

dr inż. Jerzy Kukielka¹⁾
ORCID: 0000-0001-7050-697X

Podbudowy kompozytowe z dodatkiem miazgu gumowego z recyklingu opon samochodowych do nawierzchni drogowych

Composite bases with the addition of rubber powder from recycled tires for road pavements

DOI: 10.15199/33.2023.10.08

Streszczenie. W artykule opisano doświadczenia dotyczące wykonywania podbudów nawierzchni drogowych z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MMCE) i betonów asfaltowo-cementowych (BAC). Wieloletnie prace nad doskonaleniem technologii recyklingu nawierzchni asfaltowych „na zimno” głównie w celu poprawy trwałości zmęczeniowej i odporności na spękania zaowocowały opracowaniem nowych mieszanek kompozytowych z zastosowaniem miazgu gumowego. Opisano skład i właściwości mieszanek zawierających destrukta asfaltowy, kruszywo doziarniające, cement, emulsję asfaltową i rozdrobnione odpady gumowe. Przeprowadzone prace badawcze pozwoliły na opracowanie patentów oraz wdrożenie technologii na odcinkach doświadczalnych.

Słowa kluczowe: recykling nawierzchni asfaltowych; mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne; betony asfaltowo-cementowe; miazg gumowy.

Abstract. The article describes the experience of making road pavement bases from mineral-cement-emulsion mixtures (MCEM) and asphalt-cement concrete (ACC). Many years of work on improving the "cold" recycling technology of asphalt pavements, mainly to improve fatigue life and cracking resistance, resulted in the development of new composite mixtures using rubber powder. Compositions and properties of mixtures containing reclaimed asphalt, new aggregate, cement, asphalt emulsion and shredded rubber waste are described. The laboratory research work carried out allowed the development of patents and the implementation of the technology in experimental sections.

Keywords: recycling of asphalt pavements; mineral-cement-emulsion mixtures; asphalt-cement concretes; rubber powder.

Nawierzchnie półsztywne o podbudowie związanej spoiwami hydraulicznymi (np. cementem lub żużłami granulowanymi) grubości 20 ÷ 50 cm stanowiły we Francji ok. 40% warstw na początku XXI wieku [1]. Podbudowy związane wyłącznie cementem z mieszanek o siedmiu klasach wytrzymałości na ściskanie ($R_c = 1,5 \div 10,0$ MPa), najczęściej o uziarnieniu 0/11,2 do 0/31,5 mm, często stosowano w Polsce do 2013 r. w podbudowach zasadniczych o wytrzymałości $R_c = 8,0 \div 10,0$ MPa [2]. Charakteryzowały się one znaczną liczbą spękań, które jako tzw. spękania odbite widoczne były na jezdni asfaltowej. Dylatowanie poprzeczne i podłużne zalecano w przypadku warstw o wytrzymałości $R_c > 10,0$ MPa. Uzyskanie materiału kompozytowego przez mody-

fikację betonów cementowych i chudych betonów dodatkiem rozdrobnionych odpadów z opon samochodowych badała Ołdakowska E. – autorka pracy doktorskiej z 2006 r. [3, 4].

Przegląd doświadczeń zagranicznych dotyczących modyfikacji mieszanek mineralno-asfaltowych miazgiem gumowym np. metodą „na sucho” zawiera monografia z IBDiM [5], a metodą „na mokro” rozprawa doktorska Orzechowskiego R. z 2017 r. wykonana w Politechnice Świętokrzyskiej [6]. Tytuł monografii wydawnictwa firmy Orlen Asfalt z 2020 r [7] może wydawać się przydatny głównie do projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych, gdyż zawiera informacje dotyczące asfaltów wysoko modyfikowanych HiMA z zastosowaniem lepiscza o ciągłej fazie polimerowej. Monografia ta zawiera m.in. definicje, określenia, rodzaje i charakterystykę mieszanek mineralno-asfaltowych, a przede wszystkim

uproszczony model rozproszonego niszczenia w ośrodku lepko-sprężystym (teoria VECD), opis modułów sztywności (IT-CY) i dynamicznych modułów sztywności AASHTO TP79, których zastosowanie może dotyczyć wielu materiałów budowlanych.

