



ŁUKASZ SKOTNICKI¹⁾
JAROSŁAW KUŹNIEWSKI²⁾

CRACKING RESISTANCE OF RECYCLED MINERAL-CEMENT-EMULSION MIXTURES³⁾

ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE MIESZANEK MINERALNO-CEMENTOWO-EMULSYJNYCH WYTWORZONYCH W PROCESIE RECYKLINGU³⁾

STRESZCZENIE. Recykling pozwala na ograniczenie użycia w budownictwie drogowym surowców naturalnych, pozytywnie wpływając na aspekty ochrony środowiska. Do materiałów budowlanych powstających dzięki recyklingowi zalicza się mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (MCE), która jest stosowana do warstw podbudowy konstrukcji nawierzchni drogowych. MCE składa się z kruszywa, kruszywa doziarniającego oraz emulsji asfaltowej i cementu jako spoiw. Kruszywo można zastąpić destruktem asfaltowym ze zdegradowanych nawierzchni drogowych. Zastosowanie cementu w warstwach podbudowy generuje pojawienie się spękań propagujących w kierunku górnych warstw nawierzchni drogowej. Poprzez zastosowanie innowacyjnych spoiw zamiast cementu można zredukować liczbę spękań, a tym samym pozytywnie wpłynąć na trwałość całej konstrukcji nawierzchni. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące zastosowania w mieszankach MCE innowacyjnego spoiwa cementowego, wykorzystującego uboczne produkty pyłaste pochodzące z cementowni (UCPP). Badania laboratoryjne prowadzone były w zakresie analiz trwałości zmęczeniowej i odporności na pękanie. Innowacyjne spoiwa cementowe wykazały istotny wpływ na rezultaty badań. W połączeniu z destruktem asfaltowym zapewniły redukcję zjawiska pękania w mieszankach typu MCE, co poprawiło ich trwałość zmęczeniową.

SŁOWA KLUCZOWE: innowacyjne spoiwo drogowe, mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna, odporność na pękanie, recykling, trwałość zmęczeniowa.

ABSTRACT. Recycling enables reduction in usage of natural resources in road construction, positively affecting its environmental aspects. Construction materials obtained through recycling include mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures, which are used in road pavements as base courses. MCE mixture consists of aggregate, added aggregate that improves gradation, bituminous emulsion and cement. Aggregate may be substituted with reclaimed asphalt material obtained from deteriorated pavements. Use of cement in pavement structure generates cracks that propagate upwards through the upper layers. When innovative binders are used instead of pure cement, the number of cracks may be reduced, improving the life of the entire pavement structure. The article presents selected problems pertaining to MCE mixtures produced using an innovative cement-based binder incorporating cement by-pass dust (CBPD). The performed laboratory tests encompassed fatigue life and fracture toughness. The innovative cement-based binders displayed significant influence on the obtained results. Used in combination with reclaimed asphalt pavement material, they reduced cracking in MCE mixtures, improving their fatigue life.

DOI: 10.7409/rabdim.023.002

KEYWORDS: fatigue life, fracture toughness, innovative road binder, mineral-cement-emulsion mixture.

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; lukasz.skotnicki@pwr.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław; jaroslaw.kuzniewski@pwr.edu.pl

³⁾ article co-edited by Prof. Wojciech Bańkowski and Prof. Jorge Pais, from the series of works under the common title: "Use of RAP in Road Engineering" as part of the Ministry of Education and Science project No. RCN/SP/0569/2021/1 artykuł współredagowany przez dr. hab. inż. Wojciecha Bańkowskiego, prof. IBDiM, oraz dr. inż. Jorge Paisa, prof. Uniwersytetu w Minho, z cyklu prac pod wspólnym tytułem „Wykorzystanie destruktu asfaltowego w budownictwie drogowym” w ramach projektu MeIN Nr RCN/SP/0569/2021/1

1. WPROWADZENIE

1.1. ZASTOSOWANIE MATERIAŁÓW Z RECYKLINGU JAKO ELEMENT OCHRONY ŚRODOWISKA

Do wykonania warstw nawierzchni drogowych coraz częściej wykorzystywane są materiały pochodzące z recyklingu. Recykling w budownictwie drogowym wpływa na ograniczenie składowisk odpadów pochodzących ze zniszczonych nawierzchni drogowych, zmniejsza zapotrzebowanie na naturalne surowce mineralne oraz obniża koszty transportu kruszyw. Istnieje możliwość zastosowania materiału rozbiórkowego na miejscu budowy. Powtórne wykorzystanie destruktu asfaltowego, po odpowiednim przygotowaniu i wymieszaniu ze spoiwami typu emulsja asfaltowa i spoiwo cementowe, umożliwia uzyskanie pełnowartościowych materiałów przeznaczonych do warstw nawierzchni drogowych. Jednym z nich jest mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (MCE).

Na świecie prowadzone są badania weryfikujące właściwości techniczne materiałów z recyklingu i ich przydatność do zastosowania w przemyśle. Autorzy pracy [1] udowodnili na podstawie obserwacji osiadania i stopnia zagęszczenia, że odpady budowlane i pochodzące z rozbiórki (CDW), przy zastosowaniu właściwych technologii, są przydatne do zastosowania. Podłoże wymieszane z tego typu odpadem charakteryzuje się mniejszym odkształceniem niż podłoże naturalne. Jako składnik podłoża budowlanego można także wykorzystać odpady pochodzące z wysypisk śmieci [2]. Materiały CDW mogą być także wykorzystane do budowy poboczy lub dróg nieutwardzonych. Parametrami, za pomocą których wykazano te właściwości, były gęstość, nośność i mrozoodporność [3]. Mieszanki mineralne kruszyw odzyskanych z rozbiórki domów, w tym także ścian i fundamentów, wykazywały lepsze zachowanie strukturalne i mniejszą degradację oraz wyższe wartości modułów niż mieszanka z naturalnych kruszyw. Dodatkowo trwałość kruszyw naturalnych nie była wyższa od trwałości uzyskanej dla kruszyw recyklowanych. Mieszanki te nadają się do zastosowania w warstwach nawierzchni drogowych niezwiązanych spoiwem [4].

W pracy [5] wykazano, że gruz pochodzący z recyklowanego muru nadaje się do produkcji betonu cementowego. Możliwość zastosowania odpadów betonowych i cegły do konstrukcji nasypów autostrad potwierdziły doświadczenia chińskie [6, 7], jednakże ze względu na możliwość wystąpienia uszkodzonych lub niewłaściwie odwodnionych elementów nawierzchni i nieprawidłowo nachylonych skarp powinno się kontrolować wilgotność nasypu. Według [8-10] odpady budowlane i pochodzące z rozbiórki można zastosować w nasypach drogowych. Możliwość stosowania w niezwiązanych

1. INTRODUCTION

1.1. USE OF RECYCLED MATERIALS AS AN ELEMENT OF ENVIRONMENT PROTECTION

Road pavement courses are increasingly produced using recycled materials. In road construction, recycling reduces landfilling of deteriorated pavement material, limits the demand for natural resources and provides savings on aggregate transportation. It is possible to use reclaimed material directly in-place. Reuse of reclaimed asphalt pavement (RAP) material, after appropriate preparation and mixing with bituminous and cement-based binders, results in production of fully usable road materials, including mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures.

Research works verifying the technical properties and industrial potential of recycled materials are conducted worldwide. Based on observations of settlement and compaction, the authors of [1] proved that construction and demolition waste (CDW) may be reused, provided that appropriate technologies are employed. Subgrade mixed with such material displays lesser strain than natural subgrade. Construction subgrades may incorporate waste from landfills as well [2]. CDW waste can be also used in road shoulders or unpaved roads. Their properties were demonstrated based on density, bearing capacity and frost resistance [3]. Mineral mixtures of aggregates reclaimed from housing demolition, including walls and foundations, displayed better structural performance, lesser deterioration and higher moduli than mixture of natural aggregates. Moreover, weathering resistance of natural aggregates was not greater than that of recycled aggregates. Recycled mixtures may be successfully in unbound pavement layers [4]. In [5] it was shown that recycled debris from a demolished wall may be used in production of cement concrete.

The possibility of usage of concrete and brick waste in highway embankments was confirmed by Chinese research [6, 7]; however, water content should be monitored to avoid damage due to faulty or improperly drained pavement elements or excessive slope angles. According to [8-10], construction and demolition waste may be used in road embankments. The possibility of usage of CDW in unbound road bases was confirmed in [11-16].

A reduction in density and increase in porosity of cement mortars was obtained owing to addition of metallic waste in the form of fibers and steel shavings [17]. Such waste modifies the electric and thermal conductivity of mortars. Usage of recycled fibers may reduce the cost of the final product by as much as 50% in comparison with material

warstwach podbudowy materiałów odpadowych pochodzących z rozbiórki (CDW) potwierdzają badania [11-16].

Zmniejszenie gęstości nasypowej i wzrost porowatości dla zapraw cementowych uzyskano dzięki dodaniu odpadów metalicznych w postaci włókien i wiórów stalowych [17]. Odpady te modyfikują oporność elektryczną i przewodność cieplną zapraw. Zastosowanie włókien pochodzących z recyklingu zmniejsza nawet o 50% koszty gotowego produktu w stosunku do wykorzystania nieużywanych włókien [18], bez pogorszenia właściwości mechanicznych. Lepsze wartości właściwości mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie, parametr *CBR*) uzyskały mieszanki recyklowane zawierające odpady aluminium niż mieszanki recyklowane bez zawartości tego odpadu [19].

1.2. PONOWNE WYKORZYSTANIE DESTRUKTU ASFALTOWEGO, ODPADU GUMOWEGO ORAZ BETONOWEGO

Destrukt asfaltowy oraz odzyskane podłoże stabilizowane cementem wg chińskich badaczy [20] mogą być wykorzystane jako surowiec wtórny do przygotowania mieszanek stabilizowanych cementem w technologii recyklingu na zimno. Zauważono, że mieszanki te wykazywały odpowiednią trwałość. Mieszanki o podwyższonej zawartości odzyskanego destruktu asfaltowego wprawdzie charakteryzują się nieznacznie obniżoną wytrzymałością, lecz nie mają znaczącego wpływu na skurcz przy suszeniu, podatność na erozję czy charakterystykę przepływu kapilarnego [21].

Dużą oszczędność energii i redukcję emisji dwutlenku węgla można uzyskać poprzez zastosowanie w konstrukcji nawierzchni mieszanek z modyfikowanym asfaltem wyprodukowanych z zastosowaniem materiału ze zużytych opon [22, 23]. Takie rozwiązanie przyczynia się do zrównoważonego rozwoju infrastruktury drogowej oraz dostarcza korzyści ekonomicznych. W pracy [24] pokazano, że małe kawałki gumy zmieszane z gruntem zapewniają lepsze wartości odkształceń sprężystych, poprawiają wytrzymałość na ścinanie oraz zwiększają przepuszczalność. Właściwości reologiczne i mechaniczne mieszanin gumowo-asfaltowych poprawia guma, pochodząca z opon samochodowych i stosowana jako dyfikator w postaci okruszków [23].

Badania potwierdzają możliwość zastosowania recyklowanego kruszywa betonowego do mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie oraz modułów sprężystości wykazały, że dodatek recyklowanego kruszywa betonowego w ilości 40% mieszanki mineralnej jest optymalny i zalecany [25].

Badania belgijskie dowodzą, że nawet do 20% naturalnego kruszywa grubego w mieszankach betonowych można

without fibers [18], without deterioration of mechanical properties. Recycled mixtures containing aluminum waste exhibited better mechanical parameters (compressive strength, *CBR*) than recycled mixtures without aluminum [19].

1.2. RECYCLING OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT, RUBBER WASTE AND CONCRETE

According to Chinese researchers [20], RAP and cement-stabilized subgrade may be used in cement-stabilized mixtures in cold recycling technology. It was noted that such mixtures displayed sufficient durability. While mixtures with heightened content of RAP exhibited a slight reduction in strength, they did not considerably affect drying shrinkage, susceptibility to erosion or capillary flow characteristics [21].

