

DOI: 10.7409/rabdim.025.007

ŁUKASZ SKOTNICKI¹⁾

ORCID: 0000-0002-4090-2311

JAROSŁAW KUŹNIEWSKI²⁾

ORCID: 0000-0003-4071-9207

Fatigue durability of recycled mixtures with added cement dusty by-products (UCPP) in base layers

Abstract: This paper describes the analyses of an innovative road binder based on cement dusty by-products (UCPP) used in mineral-cement-emulsion (MCE) mixtures and mineral-cement mixtures with foamed asphalt (MCAS). Innovative UCPP binders have been used as a replacement for traditional cement. Novel hydraulic binders reduce the rigidity of MCE and MCAS mixtures, which limits thermal and fatigue cracking of the base layers. In laboratory testing, seven different binders were tested – based on UCPP, lime, and traditional cement. The effect of these binders on mechanical properties of recycled MCE and MCAS mixes was analysed. Significant changes in the stiffness modulus and fatigue durability of the conglomerates have been demonstrated. The testing found that these innovative binders can be applied in the mixtures used for base layers. Optimum binders for application in both MCE and MCAS have been identified. The identified correlations will allow to speed-up the design process and selection of road pavement constructions used in the cold deep recycling process.

Keywords: fatigue durability, innovative road binder, mineral-cement-emulsion mixture, mineral-cement mixture with foamed asphalt, recycling.

¹⁾ Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, 41 Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego St., 50-370 Wrocław, Poland; lukasz.skotnicki@pwr.edu.pl (✉)

²⁾ Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, 41 Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego St., 50-370 Wrocław, Poland; jaroslaw.kuzniewski@pwr.edu.pl

1. INTRODUCTION

1.1. GENERAL REMARKS

With time, road pavements reduce their load capacity and undergo gradual degradation. There is a problem of how to manage the reclaimed materials. One way to deal with this is to recycle road pavements and re-use the materials in new road pavement constructions. Depending on the material used in the degraded pavements, two basic pavement types can be distinguished: rigid stiff pavements made of cement-based concrete, and flexible pavements made of mineral-asphalt mixes.

Reclaimed materials from both types of structures can be used for the construction of pavement base layers. Re-use of construction and demolition waste (CDW) materials in the pavement base layers contributes to decarbonisation of the road construction process [1]. Recycling can be described as hot or cold in terms of production process, or on-site or off-site based on the location of production [2]. The most common asphalt pavement reclamation method is deep cold recycling. As a result of the recycling process, materials such as MCE and MCAS, and asphalt-cement concrete (ACC) can be obtained [3]. The general division of recycling methods used in road-building industry is presented in Fig. 1.

Demolition of asphalt pavements produces reclaimed asphalt pavement (RAP). RAP used in new road pavements significantly reduced carbon footprint of the road construction processes. However, the addition of RAP to asphalt pavements increases total concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in the fumes from the production process, therefore, appropriate filters should be used [2]. Multirecycled aggregate can be used in the concrete recycling process. However, the durability features of such material needs to be enhanced. This can be achieved by using an appropriate model of granulation and compaction of aggregate gains in the cement concrete containing multirecycled aggregate [4].

Natural aggregate can be also replaced with recycled aggregate (CDW) in unbound pavement base layers [1]. Proven methods of predicting the properties of unbound mixes point to the possibility of using CDW aggregates as a filling material in e.g. road embankments.

There have been also attempts to replace natural aggregate in cement concretes with pre-formed (granulated) aggregate made of fibre-reinforced polymers (mechanical recycling). Another method is the application of polymers as isolated fragmented fibres [5].

1. WPROWADZENIE

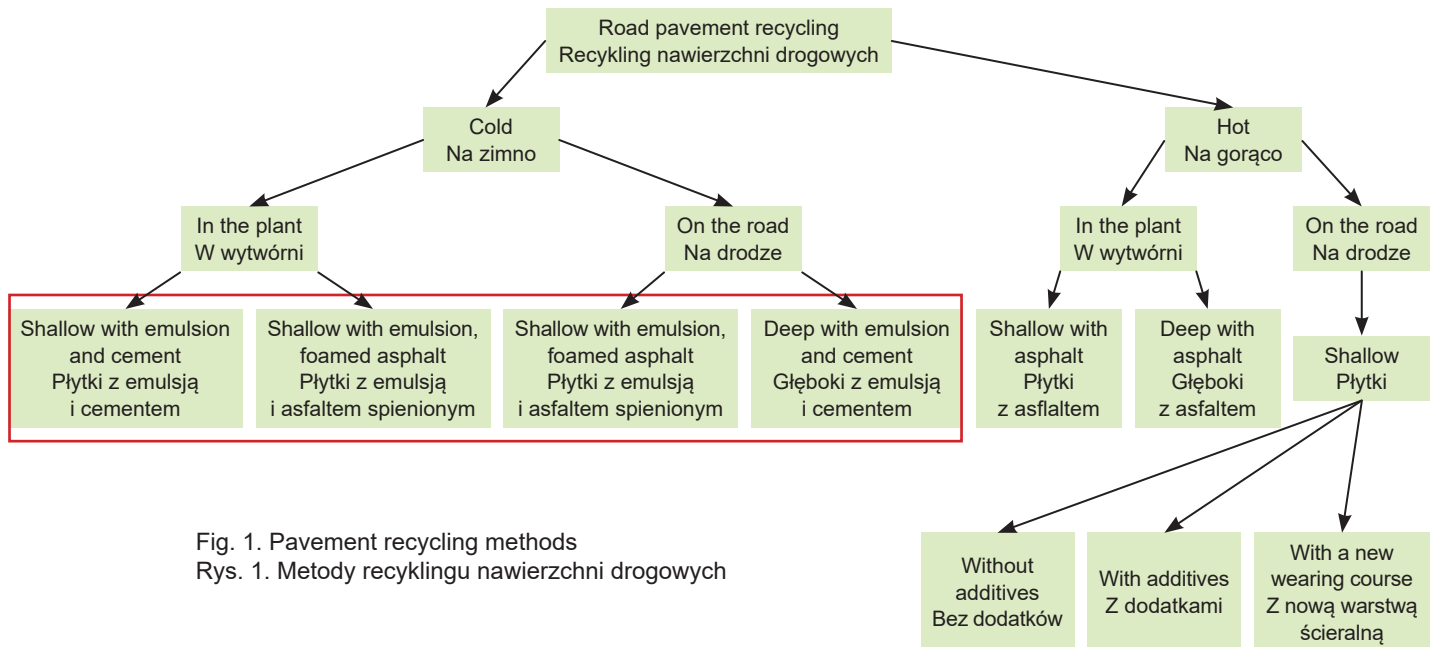
1.1. UWAGI OGÓLNE

Wraz z upływem czasu nawierzchnie drogowe tracą swoją nośność i ulegają stopniowej degradacji. Powstaje problem z zagospodarowaniem materiałów rozbiórkowych. Jednym ze sposobów jest recykling nawierzchni drogowych i powtórne wykorzystanie materiałów w nowych konstrukcjach drogowych. W zależności od materiału użytego w wyeksploatowanych nawierzchniach możemy wyróżnić dwa podstawowe typy nawierzchni: nawierzchnie sztywne z betonu cementowego oraz nawierzchnie podatne z mieszanek mineralno-asfaltowych. Oba materiały odpadowe można wykorzystać do wytworzenia warstw podbudowy nawierzchni drogowych.

Powtórne wykorzystanie materiałów rozbiórkowych (ang. *Construction and Demolition Waste Materials*, CDW) w budownictwie w warstwach podbudowy nawierzchni drogowych przyczynia się do tzw. dekarbonizacji procesu budowy dróg [1]. Recykling ze względu na sposób produkcji można wykonywać metodą na gorąco, metodą na zimno oraz ze względu na lokalizację wytwarzania, na miejscu lub w wytwórni [2]. Najbardziej rozpowszechniony jest recykling nawierzchni asfaltowych wykonywany metodą recyklingu głębokiego na zimno. W efekcie procesu recyklingu można uzyskać takie materiały jak MCE i MCAS oraz beton cementowo-asfaltowy BAC [3]. Ogólny podział metod recyklingu stosowanych w drogownictwie przedstawiono na Rys. 1.

Prace rozbiórkowe nawierzchni asfaltowych prowadzą do powstania tzw. destruktu asfaltowego (ang. *Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP). Stosowanie RAP do wytworzenia nowych nawierzchni drogowych przyczynia się w znaczącym stopniu do redukcji tzw. śladu węglowego procesu budowy dróg. Dodatek RAP do nawierzchni asfaltowych zwiększa jednak całkowite stężenie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w spalinach z procesów produkcyjnych, dlatego należy stosować odpowiednie urządzenia filtrujące [2].

W procesie recyklingu materiałów betonowych możliwe jest zastosowanie tzw. *multirecycled aggregate* tzn. wielokrotnie recyklowanego kruszywa betonowego. Należy jednak pamiętać o odpowiednim wzmocnieniu cech wytrzymałościowych takiego materiału. Efekt ten można uzyskać np. poprzez zastosowanie odpowiedniego modelu uziarnienia i upakowania ziaren kruszywa w betonie cementowym, zawierającym kruszywo wielokrotnie recyklowane [4].



1.2. MATERIALS USED IN MCE AND MCAS MIXTURES FOR BASE LAYERS

MCE or MCAS mixes are composed of three main ingredients – aggregate, cement and asphalt emulsion or foamed asphalt (Fig. 2). The mutual proportions of the ingredients affect future resilience and deformation characteristics of these conglomerates. Also, the properties of the component materials are important in terms of durability of MCE and MCAS mixes to load and environmental impacts.

The analysis of foamed asphalts has demonstrated that, when mixed with typical asphalt, it increased the time-to-break-up up to 10 times while marginally decreasing viscosity, which allowed it to preserve the softening behaviour depending on the content of the foaming water [6]. Structural analysis demonstrates the relationship between foaming bubble size and the content of foaming water [6].

In addition, the effects of various additives on the parameters of road mixes in the base courses containing foamed asphalt have been investigated. The addition of reclaimed asphalt pavement, glass, or plastics reduced *ITS* when the content of these blends was 30%, 20% and 3%, respectively. CBR testing result has also demonstrated favourable effects of foamed asphalt added to

Zastąpienie naturalnego kruszywa poprzez kruszywa z recyklingu (CDW) możliwe jest również w niezwiązanych warstwach podbudowy drogowej [1]. Wykazane metody predykcji właściwości mieszanek niezwiązanych wskazują na możliwość zastosowania kruszyw CDW, jako materiał wypełniający np. w nasypach drogowych.

Istnieją również próby zastąpienia naturalnego kruszywa w betonach cementowych poprzez zastosowanie formowanego (granulatu) kruszywa z wzmacnianych włóknami polimerów (mechaniczny recykling). Inną metodą jest zastosowanie polimerów w postaci pojedynczych rozdronionych włókien [5].

1.2. MATERIAŁY STOSOWANE W MCE I MCAS DO WARSTW PODBUDOWY

Mieszanki MCE lub MCAS składają się z trzech głównych składników – kruszywa, cementu i emulsji asfaltowej lub spienionego asfaltu (Rys. 2). Wzajemne proporcje pomiędzy składnikami wpływają na przyszłe właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowe analizowanych konglomeratów. Również właściwości samych materiałów składowych są istotne z punktu widzenia odporności mieszanek MCE i MCAS na działanie obciążeń oraz warunków środowiskowych.

the blends containing reclaimed asphalt pavement, glass or plastic. The blends with added foamed asphalt were more resistant to permanent deformation and at the same time more flexible [7]. Testing for foamed asphalt with blended synthetic wax contribute to its ageing due to rapid heat exchange during the foaming process [8].

