

OCENA PRZYCZEPNOŚCI ASFALTU DO KRUSZYW MINERALNYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY FOTOGRAMETRYCZNEJ¹

Weronika PAWŁOWSKA*, Mieczysław SŁOWIK**, Adrian NOWAK*,
Adam KRZEMIENIŃ*, Artur WILMAŃSKI***

*Student Politechniki Poznańskiej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

**Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

***Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Poznaniu

Zgodnie z procedurami opisanymi w normach PN-84/B-06714/22 oraz PN-EN 12697-11:2012, oceny stopnia pokrycia kruszywa lepiszczem asfaltowym dokonuje się wzrokowo przez dwóch niezależnych obserwatorów. Nie jest to jednak metoda, która umożliwiłaby precyzyjną ocenę badanego zjawiska. Zespół badawczy podjął się opracowania metodyki badawczej opartej na metodzie fotogrametrycznej pozwalającej dokonać oceny przyczepności asfaltu do kruszyw mineralnych bez konieczności wykorzystania oceny wizualnej obciążonej subiektywnymi wrażeniami obserwatora. Zakres pracy obejmował budowę stanowiska do wykonywania obrazów fotograficznych próbek kruszywa, przygotowanie próbek kruszywa o znanym stopniu pokrycia asfaltem oraz ocenę stopnia pokrycia asfaltem tych próbek przy pomocy programu GIMP, dzięki czemu możliwa była weryfikacja tej metody. Następnie dokonano oceny przyczepności asfaltu do kruszyw mineralnych metodami opisanymi w normach PN-84/B-06714/22 i PN-EN 12697-11:2012, co było praktycznym zastosowaniem metody opisanej w pracy. Wykazano, że metoda fotogrametryczna pozwala dokładniej ocenić stopień pokrycia asfaltem kruszyw mineralnych niż stosowana dotychczas ocena wizualna.

1. WPROWADZENIE

Celem pracy jest opracowanie metodyki pozwalającej precyzyjnie określić przyczepność asfaltu do kruszyw mineralnych oraz ocena przyczepności lepiszczka do wybranych kruszyw z wykorzystaniem zaproponowanej przez zespół autorski metody fotogrametrycznej. Zakres pracy obejmował:

- a) budowę stanowiska badawczego do wykonywania obrazów fotograficznych próbek kruszywa otoczonego asfaltem,
- b) opracowanie metodyki badań przyczepności asfaltów do kruszyw z zastosowaniem analizy obrazu,

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2018.27.10

- c) przygotowanie próbek kruszywa o zróżnicowanym (znanym) stopniu pokrycia lepiszczem asfaltowym do badań laboratoryjnych,
- d) ocenę stopnia pokrycia kruszywa asfaltem na podstawie analizy uzyskanych obrazów,
- e) ocenę przyczepności asfaltów do wybranych kruszyw mineralnych metodami opisanymi w normach PN-84/B-06714/22 i PN-EN 12697-11:2012 z zastosowaniem opracowanej metody analizy obrazu.

2. PRZYCZEPNOŚĆ ASFALTU DO KRUSZYW MINERALNYCH – STUDIUM LITERATURY

2.1. Podstawowe informacje

Jedną z najważniejszych właściwości asfaltu jest jego adhezja do kruszywa, czyli zdolność związania się lepiszcza z powierzchnią materiału mineralnego. Miarą przyczepności asfaltu jest praca potrzebna do oddzielenia lepiszcza od powierzchni kruszywa pozostającej z nim w kontakcie, przypadająca na jednostkę powierzchni. Dobre przyleganie asfaltu do kruszywa jest bardzo ważne. Jeśli adhezja jest zbyt mała, wówczas słabsze jest połączenie ziaren, co może prowadzić do szybszego zniszczenia nawierzchni. Również odmycie asfaltu (podczas którego następuje rozerwanie wiązań adhezyjnych między lepiszczem a powierzchnią kruszywa) ze znajdujących się w warstwie ścieralnej ziaren może być przyczyną zmniejszenia trwałości nawierzchni. Czynniki wpływające na adhezję asfaltu do powierzchni ziaren kruszywa zestawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Wybrane czynniki wpływające na adhezję asfaltu do ziaren kruszywa [1]

Właściwości kruszywa	Właściwości asfaltu
skład petrograficzny tekstura powierzchni porowatość zapylenie powierzchnia właściwa zdolność wchłaniania asfaltu wilgotność kształt ziaren stopień zwiertzenia	właściwości reologiczne polarność elektryczna budowa chemiczna

2.2. Wpływ pH kruszywa

Kruszywa są istotnym składnikiem wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych. W zależności od zawartości krzemionki możemy je podzielić na:

- kwaśne – o zawartości krzemionki > 65%,

- obojętne – o zawartości krzemionki 55-65%,
- zasadowe – o zawartości krzemionki < 55%.

Powierzchnie większości kruszyw nie są elektrycznie obojętne.

Przyczepność chemiczna błonki asfaltu do powierzchni kruszywa jest wynikiem oddziaływania stosunkowo słabych, rozproszonych ładunków elektrycznych. Ponieważ woda jest materiałem bardzo polarnym, zostaje przyciągana przez ładunki elektryczne występujące na powierzchni kruszywa. Kruszywa kwaśne wykazują większe właściwości hydrofilowe niż kruszywa zasadowe, a ponadto asfalt jest koloidem elektroujemnym, dlatego wykazuje lepszą przyczepność do kruszyw zasadowych (elektrododatnich) niż do kruszyw kwaśnych (elektroujemnych) [1].

2.3. Wpływ wody

Przenikanie wód opadowych do wnętrza nawierzchni drogowej jest zjawiskiem niepożądanym. Przepływająca woda powoduje bowiem usunięcie błonki asfaltu znajdującej się na kruszywie, zajmując jej miejsce. Zjawisku temu sprzyja przerwanie błonki asfaltowej występujące w miejscach jej mechanicznego uszkodzenia. Najczęściej miejscami tymi są krawędzie ziaren, gdzie błonka asfaltu jest najsłabsza i narażona na przerywanie przez kontakt i tarcie z ziarnami. W trakcie odmywania następuje rozerwanie wiązań adhezyjnych między asfaltem a powierzchnią kruszywa. Woda dostaje się wówczas pomiędzy warstwę asfaltu a kruszywo i ze względu na to, że powierzchnia kruszywa wykazuje zwykle większe powinowactwo z wodą niż z asfaltem – wiązanie adhezyjne zostaje rozerwane. Odsłonięte powierzchnie kruszywa narażone są na agresywne działanie wody i środków chemicznych [2].