Considerable savings in energy and carbon dioxide emissions in road construction may be achieved through use of modified bitumen produced using crumb rubber from scrap tires [22, 23]. Such solution contributes to sustainable development of road infrastructure and provides economic benefits. In [24] it was demonstrated that small rubber particles mixed with soil provide better values of elastic strain, improved shearing strength and permeability. Rheological and mechanical properties of rubber-bitumen mixtures are improved by rubber originating from scrap tires and applied in the form of crumbs [23].

Research works confirm that it is possible to use reclaimed concrete as aggregate in asphalt mixtures. Indirect tensile strength and elastic modulus tests indicated that 40% is the optimum and recommended addition of reclaimed concrete aggregate [25].

Belgian research indicated that even up to 20% of natural aggregate in concrete mixtures may be replaced with high-quality reclaimed concrete aggregate [26], as demonstrated in abrasion resistance and frost resistance tests. Research works devoted to reclaimed concrete aggregate were performed also in Hong Kong. Mixtures of fine recycled aggregate and coarse reclaimed concrete aggregate [27] were subjected to compressive strength tests, whose results confirmed the possibility of usage of this type of waste in structures. Based on several hundred mixture composition designs with reclaimed concrete and natural aggregates, the authors of [28] proved that the type of aggregate used was not significant in concretes with compressive strength of up to 45 MPa. Reclaimed concrete may be used in MCE mixtures as well. Its content at the level of 45% results in the optimum grading of the mineral

zastąpić wysokiej jakości materiałami z recyklingu kruszyw betonowych [26]. Potwierdzają to badania odporności na ściekanie oraz odporności na zamarzanie. Badania recyklowanego kruszywa betonowego wykonano także w Hongkongu. Mieszanki składające się z drobnego kruszywa pochodzącego z recyklingu oraz grubego betonowego kruszywa recyklowanego [27] poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie, których wyniki potwierdziły możliwość stosowania tego typu odpadów w konstrukcjach budowlanych. W pracy [28] autorzy, bazując na kilkuset projektach mieszanek z zawartością kruszywa recyklowanego betonowego i naturalnego, wykazali, że w betonach o wytrzymałości na ściskanie do 45 MPa typ zastosowanego kruszywa nie miał znaczenia. Destrukt betonowy można także zastosować w mieszankach MCE. Jego zawartość na poziomie 45% pozwala na uzyskanie optymalnego uziarnienia mieszanki mineralnej i maksymalnych cech wytrzymałościowych tego typu mieszanki [29].

Istotny wpływ na parametry fizyko-mechaniczne mieszanek recyklowanych metodą na zimno wykazuje asfalt spieniony [30]. Otrzymane wyniki potwierdziły możliwość zastosowania w konstrukcji nawierzchni mieszanek poddanych recyklingowi na zimno ze spienionym asfaltem.

1.3. PONOWNE WYKORZYSTANIE PYŁÓW

Pył w produkcji betonów zastosowany w zastępstwie cementu zmniejsza wytrzymałość na ściskanie [31]. Mieszanka taka zapewnia jednak lepszy komfort cieplny i zmniejsza zapotrzebowanie na energię w budynkach. W Danii [32] oszacowano oddziaływanie popiołu składowanego i popiołu w konstrukcjach drogowych na środowisko. Wykazano poprawę sztywności i brak spadku wytrzymałości betonu asfaltowego zawierającego pył z pieca elektrycznego [33].

Na wartości parametrów mechanicznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie pośrednie czy moduł dynamiczny, w przypadku mieszanek zawierających kruszywo z recyklingu mają wpływ nie tylko ich składniki (w tym rodzaj zastosowanego odpadu) ale także kolejność i sposób wymieszania, warunki mieszania i zagęszczanie [34-36].

1.4. WPŁYW ODPADÓW NA TRWAŁOŚĆ I PĘKANIE MIESZANEK MCE

Materiały pochodzące z recyklingu z powodzeniem mogą być stosowane w procesie wytwarzania nowych mieszanek do warstw konstrukcji nawierzchni drogowych. Z uwagi na ciągle rosnące zapotrzebowanie na surowce, tylko ich odpowiednie pozyskiwanie umożliwi sprawne funkcjonowanie procesu dostarczania kruszyw dla gospodarki oraz wyeliminuje bariery prawne, techniczne i rynkowe [27, 37, 38]. Należy zwrócić szczególną uwagę na dopuszczalną zawartość materiałów odpadowych w finalnym produkcie.

mixture and maximum strength parameters of the MCE mixture [29].

Significant impact on physical-mechanical parameters of cold-recycled mixtures was noted for foamed bitumen [30]. The obtained results confirmed the possibility of use of cold-recycled mixtures incorporating foamed bitumen in pavement structure.

1.3. RECYCLING OF WASTE DUSTS

When used in production as a substitute of cement, waste dust reduces compressive strength of concrete [31]. However, such mixture provides greater thermal comfort and reduces energy use in buildings. The environmental impact of ash in landfills and in road structures was assessed in Denmark [32]. For asphalt concrete incorporating electric arc furnace dust waste, it was shown that stiffness improved and strength was not reduced [33].

In the case of mixtures containing recycled aggregate, mechanical parameters such as indirect tensile strength or dynamic modulus are affected not only by composition (including the type of waste material used) but also compaction and the order, conditions and manner of mixing [34-36].

1.4. INFLUENCE OF WASTE MATERIALS ON THE LIFE AND CRACKING RESISTANCE OF MCE MIXTURES

Recycled materials may be successfully used in production of new mixtures for road pavement layers. Due to the increasing demand for resources, only their appropriate obtaining will enable efficient provision of aggregates for the industry and eliminate legal, technical and market barriers [27, 37, 38]. Particular attention should be placed on the permissible content of waste materials in the final product.

Usage of reclaimed concrete aggregate in MCE mixtures may result in reduced stiffness of the material. However, content of recycled aggregate below 30% of the mixture (by mass) does not considerably affect the tensile strength of the analyzed materials [39].

The phenomenon of stiffness reduction in MCE mixtures may prove advantageous in the case of their use in road base courses. The reduction in stiffness considerably increases the fatigue life of the layer, especially during performance in the cracked phase [29]. Use of RAP in combination with foamed bitumen in base course mixtures enables obtaining of adequate bearing capacity and fatigue life of road bases [40].

Zastosowanie betonowego kruszywa pochodzącego z recyklingu do mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych może skutkować redukcją sztywności tych materiałów. Przy tym zawartość kruszywa z recyklingu poniżej 30% masy mieszanki nie wpływa znacząco na wytrzymałość na rozciąganie analizowanych materiałów [39].

Zjawisko redukcji sztywności w mieszankach MCE może okazać się pozytywne w przypadku stosowania tych materiałów w podbudowach nawierzchni drogowych. Redukcja sztywności znacząco wpływa na zwiększenie trwałości zmęczeniowej warstwy, szczególnie podczas pracy w fazie spękania [29]. Zastosowanie destruktu asfaltowego z recyklingu w połączeniu z asfaltem spienionym do wykonania mieszanek do warstw podbudowy pozwala na uzyskanie odpowiedniej nośności i trwałości zmęczeniowej tych warstw [40].

Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem zawartości odzyskanych materiałów cementowych w mieszankach rośnie skurcz [27, 41]. Wzrost zawartości betonowego kruszywa pochodzącego z recyklingu powoduje wzrost wilgotności optymalnej, co skutkuje zwiększeniem skurczu [20]. Zjawisko skurczu może negatywnie wpływać na odporność materiałów na pękanie podczas ich eksploatacji. Wykazano jednak, że mieszanki z recyklingu na zimno (CRM) uzyskują podobne wartości skurczu na sucho jak mieszanki stabilizowane cementem (CSM) z zawartością tylko kruszywa naturalnego [42]. Wyższa zawartość cementu wpływa na wzrost skurczu suchego. W początkowej fazie kluczowe znaczenie ma czas wiązania, dlatego w tym okresie należy utrzymywać optymalną wilgotność warstwy z recyklingu, aby uniknąć wysokiego skurczu przy suszeniu [21].

Aby polepszyć właściwości mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych należy zastosować odpowiednie dodatki, które ograniczą zjawisko skurczu i poprawią ich odporność na pękanie. Dodanie do mieszanek MCE nanocząstek celulozy poprawia stabilność świeżej mieszanki, powoduje wczesne nawodnienie cementu i zmniejsza porowatość zagęszczonej mieszanki oraz wzmacnia jej szkielet nośny [43]. Właściwości mieszanek recyklowanych można polepszyć również dzięki „karbonizacji”, która poprawia właściwości mechaniczne oraz odporność na skurcz na sucho [44, 45].

Porównując ze sobą właściwości mieszanek z zawartością cementu portlandzkiego i mieszanek z wapnem w [46] wykazano, że w mieszankach na bazie wapna wartość skurczu była niższa, a ponadto po dodaniu do nich siarczanu sodu wzrosła ich wytrzymałość. Mieszanki zawierające kruszywo betonowe z recyklingu uzyskały podobną wytrzymałość co mieszanki zawierające nowe kruszywo kamienne [41]. Zastępując granulowany żużel wielkopiecowy popiołem lotnym i różnymi

It was observed that shrinkage increases with an increase in the content of reclaimed cement-based materials in the mixtures [27, 41]. An increase in reclaimed concrete aggregate content leads to an increase in optimum water content, which in turn results in increased shrinkage [20]. Shrinkage may negatively affect fatigue resistance of materials during their service. However, it was demonstrated that cold-recycled mixtures display similar dry shrinkage values as cement-stabilized mixtures containing only natural aggregate [42]. Higher cement content influences an increase in dry shrinkage. In the initial phase the setting time is of key importance; therefore, optimum water content of the recycled layer should be maintained in this period in order to avoid high shrinkage during drying [21].

In order to improve the properties of mineral-cement-emulsion mixtures, appropriate additives should be used, reducing shrinkage and improving their cracking resistance. Addition of nano fibrillated celluloses to an MCE mixture improves stability of fresh mixture, provides early wetting of cement, reduces porosity of compacted mixture and strengthens its structure [43]. Properties of recycled mixtures may also be improved by means of “carbonation”, which improves mechanical properties and resistance to dry shrinkage [44, 45].

Comparing properties of mixtures with Portland cement and lime, the authors of [46] demonstrated that shrinkage of lime-based mixtures was lower; moreover, their strength increased upon addition of sodium sulfate. Mixtures containing reclaimed concrete aggregate achieved similar strength to that of mixtures containing virgin mineral aggregate [41]. When granulated blast furnace slag was substituted by fly ash and various types of fibers it was noted that addition of these materials does not negatively affect cement setting time, slightly limits strength and reduces shrinkage in comparison with the slag-based mixture. Mixtures with fibers were characterized by greater strength and displayed improved frost resistance [47].

In order to improve the properties of mineral-cement-emulsion mixtures, appropriate additives should be used, reducing shrinkage and improving their cracking resistance. Addition of nano fibrillated celluloses to an MCE mixture improves stability of fresh mixture, provides early wetting of cement, reduces porosity of compacted mixture and strengthens its structure [43]. Properties of recycled mixtures may also be improved by means of “carbonation”, which improves mechanical properties and resistance to dry shrinkage [44, 45].

rodzajami włókien stwierdzono, że dodatek tych materiałów nie wpływa negatywnie na czas wiązania cementu, nieznacznie zmniejsza wytrzymałość oraz zmniejsza skurcz w porównaniu do mieszanki żużlowej. Mieszanki z włóknami charakteryzowały się zwiększoną wytrzymałością oraz uzyskały wymaganą odporność na zamrażanie [47].