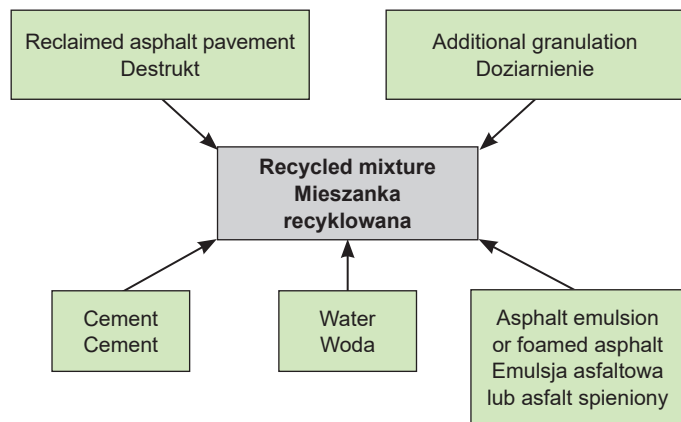


Fig. 2. Composition of recycled mixtures
Rys. 2. Skład mieszanek recyklowanych

Paper [9] has demonstrated, based on review of international literature, that *ERL* (expansion ratio) and *HL* (half life) should be the parameters that characterise foamed asphalt. Typical *ER* range is 8-10 seconds, and 6-12 seconds for *HL*. The described engineering methods also recommend avoiding too soft and too hard bitumen types, regardless of the foam characteristics. It is important to conduct testing assessing the physical and chemical characteristics of the asphalt intended for the production of foamed product. This will enable the selection of a better binder. Using a blend in excess of 10% may be detrimental to the economy of the mix [9]. The effect of ageing on rheological characteristics of foamed asphalt depends on the mineral filler used. Diabase fillers reduced stiffness, while basalt fillers increased the same [10].

In addition to the strength characteristics of MCE and MCAS mixes, an important engineering consideration for these materials is the stiffness modulus. This modulus should not be too high so that the mixes are not prone to fatigue cracking.

The results of tests presented in [11] demonstrated that mixes containing foamed asphalt with blended reclaimed asphalt pavement and cement by-pass dust additive are characterised by appropriate mechanical properties when

Analiza asfaltów spienionych wykazała, że przy jego wymieszaniu z typowym asfaltem, czas rozpadu zwiększył się nawet 10-krotnie oraz marginalnie zmniejszyła się lepkość, co pozwoliło zachować płynność (ang. *softening behavior*) uzależnioną od zawartości wody spieniającej [6]. Analiza morfologiczna wykazała zależność wielkości pęcherzyka przy spienianiu od zawartości wody spieniającej [6].

Przeprowadzono badania wpływu różnych dodatków na parametry mieszanek drogowych w warstwach podbudowy zawierających asfalt spieniony. Dodatek destruktu asfaltowego, szkła, plastiku spowodował obniżenie wartości *ITS*, gdy zawartość dodatków wynosiła odpowiednio 30%, 20% i 3%. Wyniki badania CBR również wykazały korzystne skutki dodatku asfaltu spienionego do mieszanek zawierających destruk, szkło i plastik. Mieszanki z dodatkiem asfaltu spienionego charakteryzowały się większą odpornością na trwałe odkształcenie i jednocześnie poprawiały plastyczność [7]. Badania przeprowadzone dla asfaltu spienionego z zawartością wosku syntetycznego przyczyniają się do jego starzenia, ze względu na szybką wymianę ciepła podczas spieniania [8].

W pracy [9] udowodniono, na podstawie przeglądu literatury światowej, że współczynnik ekspansji *ERL* (ang. *expansion ratio*) i czas rozpadu *HL* (ang. *half-life*) – powinny być parametrami charakteryzującymi spieniony asfalt. Typowy zakres dla *ER* wynosi od 8-10 sekund, a dla *HL* 6-12 sekund. Opisane tam metody projektowe wspólnie zalecają również unikanie zbyt miękkich i zbyt twardych typów asfaltów, niezależnie od charakterystyki pianki (*the foam*). Istotne jest przeprowadzenie badań do oceny związku właściwości fizycznych i chemicznych asfaltu przeznaczonego do wytwarzania asfaltu spienionego. Spowoduje to lepszy wybór lepiszcza. Zastosowanie wypełniacza powyżej 10% może mieć szkodliwy wpływ na wydajność mieszanki [9]. Wpływ efektu starzenia się na właściwości reologiczne asfaltów spienionych jest uzależniony od zastosowanego wypełniacza mineralnego. Wypełniacz mineralny diabaz (ang. *diabase filler*) zmniejszał sztywność, natomiast wypełniacze bazaltowe zwiększały ją [10].

Oprócz wytrzymałości mieszanek MCE i MCAS, ważnym kryterium projektowym dla tych materiałów jest moduł sztywności. Moduł nie powinien być zbyt wysoki, aby mieszanki nie były podatne na pękanie zmęczeniowe.

Wyniki badań zaprezentowane w [11] wykazały, że mieszanki z asfaltem spienionym wraz z destruktem

the ingredients are used in appropriate proportions. These blends increased the value of the *ITSR* parameter and indirect tensile strength *ITS*. Chemical analysis revealed that excessive amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in a road pavement binder may deteriorate the performance of a recycled base layer.

The properties of foamed bitumen stabilised (FSB) materials are described in [12]. Flexural fatigue life was increasing with rising binder content. The modulus and strength were decreasing with rising temperature.

In mixes containing foamed asphalt and prepared using the cold recycling method, the dynamic modulus was found to be related to the frequency of loading and the type of recycled material. The lower frequency, the lower the modulus. Foamed asphalt mixtures were characterised by narrow phase angle variation at different load frequencies and temperature changes. This indicated superior mechanical stability and reduced sensitivity to external changes such as climate fluctuations and traffic loads [13].

The application of foamed bitumen mixture (FBM) technology in the construction of pavements demonstrated significant environmental and economic benefits [14]. This technology reduces greenhouse gas emissions and saves energy and natural resources, as it can be produced at lower temperatures. Testing of efficiency has demonstrated that fatigue performance of FBMs is comparable to or slightly better than that of hot mineral-asphalt mixes (HMAs). In addition, their temperature sensitivity is less than in the case of HMAs. On the other hand, FBMs tend to have lower: indirect tensile strength *ITS*, elasticity modulus, resistance to moisture and rutting.

In testing of cement-containing foamed bitumen mixtures, the binder type was found to affect the compactibility of the mixtures [15]. Mixtures with higher binder penetration grade were characterised by lower void content. Indirect tensile strengths, tensile and creep stiffness moduli decrease with increasing penetration of the foamed bituminous binder. Similar positive conclusions with regard to the application of foamed asphalt in the base course of a runway were achieved in [16], both in terms of indirect tensile strength *ITS* and compressive strength *UCS*.

Verification of the assessment of pavement full-depth reclamation using in-situ recycling with foamed asphalt has brought positive outcomes [17]. This has been demonstrated by the results of mechanical testing, including indirect tensile strength *ITS*. Foamed asphalt in road mixes

asfaltowym oraz dodatkiem w postaci cement by-pass dust charakteryzują się odpowiednimi właściwościami mechanicznymi przy zachowaniu odpowiedniej proporcji składników. Ich zawartość korzystnie zwiększył parametr *ITSR* oraz siłę pośredniego rozciągania *ITS*. Analiza chemiczna wykazała, że nadmierna ilość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w lepiszczu drogowym może wpłynąć na pogorszenie użyteczności recyklowanej podbudowy.

Właściwości materiałów stabilizowanych asfaltem spienionym (ang. *Foamed Bitumen Stabilised Materials*, FSB) opisano w [12]. Trwałość zmęczeniowa (ang. *flexural fatigue life*) wzrastała wraz z zawartością lepiszcza. Moduł i wytrzymałość malały wraz ze wzrostem temperatury.

W mieszankach zawierających asfalt spieniony i wykonanych metodą recyklingu na zimno moduł dynamiczny wykazywał zależność od częstotliwości obciążenia i rodzaju materiału pochodzącego z recyklingu. Im mniejsza była częstotliwość, tym moduł przyjmował niższe wartości. Mieszanki na bazie asfaltu spienionego charakteryzowały się małą zmiennością kąta fazowego przy różnych częstotliwościach obciążenia i zmianach temperatury. Wskazywało to na doskonałą stabilność mechaniczną i zmniejszoną wrażliwość na zmiany zewnętrzne, takie jak fluktuacje klimatyczne i obciążenia ruchu [13].

Zastosowanie technologii asfaltu spienionego (FBM) w konstruowaniu nawierzchni wykazało znaczne korzyści środowiskowe i ekonomiczne [14]. Ta technologia zmniejsza emisje gazów cieplarnianych (ang. *greenhouse gas emissions*) i oszczędza energię oraz zasoby naturalne, umożliwiając przeprowadzanie produkcji w niższych temperaturach. Badania wydajności wskazują, że żywotność zmęczeniowa FBM jest porównywalna lub nieco lepsza od mieszanek mineralno-asfaltowych wykonywanych na gorąco (HMA). Ponadto ich wrażliwość na temperaturę jest niższa w porównaniu do HMA. Z drugiej strony FBM ma tendencję do niższych: wytrzymałości na rozciąganie pośrednie *ITS*, modułu sprężystości, odporności na wilgoć i odporności na koleiny.

Badając mieszankę z asfaltem spienionym i zawartością cementu stwierdzono, że typ spoiwa miał wpływ na zdolność do zagęszczenia (ang. *compactability*) mieszanek [15]. Mieszanki o wyższej penetracji lepiszcza charakteryzowały się mniejszą zawartością wolnej przestrzeni. Wartości pośrednich wytrzymałości na rozciąganie, modułów sztywności na rozciąganie i pełzanie

containing a hydraulic binder reduces the risk of course cracking [18, 19]. However, optimum temperature of production of foamed asphalt and water content should be maintained. For asphalts with 160/220 penetration, this temperature is 150°C. Water content mainly affects the half-life of foamed asphalt, resulting in quicker volume reductions for higher water contents [20].

An important consideration is also the type of foamed asphalt and its chemical composition. Using phosphogypsum (FY) as waste in production of foamed asphalt enhances binder properties such as stability, rheological characteristics. This additive meets the radioactive specifications [21].

In mixtures containing hydraulic binder and asphalt emulsion, these ingredients interact with each other, resulting in a number of complex physical and chemical reactions. This applies to the adsorption of asphalt emulsion by cement, which leads to destabilisation of that emulsion [22]. For lower A/C ratios, the authors suggest the application of anionic emulsion, and for higher A/C ratios – cationic emulsion. Similar observations were made in [23]. The quantitative relationship between asphalt emulsion and cement with appropriate compaction temperature and moisture content plays a significant role in determining the strength performance of a cement-emulsified asphalt mixture on its early stage of life.

In MCE mixtures, bituminous emulsion breaks down and fairly quickly binds the materials while not increasing the stiffness modulus of the entire mixture. Cement behaves the other way round. Its effects seem to occur slowly, and all construction materials containing cement exhibit increased strength and stiffness with time [24]. Increasing cement content caused increased values of the moduli and smaller phase angle. Despite that, such mixtures perform as viscoelastic materials, even with the 6% cement added and regardless of the duration of the curing process – be it 28 days or one-and-a-half years [24, 25]. This is due to the fact that such mixtures change significantly with changing temperature. In addition, their viscosity is greater than in asphalt concrete, because their maximum phase angle is significantly less than typical for asphalt concrete [25]. What is also important is appropriate selection of cement content and granulation of the road aggregate [26].

The use of asphalt emulsion with added cement improves the stiffness of such mixtures on the one hand, and

maleją wraz ze wzrostem penetracji spienionego spoiwa bitumicznego. Podobne pozytywne wnioski w odniesieniu do zastosowania asfaltu spienionego w warstwach podbudowy konstrukcji pasa startowego uzyskano w [16], wykorzystując zarówno wytrzymałość na rozciąganie ITS jak i wytrzymałość na ściskanie UCS .

