proszkowego z zastosowaniem atestowanych farb. Łączny koszt prac przyjęto jako 100% (rysunek 2).



Rys. 2. Relacje nakładów początkowych (obejmujących koszt dostawy i montażu) barierek stalowych zabezpieczonych antykorozyjnie wg trzech systemów

Fig. 2. Relationships of initial investment (including delivery and assembly costs) of steel barriers protected against corrosion by three systems

W celu przeprowadzenia analizy dokonano porównania nakładów początkowych związanych z wykonaniem wariantu bazowego (zrealizowanego w praktyce) z dwoma alternatywnymi systemami ochrony antykorozyjnej. Poszczególne warianty dotyczą tego samego odcinka barierki (zachowano rodzaj barierki i ich długość), który występuje w wariantie bazowym. Ustalono również nakład początkowy dostawy i mon-

tażu kompletu barier, zabezpieczonych antykorozyjnie wg wariantu 1 oraz 3. Z uwagi na fakt, iż wykonane prace (wariant 2) były wyceniane na podstawie cen z 2015 r., wycena wariantu 1 i 3 odnosi się również do 2015 r. Wyniki przedstawiono na rysunku 2.

W celu przeprowadzenia analizy kosztów cyklu życia trzech systemów ochrony antykorozyjnej stalowych barier zamontowanych na odcinku drogi, przyjęto następujące założenia: okres eksploatacji – 25 lat (do analizy przyjęto lata 2015 – 2040); stopa dyskontowa – 1,75%. W przypadku wariantów 2 i 3 wykonywane są prace związane z czyszczeniem i odnawianiem powłok antykorozyjnych (czyszczenie strumieniowo-ścierne, odtłuszczenie, malowanie), a we wszystkich wariantach planuje się coroczne mycie barier. Szczegółowa strategia utrzymania została przedstawiona w tabeli 2.

Tabela 2. Przyjęta strategia utrzymania barier zabezpieczonych wg wariantów 1, 2 i 3 w okresie 25 lat

Table 2. The adopted maintenance strategy over a period of 25 years for safety barriers according to options 1, 2 and 3

Po 5 latach	5% powierzchni – czyszczenie i odnowienie powłok antykorozyjnych*
Po 10 latach	15% powierzchni – czyszczenie i odnowienie powłok antykorozyjnych*
Po 15 latach	25% powierzchni – czyszczenie i odnowienie powłok antykorozyjnych*
Po 20 latach	50% powierzchni – czyszczenie i odnowienie powłok antykorozyjnych*
Po 25 latach	70% powierzchni – czyszczenie i odnowienie powłok antykorozyjnych*
Co roku	100% powierzchni – mycie (dotyczy wariantu 1, 2, 3)

* dotyczy wariantu 2 i 3

Na rysunku 3 przedstawiono porównanie kosztów cyklu życia (w okresie 25 lat) przedmiotowego odcinka barier stalowych zabezpieczonych antykorozyjnie wg trzech alternatywnych systemów. Koszty cyklu życia poszczególnych wariantów obejmują: nakłady początkowe; koszty prac naprawczych i utrzymania prowadzonych w okresie 25 lat (wartości zdyskontowane) oraz coroczne koszty mycia barier wodą z detergentem pod ciśnieniem (wartości zdyskontowane).



Rys. 3. Relacje LCC barier stalowych zabezpieczonych antykorozyjnie wg trzech systemów

Fig. 3. LCC relations of steel barriers protected against corrosion by three systems

Wyniki analiz wskazują, iż uwzględniając wyłącznie nakład początkowy, **najdroższym rozwiązaniem jest wykonanie balustrad zabezpieczonych antykorozyjnie wg wariantu 2** (rysunek 2). Analizując koszty utrzymania balustrad w okresie 25 lat, stwierdzono, że jest to także najdroższe rozwiązanie, patrząc na założony okres eksploatacji (rysunek 3). Decyduje o tym m.in. szybki czas starzenia się malarskich powłok zabezpieczających (tracą one swoją elastyczność, zarysowują się, pękają i łuszcza), co w konsekwencji powoduje istotne obniżenie ich trwałości. W praktyce oznacza to, że co 4 – 7 lat musi być powtarzany pracochłonny zabieg konserwacji i naprawy w postaci nanoszenia nowych powłok malarskich. Działania te powodują, iż koszty zabezpieczenia powłokami malarskimi rosną w czasie. Natomiast koszt zabezpieczenia konstrukcji stalowej, w postaci zastosowania

warstwy ocynkowanej, pozostaje przez dłuższy okres na niezmiennym poziomie (występuje tylko nakład początkowy, bez konieczności podejmowania kosztownych działań utrzymaniowych). Uwzględniając łączny koszt cyklu życia, tj. nakład początkowy oraz 25-letni okres utrzymania balustrad stalowych zabezpieczonych w trzech wariantach, stwierdzono, że **najtańszym rozwiązaniem jest wariant 1 (barierki ocynkowane bez powłoki malarskiej)**.