Podejmuje się również próby wykorzystania kuchennego oleju odpadowego i emulsji asfaltowej w mieszankach z recyklowanym kruszywem betonowym stabilizowanych cementem [48]. Wyniki testów wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie wykazały, że oba dodatki spowodowały akceptowalne zmniejszenie wytrzymałości mieszanki we wczesnym etapie dojrzewania (7 dni). Dodatki te zmniejszyły także sztywność mieszanki i skurcz.

Zastosowanie w mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych pyłu uzyskanego ze starych opon samochodowych pozwala na obniżenie sztywności tych mieszanek oraz redukcję naprężeń niszczących, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej trwałości zmęczeniowej warstwy nawierzchni drogowej [49]. Sposobem na redukcję skurczu i wzrost odporności na pękanie mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych może być również zastosowanie w miejsce cementu innowacyjnych spoiw na bazie ubocznych produktów paleniskowych, w połączeniu z emulsją asfaltową jako lepiszczem scalającym.

2. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

2.1. MIESZANKA MCE DO WARSTW PODBUDOWY

Mieszanki mineralno-cementowo-emulsyjne (MCE) są wykorzystywane w podbudowach nawierzchni drogowych. Mieszanka MCE składa się z destruktu asfaltowego, kruszywa doziarniającego, emulsji asfaltowej, cementu i wody. Dodanie cementu jako środka wiążącego wpływa jednak na „utwardzanie” mieszanki MCE. Przy zwiększonej ilości cementu sztywność mieszanki może wzrosnąć od kilku do kilkunastu procent [50].

Podstawowym celem badań jest ocena wpływu innowacyjnego środka wiążącego (zastosowanego w zastępstwie cementu) na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy. Wynikiem prac jest uzyskanie specjalnie opracowanego środka wiążącego o optymalnym składzie w postaci spoiwa hydraulicznego do podbudowy MCE, zmniejszającego sztywność mieszanek MCE i poprawiającego ich odporność na pękanie.

Badania w ramach tego przedsięwzięcia zostały wykonane w sumie dla 14 wariantów mieszanki MCE. Zastosowano

Comparing properties of mixtures with Portland cement and lime, the authors of [46] demonstrated that shrinkage of lime-based mixtures was lower; moreover, their strength increased upon addition of sodium sulfate. Mixtures containing reclaimed concrete aggregate achieved similar strength to that of mixtures containing virgin mineral aggregate [41]. When granulated blast furnace slag was substituted by fly ash and various types of fibers it was noted that addition of these materials does not negatively affect cement setting time, slightly limits strength and reduces shrinkage in comparison with the slag-based mixture. Mixtures with fibers were characterized by greater strength and displayed improved frost resistance [47].

Trials devoted to usage of waste cooking oil and bituminous emulsion in cement-stabilized mixtures with reclaimed concrete aggregate have also been performed [48]. Compressive and tensile strength tests indicated that both additives caused acceptable reduction in mixture strength at an early stage of curing (7 days). The additives also reduced stiffness and shrinkage of the mixture.

Usage of waste rubber powder in MCE mixtures enables reduction in their stiffness and failure stress; at the same time, adequate fatigue life of the pavement course is maintained [49]. Reduction of shrinkage and improvement of cracking resistance of MCE mixtures may also be obtained through usage of innovative hydraulic binders incorporating by-pass dusts, in combination with bituminous emulsion as second binder.

2. MATERIALS AND TEST METHODS

2.1. MCE MIXTURE FOR ROAD BASE COURSES

Mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures are used in road bases. A typical MCE mixture consists of reclaimed asphalt pavement, added aggregate, bituminous emulsion, cement and water. However, use of pure cement results in “stiffening” of the mixture. At greater cement content, mixture stiffness may increase by over ten per cent [50].

The basic aim of the performed research was to evaluate the influence of the innovative hydraulic binder (used as substitute of cement) on physical, mechanical and rheological properties of the recycled base course. The research effort resulted in determination of the optimum composition of the innovative hydraulic binder dedicated to MCE base courses, providing a reduction in stiffness and improvement in cracking resistance.

dwie różne mieszanki mineralne: drobnoziarnistą i gruboziarnistą, dla których przygotowano 7 różnych zawartości innowacyjnego środka wiążącego [51, 52]. Mieszanekom drobnoziarnistym przydzielono oznaczenie: MCE-D-1V, MCE-D-2V, MCE-D-3V, MCE-D-4C, MCE-D-5C, MCE-D-6C oraz MCE-D-7C. Mieszanki gruboziarniste oznaczono: MCE-G-1V, MCE-G-2V, MCE-G-3V, MCE-G-4C, MCE-G-5C, MCE-G-6C i MCE-G-7C. Różniły się one między sobą zawartością trzech składników (cementu, wapna hydratyzowanego oraz ubocznych cementowych produktów pylistych UCPP). W planie badań uwzględniono również dwie mieszanki referencyjne: drobnoziarnistą (MCE-D-Ref) i gruboziarnistą (MCE-G-Ref), w których zastosowano cement jako spoiwo.

Mieszanka drobnoziarnista zawierała kruszywo naturalne doziarniające (melafir) o ciągłym uziarnieniu 0/31,5, kruszywo naturalne doziarniające (piasek płukany) o ciągłym uziarnieniu 0/2 oraz kruszywo recyklowane (destrukta asfaltowy) 0/10. Z kolei mieszanka gruboziarnista składała się z kruszywa naturalnego doziarniającego (melafir) o ciągłym uziarnieniu 0/31,5, kruszywa naturalnego doziarniającego (piasek płukany) o ciągłym uziarnieniu 0/2 oraz kruszywa recyklowanego (destrukta asfaltowy) 0/31,5. Zastosowanie specjalnego środka wiążącego miało zapewnić trwałość eksploatacyjną oraz ograniczyć sztywność mieszanki MCE. Składy poszczególnych spoiw przedstawiono w Tabl. 1.

Table 1. Symbols and compositions of the designed hydraulic binders

Tablica 1. Oznaczenie i składy zaprojektowanych spoiw

Symbol of binder Oznaczenie spoiw	Binder components / Składniki spoiwa		
	Cement	Lime / Wapno	CBPD / UCPP
1V	0.20	0.20	0.60
2V	0.20	0.60	0.20
3V	0.60	0.20	0.20
4C	0.20	0.40	0.40
5C	0.40	0.20	0.40
6C	0.40	0.40	0.20
7C	0.33	0.33	0.33
Ref	1	0	0

Określenie właściwości fizycznych, mechanicznych i reologicznych miało wykazać wpływ składu innowacyjnego środka wiążącego na zmianę właściwości recyklowanej podbudowy. Spoiwo o optymalnym składzie zostanie wykorzystane w warstwie podbudowy wykonanej z MCE w konstrukcji nawierzchni drogowej na odcinku doświadczalnym. Umożliwi to ocenę przydatności innowacyjnego spoiwa w warunkach rzeczywistych.

The research encompassed a total of 14 variants of the MCE mixture composition. Two different mineral mixtures were used – fine and coarse-grained – for which 7 various contents of the innovative hydraulic binder were adopted [51, 52]. Fine mixtures were labeled as: MCE-D-1V, MCE-D-2V, MCE-D-3V, MCE-D-4C, MCE-D-5C, MCE-D-6C and MCE-D-7C. Coarse mixtures were labeled as: MCE-G-1V, MCE-G-2V, MCE-G-3V, MCE-G-4C, MCE-G-5C, MCE-G-6C and MCE-G-7C. They differed in the content of three components (cement, hydrated lime and cement by-pass dust). The research plan also encompassed preparation of two reference mixtures – fine (MCE-D-Ref) and coarse (MCE-G-Ref) – in which pure cement was used as hydraulic binder.

The fine mixture contained added continuously-graded 0/31.5 natural aggregate (melaphyre), added continuously-graded 0/2 natural aggregate (washed sand) and 0/10 recycled aggregate (reclaimed asphalt pavement). The coarse mixture contained added continuously-graded 0/31.5 natural aggregate (melaphyre), added continuously-graded 0/2 natural aggregate (washed sand) and 0/31.5 recycled aggregate (reclaimed asphalt pavement). Usage of special three-component hydraulic binder was to provide prolonged service life and reduce the stiffness of the MCE mixture. Compositions of binders are shown in Table 1.

Physical, mechanical and rheological properties were determined in order to demonstrate the effect of the innovative hydraulic binder on the properties of the recycled base course. The binder with the optimum composition will be used in an MCE road base on a test section, which will enable evaluation of the innovative binder in real conditions.

2.2. SELECTION OF THE COMPOSITION OF THE RECYCLED BASE COURSE

The tested MCE mixtures were produced using reclaimed asphalt pavement, added aggregate, hydraulic binder, bituminous emulsion and water. Strength and strain properties of MCE mixtures depend on gradation of the mineral mixture used, as confirmed by the requirements [53]. When the tested mixtures were designed, it was assumed that the percentage of both types of aggregate (reclaimed asphalt vs. added natural aggregate) will be the same in both mineral mixtures. Moreover, grading curves of the fine and coarse mineral mixtures shall lie within the limit curves for MCE mixtures. Upon further analyses, the following proportions of the components were adopted for the mineral mixtures: 40% of reclaimed asphalt pavement,

2.2. DOBÓR SKŁADU RECYKLOWANEJ
PODBUDOWY

Do wytworzenia mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych wykorzystano następujące materiały: destrukta asfaltowy, kruszywo doziarniające, spoiwo hydrauliczne, emulsję asfaltową oraz wodę. Wartości właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych mieszanek MCE są uzależnione od składu granulometrycznego mieszanki mineralnej, co potwierdzają wymagania [53]. W projekcie założono, że zawartość procentowa poszczególnych składników mieszanki mineralnej (kruszywa naturalne oraz destrukta) w obu typach mieszanek będzie taka sama. Ponadto krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej drobnoziarnistej i gruboziarnistej powinna spełniać warunki krzywych granicznych MCE. Po wykonaniu analiz w projekcie mieszanek mineralnych założono udział procentowy destrukta asfaltowego na poziomie 40%, kruszywa naturalnego 0/31,5 mm w ilości 50% oraz kruszywa naturalnego 0/2 mm – 10% (Tabl. 2). Optymalna procentowa zawartość destrukta została przyjęta na podstawie analiz [51, 54].

Table 2. Compositions of mineral mixture
Tablica 2. Skład mieszanek mineralnych

Mixture components Składniki mieszanki		Mineral mixture (fine) Mieszanka mineralna (drobnoziarnista)	Mineral mixture (coarse) Mieszanka mineralna (gruboziarnista)
0/10 reclaimed asphalt 0/10 kruszywo sztuczne (destrukta asfaltowy)	[%]	40	–
0/31.5 reclaimed asphalt 0/31.5 kruszywo sztuczne (destrukta asfaltowy)	[%]	–	40
0/31.5 crushed aggregate improving the gradation – melaphyre 0/31.5 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu – melafir	[%]	50	50
0/2 natural aggregate improving the gradation – sand 0/2 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu – piasek	[%]	10	10

Na podstawie doświadczeń własnych [29, 40, 55, 56] oraz wyników badań przedstawionych w [48, 57, 58] w projekcie mieszanek MCE założono 3% udział cementu. Do badań zastosowano cement portlandzki CEM II klasy 32,5. Wilgotność optymalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu mieszanek oznaczono metodą Proctora, na podstawie normy [59]. Dla mieszanki drobnoziarnistej wilgotność optymalna wynosiła 8,0%, zaś dla mieszanki gruboziarnistej: 7,8% [51, 54].

W analizowanych mieszankach MCE zastosowano emulsję kationową C60B10 R zgodnie z wymaganiami normy [60]. Dodatkowo zaleca się, aby w emulsji zastosowano asfalt 50/70 lub 70/100 wg [53]. Ostatecznie udział procentowy emulsji asfaltowej 60/40 przyjęto na poziomie 5%. Do jego określenia wykorzystano doświadczenia własne [29, 40, 55, 56] oraz

50% of added 0/31.5 mm natural aggregate and 10% of added 0/2 mm natural aggregate (Table 2). The optimum content of RAP was adopted based on analyses presented in [51, 54].