2.4. Dodatki zwiększające adhezję

W celu polepszenia przyczepności asfaltu do kruszyw stosuje się tzw. środki adhezyjne. Są to substancje powierzchniowo aktywne, które zmieniają fizyczno-chemiczny charakter kontaktu między kruszywem i asfaltem. Dodatki te redukują napięcie powierzchniowe układu asfalt/ziarno kruszywa oraz zmniejszają kąt zwilżania, który tworzy się na granicy styku kruszywa, wody i lepiszcza. Jeżeli wartość kąta zwilżania wynosi 0° to mamy do czynienia ze zjawiskiem zwilżania idealnego. Przy kącie równym 180° zwilżanie wcale nie zachodzi. Zadaniem substancji powierzchniowo aktywnych jest zmniejszenie kąta zwilżania do wartości $<90^\circ$. Dodatki zwiększające adhezję można wprowadzać zarówno do lepiszcza jak i do kruszywa. Stosuje się dwie metody dodawania tych środków do mieszanki mineralno-asfaltowej:

a) „na gorąco”:

- poprzez dodanie środków adhezyjnych do zbiornika z asfaltem,
- poprzez wprowadzenie środków adhezyjnych do przewodów dostarczających asfalt do mieszalnika otaczarki;

b) „na zimno”:

- poprzez spryskanie powierzchni kruszywa wodnym roztworem środka adhezyjnego w procesie otaczania [1, 2].

3. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW

3.1. Pochodzenie kruszyw

Obiektem badań były kruszywa łamane, które powstały w wyniku przekruszenia surowca skalnego. Ze względu na sposób powstania skały dzielimy na 3 grupy:

- magmowe – powstające w wyniku krzepnięcia magmy,
- osadowe – powstające zwykle na skutek cyklu procesów rozpoczynających się od niszczenia skały, transportu jej okruchów, a następnie ich osadzenia w środowisku wodnym lub lądowym,
- przeobrażone – powstające w wyniku przeobrażenia wcześniej istniejących skał pod wpływem czynników występujących w głębi Ziemi (ciepła i wysokiego ciśnienia).

Każdy z powyższych typów skał posiada charakterystyczną grupę minerałów skałotwórczych, które mają bardzo duży wpływ na właściwości skały [3].

W niniejszej pracy badaniom poddano cztery rodzaje kruszyw o zróżnicowanym pochodzeniu:

- wapienne,
- granitowe,
- bazaltowe,
- z bazaltu utlenionego.

3.2. Charakterystyka kruszyw poddanych badaniom

W badaniach wykorzystano jedno kruszywo pochodzące ze skał osadowych oraz trzy kruszywa pochodzące ze skał magmowych. Poniżej przedstawiono ich krótką charakterystykę:

- wapień – skała osadowa, o dominującej zawartości węgla wapnia. Przydatność kruszywa wapiennego do celów drogowych jest ograniczona ze względu na występujące problemy ze ścieralnością. Charakteryzuje się za to bardzo dobrą adhezją do asfaltu. Jego gęstość wynosi 2,63-2,87 Mg/m³. Zawiera od 0 do 5% krzemionki, należy zatem do kruszyw zasadowych [3];
- granit – skała magmowa głębinowa o dużej wytrzymałości. Właściwości kruszywa granitowego zależą od złoża i są zróżnicowane (występuje wśród nich duża zmienność odporności na ścieranie i czynniki klimatyczne). Jego gęstość wynosi 2,62-2,84 Mg/m³. Zawiera ponad 70% krzemionki, zatem zaliczany jest do kruszyw kwaśnych [3],
- bazalt – skała magmowa wylewna, najpopularniejsza w Polsce skała stosowana w drogownictwie. Kruszywo bazaltowe charakteryzuje się dobrymi parametrami

trami wytrzymałościowymi. Jego gęstość wynosi 2,73-3,23 Mg/m³. Zawiera od 34 do 54% krzemionki, zatem należy do kruszyw zasadowych [3],

- bazalt utleniony – skała magmowa wylewna (bazalt) z występującymi przebarwieniami, które mogły być skutkiem wietrzenia lub mineralizacji.

3.3. Charakterystyka asfaltu drogowego 50/70

Badaniom przyczepności do kruszyw poddano asfalt drogowy 50/70. Jest on stosowany jako materiał wiążący (lepiszcze) przede wszystkim w betonach asfaltowych (AC) i mieszankach mastykowo-grysowych (SMA) w warstwach ścieralnych nawierzchni obciążonych ruchem kategorii KR1-KR4, pod warunkiem spełnienia postawionych wymagań dotyczących odporności mieszanki na koleinowanie.

Podstawowe wymagania normy PN-EN 12591 stawiane asfaltom 50/70 są następujące [2]:

- penetracja w temperaturze 25°C: 50÷70 mm/10;
- temperatura mięknięcia: 46÷54°C;
- właściwości po starzeniu krótkoterminowym symulowanym metodą laboratoryjną RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) wg PN-EN 12607-1 [4],
 - zmiana masy (\pm): $\leq 0,5\%$,
 - pozostała penetracja: $\geq 50\%$,
 - temperatura mięknięcia po starzeniu: $\geq 48^\circ\text{C}$,
- temperatura zapłonu: $\geq 230^\circ\text{C}$;
- rozpuszczalność: $\geq 99,0\%$.

Inne (wybrane) wymagania normy PN-EN 12591 związane ze szczególnymi warunkami krajowymi:

- zawartość parafiny: $\leq 2,2\%$,
- lepkość dynamiczna w 60°C: $\geq 145 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- lepkość kinematyczna w 135°C: $\geq 295 \text{ mm}^2/\text{s}$,
- temperatura łamliwości wg Fraassa: $\leq -8^\circ\text{C}$,
- indeks penetracji: od -1,5 do +0,7.

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

4.1. Opis przygotowania próbek kruszywa do badań

Słowo „próbka” odnosić się będzie do określonej masy kruszywa grubego łamanego frakcji 8/11 mm otoczonego lepiszczem asfaltowym.