Analiza rzeczywistego przypadku

Poszukiwanie rozwiązań optymalnych w warunkach długoterminowej eksploatacji elementu w bardzo dużym stopniu zależy od jakości i warunków wytworzenia powłok antykorozyjnych, jak również warunków rzeczywistej eksploatacji [1, 9]. Na fotografiach 2 i 3 przedstawiono przykład konstrukcji eks-



Fot. 2. Wykwity solne na powierzchni powłoki malarskiej

Photo 2. Salt efflorescence on the surface of the paint coating



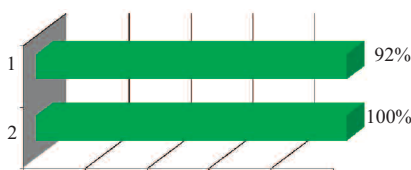
Fot. 3. Korozja powłoki cynkowej stanowiącej podkład pod malarską powłokę proszkową

Photo 3. Corrosion of the zinc coating being a primer for a powder coating

platuowanej w warunkach obiektu mostowego nad rzeką w obszarze nizinnym. Pod koniec okresu gwarancyjnego (przyjęto okres 5 lat) użytkownik obiektu stwierdził wadliwość systemu zabezpieczenia antykorozyjnego. Podjęte przez wykonawcę prac czynności zaradcze ograniczyły się do lokalnych, powierzchniowych napraw maskujących jedynie wizualne defekty, bez usunięcia wady technologicznej powłoki.

W analizowanym przypadku projektant wybrał najdroższy (w odniesieniu do nakładów początkowych) wariant zabezpieczenia antykorozyjnego elementów – **cynkowanie zanurzeniowe wraz z kolorystyczną powłoką malarską wykonaną za pomocą farb ciekłych**. W trakcie realizacji, za namową podwykonawcy, rozwiązanie zostało zamienione na powłokę malarską wykonywaną z zastosowaniem farb proszkowych. Było to podyktowane chęcią skrócenia czasu realizacji prac antykorozyjnych. Efekty błędów i niedoróbek popełnionych w czasie aplikacji powłok proszko-

wych ujawniły się dopiero po kilku latach eksploatacji, gdy na powierzchni systemu malarskiego zaczęły pojawiać się białe wykwity i naloty. Dalsze szczegółowe badania wykazały nieszczelność systemu malarskiego, zbyt cienką jego warstwę, szczególnie w szczelinach wypełniających barierkę. Pod powłoką malarską stwierdzono w większości przypadków rozwój powierzchniowy korozji zabezpieczenia cynkowego. Powodem była nieszczelność systemu powstała podczas produkcji elementów. Zaobserwowano również nieszczelności powłoki zewnętrznej z powodu korozji podpowłokowej, skutkującej przyrostem objętości produktów korozyjnych, a w następstwie tego miejscowym rozerwaniem tej powłoki. W efekcie doszło do dalszych uszkodzeń i braku przyczepności powłoki malarskiej do powierzchni cynkowej. Wady wykonawcze oraz brak dostatecznej obróbki powierzchni powłoki cynkowej i jej gazowanie w procesie wygrzewania farb w piecach spowodowały, że użytkownik po 5 latach od przejścia obiektu do eksploatacji został zmuszony do wykonania ponownego malowania renowacyjnego. Koszt został oszacowany przez wykonawcę na poziomie 92% kosztu wykonania początkowego tego fragmentu inwestycji (rysunek 4), a czas potrzebny na wykonanie napraw aż na 290 robocizdni.



1 – koszt ponownego wykonania kolorystycznego malowania zabezpieczającego;
2 – nakład początkowy

Rys. 4. Zmiana relacji kosztu życia obiektu w analizowanym przypadku

Fig. 4. The change cost relationship of the object's lifetime in the analyzed case

Wnioski

1. Zabezpieczenia antykorozyjne w postaci powłok malarskich, balustrad stalowych ocynkowanych oraz nieocynkowanych, stanowią rozwiązania droższe w porównaniu z zastosowaniem balustrad ocynkowanych, lecz niezabezpieczonych powłoką malarską. Szybki czas starzenia się powłoki powoduje istotne obniżenie jej trwałości, koniecz-

ność przeprowadzania kosztownych i częstych zabiegów konserwacji i napraw w postaci nanoszenia nowych powłok malarskich. Analiza LCC potwierdziła długookresowe korzyści wynikające z zastosowania ochrony antykorozyjnej w postaci powłoki ocynkowanej, niemalowanej.

2. W przypadku konieczności stosowania powłok antykorozyjnych o żądanej kolorystyce rozsądnym rozwiązaniem pod względem kosztów (także w ujęciu LCC) wydaje się stosowanie malowania bez stosowania powłok cynkowych.