Weryfikacja oceny rekultywacji pełnej głębokości nawierzchni za pomocą recyklingu in situ ze spienionym asfaltem przyniosła pozytywne efekty [17]. Świadczą o tym wyniki badań mechanicznych, m.in. wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITS . Asfalt spieniony w mieszankach drogowych zawierających spoiwo hydrauliczne przyczynia się do redukcji ryzyka spękania warstwy [18, 19]. Należy jednak pamiętać o zachowaniu optymalnej temperatury produkcji asfaltu spienionego oraz zawartości wody. Dla asfaltu o penetracji 160/220 temperatura wynosi 150°C. Zawartość wody wpływa głównie na czas rozpadu (ang. *half-life*) asfaltu spienionego, co powoduje szybsze zmniejszenie jego objętości dla wyższej zawartości wody [20].

Istotną sprawą jest także rodzaj zastosowanego asfaltu spienionego i jego skład chemiczny. Użycie fosfogypsum (FY) jako odpadu w produkcji asfaltu spienionego ulepsza właściwości lepiszcza: takie jak stabilność, charakterystyka reologiczna. Dodatek ten spełnia wymagania specyfikacji radioaktywnych [21].

W mieszankach zawierających spoiwo hydrauliczne i emulsję asfaltową zachodzi między tymi składnikami interakcja obejmująca szereg skomplikowanych reakcji fizycznych i chemicznych. Dotyczy ona adsorpcji emulsji asfaltowej przez cement co prowadzi do destabilizacji emulsji [22]. W przypadku niskiego współczynnika A/C autorzy sugerują stosowanie emulsji anionowej, zaś w przypadku wysokiego ilorazu A/C stosowanie emulsji kationowej. Podobne spostrzeżenia zaobserwowano w [23]. Zależność ilościowa pomiędzy emulsją asfaltową a cementem wraz z odpowiednią temperaturą zagęszczania i zawartością wilgoci, odgrywa znaczącą rolę w określaniu wytrzymałości mieszanki cementowo-emulsyjnej na jej wczesnym etapie życia.

W mieszankach MCE emulsja bitumiczna rozpada się i dość szybko wiąże materiały, nie zwiększa modułu sztywności całej mieszaniny. W przypadku cementu występuje przeciwne zachowanie. Jego efekty wydają się powolne, a wszystkie materiały budowlane zawierające

elasticity on the other [27]. According to [28], the conditions of curing of recycled mixtures with asphalt emulsion can affect the void content and indirect tensile strength *ITS* of such materials. In addition, asphalt emulsion reduces moisture loss, which improves internal curing [29]. Cement and asphalt emulsion should be thoroughly mixed before contact with the aggregate to realise optimum efficiency of cold recycling mixes and avoid unfavourable interfaces [30].

Reclaimed asphalt pavement can be also applied in MCE mixtures. Its content at 45% achieves an optimum granulation of the mineral mixture and maximum strength features of such types of mixture [31]. With such solution, the amount of what is called reflective cracks on the pavement surface can be significantly reduced [26]. Rubber powder added to MCE mixtures contributes to reduced stiffness modulus and indirect tensile strength, and improves fatigue life, which can reduce the amount of additional asphalt emulsion [32].

1.3. APPLICATION OF AN INNOVATIVE BINDER BASED ON UCPP

In conglomerates containing reclaimed asphalt pavement (RAP), one method to enhance their performance is to use a dedicated bituminous binder. Such innovative bituminous binder has refreshing and anti-ageing properties. At the same time, it supports the process of mixing and homogenising reclaimed asphalt with fresh mineral material and ensures appropriate mixture workability in the paving and compaction processes [33].

Another way to improve the performance of RAP-containing mineral-asphalt mixtures is to use innovative cement binders based on cement dusty by-products (UCPP) [34]. Clinker is the primary ingredient of portland cements. In clinker production, present-day kilns also produce a waste product – cement by-pass dust (CBPD). CBPD dusts can contain significant amounts of soluble alkalis and free lime. Contained in the binder, they can potentially act as a starter activating the other ingredients of the binder [35]. As binder additive, they can replace traditional cement. They act as a stabiliser while reducing the stiffness of the output material. The application of cement dusty by-products (UCPP) in MCE and MCAS mixtures is at the same time a way to reuse waste [36]. An additional ingredient of the innovative binder is hydrated lime which improves

cement z czasem przedstawiają wzrost siły i sztywności [24]. Wzrost zawartości cementu powodował wzrost wartości modułów oraz spadek wartości kąta fazowego. Mimo to, tego typu mieszanki zachowują się jak materiały lepkosprężyste, nawet przy dodaniu 6% cementu i bez względu na okres zagęszczania (ang. *curing process*) – 28 dni, czy półtora roku [24, 25]. Wynika to z faktu, że właściwości tego typu mieszanki zmieniają się znacząco wraz ze zmianą temperatury. Ponadto ich lepkość jest niższa niż w betonie asfaltowym, ponieważ ich maksymalny kąt fazowy jest znacznie niższy niż typowy dla betonu asfaltowego [25]. Istotne jest odpowiednie dobranie zawartości cementu oraz uziarnienia kruszywa drogowego [26].

Wykorzystanie emulsji asfaltowej wraz z dodatkiem cementu korzystnie wpływa z jednej strony na sztywność a z drugiej strony na elastyczność takich mieszanek [27]. Według [28] warunki dojrzewania mieszanek recyklowanych z emulsją asfaltową mogą wpływać na zawartości wolnych przestrzeni i wytrzymałość na rozciąganie pośrednie *ITS* tych materiałów. Ponadto emulsja asfaltowa ogranicza utratę wilgoci, co prowadzi do poprawy wewnętrznego utwardzania [29]. Cement i emulsja asfaltowa powinny być w pełni zmieszane przed kontaktem z kruszywem, aby zrealizować optymalną wydajność mieszaniny recyklingu zimnego i uniknąć tworzenia niekorzystnej powierzchni styku [30].

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 [31]. Takie rozwiązanie pozwoli znacznie zmniejszyć ilość tzw. pęknięć odbitych na powierzchni nawierzchni [26]. Dodanie do mieszanek MCE proszku gumowego przyczynia się do zmniejszenia modułu sztywności i pośredniej wytrzymałości na rozciąganie oraz zwiększenia trwałości zmęczeniowej, co powoduje możliwość zmniejszenia ilości dodatkowej emulsji asfaltowej [32].

1.3. ZASTOSOWANIE INNOWACYJNEGO SPOIWA NA BAZIE UCPP

W konglomeratach zawierających odpady z warstw asfaltowych (RAP) sposobem na polepszenie ich właściwości jest zastosowanie dedykowanego lepiszcza asfaltowego. Innowacyjne lepiszcze asfaltowe posiada właściwości odświeżające i antystarzeniowe. Wspomaga jednocześnie proces mieszania i ujednoludnienia granulatu asfaltowego

physical and mechanical performance of the mixtures as well as the adhesion of binders to the aggregate [37].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. PURPOSE OF THE STUDY

The primary purpose of this study was to conduct comparative analysis of MCE and MCAS mixtures containing an innovative UCPP binder as a replacement for traditional cement. As a result of the analyses, binders that provide an appropriate durability of the road pavement base layer have been identified and proposed for the construction of a test section. The schematic diagram of our research approach is presented in Fig. 3.

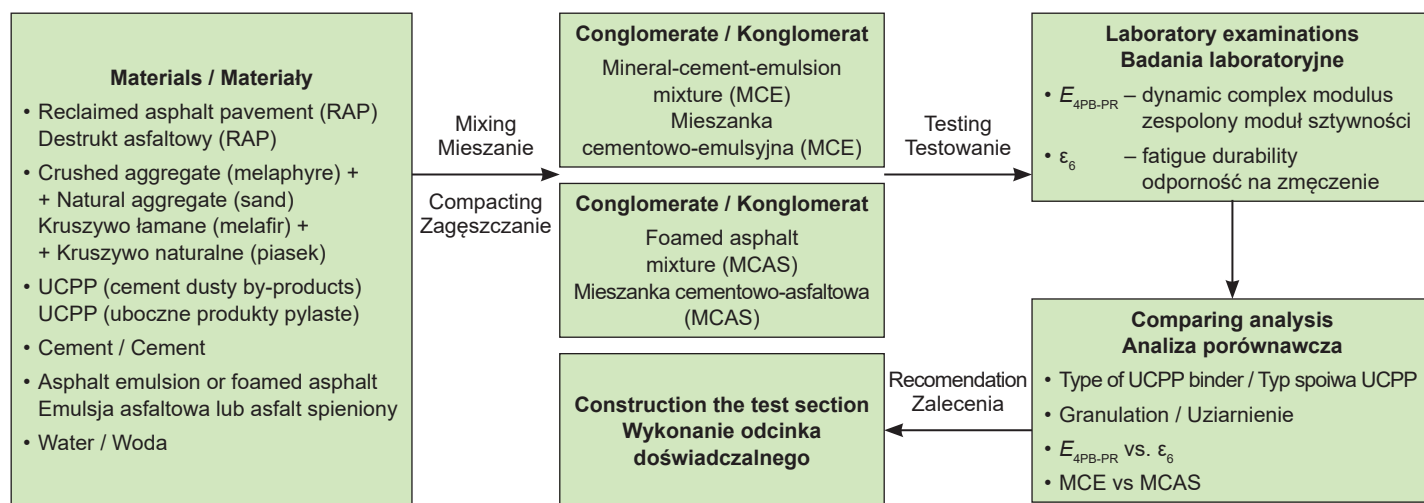


Fig. 3. The flowchart of testing methods
Rys. 3. Schemat blokowy metodologii badań

2.2. MATERIALS

The analysis covered two types of mixtures: MCE and MCAS. Based on granulation, coarse (C) and fine grained (F) mixtures are distinguished. Natural aggregate and reclaimed asphalt pavement (RAP) were both used in the mixtures. Optimum moisture levels were determined based on Proctor test to allow for correct compaction of the material. These moisture levels were 8.0% and 7.8% for coarse and fine grained mixtures, respectively. The granulation curves of the engineered mineral mixtures (MM) are presented in Fig. 4.

The amount of hydraulic binder was kept constant at 3.0% to ensure appropriate stiffness and fatigue durability. MCE and MCAS mixtures based on traditional cement

ze świeżym materiałem mineralnym oraz zapewnia odpowiedni poziom urabialności mieszanki podczas jej wbudowywania i zagęszczania [33].

Innym sposobem na poprawę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, zawierających RAP jest zastosowanie innowacyjnych spoiw cementowych na bazie ubocznych produktów pylistych (UCPP) [34]. Podstawowym składnikiem cementów portlandzkich jest klinkier. Podczas produkcji klinkieru, w nowoczesnych instalacjach piecowych powstają również pyły odpadowe – cementowe pyły by-passowe (CBPD). Pyły CBPD mogą zawierać znaczne ilości rozpuszczalnych alkaliów i wolne wapno. Występując w spoiwie mogą potencjalnie pełnić funkcję aktywatora dla innych składników spoiwa [35].

Jako dodatek do spoiwa mogą zastępować klasyczny cement. Pełnią rolę stabilizatora przy jednoczesnym ograniczaniu sztywności materiału wyjściowego. Zastosowanie pyłów UCPP w mieszankach MCE i MCAS stanowi jednocześnie metodę utylizacji odpadów [36]. Dodatkowym składnikiem innowacyjnego spoiwa będzie wapno hydratyzowane, które poprawia właściwości fizyko-mechaniczne mieszanek oraz adhezję spoiw do kruszywa [37].

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. CEL BADAŃ

Głównym celem badań była analiza porównawcza mieszanek typu MCE i MCAS zawierających w swym składzie innowacyjne spoiwo UCPP, zastępujące klasyczny cement. W efekcie przeprowadzonych analiz zaproponowano spoiwa gwarantujące odpowiednią trwałość

were adopted as reference mixtures. In the experimental process, traditional cement was replaced with innovative binders with the compositions as provided in Fig. 5, and the performance of these binders was analysed. Upon adding asphalt emulsion or foamed bitumen and replacing some cement with cement dusty by-products (UCPP), the stiffness of the structural layer of the road can be reduced and its fatigue life can be improved. The analysis covered seven types of binders and a comparative binder – cement – acc. to [11]. The percentage compositions of innovative binders are presented in Fig. 5. Ref binder was used as reference, which was 100% traditional cement. The compositions of MCE and MCAS mixtures, including water, are shown in Table 1 and Table 2.