Przygotowanie próbek kruszywa o zróżnicowanym stopniu pokrycia lepiszczem asfaltowym do badań laboratoryjnych wykonywano w następującej kolejności:

- wybór czterech rodzajów kruszywa grubego łamanego: granitowe, wapienne, bazaltowe oraz z bazaltu utlenionego. Wykorzystując sita badawcze oraz

wstrząsarce laboratoryjną oddzielono 600 g frakcji 8/11 mm każdego z kruszyw przeznaczonych do badań;

- płukanie przesianego kruszywa pod bieżącą wodą na sicie 8 mm, w celu usunięcia pyłów i zanieczyszczeń;
- umieszczenie kruszywa w wentylowanej suszarce laboratoryjnej rozgrzanej do temperatury 110°C i osuszenie go do stałej masy. Stałą masę kruszywo osiąga, gdy kolejne pomiary masy wykonane w odstępach czasowych równych 1 h dają wyniki różniące się od siebie o nie więcej niż 0,1% masy;
- pobranie próbki lepiszcza – asfaltu 50/70 wg PN-EN 12594:2014-12 i umieszczenie go w metalowym pojemniku z pokrywą;
- rozgrzanie badanego kruszywa i lepiszcza asfaltowego w wentylowanej suszarce do osiągnięcia zakładanej temperatury mieszania;
- do rozgrzanej miski, w której uprzednio umieszczono 16 g lepiszcza asfaltowego, dodawano 510 g kruszywa i całość intensywnie mieszano przy pomocy szpatułki w celu uzyskania jednolitego pokrycia ziaren kruszywa asfaltem;
- po wymieszaniu, powstałą mieszanekę niezwłocznie rozkładano na płaskiej powierzchni, pilnując, by otoczone lepiszczem ziarna kruszywa się nie stykały [5]. W tym celu wykorzystano papier pokryty silikonem. Należało działać szybko, ponieważ wraz ze zmniejszaniem temperatury pojedyncze ziarna kruszywa łączyły się w bryły i trudno było je rozdzielić.

Tak przygotowane próbki pozostawiano w temperaturze pokojowej na co najmniej 3 h.

Wszystkie opisane powyżej kroki były wykonywane dla każdego z czterech rodzajów kruszyw.

4.2. Opis stanowiska badawczego

Badania wykonano w Laboratorium Drogowym Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Poznaniu.

4.2.1. Przygotowanie próbek do wykonania zdjęć

Aby przygotować próbki użyto następujących narzędzi i przyrządów:

- waga – mierząca masę z dokładnością do $\pm 0,2$ g, służąca do ważenia próbek kruszywa i lepiszcza asfaltowego,
- zestaw sit badawczych – użyte w celu przesiania kruszywa, wymiary oczek sit to 8 mm oraz 11 mm,
- wstrząsarca do sit - potrzebna do przesiewania kruszywa,
- suszarka z wymuszonym obiegiem powietrza – użyta w celu wysuszenia kruszywa do stałej masy oraz do ogrzania kruszywa i lepiszcza asfaltowego do temperatury mieszania,
- miska stalowa lub parownica – potrzebna do mieszania w niej kruszywa z rozgrzanym lepiszczem asfaltowym,
- szpatuła – służąca do mieszania kruszywa z rozgrzanym lepiszczem asfaltowym,

- papier z nieprzywieralną powłoką silikonową – potrzebny do ułożenia próbek,
- naczynia szklane, w których umieszczano przygotowane próbki kruszywa przeznaczone do analizy fotogrametrycznej,
- zbiornik z wodą destylowaną potrzebną do wypełnienia naczynia z próbką.

4.2.2. Stanowisko do wykonywania zdjęć

Do wykonania fotografii wykorzystano następujące urządzenia:

- aparat cyfrowy – użyto aparat Panasonic, model Lumix DMC-S1 o rozdzielczości wykonywanych zdjęć 12,1 MPx,
- źródło światła: wykorzystano dwa reflektory do jednoczesnego oświetlenia komory bezcieniowej z dwóch stron; jeden halogenowy o mocy 500 W, drugi LED o mocy 20 W (co odpowiada lampie halogenowej o mocy 115 W),
- komora bezcieniowa wykonana we własnym zakresie składająca się ze stelaża drewnianego otaczającego fotografowaną próbkę, złożonego z trwale połączonych drewnianych listew, otoczonego białym materiałem, dzięki któremu uzyskiwano światło rozproszone,
- czerwony papier służący za tło, na którym układano badaną próbkę.

Do obróbki zdjęć wykorzystano komputer z zainstalowanym programem graficznym GIMP.

4.2.3. Metoda oceny przyczepności asfaltu do kruszywa wg normy PN-84/B-06714/22

Do przeprowadzenia badania potrzebne są:

- zlewki szklane o pojemności 250 cm³
- kuchenka elektryczna – użyta w celu ogrzania próbki do temperatury wrzenia
- szczypce laboratoryjne – potrzebne do chwycenia ogrzanej zlewki z badaną próbką.

4.2.4. Metoda oceny przyczepności asfaltu do kruszywa wg normy PN-EN 12697-11:2012

Do przeprowadzenia badania niezbędne są:

- lodówka umożliwiająca schłodzenie wody destylowanej do temperatury 2–5°C,
- butelki do badań wykonane ze szkła borokrzemianowego o pojemności 500 ml z wodoszczelną zakrętką,
- szklane bagietki, które umieszczają się w butelkach wraz z badaną próbką,
- urządzenie do obracania butelek.

4.3. Zastosowanie metody fotogrametrycznej do oceny stopnia pokrycia kruszywa asfaltem. Kalibracja metody pomiarowej

Po wykonaniu badania zgodnie z normą PN-EN 12697-11:2012 przystąpiono do oceny przyczepności lepischerza do kruszywa metodą fotogrametryczną.

Pierwszym zadaniem było wykonanie pozbawionego odbłasków, dobrej jakości zdjęcia cyfrowego próbki znajdującej się w naczyniu wypełnionym wodą destylowaną.