Based on the authors' own research [29, 40, 55, 56] and the results presented in [48, 57, 58], 3% cement content was adopted for the MCE mixtures. Portland cement CEM II 32.5 was used in the tests. Optimum water content and maximum dry density were determined in a Proctor test, in accordance with the standard [59]. The optimum water content equaled 8.0% for the fine aggregate and 7.8% for the coarse aggregate [51, 54].

Cationic emulsion C60B10 R was used in the tested MCE mixtures, in accordance with the standard [60]. It is also recommended that 50/70 or 70/100 bitumen be used in the emulsion [53]. The 60/40 bituminous emulsion content was adopted as 5%, based on the authors' own research [29, 40, 55, 56] and information available in international literature [61-63]. The used emulsion content resulted in the following final total content of bitumen (originating both from emulsion and RAP material): 5.1% in fine mixtures and 4.9% in coarse mixtures.

2.3. COMPOSITION OF THE MCE MIXTURES

The recycled MCE mixtures were designed taking into account the above assumptions. Percentages of the components used are given in Tables 3 and 4. Compositions of the MCE mixtures in which cement was replaced with the innovative hydraulic binder were designed as well. Compositions of the binders are shown in Table 1.

2.4. THE PERFORMED TESTS

2.4.1. The aim and scope of the tests

Laboratory tests were performed on MCE mixtures of varying compositions (16 mixtures – 14 mixtures with the innovative hydraulic binder and 2 reference mixtures with pure cement). The aim of the tests was to evaluate

informacje dostępne w literaturze światowej [61-63]. Zastosowana zawartość emulsji pozwoliła na uzyskanie całkowitej zawartości lepiszcza w mieszankach drobnoziarnistych na poziomie 5,1%, a w mieszankach gruboziarnistych na poziomie 4,9% (przy uwzględnieniu lepiszcza zawartego w emulsji i destrukcie).

2.3. SKŁAD MIESZANEK MCE

Wykonano projekt składu recyklowanych mieszanek MCE. Procentowe zawartości poszczególnych składników przedstawiono w Tabl. 3 i 4. Określono również składy mieszanek MCE, w których cement zastąpiono innowacyjnym środkiem wiążącym (spoiwem). Składy poszczególnych spoiw przedstawiono w Tabl. 1.

the mechanical properties of the future recycled MCE base course. The tests encompassed:

- complex stiffness modulus and fatigue resistance in 4PB-PR test according to [64, 65], at the temperature of +13°C,
- fracture toughness in SCB test according to [66], at the temperature of 0°C.

The temperatures were adopted based on average yearly temperature and the minimum temperature occurring in a road base course.

Table 3. Composition of the fine mixture
Tablica 3. Skład mieszanki drobnoziarnistej

Mixture components Składniki mieszanki		Mineral mixture (fine) Mieszanka mineralna (drobnoziarnista)	Mineral-cement-emulsion mixture (Ref) Mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (Ref)
0/10 reclaimed asphalt 0/10 kruszywo sztuczne (destrukt asfaltowy)	[%]	40	34.40
0/31.5 crushed aggregate improving the gradation – melaphyre 0/31.5 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu – melafir	[%]	50	43.00
0/2 natural aggregate improving the gradation – sand 0/2 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu – piasek	[%]	10	8.60
Cement	[%]	–	3.00
Asphalt emulsion 60/40 Emulsja asfaltowa 60/40	[%]	–	5.00
Water / Woda	[%]	–	6.00

Table 4. Composition of the coarse mixture
Tablica 4. Skład mieszanki gruboziarnistej

Mixture components Składniki mieszanki		Mineral mixture (coarse) Mieszanka mineralna (gruboziarnista)	Mineral-cement-emulsion mixture (Ref) Mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna (Ref)
0/31.5 reclaimed asphalt 0/31.5 kruszywo sztuczne (destrukt asfaltowy)	[%]	40	34.48
0/31.5 crushed aggregate improving the gradation – melaphyre 0/31.5 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu – melafir	[%]	50	43.10
0/2 natural aggregate improving the gradation – sand 0/2 kruszywo naturalne doziarniające o ciągłym uziarnieniu – piasek	[%]	10	8.62
Cement	[%]	–	3.00
Asphalt emulsion 60/40 Emulsja asfaltowa 60/40	[%]	–	5.00
Water / Woda	[%]	–	5.80

2.4. BADANIA

2.4.1. Cel i zakres badań

W przypadku mieszanek MCE o różnych składach (16 mieszanek – 14 z innowacyjnym spoiwem plus 2 z samym cementem) wykonano badania laboratoryjne. Badania te miały na celu ustalenie właściwości mechanicznych przyszłej warstwy recyklowanej podbudowy drogowej. Cykl badań uwzględniał:

- badania zespolonego modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej metodą 4PB-PR wg [64, 65] w temp. +13°C,
- badania pęknięcia metodą SCB wg [66] w temp. 0°C.

Temperatury badań zostały ustalone jako temperatura średnioroczna oraz temperatura minimalna mogąca pojawić się w warstwie podbudowy nawierzchni drogowej.

2.4.2. Trwałość zmęczeniowa

Badania modułu zespolonego i trwałości zmęczeniowej wykonano wg normy [64, 65] metodą czteropunktowego zginania (4PB-PR). W obu przypadkach wykorzystywane są próbki badawcze w postaci beleczek o nominalnych wymiarach $b = 60$ mm, $h = 50$ mm, $L_{tot} = 400$ mm. Badania prowadzono w temperaturze +13°C. Próbkę zagęszczano urządzeniem wałującym z wykorzystaniem płyt poślizgowych wg normy [67] do uzyskania gęstości objętościowej oznaczonej na próbkach Marshalla. Z zagęszczonej płyty wycinano na mokro beleczki, doprowadzając je do wymaganych wymiarów nominalnych. Okres dojrzewania płyt wynosił 28 dni w powietrzu. Po tym czasie w środku rozpiętości próbki wykonano nacięcie (tzw. karb) o głębokości 10 mm i szerokości 1 mm. Karb miał na celu symulację i inicjację propagacji spękania warstwy podbudowy wykonanej z analizowanego materiału. Widok próbki z karbem przedstawiono na Rys. 1.

W trakcie badań rejestrowano pionową siłę obciążającą i przemieszczenia pionowe w środku rozpiętości belki. Uzyskane dane wykorzystano do określenia zespolonego modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej. Wartości modułu wyznaczono z zależności (1-3):

$$E_{4PB} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}, \quad (1)$$

gdzie:

E_{4PB} – zespolony moduł sztywności [MPa],

E_1 – część rzeczywista,

E_2 – część urojona,

$$E_1 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \cos(\phi) + \frac{\mu}{10^6} \cdot \omega^2 \right), \quad (2)$$

$$E_2 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \sin(\phi) \right), \quad (3)$$

2.4.2. Fatigue resistance

Complex stiffness modulus and fatigue life were tested in accordance with the standards [64, 65], using the configuration of four-point bending of prismatic specimens (4PB-PR). In both cases beam specimens were used, with the nominal dimensions of: $b = 60$ mm, $h = 50$ mm, $L_{tot} = 400$ mm. Tests were performed at the temperature of +13°C. Specimens were compacted in a roller compactor with sliding plates, in accordance with the standard [67], until the Marshall density was achieved. Prismatic specimens were cut from the plate and cut to the required nominal dimensions. The plates were conditioned for 28 days in air. After conditioning a 10-mm-deep and 1-mm-wide notch was cut in mid-span of each specimen. The role of the notch was to simulate and initiate cracking of the base course. A notched specimen is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Notched specimen for the 4PB-PR test

Rys. 1. Próbkę z karbem do badań metodą 4PB-PR

The vertical loading force and the vertical displacement in mid-span of the specimen were registered during the test. The obtained data were used to determine the complex stiffness modulus and the fatigue life. The modulus was calculated based on relationships (1-3):

$$E_{4PB} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}, \quad (1)$$

where:

E_{4PB} – complex stiffness modulus [MPa],

E_1 – real part,

E_2 – imaginary part,

$$E_1 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \cos(\phi) + \frac{\mu}{10^6} \cdot \omega^2 \right), \quad (2)$$

$$E_2 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \sin(\phi) \right), \quad (3)$$

where:

F – loading [kN],

z – displacement in mid-span [mm],

ϕ – phase angle [°],

ω – loading angular frequency [rad/s],

gdzie:

F – obciążenie [kN],

z – ugięcie w środku rozpiętości [mm],

ϕ – kąt przesunięcia fazowego [°],

ω – częstość kołowa obciążenia [rad/s],

μ – współczynnik masy,

γ – współczynnik kształtu.

Trwałość zmęczeniową określono jako liczbę cykli obciążeniowych prowadzącą do spadku modułu zespolonego do poziomu 50% początkowej wartości (Rys. 2). W przypadku badań trwałości zmęczeniowej stosowano cykliczne obciążenie w postaci zadanego mikroodkształcenia na poziomach: $\varepsilon = 90 \cdot 10^{-6}$ m/m, $\varepsilon = 140 \cdot 10^{-6}$ m/m, $\varepsilon = 160 \cdot 10^{-6}$ m/m z częstotliwością wynoszącą 10 Hz. Dla każdego założonego poziomu odkształcenia wykonano analizy trwałości zmęczeniowej na sześciu próbkach badawczych. Wartość modułu zespolonego określana jest w czasie rzeczywistym w sposób ciągły przy tych samych warunkach obciążeniowych. Schemat obciążania próbki zamieszczono na Rys. 3.

Ustalenie odkształcenia niszczącego ε_6 , które pozwala na uzyskanie trwałości zmęczeniowej 1 mln cykli obciążeniowych, wykonano na podstawie krzywych zmęczeniowych ustalonych odrębnie dla każdej z mieszanek MCE. Przykładową krzywą zmęczeniową charakterystyczną dla mieszanek MCE przedstawiono na Rys. 4.



Fig. 3. A 4PB-PR specimen mounted in the test device
Rys. 3. Próbkę w urządzeniu do badania 4PB-PR

2.4.3. Odporność na pękanie – metoda SCB

Drugim testem mającym posłużyć do oceny odporności analizowanego materiału na pękanie były badania zginania próbki półwałcowej metodą SCB. Badania przeprowadzono powyższą metodą wg normy [66]. Do analiz wykorzystano

μ – mass coefficient,

γ – shape coefficient.

Fatigue life was determined as the number of cycles after which the complex modulus decreased to 50% of its initial value (Fig. 2). Fatigue life tests were performed in strain-controlled mode, using three preset strain levels ($\varepsilon = 90 \cdot 10^{-6}$ m/m, $\varepsilon = 140 \cdot 10^{-6}$ m/m, $\varepsilon = 160 \cdot 10^{-6}$ m/m) applied cyclically at the frequency of 10 Hz. Six specimens were tested for each of the adopted strain levels. Complex modulus values were determined in real time using the same loading conditions. A specimen mounted in loading device is shown in Fig 3.

Determination of the critical strain ε_6 , which corresponds to fatigue life of 1 million load cycles, was based on fatigue curves obtained separately for each MCE mixture. A typical fatigue curve obtained for an MCE mixture is shown in Fig. 4.