Podbudowy z betonów asfaltowo-cementowych i mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych

Początki powszechnego stosowania recyklingu „na zimno” nawierzchni asfaltowych w Polsce dotyczą pierwszych zaleceń odnoszących się do MMCE wydanych w 1999 r. [8], co dało impuls do dalszych prac nad innymi możliwościami wykorzystania destrukta asfaltowego. Destrukt z frezowania „na zimno” warstw asfaltowych (patent nr 166858 udzielony Politechnice Lubelskiej w 1995 r.) wykorzystano do budowy przystanków autobusowych metodą

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury; jerzy.kukielka@pollub.pl

recyklingu „na miejscu” z wymieszaniem składników betonu asfaltowo-cementowego (BAC) w betoniarnie przeciwbieżnej. Badania laboratoryjne i praktyczne zastosowania takiego betonu na początku XXI w. w Lublinie, na podstawie projektu Komitetu Badań Naukowych 7 T07 E 04819 pt. *Betony asfaltowo-cementowe (BAC) i ich zastosowanie do podbudów i warstw wiążących nawierzchni drogowych*, poprzedzono zgłoszeniem i następnie decyzją o udzieleniu patentu 05.06.2002 r., dotyczącego sposobu wykonania półsztywnej podbudowy nawierzchni drogowej. Tezy i ogólny cel prac naukowych opublikowanych w 2002 r. dotyczyły technologii oraz wpływu grubości warstw z betonu asfaltowo-cementowego, na stan naprężeń i odkształceń oraz wpływu temperatury na jego cechy mechaniczne, której znaczenie podkreślano przez specjalistów uczestniczących w krytycznej konferencji [9]. Pierwszy artykuł dotyczący betonu tego typu opublikowano w „Materiałach Budowlanych” [10], a właściwości mechaniczne, w tym nowe elementy badań dotyczące np. modułów sztywności pełzania wg modelu Burgersa, stanowiły przedmiot publikacji [11]. Stosowanie betonów asfaltowo-cementowych po początkowym zainteresowaniu nie przyjęło się w praktyce, pomimo wielu opisanych w publikacjach doświadczeń terenowych [12].

Prace dotyczące mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych prowadzone były w wielu uczelniach w Polsce, m.in. w Politechnikach Gdańskiej, Wrocławskiej, Świętokrzyskiej i Lubelskiej. Wyniki moich badań dotyczyły zwiększenia ilości cementu w porównaniu z zalecaną w publikacji w „Materiałach Budowlanych” [13]. Oceniono nośność nawierzchni o podbudowie z MMCE przekazanej do eksploatacji w 2000 r. na odcinku drogi krajowej DK 19 przez wykonanie analizy badań FWD w 2013 r. [14]. Na dodatkowej warstwie ścieralnej z SMA ułożonej w 2017 r. nie stwierdzono pęknięć poprzecznych, które były często występującą wadą w różnych regionach Polski. Odcinki dróg wykonane zgodnie z warunkami technicznymi [8] podlegały weryfikacji [15] i posłużyły do opracowania nowej instrukcji wydanej w 2014 r. [16]. Do-

świadczenia z realizacji podbudów wykonywanych w technologii MMCE i BAC mogą stanowić podstawę do ich dalszego ulepszania.

Miał gumowy z recyklingu opon samochodowych jako dodatek do BAC i MMCE

Zużyte opony samochodowe wg Konwencji Bazylejskiej Narodów Zjednoczonych nie są materiałem stanowiącym ryzyko przetwarzania. Stopień rozdrobnienia zużytych opon umożliwia uzyskanie następujących frakcji [5]:

- pył gumowy < 0,2 mm;
- miał gumowy 0,2 – 1 mm;
- granulat gumowy 1 – 10 mm;
- grys > 10 mm.

Doświadczenia dotyczące modyfikacji BAC i MMCE przez dodatek miału gumowego poprzedzone zostały jego zastosowaniem do powszechnie wykonywanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Publikacje dotyczące dodatku rozdrobnionych opon samochodowych to m.in. modyfikacja lepiszczy asfaltowych miałem gumowym [17], doświadczenia nad uszlachetnianiem asfaltu mączką gumową [18], modyfikacja mieszanek mineralno-bitumicznych miałem gumowym [19], kohezja i sprężystość asfaltów modyfikowanych polimerami [20], tymczasowe wytyczne do stosowania spoiwa mineralno-asfaltowo-gumowego [21].