Table 1. Composition of MCE mixtures
Tablica 1. Skład mieszanek MCE

No. Lp.	Ingredient Składnik	Mineral mixture MM [%]	Coarse MCE MCE(G) [%]	Fine MCE MCE(D) [%]
1	Reclaimed asphalt 0/10 mm (D) or 0/31.5 mm (G) Destrukt asfaltowy 0/10 mm (D) lub 0/31.5 mm (G)	40	34.4	34.5
2	Crushed aggregate improving the gradation – melaphyre 0/31.5 mm Kruszywo łamane, doziarnienie, melafir 0/31.5 mm	50	43.0	43.1
3	Natural aggregate improving the gradation – sand 0/2 mm Kruszywo naturalne, doziarnienie, piasek 0/2 mm	10	8.6	8.6
4	Cement or cement binder (1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C) Cement lub spoiwo (1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)	–	3.0	3.0
5	Asphalt emulsion C60B10ZM/R Emulsja asfaltowa C60B10ZM/R	–	5.0	5.0
6	Water Woda	–	6.0	5.8

Table 2. Composition of MCAS mixtures
Tablica 2. Skład mieszanek MCAS

No. Lp.	Ingredient Składnik	Mineral mixture MM [%]	Coarse MCAS MCAS(G) [%]	Fine MCAS MCAS(D) [%]
1	Reclaimed asphalt 0/10 mm (D) or 0/31.5 mm (G) Destrukt asfaltowy 0/10 mm (D) lub 0/31.5 mm (G)	40	34.4	34.5
2	Crushed aggregate improving the gradation – melaphyre 0/31.5 mm Kruszywo łamane, doziarnienie, melafir 0/31.5 mm	50	43.0	43.1
3	Natural aggregate improving the gradation – sand 0/2 mm Kruszywo naturalne, doziarnienie, piasek 0/2 mm	10	8.6	8.6
4	Cement or cement binder (1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C) Cement lub spoiwo (1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)	–	3.0	3.0
5	Foamed asphalt Asfalt spieniony	–	3.0	3.0
6	Water Woda	–	8.0	7.8

warstwy podbudowy nawierzchni drogowej, przeznaczoną do wykonania odcinka testowego. Schemat podejścia badawczego przedstawiono na Rys. 3.

2.2. MATERIAŁY

Analizom poddano dwa typy mieszanek: MCE i MCAS. W zależności od uziarnienia wyróżniono mieszanki gruboziarniste (G) i drobnoziarniste (D). W mieszkach zastosowano kruszywo naturalne oraz pochodzące z recyklingu (RAP). Na podstawie badań Proctora określono wilgotności optymalne, pozwalające na prawidłowe zagęszczenie materiału. Wilgotności te wynosiły odpowiednio 8,0% – w przypadku mieszanek gruboziarnistych i 7,8% – w przypadku mieszanek drobnoziarnistych. Krzywe uziarnienia projektowanych mieszanek mineralnych (MM) zamieszczono na Rys. 4.

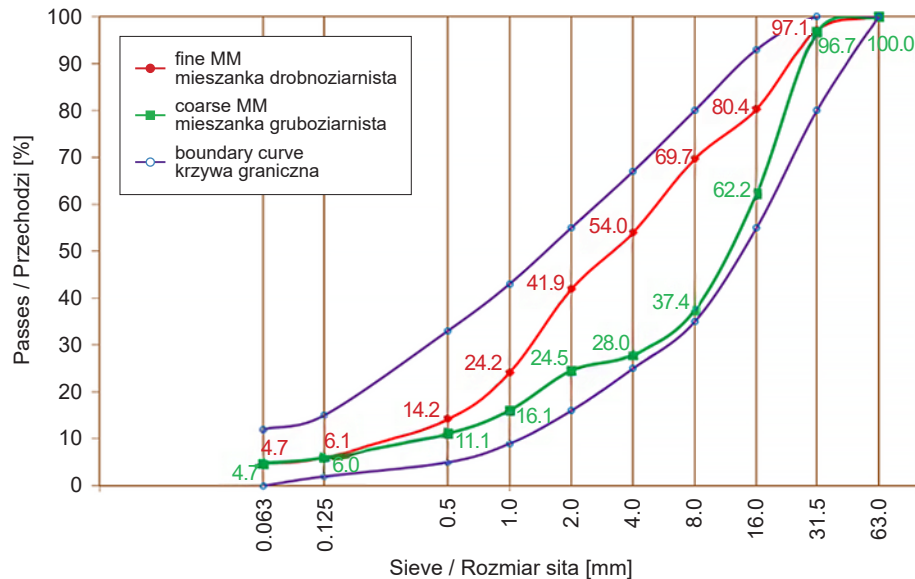


Fig. 4. The granulation curves of mineral mixtures (MM)
Rys. 4. Krzywe uziarnienia mieszanek mineralnych (MM)

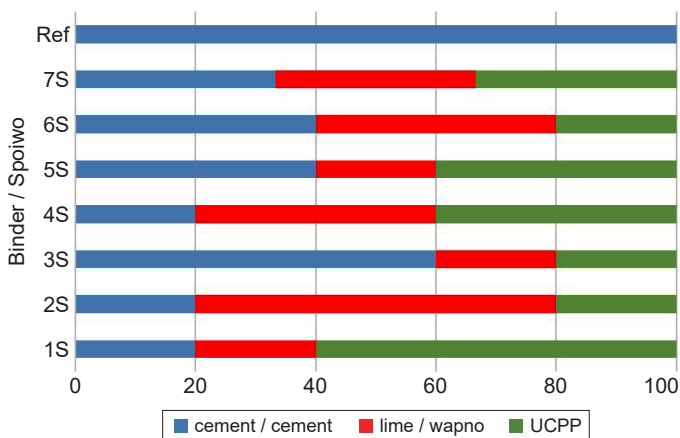


Fig. 5. Content of ingredients in innovative binders [%]
Rys. 5. Zawartości składników w innowacyjnych spoiwach [%]

2.3. TEST METHODS

MCE and MCAS are materials used mainly for the construction of base layers in road pavements. Therefore, such materials must be stiff enough and their fatigue performance should ensure appropriate durability of the entire structure of the road pavement.

The properties of MCE and MCAS mixtures based on innovative UCPP binders were analysed, including how the type of binder affects the stiffness modulus and fatigue durability of the mixture. The detailed testing plan is presented in Table 3.

Ilość spoiwa hydraulicznego była stała i wynosiła 3,0%. Wartość ta gwarantowała uzyskanie odpowiedniej sztywności oraz trwałości zmęczeniowej. Za mieszanki referencyjne przyjęto mieszanki MCE i MCAS oparte na klasycznym cemencie. W procesie eksperymentu klasyczny cement zastępowano spoiwami innowacyjnymi o składzie jak na Rys. 5 i analizowano ich wpływ na uzyskiwane rezultaty. Po dodaniu emulsji asfaltowej lub asfaltu spienionego i zastąpieniu części cementu pyłowymi produktami ubocznymi cementu (UCPP), możliwe będzie zmniejszenie sztywności i poprawa wytrzymałości zmęczeniowej warstwy konstrukcyjnej drogi. Analizie poddano siedem rodzajów spoiw oraz spoiwo porównawcze – cement, wg [11]. Składy procentowe innowacyjnych spoiw pokazano na Rys. 5. Jako spoiwo porównawcze przyjęto spoiwo Ref, w którym 100% zawartości stanowił klasyczny cement. Składy mieszanek MCE i MCAS z uwzględnieniem wody przedstawiono w Tabl. 1 i Tabl. 2.

2.3. METODY BADAŃ

Materiały MCE i MCAS wykorzystywane są głównie do konstruowania warstw podbudowy w nawierzchniach drogowych. Z faktu tego wynika, że muszą charakteryzować się odpowiednią sztywnością, a ich trwałość zmęczeniowa powinna zagwarantować odpowiednią trwałość całej konstrukcji nawierzchni drogowej.

W ramach badania przeprowadzona została ocena właściwości mieszanek MCE i MCAS opartych na innowacyjnych

The complex stiffness modulus and fatigue durability were examined using the four-point bending test on samples with nominal dimensions $b \times h \times L$ at 60 mm $\times$ 50 mm $\times$ 400 mm, respectively. Images of the test samples are presented in Fig. 6. The testing for stiffness modulus and fatigue durability was performed at 13°C.

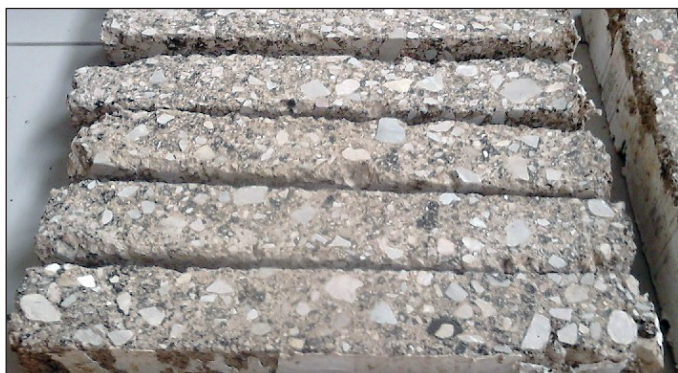


Fig. 6. Samples intended for bending by the 4PB-PR method
Rys. 6. Próbkki przeznaczone do zginania metodą 4PB-PR

Table 3. Laboratory testing plan

Tablica 3. Program badań laboratoryjnych

No. Lp.	Examination Badanie	Temperature [°C] Temperatura	Curing period in the air [days] Kondycjonowanie w powietrzu [dni]
1	Stiffness of MCE mix according to [38] Sztywność mieszanek MCE wg [38]	13	28
	Eight fine grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek droбноziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
	Eight coarse grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek gruboziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
2	Stiffness of MCAS mix according to [38] Sztywność mieszanek MCAS wg [38]	13	28
	Eight fine grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek droбноziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
	Eight coarse grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek gruboziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
3	Resistance to fatigue of MCE mix according to [39] Odporność na zmęczenie mieszanek MCE wg [39]	13	28
	Eight fine grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek droбноziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
	Eight coarse grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek gruboziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
4	Resistance to fatigue of MCAS mix according to [39] Odporność na zmęczenie mieszanek MCAS wg [39]	13	28
	Eight fine grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek droбноziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		
	Eight coarse grained mixtures (with Cem, or: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C binder) Osiem mieszanek gruboziarnistych (Cem, lub spoiwo: 1V, 2V, 3V, 4C, 5C, 6C, 7C)		

spoiwach UCPP. Analizowano wpływ typu spoiwa na moduł sztywności mieszanki oraz na jej trwałość zmęczeniową. Szczegółowy program badań przedstawiono w Tabl. 3.

Badania zespolonego modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej wykonywano metodą zginania belki 4-punktowej na próbkach o wymiarach nominalnych $b \times h \times L$ wynoszących odpowiednio 60 mm $\times$ 50 mm $\times$ 400 mm. Widok próbek testowych przedstawiono na Rys. 6. Badania modułu sztywności i odporności na zmęczenie prowadzono w temperaturze 13°C.