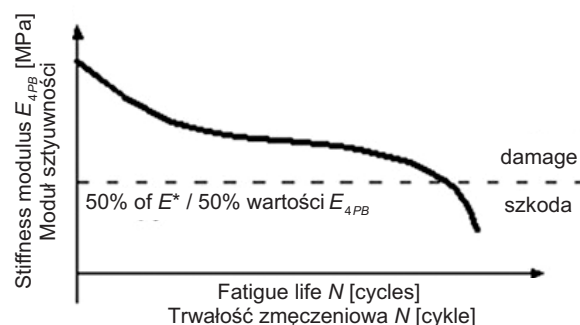


Fig. 2. Analysis of fatigue life
Rys. 2. Analiza trwałości zmęczeniowej

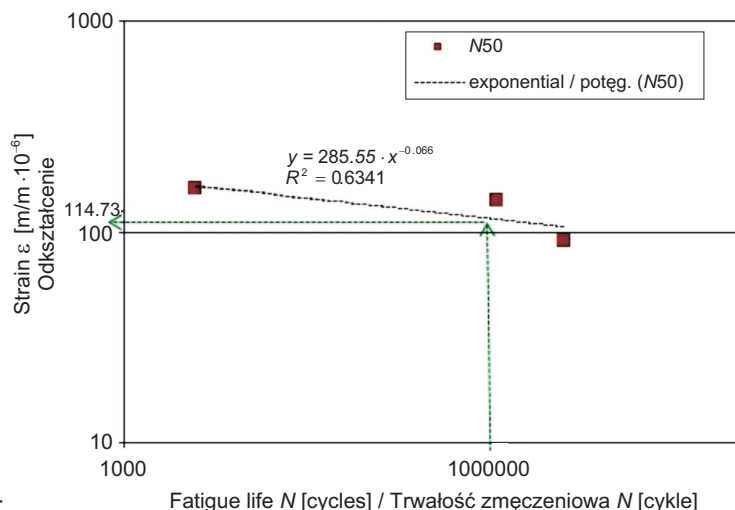


Fig. 4. Fatigue curve of the fine MCE 7C mixture
Rys. 4. Krzywa zmęczeniowa mieszanki drobnoziarnistej MCE 7C

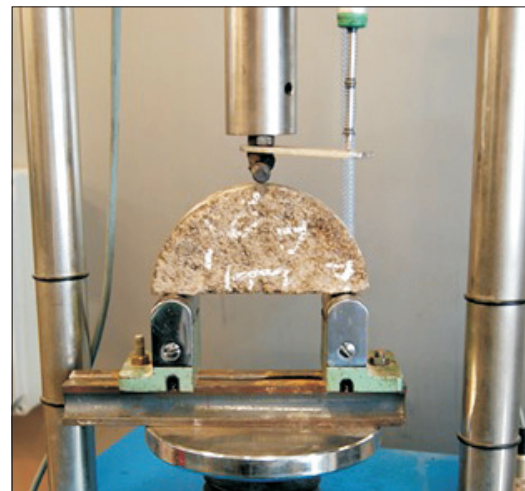
próbki półwalcowe o nominalnej średnicy 150 mm i grubości 50 mm. Badania prowadzono w temperaturze 0°C. Próbkę również zagęszczano urządzeniem wałującym z wykorzystaniem płyt poślizgowych wg normy [67] do uzyskania gęstości objętościowej oznaczonej na próbkach Marshalla. Z zagęszczonej płyty uzyskiwano odwierty, które zostały przycięte do wymaganych wymiarów nominalnych. W środku rozpiętości próbki wykonano karb o głębokości 10 mm i szerokości 1 mm (analogicznie do beleczek 4PB-PR), prostopadły do kierunku zagęszczania płyty. Karb miał na celu symulację i inicjację propagacji spękania. Widok próbek półwalcowych przedstawiono na Rys. 5.



Fig. 5. Specimens prepared for SCB testing
Rys. 5. Próbkę do badania metodą SCB

Analizowane próbki zostały poddane obciążeniu statycznemu przyłożonemu wg schematu przedstawionego na Rys. 6. W trakcie badań rejestrowano obciążającą siłę pionową i przemieszczenia, aż do zniszczenia próbki.

Fig. 6. An SCB specimen mounted in the test device
Rys. 6. Próbkę w aparacie do badania metodą SCB



Podczas badania analizie poddawane były trzy parametry: odkształcenie niszczące $\varepsilon_{\max}$ zgodnie z zależnością (4), naprężenie występujące w materiale przy zniszczeniu $\sigma_{\max}$ (5) oraz tzw. odporność na pękanie, wyrażona parametrem K_{Ic} (6).

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4,263 \cdot F_{\max}}{D_i \cdot t_i} \cdot 100\%, \quad (5)$$

$$K_{Ic} = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_i} \cdot f\left(\frac{a_i}{W_i}\right), \quad (6)$$

gdzie:

2.4.3. Fracture toughness – SCB test

The second test performed in order to evaluate cracking resistance of the analyzed material was the semi-circular bending (SCB) test, conducted in accordance with the standard [66]. Semi-circular specimens of nominal diameter of 150 mm and thickness of 50 mm were used. Tests were performed at the temperature of 0°C. Like in the previous test, specimens were also compacted in a roller compactor with sliding plates, in accordance with the standard [67], until the Marshall density was achieved. Specimens were cored from compacted plates and cut to the required nominal dimensions. Specimens were notched in mid-span, perpendicularly to the direction of compaction (notch depth of 10 mm and width of 1 mm, analogously to the 4PB-PR beams). The role of the notch was to simulate and initiate cracking. Semi-circular specimens are shown in Fig. 5.

The analyzed specimens were subjected to static loading applied according to the scheme shown in Fig. 6. Vertical loading force and displacement were registered throughout the test, up to specimen failure.

Analysis encompassed three parameters: strain at failure $\varepsilon_{\max}$ according to (4), stress at failure $\sigma_{\max}$ (5) and the so-called fracture toughness, expressed by the parameter K_{Ic} (6).

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4.263 \cdot F_{\max}}{D_i \cdot t_i} \cdot 100\%, \quad (5)$$

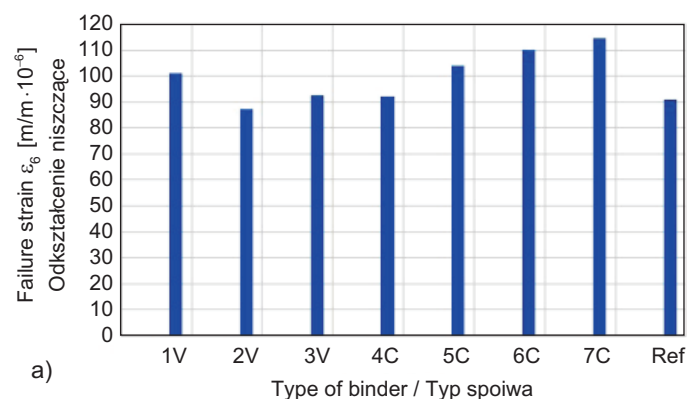
$$K_{Ic} = \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_i} \cdot f\left(\frac{a_i}{W_i}\right), \quad (6)$$

$\varepsilon_{\max}$ – maksymalne odkształcenie niszczące [%],
 $\sigma_{\max}$ – maksymalne naprężenie niszczące [N/mm²],
 K_{Ic} – współczynnik odporności na pękanie [N/mm^{1.5}],
 W_i – wysokość próbki [mm],
 ΔW_i – pionowe przemieszczenie pod wpływem działania maksymalnej siły niszczącej [mm],
 $F_{\max}$ – maksymalna siła niszcząca [N],
 D_i – średnica próbki [mm],
 t_i – grubość próbki [mm],
 a_i – głębokość nacięcia (karbu) [mm],
 f – współczynnik kształtu [–].

3. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

3.1. PORÓWNIANIA WARTOŚCI ODKSZTAŁCENIA ε_6 (4PB-PR) I ODKSZTAŁCENIA NISZCZĄCEGO $\varepsilon_{\max}$ (SCB)

Na podstawie uzyskanych wyników badań określono wartości średnie odkształcenia niszczącego po milionie cykli ε_6 w badaniu 4PB-PR dla wszystkich badanych mieszanek MCE z podziałem na mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste (Rys. 7).



where:

$\varepsilon_{\max}$ – maximum strain at failure [%],
 $\sigma_{\max}$ – maximum stress at failure [N/mm²],
 K_{Ic} – fracture toughness [N/mm^{1.5}],
 W_i – specimen height [mm],
 ΔW_i – vertical displacement under maximum loading force (at failure) [mm],
 $F_{\max}$ – maximum loading force (at failure) [N],
 D_i – specimen diameter [mm],
 t_i – specimen thickness [mm],
 a_i – notch depth [mm],
 f – shape coefficient [–].

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. COMPARISON OF CRITICAL STRAIN ε_6 (4PB-PR) AND STRAIN AT FAILURE $\varepsilon_{\max}$ (SCB)

Mean values of critical strain at one million cycles ε_6 were determined based on the results obtained in the 4PB-PR test for individual mixture types, including the division into coarse and fine mixtures (Fig. 7).

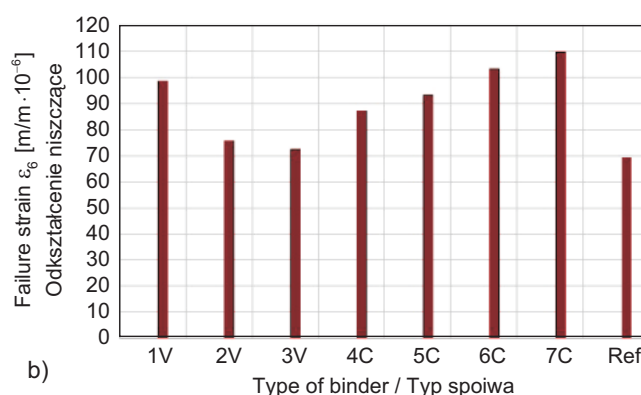


Fig. 7. Critical strain causing failure at 10⁶ cycles ε_6 in the 4PB-PR test: a) fine grained mixture, b) coarse grained mixture
Rys. 7. Odkształcenia niszczące po 10⁶ cykli ε_6 w badaniu metodą 4PB-PR: a) mieszk. drobnoziarnista, b) mieszk. gruboziarnista

Przeprowadzone analizy wskazują na to, że na trwałość zmęczeniową mieszanek MCE w fazie spękaną znaczący wpływ ma typ zastosowanego spoiwa hydraulicznego. W zależności od zastosowanego uziarnienia i spoiwa (1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C) oraz cementu (Ref) mieszanki MCE mogą charakteryzować się odmienną specyfiką materiałową. Zastosowanie innowacyjnych spoiw pozwoliło na uzyskanie wzrostu odkształceń niszczących, a co za tym idzie – wzrostu ich trwałości zmęczeniowej w porównaniu do mieszanek referencyjnych

The performed analyses indicate that fatigue life of MCE mixtures in cracked phase is considerably affected by the type of hydraulic binder used. Depending on the grading and binder (1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C) as well as cement (Ref), MCE mixtures may display different material characteristics. Use of innovative binders provided an increase in critical strain, which reflects an increase in fatigue resistance in comparison to traditional mixtures containing pure cement. Fine mixtures displayed greater fatigue life

zawierających klasyczny cement. Mieszanki drobnoziarniste charakteryzowały się wyższą trwałością zmęczeniową niż mieszanki gruboziarniste. Analizy wykazały pozytywny efekt stosowania innowacyjnych spoiw drogowych w połączeniu z emulsją asfaltową w mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych.

Podczas badań pękania metodą SCB ustalono średnie wartości odkształcenia niszczącego $\varepsilon_{\max}$ oraz odporności na pękanie K_{Ic} , uzyskane z czterech próbek badawczych dla każdej badanej mieszanki. Dane te wraz z odchyleniami standardowymi przedstawiono na Rys. 8 i 9, z uwzględnieniem podziału na mieszanki gruboziarniste i drobnoziarniste.