Po kilkunastu różnych próbach, za najbardziej korzystne uznano rozwiązanie w postaci stanowiska badawczego o następującej charakterystyce:

- próbki kruszywa otoczonego lepiszczem asfaltowym ułożone w szklanym naczyniu wypełnionym wodą destylowaną,
- naczynie położone na czerwonej kartce papieru stanowiącej tło,
- komora bezcieniowa osłonięta od góry (zastosowano białą kartkę),
- cyfrowy aparat fotograficzny usytuowany w górnej płaszczyźnie szkieletu drewnianego, tuż pod kartką papieru znajdującą się w górnej części szkieletu,
- reflektor LED o mocy 20 W (który jest odpowiednikiem lampy halogenowej o mocy 115 W) umieszczony w odległości 25 cm od lewego boku szkieletu drewnianego,
- lampa halogenowa o mocy 500 W umieszczona w odległości 40 cm od prawego boku szkieletu rozpraszającego, przykryta cienką warstwą białego papieru (usytuowanie oraz przesłona miały na celu zniwelowanie znacznie większej mocy reflektora i zapewnienie równomiernego oświetlenia próbki)
- lampy uniesione powyżej płaszczyzny poziomej próbki,
- kąt pochylenia lamp w stronę próbki wynosił 45°.

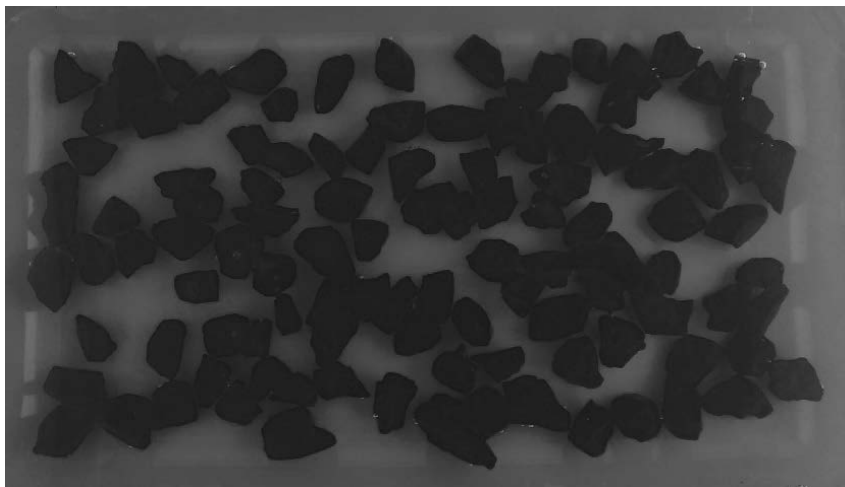
Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego w wersji ostatecznej

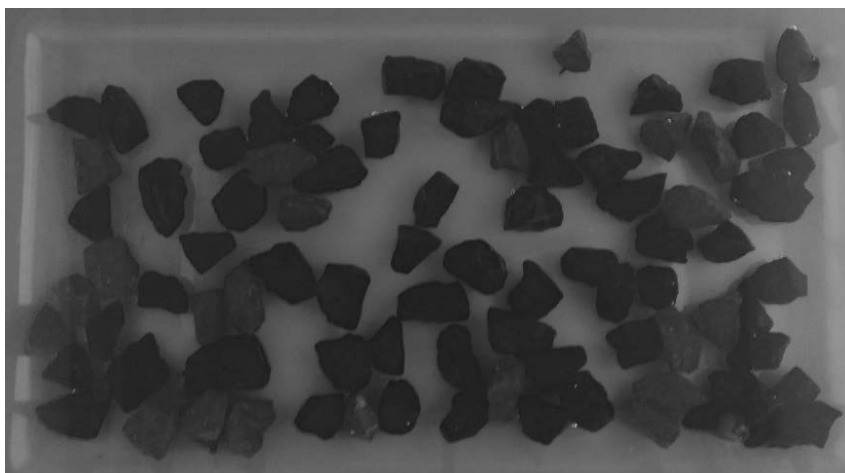
W celu kalibracji opracowanej przez zespół badawczy metody pomiarowej, najpierw przygotowane zostały próbki, w których wymieszane zostały ziarna kruszywa całkowicie pokryte asfaltem z ziarnami kruszywa niepokrytymi lepiszczem - znany był procentowy udział ich masy w próbce:

- a) próbka kruszywa z bazaltu utlenionego zawierała 100% kruszywa otoczonego lepiszczem asfaltowym (150,0 g) – rysunek 2;



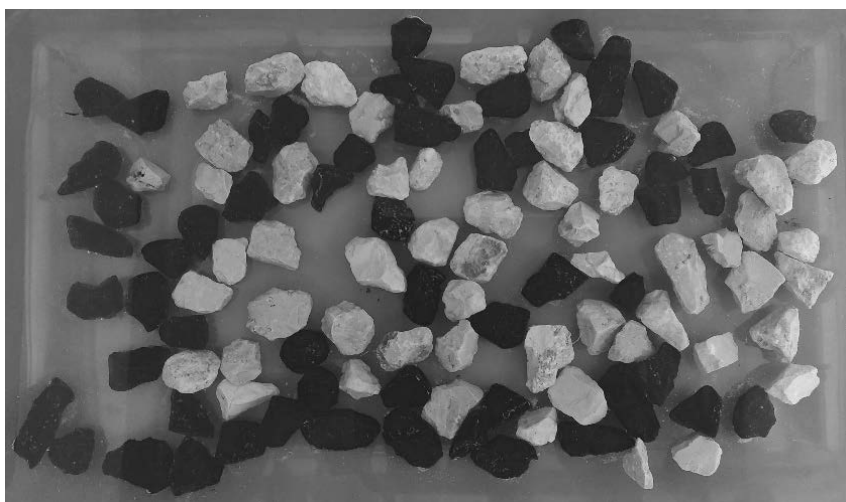
Rys. 2. Próbką kruszywa z bazaltu utlenionego całkowicie (w 100%) otoczonego lepiszczem asfaltowym

- b) próbka kruszywa bazaltowego: 75% kruszywa otoczonego lepiszczem (112,75 g) i 25% kruszywa nieotoczonego (36,93 g) – rysunek 3;