Na zmianę temperatury w nawierzchni na jej różnych głębokościach wpływa wiele czynników, m.in.: temperatura powietrza, nasłonecznienie, pora roku czy nawet pora doby. W okresie zimowym różnica temperatury pomiędzy najniższym a najwyższym punktem konstrukcji jest mniejsza niż w okresie letnim [40]. Ponadto im głębiej dokonujemy pomiaru temperatury, to jej różnica w ciągu roku jest mniejsza [40]. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych wykazały, że na głębokości konstrukcji ponad 55 cm, wpływ temperatury występującej

Temperature changes in the pavement along its various depths are affected by many factors, including: air temperature, sunlight exposure, season of the year, or even the time of the day. In winter, temperature difference between the lowest and the highest point of the structural profile is less than in summer [40]. In addition, the deeper temperature is measured in the profile, the smaller the difference during the year [40]. The results of experimental and simulation testing show that at profile depth of more than 55 cm, the impact of temperature measured on the surface of the profile is negligible [41]. The use of equivalent temperature (temperature at which the magnitude of fatigue damage would be equal to the fatigue damage calculated using the existing temperature range) reduces the number of tests, simplifies the analysis of results, reduces testing costs, and speeds up the structure dimensioning process. The US Strategic Highway Research Program has developed SUPERPAVE, a system for the engineering of mineral-asphalt mixtures, including defined the equivalent temperature for the pavement, in terms of the magnitude of fatigue damage [42]. For each of more than two thousands of road sections in the US and Canada, a temperature was selected for each structure at which an equivalent fatigue damage is expected. The equivalent temperature has been used in the practice of designing pavement structures in Poland [43].

The adopted testing temperature was average annual equivalent temperature in the recycled base layer made of MCE or MCAS mixtures, covered with SMA layer of 8 cm – which corresponds to the temperature recorded in the experimental section according to [37].

During the four-point beam bending test, detailed records were made of the vertical loading force and vertical displacement in the middle of the beam span. The data were used to determine the complex modulus acc. to (1):

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

where:

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

E_1 – real part, acc. eq. (2),

E_2 – imaginary part, acc. eq. (3),

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

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

na powierzchni konstrukcji, jest znikomy [41]. Wykorzystanie temperatury równoważnej (temperatura, w której wielkość szkody zmęczeniowej byłaby równa szkodzie zmęczeniowej wyliczonej z uwzględnieniem występującego przedziału wartości temperatury) zmniejsza liczbę badań, upraszcza analizę wyników, obniża koszty badań i przyspiesza proces wymiarowania konstrukcji. Amerykański program badawczy SHRP (ang. *Strategic Highway Research Program*) opracował system projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych SUPERPAVE, w tym określił temperaturę równoważną dla nawierzchni, ze względu na wielkość szkody zmęczeniowej [42]. Dla każdego z ponad dwóch tysięcy odcinków dróg w USA i Kanadzie dobrano taką temperaturę badania dla każdej z konstrukcji, w której przewiduje się równoważną szkodę zmęczeniową. Temperaturę równoważną stosuje się w praktyce projektowania konstrukcji nawierzchni w Polsce [43].

Temperaturę badań przyjęto jako średnioroczną temperaturę ekwiwalentną, występującą w warstwie recyklowanej podbudowy z mieszanek MCE lub MCAS, przykrytej warstwą SMA o grubości 8 cm – co odpowiada temperaturze rejestrowanej na odcinku doświadczalnym wg [37].

Podczas testów za pomocą metody belki 4-punktowo zginiwanej dokonano szczegółowej rejestracji pionowej siły obciążenia i pionowego przemieszczenia pośrodku rozpiętości belki. Uzyskane dane wykorzystano do określania modułu zespolonego wg (1):

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

gdzie:

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

E_1 – część rzeczywista (2),

E_2 – część urojona (3),

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

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

gdzie:

F – obciążenie [N],

z – ugięcie w środku rozpiętości belki [mm],

φ – kąt przesunięcia fazowego [°],

ω – częstotliwość kołowa obciążenia [rad/s],

where:

F – load [N],

z – deflection in the middle of the beam span [mm],

φ – phase angle [°],

ω – radial frequency of the load [rad/s],

μ – mass factor [g],

γ – shape factor [mm⁻¹].

For the testing of complex stiffness modulus, permanent load in the form of microstrain at $\varepsilon = 50 \cdot 10^{-6}$ m/m was applied with the frequency of 10 Hz. The sample loading method is presented in Fig. 7.

Fatigue durability or fatigue life is the maximum number of loading cycles leading to a reduction of the complex modulus to 50% of its initial value. For the testing of fatigue durability, permanent load in the form of microstrain at $\varepsilon = 90 \cdot 10^{-6}$ m/m, $\varepsilon = 140 \cdot 10^{-6}$ m/m, $\varepsilon = 160 \cdot 10^{-6}$ m/m was applied with the frequency of 10 Hz. The failure strain ε_6 , which achieves 1 million of loading cycles, was determined based on fatigue curves determined separately for each of the MCE and MCAS mixtures (Fig. 8).

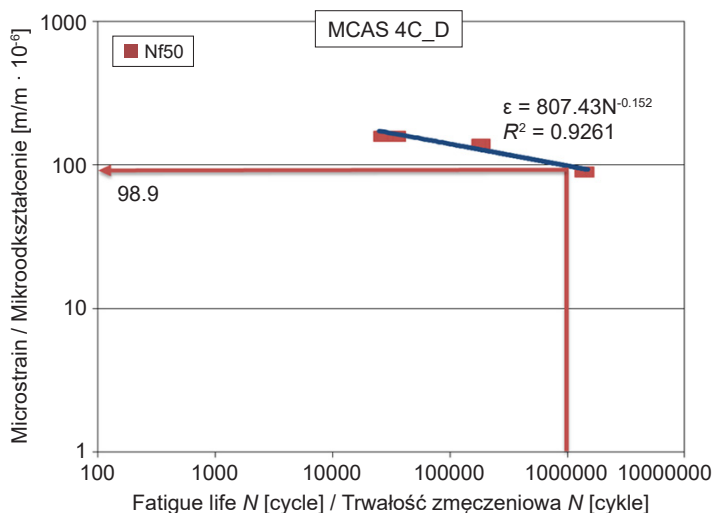


Fig. 8. Determination of failure microstrain ε_6

Rys. 8. Wyznaczenie mikroodkształcenia niszczącego ε_6

3. TEST RESULTS

The outcome of the testing were average values of complex stiffness modulus and failure strain of fatigue durability for MCE and MCAS mixtures based on UCPP binders. The characteristic properties for fine mixtures are presented in Table 4, and for coarse mixtures – in Table 5. Graphical interpretation of MCE and MCAS mixture stiffness results are presented in Fig. 9.

μ – współczynnik masy [g],

γ – współczynnik kształtu [mm⁻¹].

W przypadku badań zespolonego modułu sztywności zastosowano stałe obciążenie w postaci zadanego mikroodkształcenia na poziomie $\varepsilon = 50 \cdot 10^{-6}$ m/m z częstotliwością wynoszącą 10 Hz. Sposób obciążania próbki pokazano na Rys. 7.

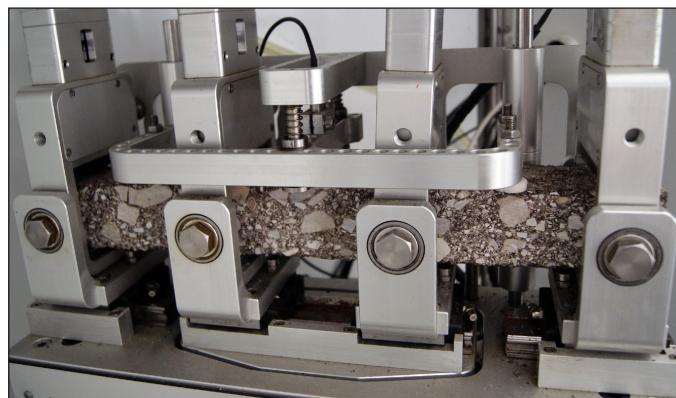


Fig. 7. Beam bending by the 4PB-PR method

Rys. 7. Zginanie belki metodą 4PB-PR

Trwałość zmęczeniowa jest to maksymalna liczba cykli obciążeniowych, do uzyskania spadku początkowej wartości modułu zespolonego do poziomu 50%. W przypadku badań trwałości zmęczeniowej stosowano stałe 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. Ustalenie odkształcenia niszczącego ε_6 , które pozwala na uzyskanie 1 mln cykli obciążeniowych wykonano na podstawie krzywych zmęczeniowych ustalonych oddzielnie dla każdej z mieszanek MCE i MCAS (Rys. 8).

3. REZULTATY BADAŃ

W oparciu o przeprowadzone badania uzyskano średnie wartości zespolonego modułu sztywności oraz odkształcenia niszczącego trwałości zmęczeniowej, dla mieszanek MCE i MCAS opartych na spoiwach UCPP. Właściwości charakterystyczne dla mieszanek drobnoziarnistych zamieszczono w Tabl. 4, natomiast dla mieszanek gruboziarnistych w Tabl. 5. Graficzną interpretację wyników sztywności mieszanek MCE i MCAS przedstawiono na Rys. 9.

Table 4. Properties of fine mixtures
Tablica 4. Właściwości mieszanek drobnoziarnistych

No. Lp.	Examination Badanie	Binder type / Typ spoiwa							
		1V	2V	3V	4C	5C	6C	7C	Ref
1	MCE mix / Mieszanka MCE								
	Stiffness according to [38] [MPa] Szywność wg [38]	2000	1500	3890	1690	3750	2763	3000	4183
	Resistance to fatigue according to [39] [m/m · 10 ⁻⁶] Odporność na zmęczenie wg [39]	80.21	84.38	82.31	87.35	90.41	89.67	91.60	85.00
2	MCAS mix / Mieszanka MCAS								
	Stiffness according to [38] [MPa] Szywność wg [38]	2389	2630	4286	2703	3870	3158	3413	3843
	Resistance to fatigue according to [39] [m/m · 10 ⁻⁶] Odporność na zmęczenie wg [39]	64.61	98.46	92.18	98.88	94.12	102.45	98.65	93.54

Table 5. Properties of coarse mixtures
Tablica 5. Właściwości mieszanek gruboziarnistych

No. Lp.	Examination Badanie	Binder type / Typ spoiwa							
		1V	2V	3V	4C	5C	6C	7C	Ref
1	MCE mix / Mieszanka MCE								
	Stiffness according to [38] [MPa] Szywność wg [38]	1600	1200	3056	1358	2760	1860	2000	3200
	Resistance to fatigue according to [39] [m/m · 10 ⁻⁶] Odporność na zmęczenie wg [39]	71.7	75.0	60.0	73.8	64.8	70.4	66.5	59.4
2	MCAS mix / Mieszanka MCAS								
	Stiffness according to [38] [MPa] Szywność wg [38]	3642	4150	4591	2880	3980	3221	3724	5409
	Resistance to fatigue according to [39] [m/m · 10 ⁻⁶] Odporność na zmęczenie wg [39]	80.7	100.2	91.0	93.0	94.8	101.6	100.1	97.3