Z prac opisanych w publikacjach Ołdakowskiej E. wynika, że obecność cząstek gumy w betonach cementowych powoduje słabą kohezję w stosunku do silnej przyczepności strefy stykowej cementu z kruszywem. Asphalt w mieszkach mineralno-cementowo-emulsyjnych i betonach asfaltowo-cementowych może być czynnikiem korzystnie wpływającym na tę przyczepność. Doświadczenia dotyczące możliwości poprawienia odporności podbudów z MMCE i BAC na spękania zmęczeniowe przeprowadzone przeze mnie dotyczyły dodatku miału gumowego, którego zadaniem jest zmniejszenie sztywności warstwy oraz zwiększenie podatności konstrukcji nawierzchni.

Mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne z miałem gumowym. Początkowe doświadczenia dotyczyły mieszanek MCE zawierającej 3% emulsji

asfaltowej, 50% destruktu asfaltowego, 33% kruszywa doziarniącego, 6% cementu 42,5 i do 6% miału gumowego 0,4/4 mm [22]. Stwierdzono m.in. potrzebę kompromisu pomiędzy minimalną wytrzymałością na pośrednie rozciąganie ITS i maksymalną wartością modułu sztywności IT-CY z uwzględnieniem temperatury i czasu dojrzewania. W kolejnych pracach badawczych stosowano dodatek miału gumowego 0,2/1,0 mm w mniejszej ilości oraz emulsji asfaltowej do 3%. Uzyskany w 2015 r. patent P 410 929 *Mieszanka do podbudów nawierzchni drogowych* był podstawą umowy licencyjnej Politechniki Lubelskiej z przedsiębiorstwem CEBEL w Lublinie. Przedsiębiorstwo uzyskało finansowanie na zakup licencji, a także sprzętu do wykonywania mieszanek do recyklingu „na zimno” (fotografia 1) oraz wykonania odcinka doświadczalnego nawierzchni. W 2016 r. wybudowano odcinek próbny o podbudowie z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej modyfikowanej miałem gumowym 0/1,0 mm na drodze powiatowej (fotografia 2), a następnie kilka odcinków dróg gminnych. Zamierzone badania i odwierty z nawierzchni nie zostały zrealizowane przede wszystkim z przyczyn obiektywnych. Uzyskanie dalszych zleceń przez wykonawcę oraz dostęp do wykonanych odcinków jest ograniczony.

Wykorzystanie miału gumowego w technologii recyklingu głębokiego „na zimno” było przedmiotem publikacji [23]. Metody badań zmęczeniowych i sposób przygotowania próbek laboratoryjnych opisane w pracy mogą stanowić podstawę do powszechnego wdrożenia tej technologii. W składzie zapraw do wykonania mieszanek w technologii recyklingu MCE zastosowano 3 proporcje składników: CEM : MG : EmA = 1 : 1 : 1; CEM : MG : EmA = 1,5 : 1 : 1; CEM : MG : EmA = 2 : 1 : 1. Wszystkie zaprawy miały W/C w przedziale 0,5 ÷ 0,6, aby uzyskały konsystencję plastyczną i po wypełnieniu form nie ulegały segregacji. Wyniki badań próbek z mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych z dodatkiem miału gumowego zestawiono w tabeli w celu sprawdzenia ich zgodności z wymaganiami.



Fot. 1. Mieszarka do recyklingu „na zimno” z dozatorem miazgu gumowego w PRD Lubartów
Photo 1. „Cold” recycling mixer with a rubber powder feeder in PRD Lubartów



Fot. 2. Wykonanie podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej modyfikowanej miazgiem gumowym
Photo 2. Making of the base course from a mineral-cement-emulsion mixture modified with rubber powder

Badania MMCE z miazgiem gumowym dotyczyły mieszanek o uziarnieniu do 16 mm przy dolnej granicy wg Instrukcji [16]. Próbkę z zawartością 2% emulsji asfaltowej i 2% miazgu gumowego uzyskały trwałość 50% po 602 089 do 1 089 873 cykli obciążenia przy odkształceniu < 114 μm/m. Jednorodność wyników badań była po-

niżej zaleceń i wymaga dalszych prac, aby ją poprawić [23].