3. Przedstawione w artykule studium przypadku potwierdza potrzebę wykorzystania analizy LCC w procesie planowania inwestycji, w celu zoptymalizowania kosztu cyklu życia balustrad stalowych z uwzględnieniem nakładów początkowych, ale również właściwego systemu zabezpieczenia antykorozyjnego oraz częstotliwości i zakresu wykonywania zabiegów utrzymaniowych i konserwacyjnych.

4. Metoda obliczania kosztu cyklu życia, zastosowana na etapie projektowania konstrukcji, stanowi doskonałe narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji inwestycyjnej, tj. wskazuje rozwiązanie optymalne. Na tym etapie optymalizacja wykorzystująca LCC może dotyczyć m.in. rozmiaru i kształtu konstrukcji, rodzaju materiału, technologii, rozwiązań konstrukcyjnych, ale także systemu ochrony antykorozyjnej.

5. Utrzymanie balustrad stalowych zabezpieczonych antykorozyjnie powłokami malarskimi generuje w dłuższej perspektywie znaczne wydatki ponoszone przez zarządcę i właściciela infrastruktury drogowej. Odnosi się to także do wykonawcy w przypadku, gdy wady ujawnią się w okresie gwarancji na roboty budowlane.

6. Zastosowanie w prezentowanym case study zabezpieczenia antykorozyjnego w postaci systemu jednowarstwowego (wykonanego jedynie w postaci zabezpieczenia cynkowego) dałoby znaczne oszczędności kosztowe i czasowe. Można byłoby je uzyskać w okresie wytwarzania, ale również eksploatacji obiektu. W ten sposób wyeliminowano by powstanie dużej liczby wad międzyoperacyjnych i międzysystemowych.

Literatura

- [1] Beskopylny A., A. Lyapin, H. Anysz, B. Meškhi, A. Veremeenko, A. Mozgovoy. 2020. „Artificial Neural Networks in Classification of Steel Grades Based on Non-Destructive Tests”. *Materials* 13 (11): 2445. DOI. org/10.3390/ma13112445.
- [2] Grzyl Beata, Adam Kristowski, K. Jamroz, A. Gobis. 2017. „Methods of estimating the cost of traffic safety equipment's life cycle”. In *MATEC Web of Conferences Vol. 122, p. 02003*. EDP Sciences. DOI. org/10.1051/mateconf/201712202003.
- [3] Grzyl Beata, E. Miszewska, M. Apollo. 2017. The life cycle cost of a building from the point of view of environmental criteria of selecting the most beneficial offer in the area of competitive tendering, *E3S Web of Conferences* 17, 00028 pp. 1– 8. DOI: 10.1051/e3sconf/20171700028.
- [4] Hamela D. 2000. „Stal ocynkowana ogniowo – sezonowanie przed malowaniem (in Polish)”. *Ochrona przed korozją* 9: 237 – 239.
- [5] Komorowski L. 2012. „Przygotowanie powierzchni powłoki cynkowej zanurzeniowej przed malowaniem (in Polish)”. *Ochrona przed korozją* 9: 380 – 85.
- [6] Kowalski Dariusz, Beata Grzyl, Adam Kristowski. 2017. „The cost analysis of corrosion protection solutions for steel components in terms of the object life cycle cost”. *Civil and Environmental Engineering Reports* 26.3, pp. 5 – 13. DOI: 10.1515/ceer-2017-0031.
- [7] Kowalski Dariusz. 2016. „Czy przeglądy okresowe obiektów budowlanych są potrzebne”. Are periodic inspections of buildings necessary (in Polish). *Materiały Budowlane* 525 (5): 78 – 79. DOI: 10.15199/33.2016.05.37.
- [8] Kowalski Dariusz. 2016. „Korozja i zniszczenia kształowników stalowych o przekrojach zamkniętych. Corrosion and destruction steel hollow sections (in Polish)”. *Przegląd Budowlany* 87 (5): 32 – 34.
- [9] Kowalski Dariusz. 2017. „Problemy z powłokami antykorozyjnymi na elementach wyposażenia obiektów mostowych (in Polish)”. *Ochrona przed korozją* 60 (3): 65 – 68. DOI: 10.15199/40.2017.3.3.
- [10] Kristowski Adam, Beata Grzyl, Dariusz Kowalski. 2018. The analysis of the influence of the corrosion protection method of selected steel elements on the steel structure life cycle costs Creative Construction Conference 2018, CCC 2018, Slovenia, Ljubljana, 30 June – 3 July 2018, Proceedings of the Creative Construction Conference. DOI: 10.3311/CCC2018-029.
- [11] PN-EN ISO 12944 Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów powłokowych (in Polish).
- [12] Urbańska-Galewska E., Dariusz Kowalski. 2015. *Dokumentacja projektowa konstrukcji stalowych w budowlanych przedsięwzięciach inwestycyjnych (in Polish)*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [13] Wieczorek D., E. Plebankiewicz, K. Zima. 2019. „Model estimation of the whole life cost of a building with respect to risk factors”. *Technological and Economic Development of Economy* 25.1 pp. 20 – 38.

Przyjęto do druku: 24.03.2021 r.