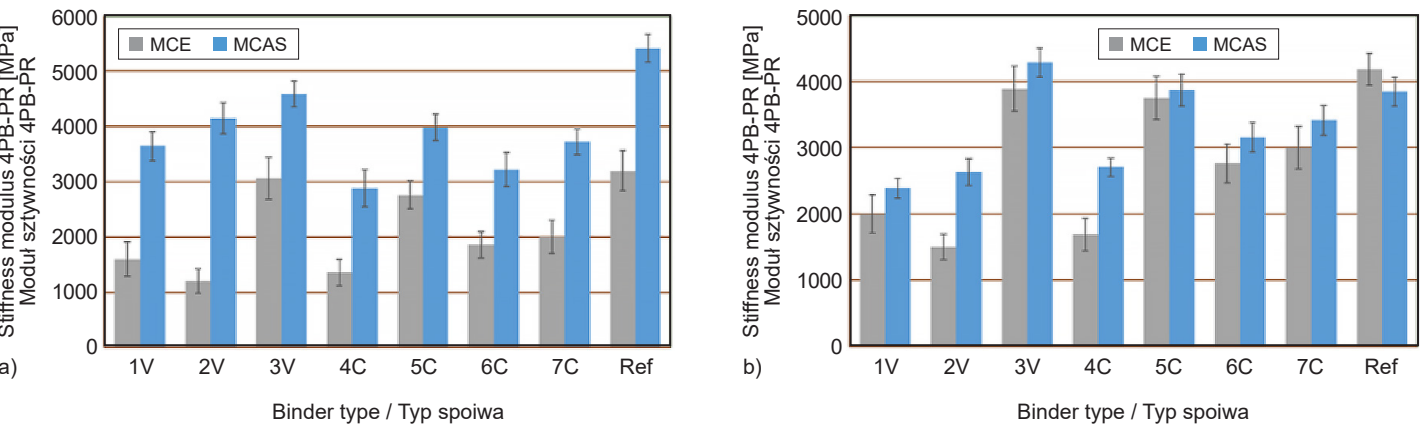
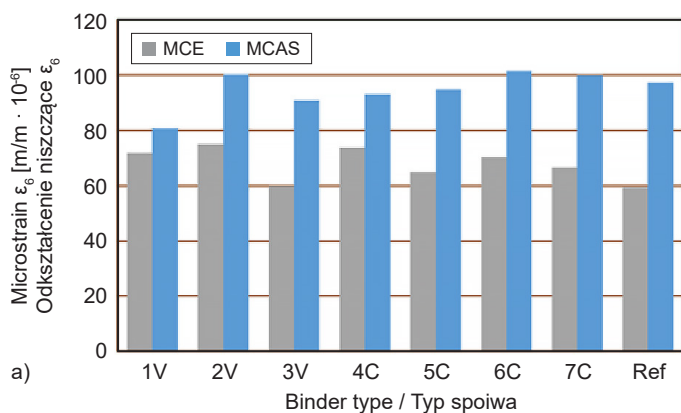


Fig. 9. 4PB modules: a) coarse mixtures, b) fine mixtures
Rys. 9. Moduły 4PB: a) mieszanki gruboziarniste, b) mieszanki drobnoziarniste

For coarse mixtures, in all cases higher stiffness of MCAS was observed than for MCE. Depending on binder type, the stiffness of MCAS mixtures was higher than for MCE mixtures, ranging from 44.2% to 245%. Average increase in stiffness modulus with foamed asphalt instead of asphalt emulsion was 101%.

Analysis of the stiffness of fine mixtures found a smaller increases in stiffness with foamed asphalt, except for the reference mixture, where higher stiffness of MCE was observed as compared to MCAS (by about 8.1%). Depending on binder type, the stiffness of MCAS mixtures was higher than for MCE mixtures, with the increase ranging from 3.2% to 75.3%. Average increase in stiffness modulus with foamed asphalt instead of asphalt emulsion was 28% – without taking account of reference mixtures. Graphical representation of the results of failure strain testing, characteristic for fatigue durability of MCE and MCAS mixtures, is presented in Fig. 10.

In analyses of failure strain of coarse mixtures, higher fatigue life of MCAS conglomerate than of MCE conglomerate was observed in all cases. Depending on binder type, the failure strain of MCAS mixtures was higher than for MCE mixtures, with the increase ranging from 12.5% to 63.8%. Average increase in failure strain with foamed asphalt instead of asphalt emulsion was 41%.



W odniesieniu do mieszanek gruboziarnistych we wszystkich przypadkach zaobserwowano wyższą sztywność konglomeratu MCAS w porównaniu do MCE. W zależności od rodzaju użytego spoiwa sztywność mieszanek MCAS była wyższa od mieszanek MCE w przedziale od 44,2% do 245%. Średni wzrost modułu sztywności po zastosowaniu asfaltu spienionego w zamian emulsji asfaltowej wyniósł 101%.

Analizując sztywność mieszanek drobnoziarnistych wzrost sztywności po zastosowaniu asfaltu spienionego był mniejszy, za wyjątkiem mieszanki referencyjnej, gdzie zaobserwowano wyższą sztywność materiału MCE w porównaniu do MCAS (o ok. 8,1%). W zależności od rodzaju użytego spoiwa, sztywności mieszanek MCAS były wyższe od sztywności mieszanek MCE w przedziale od 3,2% do 75,3%. Średni wzrost modułu sztywności po zastosowaniu asfaltu spienionego w zamian emulsji asfaltowej wyniósł 28% – nie uwzględniając mieszanek referencyjnych. Graficzną interpretację wyników odkształcenia niszczącego, charakterystycznego dla trwałości zmęczeniowej mieszanek MCE i MCAS zamieszczono na Rys. 10.

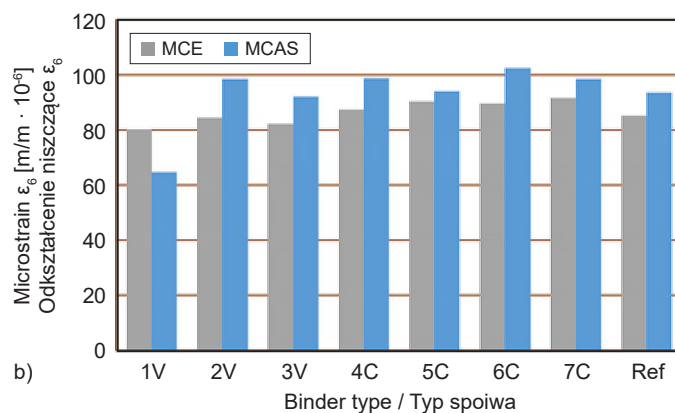


Fig. 10. Fatigue durability: a) coarse mixtures, b) fine mixtures

Rys. 10. Trwałość zmęczeniowa: a) mieszanki gruboziarniste, b) mieszanki drobnoziarniste

For fine mixtures, higher durability of MCAS conglomerate than of MCE was observed, except for MCAS with 1V binder which had lower failure strain than the MCE-1V mixture by about 19.4%. Depending on binder type, failure strain of MCAS mixtures was higher than for MCE mixtures, ranging from 4.1% to 16.7%, and the average increase was 11.1% – without taking account of mixtures containing the 1V binder.

Analizując odkształcenie niszczące mieszanek gruboziarnistych we wszystkich przypadkach zaobserwowano wyższą trwałość zmęczeniową konglomeratu MCAS w porównaniu do MCE. W zależności od rodzaju użytego spoiwa odkształcenie niszczące mieszanek MCAS było wyższe od mieszanek MCE w przedziale od 12,5% do 63,8%. Średni wzrost odkształcenia niszczącego po zastosowaniu asfaltu spienionego w zamian emulsji asfaltowej wyniósł 41%.

4. DISCUSSION

Analyses of results should consider the required performance of the materials contained in mineral-cement mixtures to be used in new base layers of road pavements. For the base layer to be safely operated and prevented from rapid cracking, the stiffness modulus of the MCE mixture should be at least 2500 MPa, and at least 3000 MPa for the MCAS mixture, while the condition of the minimum failure strain at 85 microstrains for MCE and 90 microstrains for MCAS layers, respectively, should be met.

With the aim of identifying an engineering solution that is as universal as possible, binders were sought that would simultaneously meet the requirements for stiffness and fatigue durability. However, given the safety of operation of a road pavement, fatigue durability should be the decisive factor. Such solution allowed to optimise the construction of the base layer in the test section. Fig. 11 presents the relationship between failure microstrains for fine MCAS mixtures and the failure microstrains for fine MCE mixtures. A correlation between the testing results was found. For linear relationship, the coefficient of determination R^2 was 0.49. Fig. 11 allows to identify binders for which MCE and MCAS mixtures meet at the same time the criteria for use in base layers. These binders are: 4C, 5C, 6C, and 7C.

A similar analysis was conducted for coarse mixtures (Fig. 12). In this case, no sufficient correlation between testing results was found. The R^2 coefficient was very low. Also, no binder could be identified that would meet the criteria of simultaneous application of MCE and MCAS mixtures. For this reason, coarse mixtures were discarded from the subsequent analysis process as they are less suitable for practical use.

Coarse mixtures fail to meet minimum durability (ϵ_f) requirements developed by us. Fine MCE and MCAS mixtures meet the criteria if they use 4C, 5C, 6C, 7C binders. For these mixtures, stiffness moduli were analysed in correlation to fatigue life. A minimum value of 4PB moduli at 2500 MPa for MCE and 3000 MPa for MCAS was adopted, to achieve an appropriate fatigue life of conglomerates required according to [44, 45] (Fig. 13).

W przypadku mieszanek droбноziarnistych zaobserwowano wyższą trwałość konglomeratu MCAS w porównaniu do MCE, za wyjątkiem mieszanki MCAS ze spoiwem 1V, która posiadała nisze odkształcenie niszczące od mieszanki MCE-1V o ok. 19,4%. Odkształcenie niszczące mieszanek MCAS było wyższe od mieszanek MCE w przedziale od 4,1% do 16,7%, a średni wzrost wyniósł 11,1% – nie uwzględniając mieszanek ze spoiwem 1V.

4. DYSKUSJA

W analizie wyników należało uwzględnić wymagania dotyczące właściwości materiałów typu mieszanki mineralno-cementowe, które mają być stosowane w nowych warstwach podbudowy nawierzchni drogowych. Aby warstwa podbudowy była bezpiecznie eksploatowana i nie ulegała szybkiemu spękanii moduł sztywności mieszanki MCE powinien wynosić min. 2500 MPa, natomiast mieszanki MCAS minimalnie 3000 MPa, przy jednoczesnym spełnieniu warunku minimalnego odkształcenia niszczącego wynoszącego odpowiednio 85 mikroadkształceń dla MCE i 90 mikroadkształceń dla warstw wykonanych z MCAS.

Aby rozwiązanie projektowe było maksymalnie uniwersalne dążono do wytypowania takich spoiw, które gwarantowałyby jednoczesne spełnienie wymagań dotyczących sztywności i trwałości zmęczeniowej. Z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji nawierzchni drogowej, decydującym kryterium powinno być jednak kryterium trwałości zmęczeniowej. Takie rozwiązanie pozwoliło jednocześnie na optymalizację procesu wykonania warstwy podbudowy na odcinku testowym. Na Rys. 11 przedstawiono zależność mikroadkształcenia niszczącego dla droбноziarnistych mieszanek MCAS od mikroadkształcenia niszczącego, charakterystycznego dla mieszanek droбноziarnistych MCE. Stwierdzono korelację wyników badań. Dla liniowej zależności współczynnik determinacji R^2 wynosił 0,49. Na Rys. 11 wskazano spoiwa, dla których jednocześnie mieszanki MCE i MCAS spełniały kryteria stosowania w warstwach podbudowy. Do spoiw tych należą: spoiwo 4C, 5C, 6C i 7C.

Analogiczną analizę przeprowadzono dla mieszanek gruboziarnistych (Rys. 12). W tym przypadku nie stwierdzono wystarczającej korelacji wyników badań. Współczynnik R^2 był bardzo niski. Nie można również było wskazać spoiwa, które zagwarantowałyby spełnienie kryteriów stosowania jednocześnie mieszanek MCE i MCAS. Z tego względu mieszanki gruboziarniste w dalszym procesie analiz odrzucono, jako mniej korzystne do zastosowań praktycznych.