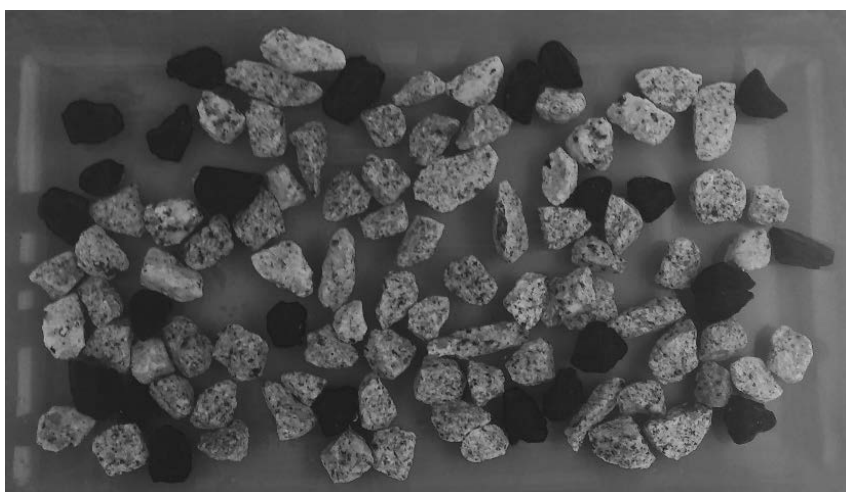
Rys. 3. Próbką kruszywa bazaltowego zawierająca 75% ziaren otoczonych lepiszczem

- c) próbka kruszywa wapiennego: 50% kruszywa otoczonego lepiszczem (75,02 g) i 50% kruszywa nieotoczonego (75,14 g) – rysunek 4;



Rys. 4. Próbką kruszywa wapiennego zawierająca 50% ziaren otoczonych lepiszczem

- d) próbką kruszywa granitowego: 25% kruszywa otoczonego lepiszczem (37,46 g) i 75% kruszywa nieotoczonego (112,59 g) – rysunek 5.



Rys. 5. Próbką kruszywa granitowego zawierająca 25% ziaren otoczonych lepiszczem

Każda z próbek miała łączną masę 150 g (± 2 g). Probki przechowywano w szklanym, płaskim, prostokątnym naczyniu i zalewano wodą destylowaną w taki sposób, aby każde ziarno znajdowało się pod taflą wody.

Stopień pokrycia ziaren kruszywa asfaltem oceniany był z użyciem programu komputerowego GIMP. Po wykonaniu fotografii, importowano je do programu i za pomocą narzędzia „Różdżka”, które wskazywało obszar o zbliżonej

koloryście, zaznaczano ziarna kruszywa całkowicie pokryte asfaltem. Następnie odczytywano liczbę zaznaczonych przez narzędzie pikseli. Analogiczną czynność wykonywano dla ziaren kruszywa niepokrytych asfaltem. Następnie obliczano stosunek liczby pikseli z obydwu odczytów i porównywano z wcześniej określonym stosunkiem mas.

Wyniki uzyskane dla poszczególnych rodzajów kruszyw prezentują się następująco (w nawiasach podano znany przed badaniem stosunek mas ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym i ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym):

a) kruszywo bazaltowe (75% ziaren otoczonych lepiszczem asfaltowym).

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa bazaltowego niepokrytego lepiszczem asfaltowym: 257760.

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa bazaltowego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 768291.

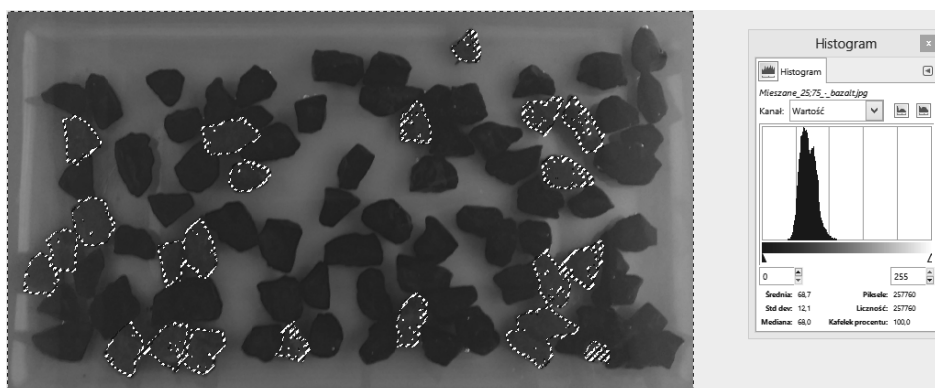
Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{257760}{257760 + 768291} \cdot 100\% = 25,1\%$$

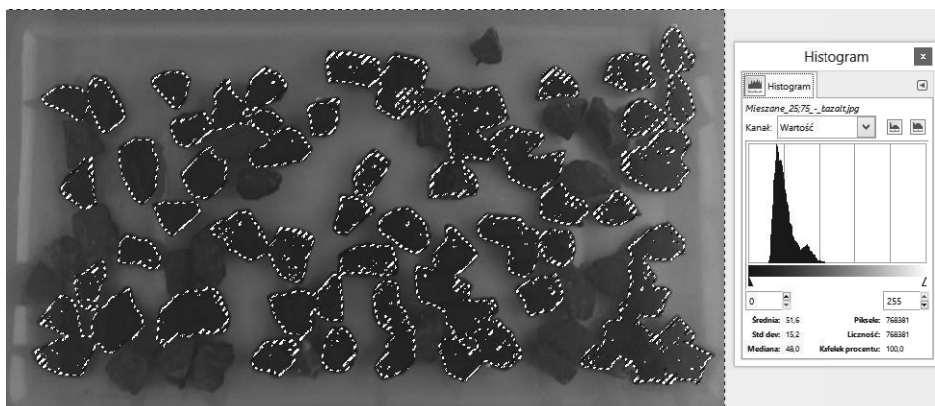
Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{768291}{257760 + 768291} \cdot 100\% = 74,9\%$$

Na rysunkach 6 i 7 załączono przykładowe zrzuty ekranu z programu GIMP.



Rys. 6. Zrzut ekranu z programu komputerowego GIMP przedstawiający zaznaczone za pomocą narzędzia „Różdżka” ziarna kruszywa bazaltowego niepokryte lepiszczem



Rys. 7. Zrzut ekranu z programu komputerowego GIMP przedstawiający zaznaczone za pomocą narzędzia „Róźdzka” ziarna kruszywa bazaltowego pokryte lepiszczem

- b) kruszywo wapienne (50% ziaren otoczonych lepiszczem asfaltowym).
 Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Róźdzka” dla ziaren kruszywa wapiennego niepokrytego lepiszczem asfaltowym: 1083431.
 Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Róźdzka” dla ziaren kruszywa wapiennego pokrytych lepiszczem asfaltowym: 1065092.
 Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytych lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{1083431}{1083431 + 1065092} \cdot 100\% = 50,4\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

- c) kruszywo granitowe (25% ziaren otoczonych lepiszczem asfaltowym).
 Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Róźdzka” dla ziaren kruszywa granitowego niepokrytego lepiszczem asfaltowym: 975546.
 Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Róźdzka” dla ziaren kruszywa granitowego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 318712.

Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{975546}{975546 + 318712} \cdot 100\% = 75,4\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{318712}{975546 + 318712} \cdot 100\% = 24,6\%$$

Można stwierdzić, że zastosowana metoda fotogrametryczna pozwala na uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników niż uzyskiwane metodą oceny wizualnej. W żadnym z prezentowanych przykładów różnica pomiędzy wyznaczo-

nym stopniem pokrycia ziaren kruszywa lepiszczem w stosunku do wartości oczekiwanej nie przekroczyła 0,5%. Dokładność oceny wizualnej szacuje się na $\pm 5-10\%$.

4.4. Zastosowanie opracowanej metodyki badawczej do oceny stopnia pokrycia kruszywa asfaltem według procedur normowych

4.4.1. Opis metody oceny przyczepności asfaltu do kruszywa wg normy PN-84/B-06714/22

Do wykonania tego badania wybrano kruszywo granitowe otoczone lepiszczem asfaltowym.

Z przygotowanej wcześniej próbki pobrano 100 g kruszywa, umieszczono w szklanej zlewce o pojemności 250 cm³ i zalano wodą destylowaną o masie 130 g. [6].

Naczynie ustawiano na piecu laboratoryjnym i ogrzewano do temperatury wrzenia przez 10 ± 1 min. Po zagotowaniu utrzymywano próbkę w stanie spokojnego wrzenia przez 3 min [6]. Trudnością w tym badaniu było wyznaczenie w sposób jednoznaczny chwili, w której woda zaczyna wrzeć.

Po zakończeniu gotowania wylewano gorącą wodę znajdującą się nad próbką, a kruszywo wysypywano na papier, odwracając zlewkę do góry dnem [6]. Według normy PN-84/B-06714/22 umieszczona na papierze próbka nie powinna rozpaść się na pojedyncze ziarna. Jednak w celu uzyskania odpowiedniej oceny wizualnej przy wykorzystaniu metody fotogrametrycznej próbkę rozdzielano na pojedyncze ziarna.

Przygotowane w ten sposób kruszywo umieszczano w warunkach odpowiadających opracowanej metodyce oceny wizualnej z zastosowaniem metody fotogrametrycznej.

4.4.2. Opis metody oceny przyczepności asfaltu do kruszywa wg normy PN-EN 12697-11:2012

Do wykonania tego badania użyto wszystkich czterech próbek kruszywa otoczonego asfaltem. Z przygotowanych wcześniej próbek odważono po 150 g kruszywa. Następnie umieszczano je zwilżonymi palcami w butelkach do badań, zawierających około 50% objętości wody destylowanej o temperaturze $5 \pm 2^\circ\text{C}$. Dzięki niskiej temperaturze wody zapobiega się sklejanemu się ziaren pokrytych asfaltem [5].

Butelki zostały wykonane ze szkła boro-krzemowego o dużej odporności na ścieranie. Każdą z butelek została odpowiednio oznakowana, by po zakończeniu badania możliwa była prawidłowa identyfikacja badanej próbki kruszywa otoczonego asfaltem. Następnie w każdej z butelek umieszczano szklaną bagietkę i zakręcano nakrętką. Tak przygotowane próbki umieszczano w urządzeniu obracającym i wprowadzono naczynia w ruch obrotowy [5]. Prędkość obrotowa butelek wynosiła 40 obr./min $\pm 10\%$. Obracanie butelek przerywano po 6 h [5]. Następnie wylewano wodę z butelek, a kruszywo przesypany do przezroczy-

tych naczyń i umieszczano je w warunkach odpowiadających opracowanej metodyce oceny wizualnej z zastosowaniem metody fotogrametrycznej.



Rys. 8. Butelki umieszczone w urządzeniu obracającym

4.5. Ocena stopnia pokrycia ziaren kruszywa asfaltem z wykorzystaniem opracowanej metody fotogrametrycznej

W niniejszym punkcie przedstawiono zastosowanie metody fotogrametrycznej do oceny stopnia pokrycia ziaren kruszywa mineralnego lepiszczem asfaltowym próbek poddanych kondycjonowaniu zgodnie z procedurami opisanymi w normach PN-84/B-06714/22 oraz PN-EN 12697-11:2012.

4.5.1. Badanie wg normy PN-84/B-06714/22

Kruszywo granitowe.

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa granitowego niepokrytego lepiszczem asfaltowym: 23575.

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa granitowego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 156929.

Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{23575}{23575 + 156929} \cdot 100\% = 13,1\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{156929}{23575 + 156929} \cdot 100\% = 86,9\%$$

Na rysunkach 9 i 10 załączono zrzuty ekranu z programu komputerowego GIMP przedstawiające zaznaczone za pomocą narzędzia „Różdżka” obszary ziaren kruszywa granitowego niepokryte lepiszczem asfaltowym oraz pokryte lepiszczem asfaltowym.

4.5.2. Badanie wg normy PN-EN 12697-11:2012

a) kruszywo granitowe

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa granitowego niepokrytego lepiszczem asfaltowym: 187266.

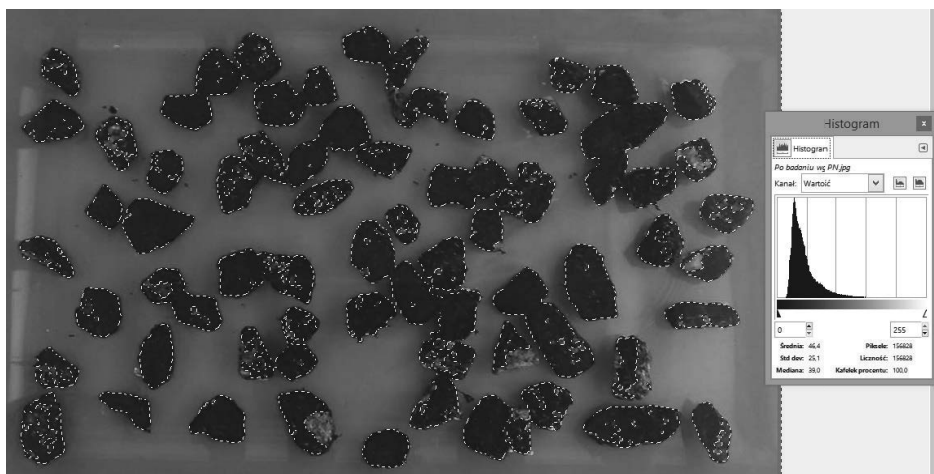
Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa granitowego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 36345.

Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{187266}{187266 + 36345} \cdot 100\% = 83,7\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{36345}{187266 + 36345} \cdot 100\% = 16,3\%$$



Rys. 9. Zrzut ekranu z programu komputerowego GIMP przedstawiający zaznaczone za pomocą narzędzia „Różdżka” obszary ziaren kruszywa granitowego niepokryte lepiszczem asfaltowym

b) kruszywo wapienne

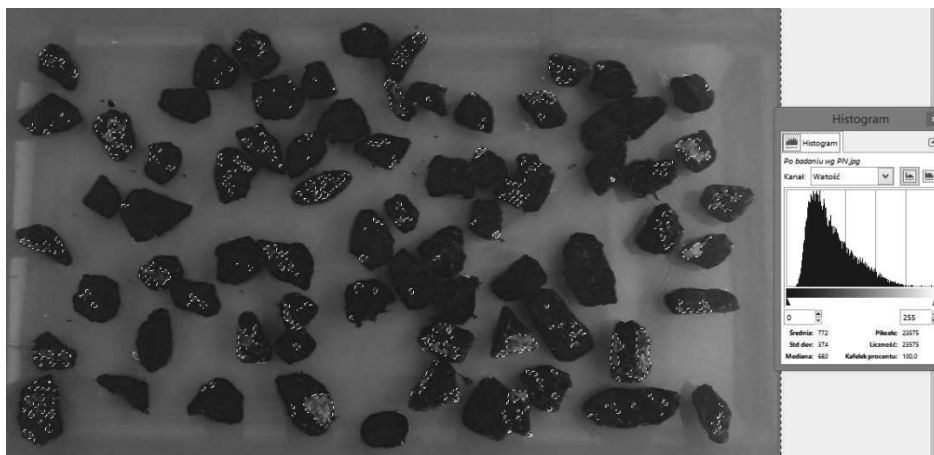
Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa wapiennego niepokrytego lepiszczem asfaltowym: 50255.

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa wapiennego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 96305 Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{50255}{50255 + 96305} \cdot 100\% = 34,3\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{96305}{50255 + 96305} \cdot 100\% = 65,7\%$$



Rys. 10. Zrzut ekranu z programu komputerowego GIMP przedstawiający zaznaczone za pomocą narzędzia „Różdżka” obszary ziaren kruszywa granitowego pokryte lepiszczem asfaltowym

d) kruszywo bazaltowe

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa bazaltowego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 747471.

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla całości ziaren kruszywa bazaltowego: 1659446.

Liczba pikseli stanowiących część niepokrytą lepiszczem asfaltowym dla ziaren kruszywa bazaltowego: (Liczba pikseli dla całości ziaren minus liczba pikseli dla ziaren pokrytych lepiszczem asfaltowym)

$$1659446 - 747471 = 911975$$

Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{911975}{1659446} \cdot 100\% = 55\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{747471}{1659446} \cdot 100\% = 45\%$$

e) kruszywo z bazaltu utlenionego

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla ziaren kruszywa z bazaltu utlenionego pokrytego lepiszczem asfaltowym: 1499735.

Liczba pikseli zaznaczonych przez narzędzie „Różdżka” dla całości ziaren kruszywa z bazaltu utlenionego: 2306919.

Liczba pikseli stanowiących część niepokrytą lepiszczem asfaltowym dla ziaren kruszywa z bazaltu utlenionego: (Liczba pikseli dla całości ziaren minus liczba pikseli dla ziaren pokrytych lepiszczem asfaltowym).

$$2306919 - 1499735 = 807184$$

Procentowy udział ziaren kruszywa niepokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{807184}{2306919} \cdot 100\% = 35\%$$

Procentowy udział ziaren kruszywa pokrytego lepiszczem asfaltowym w próbce:

$$\frac{1499735}{2306919} \cdot 100\% = 65\%$$

4.6. Wyniki badań wraz z ich analizą

4.6.1. Wizualna ocena stopnia pokrycia ziaren kruszywa asfaltem

Zgodnie z metodą zaprezentowaną w normie stopień pokrycia ziaren asfaltem powinien być określony wzrokowo w sposób niezależny przez 2 różnych obserwatorów. Zespół badawczy również dokonał takiej oceny dla każdego z badanych kruszyw przez troje obserwatorów. Ocenę stopnia pokrycia ziaren asfaltem dla badania wg Polskiej Normy wykonano tylko na jednym rodzaju kruszywa, którym było kruszywo granitowe. Wyniki oceny wizualnej zestawiono w tablicach 2 i 3 – odpowiednio dla próbek badanych według norm PN-84/B-06714/22 oraz PN-EN 12697-11:2012.

Tab. 2. Wyniki oceny wizualnej stopnia pokrycia ziaren kruszywa granitowego wg normy PN-84/B-06714/22

Obserwator	Udział ziaren kruszywa granitowego pokrytego lepiszczem asfaltowym [%]
Obserwator nr 1	80
Obserwator nr 2	80
Obserwator nr 3	75
Średnia arytmetyczna	78

Tab. 3. Wyniki oceny stopnia pokrycia ziaren kruszywa wg PN-EN 12697-11:2012

Obserwator	Udział ziaren kruszywa mineralnego pokrytego lepiszczem asfaltowym [%]			
	Wapienne	Granitowe	Bazaltowe	Z bazaltu utlenionego
Obserwator nr 1	75	20	55	85
Obserwator nr 2	65	30	65	85
Obserwator nr 3	70	25	50	80
Średnia	70	25	57	83

4.6.2. Porównanie wyników badań stopnia pokrycia ziaren kruszywa asfaltem uzyskanych metodą fotogrametryczną oraz na podstawie oceny wizualnej

W tablicach 4 i 5 zestawiono wyniki wizualnej oceny stopnia pokrycia ziaren kruszywa asfaltem oraz wyniki uzyskane metodą fotogrametryczną, odpowiednio na próbkach badanych według norm: PN-84/B-06714/22 oraz PN-EN 12697-11:2012.