Mieszanki betonu asfaltowo-cementowego z miazgiem gumowym mogą być szczególnie przydatne do podbudów nawierzchni drogowych na drogach samorządowych. Charakteryzują się trwałością zmęczeniową zbliżoną do mieszanek mineralno-asfaltowych, gdy odkształcenie rozciągające w spodzie podbudowy nie przekroczy 200 μm/m. Wartość graniczna odkształcenia rozciągającego w badaniach zmęczeniowych po 1 mln cykli obciążeń lub 50% wartości początkowej modułu sztywności określona została na $\epsilon_0 < 220 \mu\text{m/m}$ i okazała się korzystniejsza niż betonów asfaltowych. Zaprawy do BAC [24] o proporcji składników W : C : P : MG = 2 : 5 : 7 : 3, W : C : P : MG = 2 : 5 : 6 : 4, W : C : P : MG = 2 : 5 : 5 : 5 (W – woda, C – cement, P – piasek, MG – miazg gumowy) przebadano w celu określenia składu spełniającego wymagania zawarte w Instrukcji [16]. Do wykonania próbek przyjęto wilgotność optymalną wg Proctora. Badano próbki zawierające 15, 20 i 25% zaprawy cementowo-piaskowo-gumowej (CPG). Uziarnienie mieszanek było bliskie górnej granicy stosowanej w przypadku betonów asfaltowo-cementowych. Betony te z zaprawą CPG charakteryzują się dość dobrą jednorodnością wyników badań [25]. Stwierdzono, że zaprawa cementowo-piaskowo-gumowa, będąca fazą ciągłą, powinna po wymieszaniu z destruktem asfaltowym spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości na rozciąganie pośrednie i modułu sztywności

Składy mieszanek MMCE o stałej zawartości emulsji asfaltowej $E_{mA} = 2\%$ (m/m), cementu C = 4% i 6% (m/m) oraz miazgu gumowego MG = 2; 3; 4 i 5% (m/m) [23]
Compositions of MCEM with constant bitumen emulsion content $BE = 2\%$ (m/m), varied cement content $CEM = 4\%$ and 6% (m/m) with addition of rubber powder $RP = 2; 3; 4$ and 5% (m/m), meeting the requirements of the instruction [23]

Cecha	Wymagane wartości wg Instrukcji		Składy MMCE+ MG spełniające wymagania [%] (m/m)	
	KR1÷KR2 ¹⁾	KR3÷KR4 ¹⁾	KR1÷KR2 ¹⁾	KR3÷KR4 ¹⁾
Zawartość wolnych przestrzeni [%]	8 ÷ 18 maks.14 ²⁾	8 ÷ 15 maks. 12 ²⁾	13 ÷ 15	13 ÷ 15
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS ⁷ , T = 5°C, po 7 dniach [MPa]	0,4 ÷ 0,8	0,5 ÷ 1,0	C = 4 + MG ≤ 3 C = 6 + MG = 2 ÷ 3	C = 4 + MG ≤ 1 C = 6 + MG = 2 ÷ 3
Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie ITS ²⁸ , T = 5°C, po 28 dniach [MPa]	0,6 ÷ 1,4	0,7 ÷ 1,6	C = 4 + MG ≤ 2 C = 6 + MG = 3 ÷ 5	C = 4 + MG ≤ 2 C = 6 + MG = 2 ÷ 5
Moduł sztywności IT-CY ²⁸ T = 5°C, po 28 dniach [MPa]	1500 ÷ 5000	2000 ÷ 7000	C = 4 + MG = 2 ÷ 5 C = 6 + MG = 4 ÷ 5	C = 4 + MG = 2 ÷ 5 C = 6 + MG = 4 ÷ 5
Pozostała wytrzymałość na pośrednie rozciąganie po przechowywaniu próbek w wodzie ITS ²⁸ , T = 5°C, po 28 dniach [%]	≥ 70	≥ 80	C = 4 + MG = 2 ÷ 4 C = 6 + MG = 2 ÷ 4	C = 4 + MG ≤ 1 C = 6 + MG = 2 ÷ 4