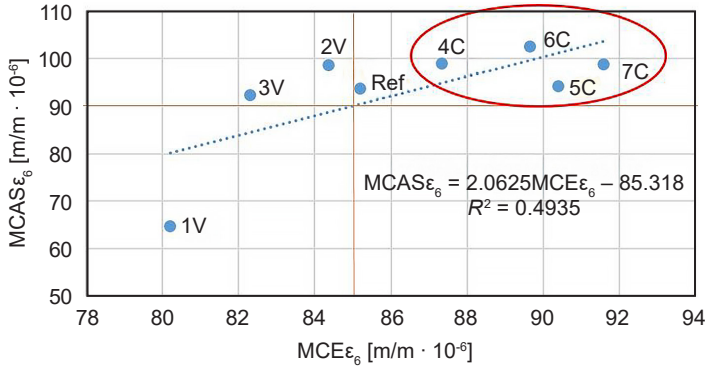


Fig. 11. Failure microstrains for fine mixtures

Rys. 11. Odształcenia niszczące dla mieszanek drobnoziarnistych

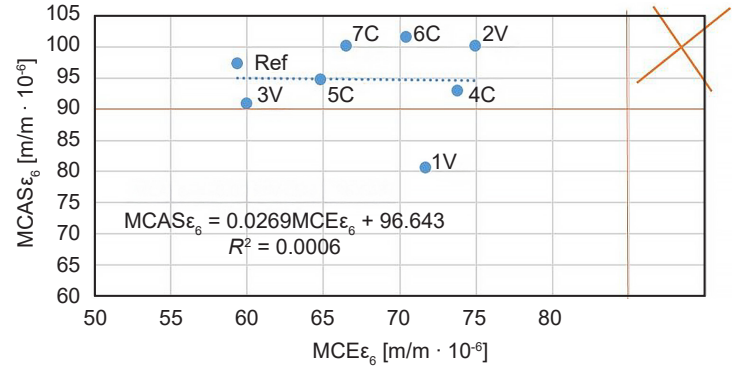
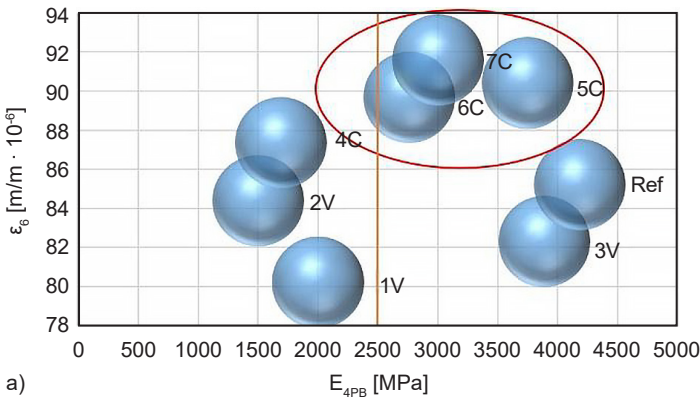
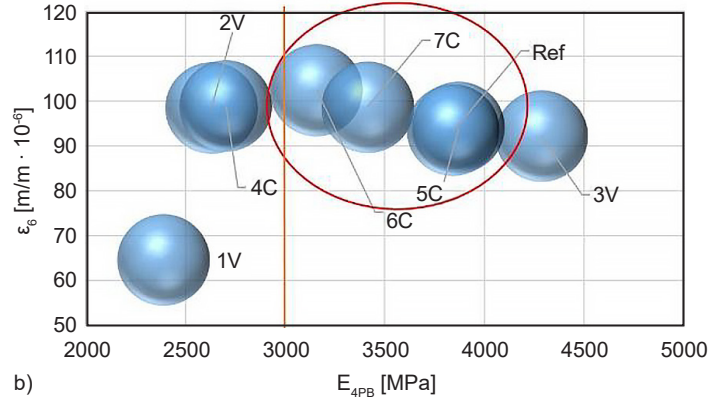


Fig. 12. Failure microstrains for coarse mixtures

Rys. 12. Odształcenia niszczące dla mieszanek gruboziarnistych



a)



b)

Fig. 13. Fine mixtures – selection of binders: a) MCE mixtures, b) MCAS mixtures

Rys. 13. Mieszanki drobnoziarniste – wybór spoiw: a) mieszanki MCE, b) mieszanki MCAS

Only three binders simultaneously met the criteria of the stiffness modulus. Three binders: 5C, 6C, and 7C, were recommended for use in the experimental section. For these materials, fatigue durability represented by failure strain as a function of the stiffness modulus was developed (Fig. 14). The value of fatigue life as a function of the stiffness modulus, in the tested range, for the fine mixtures has been described by eq. (4):

$$\varepsilon_6 = (-3 \cdot 10^{-5}) \cdot E^2 + 0.1886 \cdot E - 217.05. \quad (4)$$

The conducted analyses have demonstrated that the optimum stiffness of MCE and MCAS mixtures for base layers varies between 3000 and 3500 MPa, and the optimum failure strain is 98 microstrains.

As part of the activities under the TECHMATSTRATEG 1 project, an experimental road section was built using MCE and MCAS mixtures. The analysis of strains in the structure of the pavement of the test section based on the monitoring of climatic conditions is presented in [46].

Mieszanki gruboziarniste nie spełniają kryteriów minimalnej trwałości ε_6 opracowanych przez autorów. Mieszanki MCE i MCAS drobnoziarniste spełniają kryteria dla spoiw 4C, 5C, 6C, 7C. Dla tych mieszanek przeprowadzono analizę modułów sztywności w korelacji do trwałości zmęczeniowej. Przyjęto minimalną wartość modułów 4PB na poziomie 2500 MPa dla MCE i 3000 MPa dla MCAS, dla uzyskania odpowiedniej trwałości zmęczeniowej konglomeratów wymaganej wg [45, 46] (Rys. 13).

Tylko trzy spoiwa spełniały jednocześnie kryteria modułu sztywności. Do zastosowania na odcinku doświadczalnym rekomendowano 3 spoiwa: 5C, 6C, i 7C. Dla tych materiałów opracowano zależność trwałości zmęczeniowej, reprezentowanej przez odkształcenie niszczące, w funkcji modułu sztywności (Rys. 14). Zależność trwałości zmęczeniowej w funkcji modułu sztywności, w zakresie analizowanych wartości, dla mieszanek drobnoziarnistych opisana została wzorem (4):

$$\varepsilon_6 = (-3 \cdot 10^{-5}) \cdot E^2 + 0,1886 \cdot E - 217,05. \quad (4)$$

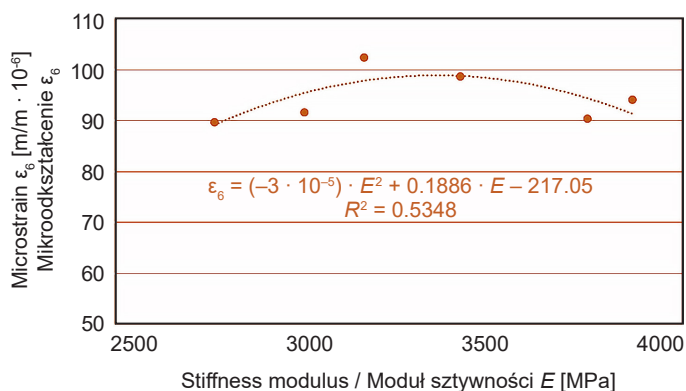


Fig. 14. Properties of fine mixtures

Rys. 14. Charakterystyka mieszanek drobnoziarnistych

5. CONCLUSIONS

The following conclusion can be drawn from the testing cycle and analysis of results:

1. It is feasible to use MCE and MCAS mixtures with a blended innovative UCPP binder that replaced traditional cement for the construction of pavement base layers.
2. The use of UCPP instead of traditional cement for the production of a binder dedicated to MCE and MCAS mixtures will reduce carbon footprint and increase the economy of reclamation of road pavements.
3. Innovative binders based on UCPP applied in MCAS mixtures achieve higher stiffness than when applied in MCE mixtures, with simultaneous improvement of fatigue lives of those materials.
4. Recycling with RAP used at 40% by weight in base layers made of MCE and MCAS mixtures, can be effectively applied.
5. Fine MCE and MCAS mixtures are characterised by higher homogeneity as compared to coarse mixtures. For fine mixtures, the 4C, 5C, 6C and 7C binders achieved stiffness and fatigue durability levels higher than the required minimum, both for MCE and MCAS.
6. The optimum fatigue durability for recycled MCE and MCAS mixtures was achieved with stiffness modulus determined by the 4PB method at 3300 MPa.
7. The analyses pointed to certain UCPP binders that ensured appropriate durability of the road pavement base layer for the test section.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że najbardziej optymalna sztywność mieszanek MCE i MCAS do warstw podbudowy waha się w granicach 3000-3500 MPa, natomiast trwałość zmęczeniowa optymalna to 98 mikrroodkształceń.

W ramach prowadzonych prac w projekcie TECHMAT-STRATEG 1 wykonano odcinek doświadczalny nawierzchni drogowej, z zastosowaniem mieszanek MCE i MCAS. Analizę odkształceń konstrukcji nawierzchni drogi odcinka testowego na podstawie monitoringu czynników klimatycznych przedstawiono w [46].

5. WNIOSKI

Z przeprowadzonego cyklu badań oraz analiz wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Możliwe jest zastosowanie mieszanek typu MCE i MCAS zawierających w swym składzie innowacyjne spoiwo UCPP, zastępujące klasyczny cement do konstrukcji warstw podbudowy nawierzchni drogowych.
2. Wykorzystanie pyłów UCPP w zamian klasycznego cementu do produkcji spoiwa dedykowanego dla mieszanek MCE i MCAS pozwoli na ograniczenie śladu węglowego i zwiększenie efektywności recyklingu nawierzchni drogowych.
3. Zastosowanie innowacyjnych spoiw na bazie UCPP pozwala na uzyskanie wyższych sztywności mieszanek MCAS w porównaniu do mieszanek MCE, przy jednoczesnym zwiększeniu trwałości zmęczeniowych tych materiałów.
4. Użycie RAP w warstwach podbudowy wykonanych z mieszanek MCE i MCAS w ilości 40% wagowo pozwala na efektywne zastosowanie recyklingu.
5. Mieszanki MCE i MCAS drobnoziarniste charakteryzują się większą jednorodnością w porównaniu do mieszanek gruboziarnistych. Dla mieszanek drobnoziarnistych spoiwa 4C, 5C, 6C i 7C pozwoliły na uzyskanie sztywności oraz trwałości zmęczeniowych na poziomach wyższych od minimalnych wymaganych, jednocześnie dla MCE i MCAS.
6. Optymalną trwałość zmęczeniową recyklowanych mieszanek MCE i MCAS uzyskano dla modułu sztywności wyznaczonego metodą 4PB na poziomie 3300 MPa.
7. W efekcie przeprowadzonych analiz wskazano na spoiwa UCPP gwarantujące odpowiednią trwałość warstw podbudowy nawierzchni drogowej dla odcinka testowego.

8. The determined relationships between failure strain and stiffness of recycled MCE and MCAS mixtures can be used for predicting the fatigue life of road pavements.
9. Binders code-named 5C, 6C, and 7C were selected for the construction of the test section. The test section with its base layers built in MCE and MCAS technologies will be subjected to analyses in range of real fatigue durability and deformation of the road pavement.

ACKNOWLEDGEMENT

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 pavement construction” (TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017), within the joint undertaking “Modern Material Technologies” (TECHMATSTRATEG I), which is co-funded by the National Centre for Research and Development.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] Wang Z., Xiao Y., Aminu U.F., He Q., Li Y., Li W.: Prediction of resilient modulus and critical dynamic stress of recycled aggregates: Experimental study and machine learning methods. *Transportation Geotechnics*, **49**, 8, 2024, Article ID: 101363, DOI: 10.1016/j.trgeo.2024.101363
- [2] Pevere A., Mouillet V., Boulange L., Gaudefroy V.: Air emissions contribution to complete environmental assessment of multi-recycled road materials incorporating reclaimed bituminous pavement for a better resource management. *Resources, Conservation and Recycling*, **212**, 2025, Article ID: 108003, DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.108003
- [3] Kukić J.: Recykling głęboki na zimno nawierzchni asfaltowych dróg samorządowych. *Materiały budowlane*, **12**, 508, 2014, 11-13, DOI: 10.15199/33.2014.12.03
- [4] Kasulanati M.L., Pancharathi R.K.: Optimizing multi-recycled concrete for sustainability: Aggregate gradation, surface treatment methods and life cycle impact assessment. *Construction and Building Materials*, **449**, 2024, Article ID: 138510, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138510
- [5] Hu B., Weng Y., Zhou Y., Li W., Huang X., Guo M.: Overcoming the weakness of recycled GFRP aggregate concrete: FRP confining and its design method. *Construction and Building Materials*, **445**, 2024, Article ID: 137780, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137780
8. Wyznaczone zależności pomiędzy odkształceniem niszczącym a sztywnością recyklowanych mieszanek MCE i MCAS mogą zostać wykorzystane do predykcji trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowej.
9. Do wykonania odcinka testowego wytypowano spoiwa oznaczone 5C, 6C i 7C. Odcinek testowy wykonany w technologii MCE i MCAS warstw podbudowy zostanie poddany analizom w zakresie rzeczywistej trwałości zmęczeniowej i odkształceń rzeczywistych nawierzchni drogowej.