Tab. 4. Zestawienie wyników oceny wizualnej pokrycia asfaltem kruszywa granitowego po badaniu wg PN-84/B-06714/22 wraz z wynikami uzyskanymi metodą fotogrametryczną z wykorzystaniem programu GIMP

Badanie normowe	Stopień pokrycia ziaren kruszywa lepiszczem asfaltowym [%] po badaniu wg normy PN-84/B-06714/22					
	Obserwator nr 1	Obserwator nr 2	Obserwator nr 3	Średnia	Program GIMP	Różnica
Ocena pokrycia asfaltem						
Granit	80	80	75	78	86,9	8,9

Po obliczeniu średnich wartości uzyskanych na podstawie oceny wizualnej dokonanej przez troje obserwatorów, po badaniach wg normy PN-84/B-06714/22 oraz normy PN-EN 12697-11:2012, obliczono różnicę pomiędzy wartością średnią a wynikiem uzyskanym metodą fotogrametryczną – z wykorzystaniem programu GIMP. Różnica po badaniu wg normy PN-84/B-06714/22 wynosi 8,9% dla kruszywa granitowego. Po badaniu wg normy PN-EN 12697-11:2012 w przypadku kruszywa granitowego różnica wynosi 8,7%, natomiast w przypadku kruszywa wapiennego 4,3%, kruszywa bazaltowego 12%, a bazaltu utlenionego 20%.

Tab. 5. Zestawienie wyników oceny wizualnej pokrycia asfaltem kruszyw po badaniu wg PN-EN 12697-11:2012 z wynikami uzyskanymi metodą fotogrametryczną z wykorzystaniem programu GIMP

Badanie normowe	Stopień pokrycia ziaren kruszywa lepiszczem asfaltowym [%] po badaniu wg normy PN-EN 12697-11:2012					
	Obserwator nr 1	Obserwator nr 2	Obserwator nr 3	Średnia	Program GIMP	Różnica
Granit	20	30	25	25	16,3	8,7
Wapień	75	65	70	70	65,7	4,3
Bazalt	55	65	50	57	45	12
Bazalt utleniony	85	85	80	83	65	20

5. WNIOSKI

Po dokonaniu analizy porównawczej wyników wizualnej oceny stopnia pokrycia ziaren kruszyw przebadanych wg norm PN-84/B-06714/22 i PN-EN 12697-11:2012 oraz oceny stopnia pokrycia ziaren z wykorzystaniem opracowanej metody fotogrametrycznej stwierdzono, że dzięki zaproponowanej metodzie uzyskano dokładniejsze wyniki niż poprzez ocenę wizualną. Na podstawie wykonanych prób z wykorzystaniem mieszanek o znanych proporcjach ziaren pokrytych i niepokrytych lepiszczem asfaltowym, stwierdzono, że metoda ta pozwala uzyskać wiarygodne wyniki. Po zastosowaniu zaproponowanej metody obliczono, że błąd oceny wizualnej wynosił nawet 20%, porównując wyniki otrzymane przez Obserwatora nr 2 z wynikami otrzymanymi metodą fotogrametryczną. Dotyczyły one kruszywa bazaltowego i kruszywa z bazaltu utlenionego, w przypadku których ciemna barwa utrudnia odróżnienie części kruszywa pokrytej lepiszczem asfaltowym od części niepokrytej.

Jako kierunek dalszych badań, autorzy proponują doskonalenie zastosowanej metody fotogrametrycznej poprzez minimalizowanie powstających na zdjęciach odbłasków oraz rozwiązanie problemu dotyczącego pokrycia lepiszczem asfaltowym ciemnych kruszyw, jakim jest np. kruszywo bazaltowe, powszechnie stosowane do budowy nawierzchni drogowych w Polsce.

LITERATURA

- [2] Trzaska E.: *Adhezja asfaltu do kruszywa*, Miesięcznik Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego Nafta-Gaz nr 6/2011, s. 423–42.
- [3] Gawęł I., Kalabińska M., Piłat J.: *Asfalty drogowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [4] Błażejowski K., Styk S.: *Technologia warstw asfaltowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.

- [5] PN-EN 12607-1:2014-12 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczenie odporności na starzenie pod wpływem ciepła i powietrza - Część 1: Metoda RTFOT.
- [6] PN-EN 12697-11:2012 Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco. Część 11: Oznaczenie powinowactwa pomiędzy kruszywem i asfaltem.
- [7] PN-84/B-06714/22. Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenie przyczepności bitumów.

ASSESSMENT OF BITUMEN ADHESION TO MINERAL AGGREGATES USING A PHOTOGRAMMETRIC METHOD

Summary

The assessment of the degree of coverage of aggregates with an asphalt binder is performed visually by two independent observers in accordance with the procedures described in standards PN-84/B-06714/22 and PN-EN 12697-11: 2012. However, this is not a method that would allow for precise evaluation of the studied phenomenon. The research team undertook the development of a research methodology based on a photogrammetric method that allows for determining the adhesion of asphalt to mineral aggregates without the need to use a visual assessment burdened with the subjective impressions of the observer. The scope of the work included the construction of a test stand for making photographic images of samples of aggregate covered with bitumen, preparation of aggregate samples with a known degree of asphalt binder covering and assessment of the asphalt binder covering aggregate grains using the GIMP program, thanks to which it was possible to verify this method. Next, the adhesion of asphalt binder to mineral aggregates was evaluated using the methods described in the standards: Polish PN-84/B-06714/22 (Polish) and PN-EN 12697-11: 2012 (European), which was a practical application of the method described in the paper. It was shown that the photogrammetric method allows to more accurately determine the degree of mineral aggregate coverage with asphalt binder than the visual assessment applied so far.

Dane autorów:

mgr inż. Weronika Pawłowska

dr hab. inż. Mieczysław Słowik prof. PP
e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl
telefon: 61 665 2478

inż. Adrian Nowak

inż. Adam Krzemień

mgr Artur Wilmański
e-mail: awilmanski@gddkia.gov.pl