¹⁾ KR1 ÷ KR2 – ruch bardzo lekki od 0,05 do 0,5 mln osi 100 kN na pas obliczeniowy, KR3÷KR4 – ruch lekki i średni od 0,5 do 7,3 mln osi 100 kN na pas obliczeniowy

²⁾ materiały rozbiórkowe zawierające smołę

w zależności od kategorii obciążenia ruchem wg Instrukcji [16]. Dozowanie zaprawy CPG do destruktu przyczynia się do zmniejszenia wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułu sztywności w porównaniu z betonem asfaltowo-cementowym z zaprawą cementowo-piaskową. Badania trwałości zmęczeniowej betonu asfaltowo-cementowego z zaprawą CPG potwierdzają ich podobieństwo do mieszanek mineralno-asfaltowych. Maksymalne odkształcenia rozciągające na spodzie warstwy BAC z miętą gumową powinny spełniać warunek $< 200 \mu\text{m/m}$.

Podsumowanie i wnioski

W 2005 r. autorzy pracy [12] stwierdzili, że z chwilą spełnienia przez nowy produkt parametrów określonych w normie, odpad staje się pełnowartościowym produktem, a przejęcie takiego stanowiska uwolniłoby wykonawców robót i inwestorów oraz administrację drogową od utrudnień.... Obecnie w procesie kształcenia kładzie się nacisk na np. kompetencje społeczne, znajomość estetyki i ochrony środowiska. Zagadnienia te były wielokrotnie poruszane w referatach wielu konferencji „Ochrona środowiska i estetyka w budownictwie komunikacyjnym” organizowanych przez Politechnikę Lubelską z udziałem innych ośrodków naukowo-badawczych oraz inwestorów i wykonawców. Specjaliści w dziedzinie technologii materiałów są jednak nadal rzadko docenianymi partnerami w decyzjach dotyczących rozwoju drogownictwa, głównie ze względu na przyjmowanie standardowych, powszechnie stosowanych rozwiązań nieistniejących ryzyka niespełnienia wymagań kontraktowych, które obecnie najczęściej realizowane są w formule „zaprojektuj i wybuduj”.

Wnioski wynikają z wybranych prac badawczych, które przeprowadziłem i opublikowałem ich wyniki:

1) mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjny zawierające 4% cementu, 2% emulsji asfaltowej i 2% miętą gumową spełniają wymagania Instrukcji GDDKiA [16] dotyczące dróg o obciążeniu ruchem KR1 ÷ KR2;

2) trwałość zmęczeniowa i odkształcalność MMCE z dodatkiem miętą gumową, badana zgodnie z norma

EN 12697-24 po 28 dniach w standardowych warunkach stosowanych w Polsce podczas badania mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA), tj. w temperaturze 10°C i przy częstotliwości 10 Hz, jest większa niż wykonywanych dotychczas mieszanek MCE zawierających do 4% cementu;

3) destruktu 0/31,5 mm z frezowania starych warstw asfaltowych, zawierających np. do 10% asfaltu, wpływa korzystnie na trwałość zmęczeniową betonów asfaltowo-cementowych, lecz powoduje jednocześnie zmniejszenie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie;

4) zaprawa cementowo-piaskowo-gumowa w betonie asfaltowo-cementowym, będąca jego fazą ciągłą, powinna po wymieszaniu z destruktem i kruszywem doziarniającym spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS wg Instrukcji [16];

5) w inwestycjach polegających na przebudowie chodników, placów i ścieżek rowerowych w miastach należy uwzględnić wykorzystanie miętą gumową np. do wykonania podsypki z zapraw cementowo-piaskowo-gumowych oraz warstw wzmacniających z betonu asfaltowo-cementowego lub mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych.