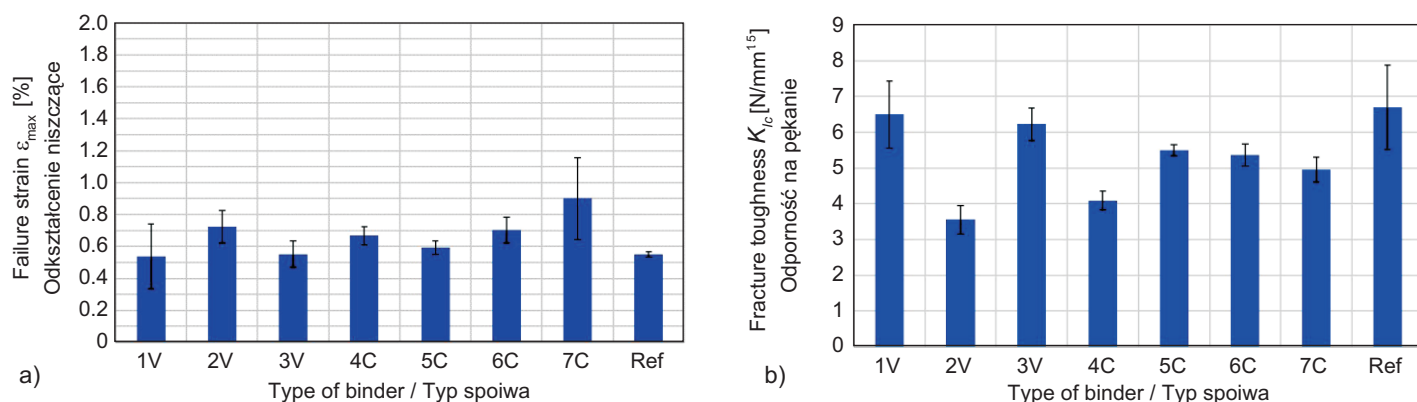


Fig. 8. Results of the SCB test - fine grained MCE mixtures: a) failure strain $\varepsilon_{\max}$, b) fracture toughness K_{Ic}

Rys. 8. Wyniki badania pękania metodą SCB - mieszanka MCE drobnoziarnista: a) odkształcenie niszczące $\varepsilon_{\max}$, b) odporność na pękanie K_{Ic}

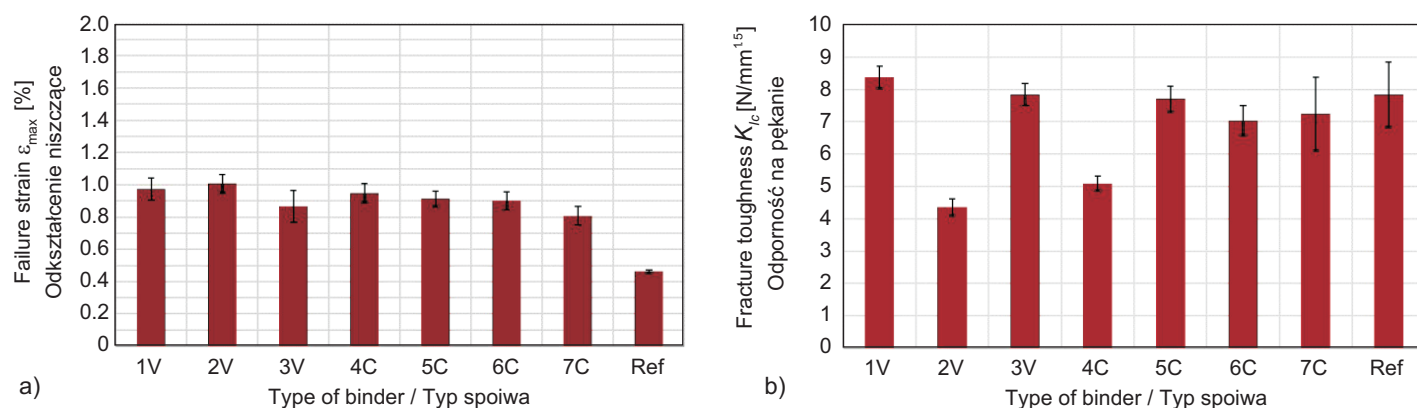


Fig. 9. Results of the SCB test - coarse grained MCE mixtures: a) failure strain $\varepsilon_{\max}$, b) fracture toughness K_{Ic}

Rys. 9. Wyniki badania pękania metodą SCB - mieszanka MCE gruboziarnista: a) odkształcenie niszczące $\varepsilon_{\max}$, b) odporność na pękanie K_{Ic}

Analizy danych wskazują, że zarówno dla mieszanek gruboziarnistych jak i drobnoziarnistych po zastosowaniu innowacyjnego spoiwa odkształcenia niszczące $\varepsilon_{\max}$ wzrosły w porównaniu do mieszanek referencyjnych zawierających klasyczny cement. Wskazuje to na lepszą odporność innowacyjnych mieszanek MCE na pękanie w porównaniu do rozwiązań tradycyjnych. Z kolei parametr odporności na

than coarse mixtures. The analyses indicated a positive effect of use of innovative hydraulic binders in combination with bituminous emulsion in MCE mixtures.

Mean strain at failure $\varepsilon_{\max}$ and mean fracture toughness K_{Ic} were calculated based on SCB tests performed on four specimens per each analyzed mixture type. The obtained mean values and standard deviations are presented in Figs 8 and 9, including the division into coarse and fine mixtures.

As visible in the figures, both coarse and fine mixtures with innovative hydraulic binders displayed an increase in strain at failure $\varepsilon_{\max}$ in comparison to reference mixtures with typical cement. This indicates greater cracking resistance of the innovative MCE mixtures in comparison to traditional solutions. However, the fracture toughness parameter K_{Ic} was more advantageous than that of reference

pękanie K_{Ic} był bardziej korzystny od wyliczonego dla mieszanek referencyjnych tylko w przypadku mieszanek gruboziarnistych, zawierających spoiwo 1V, 3V i 5C. Zaobserwowano również wpływ uziarnienia na uzyskiwane właściwości. Mieszanki gruboziarniste charakteryzowały się wyższym współczynnikiem odporności na pękanie w porównaniu do mieszanek drobnoziarnistych. Zastosowanie ziaren grubych do 31,5 mm wpłynęło na zwiększenie naprężeń odnotowanych w próbkach mieszanek MCE.

3.2. KORELACJA WYNIKÓW BADAŃ POMIĘDZY MIESZANKAMI DROBNOZIARNISTYMI I GRUBOZIARNISTYMI

W wyniku przeprowadzonych analiz zaobserwowano dla obu typów badanych mieszanek innowacyjnych zbliżone wartości odkształcenia niszczącego po milionie cykli ε_6 wyznaczonego w badaniu trwałości zmęczeniowej metodą zginania czteropunktowego. Mieszanki drobnoziarniste i gruboziarniste wykazywały również podobne wartości odporności na pękanie K_{Ic} . Zależności te przedstawiono na Rys. 10 i 11. Występująca w symbolu litera „f” w indeksie górnym oznacza mieszanek drobnoziarnistą, a litera „c” mieszanek gruboziarnistą.

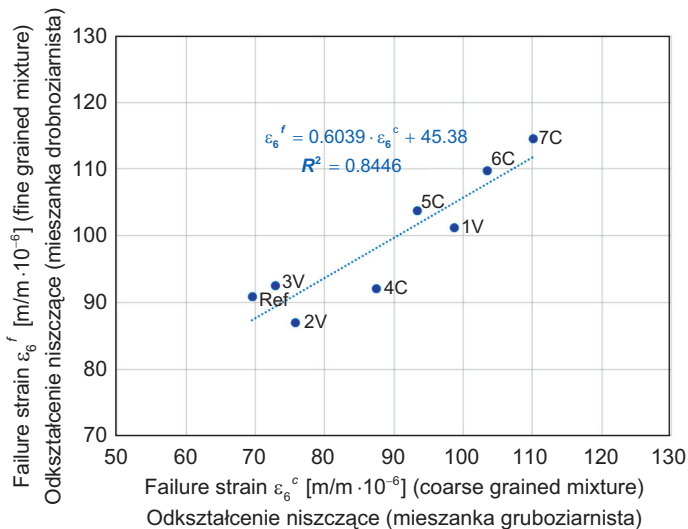


Fig. 10. Correlation of 4PB-PR critical strain ε_6 between coarse and fine grained mixtures

Rys. 10. Korelacja odkształcenia niszczącego ε_6 w badaniu 4PB-PR uzyskanego dla różnych typów mieszanek

Przedstawione zależności odkształcenia niszczącego ε_6 oraz odporności na pękanie K_{Ic} dla mieszanek drobnoziarnistych i gruboziarnistych pozwoliły uzyskać dobre wzajemne korelacje. Współczynnik determinacji R^2 wyniósł 0,8446 dla ε_6 oraz 0,8763 dla K_{Ic} . Korelacja taka umożliwia szacowanie wartości odkształceń niszczących ε_6 i odporności na pękanie

mixtures only in the case of coarse mixtures with binders 1V, 3V and 5C. Influence of grading on the obtained properties was observed. Coarse mixtures displayed greater fracture toughness than fine mixtures. Use of coarse grains of up to 31.5 mm resulted in an increase in stress registered in MCE mixture specimens.

3.2. CORRELATION OF TEST RESULTS BETWEEN FINE AND COARSE MIXTURES

The analyses indicated that both types of innovative MCE mixtures displayed similar values of critical strain at million load cycles ε_6 in the four-point bending test. They also displayed similar values of fracture toughness K_{Ic} in the SCB test. The relationships are shown in Figs 10 and 11. Letter “f” in superscript indicates a fine mixture and “c” in superscript indicates a coarse mixture.

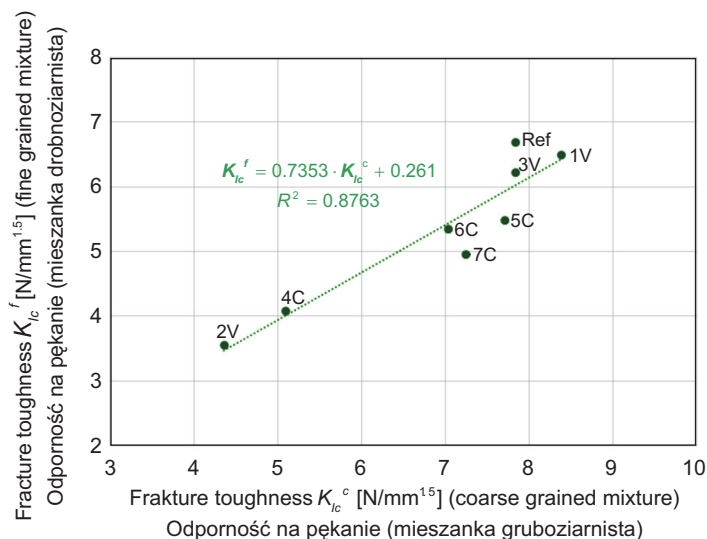


Fig. 11. Correlation of fracture toughness K_{Ic} between coarse and fine grained mixtures

Rys. 11. Korelacja odporności na pękanie K_{Ic} uzyskanej dla różnych typów mieszanek

The presented relationships enabled observation of good correlations between values obtained for fine and coarse mixtures. Coefficient of determination R^2 equaled 0.8446 for ε_6 and 0.8763 for K_{Ic} . Such correlation enables estimation of ε_6 and K_{Ic} for a given mixture type, when values for the other mixture type are known.

In the case of the 4PB-PR test, fatigue life of mixtures containing the innovative hydraulic binder with cement by-pass dust (CBPD) was greater than fatigue life of mixtures with pure cement. In the SCB test mixtures containing only cement in the role of hydraulic binder displayed greater stress at failure, expressed by greater fracture

wybranego typu mieszanki, gdy dysponuje się wynikami badań uzyskanymi dla drugiego typu mieszanki.