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.

- [6] Martinez-Arguelles G., Giustozzi F., Crispino M., Flintsch G.W.: Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen. *Construction and Building Materials*, **72**, 2014, 423-433, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.024
- [7] Maghool F., Arulrajah A., Ghorbani B., Horpibulsuk S.: Strength and permanent deformation properties of demolition wastes, glass, and plastics stabilized with foamed bitumen for pavement bases. *Construction and Building Materials*, **320**, 2022, Article ID: 126108, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126108
- [8] Iwański M., Mazurek G., Buczyński P., Zapala-Sławeta J.: Multidimensional analysis of foaming process impact on 50/70 bitumen Ageing. *Construction and Building Materials*, **266**, Part B, 2021, Article ID: 121231, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121231
- [9] Mondal P.G., Kuna K.K.: Mix design considerations for foamed bitumen stabilized materials: A review. *Construction and Building Materials*, **326**, 2022, Article ID: 126783, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126783
- [10] Motevalizadeh S.M., Mollenhauer K.: Use of multivariate clustering analysis to investigate the physicochemical interactions in bitumen mastics using micromechanical modeling and FTIR spectroscopy. *Construction and Building Materials*, **448**, 2024, Article ID: 138230, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138230

- [11] Iwański M., Mazurek G., Buczyński P., Iwański M.M.: Effects of hydraulic binder composition on the rheological characteristics of recycled mixtures with foamed bitumen for full depth reclamation. *Construction and Building Materials*, **330**, 2022, Article ID: 127274, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127274
- [12] Pitawala S., Sountharajah A., Bodin D., Kodikara J.: Advanced characterisation of flexural fatigue performance of foamed bitumen stabilised pavement materials. *Construction and Building Materials*, **341**, 2022, Article ID 127881, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127881
- [13] Cheng Z., Kong F., Gao X.: Evaluating dynamic modulus of cold in-place recycling mixture with foamed bitumen using field core samples. *Construction and Building Materials*, **448**, 2024, Article ID: 138227, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138227
- [14] Jahan H., Kar S.S., Swamy A.K.: Performance of foamed bituminous mixtures for the construction of pavements: A review. *Construction and Building Materials*, **453**, 2024, Article ID: 139024, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139024
- [15] 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, Article ID: 120517, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120517
- [16] Hashemian L., Kavussi A., Aboalmaali H.H.: Application of foam bitumen in cold recycling and hydrated lime in airport pavement strengthening. *Case Studies in Construction Materials*, **1**, 2014, 164-171, DOI: 10.1016/j.cscm.2014.08.002
- [17] Oliveira J., Silva H., Martins A., Correia E., Pragosa J., Mendes P.: A pavement full-depth reclamation case study using cold in situ recycling with foamed bitumen. *Transportation Research Procedia*, **72**, 2023, 4183-4190, DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.356
- [18] Iwański M., Chomicz-Kowalska A., Maciejewski K., Iwański M.M., Ramiączek P., Stepień J.: Evaluation of mixture grading and binder composition effects on the characteristics of cold-recycled mixtures with foamed bitumen. *Transportation Research Procedia*, **72**, 2023, 2776-2783, DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.820
- [19] Skotnicki Ł.Z., Kuźniewski J., Szydło A.: Research on the properties of mineral-cement emulsion mixtures using recycled road pavement materials. *Materials*, **14**, 3, 2021, Article ID: 563, DOI: 10.3390/ma14030563
- [20] Abreu L., Oliveira J., Silva H., Silva C., Palha D., Fonseca P.: Foamed bitumen: an alternative way of producing asphalt mixtures. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, **29**, 1, 2017, e198-e203, DOI: 10.1016/j.ctmat.2016.07.004
- [21] Cuadri A.A., Perez-Moreno S., Altamar C.L., Navarro F.J., Bolívar J.P.: Phosphogypsum as additive for foamed bitumen manufacturing used in asphalt paving. *Journal of Cleaner Production*, **283**, 2021, Article ID: 124661, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124661
- [22] Fang L., Zhou J., Yang Z., Yuan Q., Que Y.: Interaction between cement and asphalt emulsion and its influences on asphalt emulsion demulsification, cement hydration and rheology. *Construction and Building Materials*, **329**, 2022, Article ID: 127220, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127220
- [23] Lu D., Jiang X., Tan Z., Yin B., Leng Z., Zhong J.: Enhancing sustainability in pavement Engineering: A-state-of-the-art review of cement asphalt emulsion mixtures. *Cleaner Materials*, **9**, 2023, Article ID: 100204, DOI: 10.1016/j.clema.2023.100204
- [24] Dołżycki 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
- [25] Dołżycki B., Jaczewski M., Szydłowski C.: The influence of binding agents on stiffness of mineral-cementemulsion mixtures. *Procedia Engineering*, **172**, 2017, 239-246, DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.103
- [26] Dołżycki B., Jaskuła P.: Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, **6**, 4, 2019, 311-323, DOI: 10.1016/j.jtte.2019.02.002
- [27] Fang L., Zhou J., Yang Z., Yuan Q., Que Y.: Interaction between cement and asphalt emulsion and its influences on asphalt emulsion demulsification, cement hydration and rheology. *Construction and Building Materials*, **329**, 2022, Article ID: 127220, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127220
- [28] Yang W., Ouyang J., Meng Y., Han B., Sha Y.: Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under different cement contents. *Construction and Building Materials*, **297**, 2021, Article ID: 123699, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123699
- [29] Deng Z., Mahmood A.H., Dong W., Sheng D., Lin X.: Piezoresistive performance of self-sensing bitumen emulsion-cement mortar with multi-walled carbon nanotubes. *Cement and Concrete Composites*, **153**, 2024, Article ID: 105718, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105718
- [30] Chen T., Luan Y., Ma T., 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, Article ID: 120674, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120674

- [31] Kuźniewski J., Skotnicki Ł.: Properties of mineral-cement emulsion mixtures based on concrete aggregates from recycling. *Case Studies in Construction Materials*, **12**, 2019, Article ID: e00309, DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00309
- [32] Kukiela 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
- [33] Król J., Konieczna K., Liphardt A., Radziszewski P., Kowalski K., Pokorski P., Sarnowski M., Kędzierska A.: Recykling nawierzchni bardziej efektywny z innowacyjnym asfaltem. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, **3**, 2022, 52-54, https://nbi.com.pl/content/uploads/assets/NBI-pdf/2022/3_102_2022/PDF/9-Recykling-nawierzchni.pdf (19.12.2024)
- [34] Skotnicki Ł., Kuźniewski J.: Cracking resistance of recycled mineral-cement-emulsion mixtures. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **22**, 1, 2023, 19-39, DOI: 10.7409/rabdim.023.002
- [35] Czapik P., Szczur P.: Influence of cement by-pass dust on the properties of multi-component binders with granulated blast furnace slag. XII Konferencja „Dni betonu”, Wisła, 2023, http://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2023/Czapik_Szczur.pdf (19.12.2024)
- [36] Czapik P., Zapala-Sławeta J., Owsiak Z., Stępień P.: Hydration of Cement By-Pass Dust. *Construction and Building Materials*, **231**, 2020, Article ID: 117139, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117139
- [37] 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
- [38] PN-EN 12697-26+A1:2023-03 Bituminous mixtures – Test methods – Part 26: Stiffness
- [39] PN-EN 12697-24:2018-08 Bituminous mixtures – Test methods – Part 24: Resistance to fatigue
- [40] Poliaček I.: Vplyv teplotného režimu vozovky na jej správanie sa a návrh. Slovenská Vysoká Škola Technická v Bratislave, Cestné Vedeckovýskumne Laboratórium, Bratislava, 1975 (available from the authors)
- [41] Motamedi Z., Bansal T., Mattsson H., Åström J., Casselgren J.: A dynamic boundary condition finite difference model for predicting pavement profile temperatures: Development and validation. *Transportation Engineering*, **18**, 2024, Article ID: 100287, DOI: 10.1016/j.treng.2024.100287
- [42] Huber G.A., Kennedy T.W., Anderson M.: The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. Strategic Highway Research Program SHRP-A-407, Washington, DC, 1994, <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/shrp-a-407.pdf> (19.12.2024)
- [43] Bańkowski W., Gajewski M., Gajewska B.: Assessment of the Design Life of High Modulus Asphalt Concrete Pavements and Propositions of Typical Structures. In: Pereira P., Pais J. (eds), *Proceedings of the 10th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements “MAIREPAV 2024”*. Lecture Notes in Civil Engineering, **522**, 2024, 559-570, DOI: 10.1007/978-3-031-63588-5_53
- [44] Mackiewicz P., Kuźniewski J., Skotnicki Ł.Z., Szydło A.: Innowacyjna technologia wykorzystująca optymalizację środka wiążącego przeznaczona do technologii recyklingu głębokiego na zimno konstrukcji nawierzchni zapewniająca jej trwałość eksploatacyjną: wytyczne w zakresie technologii recyklingu głębokiego na zimno z emulsją asfaltową oraz dedykowanym spoiwem (MSEA). Politechnika Wrocławska, Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, SPR, 42, Wrocław 2021 (available from the authors)
- [45] Iwański M., Mazurek G., Buczyński P., 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: wytyczne w zakresie technologii recyklingu głębokiego na zimno z asfaltem spienionym oraz dedykowanym spoiwem (MSAS). Opracowanie w ramach projektu TECHMATSTRATEG1/349326/9/NCBR/2017 (available from the authors)
- [46] Iwański M., Mazurek G., Buczyński P.: Analysis of the deformation of road surface construction based on monitoring climatic factors. *Structure and Environment*, **16**, 3, 2024, 141-147, Article ID: el 013, DOI: 10.30540/sae-2024-013

Trwałość zmęczeniowa mieszanek recyklowanych z dodatkiem ubocznych cementowych produktów pylastych (UCPP) w warstwach podbudowy

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizy zastosowania innowacyjnego spoiwa drogowego opartego na ubocznych cementowych produktach pylastych (UCPP) w mieszankach mineralno-cementowo-emulsyjnych (MCE) i mieszankach mineralno-cementowych z asfaltem spienionym (MCAS). Podczas przeprowadzania badań mieszanek stosowanych w nawierzchniach asfaltowych w zamian klasycznego cementu zostały użyte spoiwa UCPP. Nowe spoiwa hydrauliczne wpływają na redukcję sztywności mieszanek MCE i MCAS, co ogranicza spękania termiczne oraz zmęczeniowe w warstwach podbudowy. W badaniach laboratoryjnych zastosowano siedem różnych spoiw opartych na UCPP, wapnie oraz klasycznym cemencie. Analizowano wpływ tych spoiw na właściwości mechaniczne recyklowanych mieszanek MCE i MCAS. Wykazano znaczące zmiany dotyczące modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej wytworzonych konglomeratów. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że nowatorskie spoiwa mogą być stosowane w mieszankach przeznaczonych do warstw podbudowy. Wytypowano spoiwa optymalne do zastosowania zarówno w MCE jak i MCAS. Wykazane korelacje pozwolą na przyspieszenie procesu projektowania i doboru konstrukcji nawierzchni drogowych opartych na procesie recyklingu głębokiego na zimno.

Słowa kluczowe: mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna, mieszanka mineralno-cementowa z asfaltem spienionym, innowacyjne spoiwo drogowo, recykling, trwałość zmęczeniowa.