Fotografie: Autor

Literatura

- [1] Judycki J, Jaczewski M. Zastosowanie w warunkach polskich francuskiej metody projektowania nawierzchni asfaltowych o podbudowach związanych spoiwem hydraulicznym. *Drogownictwo*. 2012; 6.
- [2] Kukielka J. Nawierzchnie asfaltowe dróg samorządowych. Monografie Politechniki Lubelskiej; 2013.
- [3] Ołdakowska E. Beton cementowy modyfikowany rozdrobnionymi odpadami gumowymi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Budownictwo* 109/2006.
- [4] Ołdakowska E. Badanie wpływu dodatku rozdrobnionych zużytych opon samochodowych na wybrane właściwości kompozytów cementowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Budownictwo* 112/2007.
- [5] Horodecka R, Kalabińska M, Piłat J, Radziszewski P, Sybilski D. Wykorzystanie zużytych opon samochodowych w budownictwie drogowym. *Wydawnictwo IBDiM zeszyt 54*, Warszawa; 2002.
- [6] Orzechowski R. Wpływ gumy i wosku syntetycznego FT na trwałość mieszanki SMA. Praca doktorska. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce; 2017.
- [7] Błażejowski K, Ostrowski P, Wójcik-Wiśniewska M, Baranowski W. Mieszanki i nawierzchnie z Orbiton HiMA. Wydawnictwo Orlen Asphalt, Płock; 2020.

[8] Zawadzki J, Matras J, Mechowski T, Sybilski D. Warunki techniczne wykonania warstw podbudowy z mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjnej (MCE). *IBDiM, Zeszyt 61*, Warszawa; 1999.

[9] Kukielka J, Kukielka J. Wpływ temperatury na cechy mechaniczne betonów asfaltowo-cementowych. Tom 4, Inżynieria komunikacyjna, Konferencja Krynica; 2002.

[10] Kukielka J. Beton asfaltowo-cementowy (BAC). *Materiały Budowlane*. 2000; 11:.

[11] Bajak M. Właściwości mechaniczne podbudów z betonów asfaltowo-cementowych. *Zeszyty Budownictwo i Architektura, WBIA, Politechnika Lubelska*. 2007; 1.

[12] Dreger M, Kraszewski C. Wykorzystanie odpadów przemysłowych w budownictwie drogowym. *Materiały konferencyjne „Estetyka i ochrona środowiska w drogownictwie” Nałęczów*, 16-17.06.2005.

[13] Kukielka J. Recykling głęboki na zimno nawierzchni asfaltowych dróg samorządowych. *Materiały Budowlane*. 2014; 12.

[14] Firllej S, Kukielka J. Load bearing capacity of a national road with base course made of mineral-cement-emulsion mixture after 12 years of exploitation. *Road and Bridges – Drogi i Mosty*. 2019; 189.

[15] Judycki J, Dołycki B, Hutnik K, Stiens M. Weryfikacja zasad projektowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Zlecenie GDDKiA 2005. Praca naukowo-badawcza Politechniki Gdańskiej 2006 r.

[16] Instrukcja projektowania i wbudowywania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych. Politechnika Gdańska. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa; 2014.

[17] Radziszewski P. Modyfikacja lepiszczy asfaltowych miętą gumową. *Drogownictwo*. 1995; 2.

[18] Wojdanowicz G. Doświadczenia nad uszlachetnianiem asfaltów mączką gumową. *Praca COB i RTD, WKŁ, Zeszyt 1/1960*.

[19] Radziszewski P. Modyfikacja mieszanek mineralno-bitumicznych miętą gumową. *Drogownictwo*. 1994; 3 i 1995; 2.

[20] Sybilski D. Kohezja i sprężystość asfaltów modyfikowanych polimerami. *Praca IBDiM*. 1992; 2.

[21] Tymczasowe wytyczne do stosowania spoiwa mineralno-asfaltowo-gumowego. *WZDP*; 1972.

[22] Dębiński M, Kukielka J. Mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MMCE) modyfikowane miętą gumową. VII Międzynarodowa Konferencja „Ochrona środowiska i estetyka w budownictwie komunikacyjnym”. Politechnika Lubelska WBIA Budownictwo i architektura vol. 15 (1) Lublin, 27-29 kwietnia; 2016.

[23] Kukielka J, Bańkowski W. The experimental study of mineral-cement-emulsion mixtures with rubber powder addition. *Construction and Building Materials*. 2019; 226.

[24] Kukielka J. Cechy mechaniczne matryc cementowych i cementowo-asfaltowych z dodatkiem miętą gumowego. *Budownictwo i Architektura*. 2017; 16. (3)7.

[25] Kukielka J, Bańkowski W, Mirski K. Asphalt-Cement Concretes with Reclaimed Asphalt Pavement and Rubber Powder from Recycled Tire. *Materials*. 2021; 14 (9): 2412.

Przyjęto do druku: 18.07.2023 r.