W przypadku badań 4PB-PR trwałość zmęczeniowa mieszanek zawierających innowacyjne spoiwo na bazie ubocznych produktów pylastych (UCPP) była wyższa niż trwałość zmęczeniowa mieszanek zawierających wyłącznie cement. W badaniach SCB mieszanki zawierające wyłącznie cement wykazały wyższe naprężenia niszczące wyrażone współczynnikiem odporności na pękanie w porównaniu do mieszanek zawierających innowacyjne spoiwo. Obniżenie sztywności materiału MCE przy jednoczesnym przyroście jego trwałości zmęczeniowej może przyczynić się do wzrostu trwałości eksploatacyjnej całej nawierzchni drogowej.

Uzyskane korelacje odkształceń niszczących ϵ_6 oraz odporności na pękanie dla mieszanek o różnym uziarnieniu wskazują na pozytywny wpływ ubocznych produktów pylastych na odporność mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych, bez względu na ich uziarnienie. Istnieje więc szerokie spektrum mieszanek typu MCE przeznaczonych do warstw podbudowy nawierzchni drogowych, w których zastosowanie UCPP daje korzystne rezultaty.

4. ZASTOSOWANIE MIESZANEK MCE NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM IN SITU

W celu weryfikacji uzyskanych wyników badań mieszanek MCE zawierających destruk asfaltowy oraz odpady w postaci cementowych produktów ubocznych wykonano odcinek doświadczalny w układzie warstw konstrukcji nawierzchni podatnej. Grubości poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni przedstawiono w Tabl. 5. W warstwie podbudowy zastosowano mieszankę MCE ze spoiwem cementowym oraz mieszankę MCE drobnoziarnistą ze spoiwem innowacyjnym typu 5C, charakteryzującą się optymalnymi właściwościami odkształceniowymi i wytrzymałościowymi w szerokim programie badawczym, zawierającym również badania dodatkowe. Przed zagęszczeniem wykonanej warstwy za pomocą rekylera poddano ją profilowaniu (Rys. 12).

toughness, than mixtures containing the innovative hydraulic binder. A decrease in stiffness of an MCE mixture, combined with an increase in its fatigue life, may contribute to an increase in service life of an entire pavement.

The obtained correlations between fine and coarse mixtures indicate that use of cement by-pass dust has positive effect on resistance of MCE mixtures, regardless of their grading. Therefore, use of CBPD will prove advantageous in a wide scope of MCE mixtures dedicated for road base courses.

4. PLACEMENT OF CHOSEN MCE MIXTURES ON FIELD TEST SECTION

In order to verify the test results obtained for MCE mixtures containing RAP and CBPD material, a test section was constructed, using a flexible pavement structure. Pavement layers and their thicknesses are given in Table 5. Base course consisted either of typical MCE mixture with cement or the fine MCE mixture with the innovative hydraulic binder 5C, which displayed optimum strain and strength properties in the wide research project, including also additional testing. The recycled road base was subjected to grading before compaction (Fig. 12).



Fig. 12. Grading of the recycled base course [68, 69]
Rys. 12. Profilowanie recyklowanej warstwy [68, 69]

Table 5. Pavement structure used on the test section
Tablica 5. Układ warstw konstrukcji nawierzchni na odcinku doświadczalnym

Type of layer Rodzaj warstwy	Material Materiał	Layer thickness [m] Grubość warstwy
(Wearing + binder) courses Warstwa ścieralna + wiążąca	SMA 16	0.08
Base course Podbudowa zasadnicza	MCE and MCE + binder MCE oraz MCE + spoiwo	0.20
Natural subgrade / Podłoże gruntowe naturalne		

Monitorowanie w czasie rzeczywistym parametrów fizyczno-mechanicznych konstrukcji nawierzchni pozwoli na ocenę przydatności materiału recyklowanego oraz innowacyjnego spoiwa w zastosowaniu do budowy dróg. Uzyskane wartości sztywności wykonanych warstw będą porównywane z wartościami laboratoryjnymi, co pozwoli oszacować trwałość zmęczeniową warstw nawierzchni. Wyniki tego badania zostaną opisane w kolejnej przygotowywanej publikacji.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły możliwość zastosowania materiału pochodzącego z recyklingu wraz z innowacyjnym środkiem wiążącym do wytworzenia mieszanek MCE wbudowanych w warstwy konstrukcyjne nawierzchni drogowych. Badania wykonano dla dwóch różnych mieszanek mineralnych (drobnoziarnistej i gruboziarnistej). Mieszanki MCE zawierające spoiwo cementowe oznaczono jako referencyjne. Dla pozostałych mieszanek zamiast cementu zastosowano innowacyjne spoiwa drogowe, zawierające w składzie cement, wapno i uboczne cementowe produkty pyłaste.

W zależności od zastosowanego uziarnienia i spoiwa mieszanki MCE charakteryzują się różnymi wartościami parametrów mechanicznych. Badania miały na celu ustalenie właściwości mechanicznych uzyskanej warstwy recyklowanej podbudowy, w której wystąpi zjawisko pęknięcia. Zastosowano tzw. karby, mające na celu symulację i inicjację propagacji spekania warstwy podbudowy wykonanej z analizowanego materiału.

W badaniu trwałości zmęczeniowej metodą czteropunktowego zginania belki zauważono wzrost odkształceń niszczących po milionie cykli ϵ_6 w mieszankach zawierających innowacyjne spoiwo. To z kolei odzwierciedla wzrost ich trwałości zmęczeniowej w porównaniu do mieszanek referencyjnych, zawierających klasyczny cement. Ponadto mieszanki drobnoziarniste charakteryzowały się wyższą trwałością zmęczeniową niż mieszanki gruboziarniste. Zaobserwowano pozytywny efekt stosowania innowacyjnych spoiw drogowych w połączeniu z emulsją asfaltową w mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych.

Podczas badań pęknięcia metodą SCB zaobserwowano, że w mieszankach z innowacyjnym spoiwem odkształcenia niszczące wzrosły w porównaniu do wartości zarejestrowanych dla mieszanek referencyjnych zawierających klasyczny cement. Oznacza to, że mieszanki z innowacyjnym spoiwem wykazują lepszą odporność na pęknięcie w porównaniu do rozwiązań tradycyjnych.

Mieszanki gruboziarniste charakteryzowały się wyższym współczynnikiem odporności na pęknięcie w porównaniu do

Real-time monitoring of physical and mechanical parameters of the structure will enable evaluation of suitability of the recycled material and the innovative hydraulic binder for road construction. Stiffness values obtained for the constructed pavement layers will be compared with laboratory values in order to estimate the fatigue life of pavement layers. The results of such comparisons will be described in a future paper.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The performed research and analyses confirmed the possibility of usage of reclaimed material and the innovative hydraulic binder in production of MCE mixtures dedicated for structural layers of road pavements. Two types of mineral mixtures were tested (fine and coarse). MCE mixtures containing only cement as hydraulic binder were labeled as reference. The remaining mixtures contained innovative hydraulic binders consisting of cement, lime and cement by-pass dust.

Depending on the grading and binders used, MCE mixtures display different values of mechanical parameters. The aim of the tests was to determine mechanical properties of the obtained recycled road base after cracking has occurred. Therefore, notches were cut in the samples in order to simulate and initiate cracking. Fatigue testing in four-point bending test indicated an increase in the ϵ_6 critical strain at one million cycles for the mixtures that contained the innovative binder. This reflects an increase in their fatigue life in comparison to the reference mixtures with typical cement. Moreover, fine mixtures displayed greater fatigue life than coarse mixtures. The analyses indicated a positive effect of use of innovative hydraulic binders in combination with bituminous emulsion in MCE mixtures.

It was observed in the SCB test that mixtures with innovative hydraulic binders displayed an increase in strain at failure $\epsilon_{\max}$ in comparison to reference mixtures with typical cement. This indicates greater cracking resistance of the innovative MCE mixtures in comparison to traditional solutions.

Coarse mixtures displayed greater fracture toughness than fine mixtures. However, their fracture toughness parameter K_{Ic} was more advantageous than that of reference mixtures only in the case of coarse mixtures with binders 1V and 3V.

Good correlations were observed for the critical strain ϵ_6 in the 4PB-PR test and fracture toughness K_{Ic} in the SCB test between fine and coarse mixtures. This indicates that

mieszanek drobnoziarnistych. Jednocześnie parametr odporności na pękanie K_{lc} był wyższy od mieszanek referencyjnych w przypadku mieszanek gruboziarnistych, zawierających spoiwa 1V i 3V.

Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano dobrą korelację odkształcenia niszczącego po milionie cykli ε_6 w badaniu 4PB-PR oraz odporności na pękanie K_{lc} uzyskanej dla różnych typów mieszanek. Wskazuje to na szerokie możliwości zastosowania UCPP w mieszankach typu MCE przeznaczonych do warstw podbudowy nawierzchni drogowych, bez względu na ich uziarnienie.

Zastosowanie cementowych produktów ubocznych oraz destruktu asfaltowego do wykonania warstw nawierzchni drogowych może w znaczący sposób przyczynić się do redukcji ilości odpadów nieprzetworzonych, powodujących degradację środowiska naturalnego. Wszystkie badane mieszanki mogą zostać wykorzystane do wykonania podbudowy nawierzchni drogowej.

W dalszych pracach badawczych autorzy skupią się na oszacowaniu trwałości zmęczeniowej warstw nawierzchni wykonanych z wykorzystaniem materiału pochodzącego z recyklingu oraz ubocznych cementowych produktów pylastych.

INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł powstał w związku z realizacją zadań badawczych w projekcie pt. „Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczonego do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017), w ramach wspólnego przedsięwzięcia „Nowoczesne technologie materiałowe” (TECHMATSTRATEG I), współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Zhang J., Ding L., Li F., Peng J.: Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China. *Journal of Cleaner Production*, **255**, 2020, 120223, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120223
- [2] Mehrjardi G.T., Azizi A., Haji-Azizi A., Asdollahfardi G.: Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction. *Transportation Geotechnics*, **23**, 2020, 100349, DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100349
- [3] Huber S., Henzinger C., Heyer D.: Influence of water and frost on the performance of natural and recycled materials used in unpaved roads and road shoulders. *Transportation Geotechnics*, **22**, 2020, ID article: 100305, DOI: 10.1016/j.trgeo.2019.100305

use of CBPD will prove advantageous in a wide scope of MCE mixtures dedicated for road base courses, regardless of their grading.

Use of cement by-pass dust and reclaimed asphalt pavement material in road construction may significantly limit environmental degradation through reduction of quantities of unprocessed waste. All the tested mixtures may be used in construction of road base courses.

In the future work the authors will focus on estimation of fatigue life of pavement courses constructed using reclaimed material and cement by-pass dust.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper was developed as part of the project entitled “An innovative technology using binding agent optimization that provides long service life of cold-recycled base courses” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017), within the joint undertaking “Modern Materials Technology” (TECHMATSTRATEG I), which is co-financed by the National Center for Research and Development.

- [4] Távira J., Jiménez J.R., Ledesma E.F., López-Uceda A., Ayuso J.: Real-scale study of a heavy traffic road built with in situ recycled demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, **248**, 2020, ID article: 119219, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119219
- [5] Zieliński K.: Impact of recycled aggregates on selected physical and mechanical characteristics of cement concrete. *Procedia Engineering*, **172**, 2017, 1291-1296, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.157
- [6] Liu L., Li Z., Cai G., Liu X., Yan S.: Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes. *Journal of Cleaner Production*, **259**, 2020, ID article: 120977, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120977
- [7] Liu L., Li Z., Congress S.S.C., Liu X., Dai B.: Evaluating the influence of moisture on settling velocity of road embankment constructed with recycled construction wastes. *Construction and Building Materials*, **241**, 2020, ID article: 117988, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117988
- [8] Cristelo N., Vieira C.S., de Lurdes Lopes M.: Geotechnical and geoenvironmental assessment of recycled construction and demolition waste for road embankments. *Procedia Engineering*, **143**, 2016, 51-58, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.007
- [9] Soleimanbeigi A., Edil T.B., Benson C.H.: Engineering properties of recycled materials for use as embankment fill. *Geo-Congress 2014, Atlanta*, 3645-3657, DOI: 10.1061/9780784413272.353

- [10] Soleimanbeigi A., Edil T.B.: Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **141**, 5, 2015, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285
- [11] Arulrajah A., Disfani M.M., Horpibulsuk S., Suksiripattanapong C., Prongmanee N.: Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials*, **58**, 2014, 245-257, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025
- [12] Azam A.M., Cameron D.A.: Geotechnical properties of blends of recycled clay masonry and recycled concrete aggregates in unbound pavement construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**, 6, 2013, 788-798, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000634
- [13] Gabr A.R., Cameron D.A.: Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**, 6, 2012, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000447
- [14] Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M.: A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*, **61**, 302, 2011, 289-302, DOI: 10.3989/mc.2010.54009
- [15] O'Mahony M.M., Milligan G.W.E.: Use of recycled materials in subbase layers. *Transportation Research Record*, **1310**, 1991, 73-80, <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1310/1310-010.pdf> (15.01.2023)
- [16] Vegas I., Ibañez J.A., Lisbona A., de Cortazar A.S., Frías M.: Pro-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, **25**, 5, 2011, 2674-2682, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018
- [17] Norambuena-Contreras J., Quilodran J., Gonzalez-Torre I., Chavez M., Borinaga-Treviño R.: Electrical and thermal characterisation of cement-based mortars containing recycled metallic waste. *Journal of Cleaner Production*, **190**, 2018, 737-751, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.176
- [18] Hagnell M.K., Åkermo M.: The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. *Journal of Cleaner Production*, **223**, 2019, 957-968, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.156
- [19] López-Alonso M., Martínez-Echevarria M.J., Garach L., Galán A., Ordoñez J., Agrela F.: Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction. *Construction and Building Materials*, **195**, 2019, 249-257, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.084
- [20] Ren J., Wang S., Zang G.: Effects of recycled aggregate composition on the mechanical characteristics and material design of cement stabilized cold recycling mixtures using road milling materials. *Construction and Building Materials*, **244**, 2020, 118329, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118329
- [21] Fedrigo W., Núñez W.P., Kleinert T.R., Matuella M.F., Ceratti J.A.P.: Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **10**, 5, 2017, 393-402, DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.06.001
- [22] Wang Q.Z., Wang N.N., Tseng M.L., Huang Y.M., Li N.L.: Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China. *Journal of Cleaner Production*, **249**, 2020, 119411, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119411
- [23] Nanjegowda V.H., Biligiri K.P.: Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. *Resources, Conservation & Recycling*, **155**, 2020, 104655, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104655
- [24] Liu L., Cai G., Zhang J., Liu X., Liu K.: Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **126**, 2020, ID article: 109831, DOI: 10.1016/j.rser.2020.109831
- [25] Nwakaire C.M., Yap S.P., Yuen C.W., Onn C.C., Koting S., Babalghaith A.M.: Laboratory study on recycled concrete aggregate based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing. *Journal of Cleaner Production*, **262**, 2020, 121462, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121462
- [26] Kox S., Vanroelen G., Van Herck J., de Krem H., Vandoren B.: Experimental evaluation of the high-grade properties of recycled concrete aggregates and their application in concrete road pavement construction. *Case Studies in Construction Materials*, **11**, 2019, ID article: e00282, DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00282
- [27] Zhang L.W., Sojobi A.O., Kodur V.K.R., Liew K.M.: Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. *Journal of Cleaner Production*, **236**, 2019, 117600, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.07.075
- [28] Visintin P., Xie T., Bennett B.: A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. *Journal of Cleaner Production*, **248**, 2020, ID article: 119243, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119243
- [29] Kuźniewski J., Skotnicki Ł.: Properties of mineral-cement emulsion mixtures based on concrete aggregates from recycling. *Case Studies in Construction Materials*, **12**, 2019, ID article: e00309, DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00309
- [30] Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K.: Performance and viscoelastic assessment of high-recycle rate cold foamed bitumen mixtures produced with different penetration binders for rehabilitation of deteriorated pavements. *Journal of Cleaner Production*, **258**, 2020, ID article: 120517, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120517

- [31] *Bostanci S.C.*: Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production. *Journal of Cleaner Production*, **251**, 2020, ID article: 119785, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119785
- [32] *Birgisdóttir H., Bhander G., Hauschild M.Z., Christensen T.H.*: Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: Recycling of bottom ash in road construction or landfilling in Denmark evaluated in the ROAD-RES model. *Waste Management*, **27**, 8, 2007, S75-S84, DOI: 10.1016/j.wasman.2007.02.016
- [33] *Loaiza A., Colorado H.A.*: Marshall stability and flow tests for asphalt concrete containing electric arc furnace dust waste with high ZnO contents from the steel making process. *Construction and Building Materials*, **166**, 2018, 769-778, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.012
- [34] *Chen T., Luan Y., Zhu J., Huang X., Ma S.*: Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion. *Journal of Cleaner Production*, **258**, 2020, ID article: 120674, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120674
- [35] *Chen T., Ma T., Huang X., Ma S., Tang F., Wu S.*: Microstructure of synthetic composite interfaces and verification of mixing order in cold-recycled asphalt emulsion mixture. *Journal of Cleaner Production*, **263**, 2020, 121467, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121467
- [36] *Bai G., Zhu C., Liu C., Liu B.*: An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, **240**, 2020, ID article: 117978, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117978
- [37] *Mallick R.B., Radzicki M.J., Zaumanis M., Frank R.*: Use of system dynamics for proper conservation and recycling of aggregates for sustainable road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, **86**, 2014, 61-73, DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.02.006
- [38] *Sultan A.A.M., Lou E., Mativenga P.T.*: What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability. *Journal of Cleaner Production*, **154**, 2017, 51-60, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.201
- [39] *Bendimerad A.Z., Delsaute B., Rozière E., Staquet S., Loukili A.*: Advanced techniques for the study of shrinkage-induced cracking of concrete with recycled aggregates at early age. *Construction and Building Materials*, **233**, 2020, ID article: 117340, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117340
- [40] *Skotnicki Z.Ł., Kuźniewski J., Szydło A.*: Stiffness identification of foamed asphalt mixtures with cement, evaluated in laboratory and in situ in road pavements. *Materials*, **13**, 5, 2020, ID article: 1128, DOI: 10.3390/ma13051128
- [41] *Yildirim S.T., Meyer C., Herfellner S.*: Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, **91**, 2015, 288-296, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.045
- [42] *Li Q., Wang Z., Li Y., Shang J.*: Cold recycling of lime-fly ash stabilized macadam mixtures as pavement bases and subbases. *Construction and Building Materials*, **169**, 2018, 306-314, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.030
- [43] *Guo H., Wang Z., Liang Q., Li G.*: Improvement of stability and mechanical properties of cement asphalt emulsion composites using nano fibrillated celluloses. *Cement and Concrete Composites*, **125**, 2022, ID article: 104330, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104330
- [44] *Wang J., Zhang J., Cao D., Dang H., Ding B.*: Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*, **234**, 2020, ID article: 117366, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117366
- [45] *Abate S.Y., Song K.I., Song J.K., Lee B.Y., Kim H.K.*: Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar. *Construction and Building Materials*, **165**, 2018, 64-71, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.035
- [46] *Wu M., Zhang Y., Jia Y., She W., Liu G.*: Study on the role of activators to the autogenous and drying shrinkage of lime-based low carbon cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, **257**, 2020, ID article: 120522, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120522
- [47] *Abdollahnejad Z., Mastali M., Woof B., Illikainen M.*: High strength fiber reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance. *Construction and Building Materials*, **241**, 2020, ID article: 118129, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118129
- [48] *Zhou J., Zeng M., Chen Y., Zhong M.*: Evaluation of cement stabilized recycled concrete aggregates treated with waste oil and asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, **199**, 2019, 143-153, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.028
- [49] *Kukielka J., Bańkowski W.*: The experimental study of mineral-cement-emulsion mixtures with rubber powder addition. *Construction and Building Materials*, **226**, 2019, 759-766, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.276
- [50] *Dolżycki B., Jaczewski M., Szydłowski C.*: The long-term properties of mineral-cement-emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*, **156**, 2017, 799-808, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.032
- [51] *Szydło A., Mackiewicz P., Skotnicki Ł., Kuźniewski J.*: Ocena wpływu innowacyjnego środka wiążącego na właściwości fizyczne, mechaniczne i reologiczne recyklowanej podbudowy wykonanej z mieszanki mineralno-spoiwowejz emulsją asfaltową. Program „Nowoczesne technologie materiałowe”, TECHMATSTRATEG, Raport nr 3/2/PWr/2019

- [52] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Buczyński P., Mazurek G.: Optymalizacja składu środka wiążącego o uniwersalnym charakterze zastosowania w recyklowanych podbudowach. Opracowanie nomogramów uzyskanych właściwości dla zapraw i zaczynów zgodnie z założonym planem eksperymentu dla zaprojektowanych spoiw mieszanych. Program „Nowoczesne technologie materiałowe”, TECHMATSTRATEG, Raport nr 2/1/PŚk/2018
- [53] Dołżycki B.: Instrukcja projektowania i wbudowania mieszanek mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE). Załącznik nr 9.4.2 RID, 2019
- [54] Szydło A., Mackiewicz P., Skotnicki Ł., Kuźniewski J.: Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczona do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną, Raport serii SPR 74, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2019
- [55] Kuźniewski J., Skotnicki Ł.: Influence of the compaction method on mineral-cement emulsion mixture properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**, 11, 2016, ID article: 04016138, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001651
- [56] Kuźniewski J., Skotnicki Z.Ł., Szydło A.: Fatigue durability of asphalt-cement mixtures. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, **63**, 1, 2020, 107-111, DOI: 10.1515/bpasts-2015-0012
- [57] Guha A.H., Assaf G.J.: Effect of Portland cement as a filler in hot-mix asphalt in hot regions. *Journal of Building Engineering*, **28**, 2020, ID article: 101036, DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.101036
- [58] Du S.: Mechanical properties and shrinkage characteristics of cement stabilized macadam with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, **203**, 2019, 408-416, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.126
- [59] PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie – Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proktora
- [60] PN-EN 13808:2013-10 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Zasady klasyfikacji kationowych emulsji asfaltowych
- [61] Zhang Z., Cong C., Xi W., Li S.: Application research on the performances of pavement structure with foamed asphalt cold recycling mixture. *Construction and Building Materials*, **169**, 2018, 396-402, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.134
- [62] Gui-Ping H., Wing-Gun W.: Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials. *Construction and Building Materials*, **22**, 1, 2008, 30-40, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.033
- [63] Yan J., Ni F., Yang M., Li J.: An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes. *Construction and Building Materials*, **24**, 11, 2010, 2151-2156, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.044
- [64] PN-EN 12697-26:2018-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 26: Sztywność
- [65] PN-EN 12697-24:2018-08 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań – Część 24: Odporność na zmęczenie
- [66] EN 12697-44:2019 Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test
- [67] PN-EN 12697-33:2019-03 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metoda badań – Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym
- [68] Iwański M., Buczyński P., Mazurek G.: Ocena właściwości fizycznych, mechanicznych i reologicznych recyklowanej podbudowy z emulsją asfaltową oraz z asfaltem spienionym w aspekcie składu innowacyjnego środka wiążącego w warunkach terenowych – Projekt składu recyklowanej podbudowy z asfaltem spienionym oraz emulsją asfaltową, montaż systemu monitorowania odcinka doświadczalnego. *Techmatstrateg*. Politechnika Świętokrzyska, Raport 1/4/2019
- [69] Mazurek G., Buczyński P., Iwański M., Horodecka R.: Influence of a three-component hydraulic binder on the properties of recycled base course with foamed bitumen and bituminous emulsion: a field investigation. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **21**, 4, 2022, 309-329, DOI: 10.7409/rabdim.022.018