

dr Wiktor Jasiński<sup>1\*)</sup>

ORCID: 00001-0001-6612-4207

dr inż. Maciej Maliszewski<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-0355-3319

mgr inż. Aneta Pryga-Szulc<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-4233-3017

dr Wojciech Bartz<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-7267-2776

dr inż. Patryk Przybylski<sup>3)</sup>

ORCID: 0000-0002-7414-7537

# Root cause analysis of the occurrence of rust spots on the surface of the asphalt wearing course

## *Analiza przyczyn występowania rdzawych plam na powierzchni asfaltowej warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej*

DOI: 10.15199/33.2024.07.07

**Abstract.** The article presents a case of discoloration on an asphalt road surface, characterized by distinctive rusty spots on its surface. Methodical petrographic studies of aggregate samples taken from the damaged pavement were discussed, aimed at identifying the causes of the rusty spots. The research results indicated that the probable cause of these stains was the presence of ore minerals containing iron compounds. Although similar phenomena cannot be completely avoided, ongoing detailed verification of manufactured aggregates would prevent such processes. It is necessary to carefully select aggregates and control their mineral composition to minimize the presence of iron compounds.

**Keywords:** asphalt pavement surface decoloration; rusty spots; petrographic analysis; aggregates, iron compounds; surface aesthetics; road infrastructure quality; mineral composition.

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono przypadek przebarwień asfaltowej nawierzchni drogowej, objawiających się charakterystycznymi rdzawymi plamami na jej powierzchni. Omówiono metodyczne badania petrograficzne próbek kruszyw pobranych z uszkodzonej nawierzchni, które miały na celu identyfikację przyczyn powstawania rdzawych plam. Wyniki badań wykazały, że prawdopodobną przyczyną tych plam była obecność minerałów nieprzezroczystych (rudnych) zawierających związki żelaza. Pomimo że nie da się całkowicie uniknąć podobnych zjawisk, bieżąca szczegółowa weryfikacja produkowanego kruszywa pozwoliłaby na zapobieganie takim zjawiskom. Konieczne jest staranne jego dobieranie oraz kontrola składu mineralnego, aby zminimalizować obecność związków żelaza.

**Słowa kluczowe:** przebarwienia nawierzchni asfaltowej; rdzawe plamy; badania petrograficzne kruszywa; związki żelaza; estetyka nawierzchni; jakość infrastruktury drogowej; skład mineralny.

Every type of pavement, regardless of its load category, is designed with a specified lifespan and a structural durability of 20 to 30 years [1]. Premature damage to road surfaces may result from, e.g., the construction not being suited to the load conditions from overloaded vehicles [2], or design errors which may affect the implementation of construction projects [3] and the pavement quality [4]. Construction errors are often caused by a failure to adhere to technological regimes, material defects, or poor workmanship. Inadequate recognition of soil and water conditions, resulting in improperly prepared subgrade, is also a significant problem during the exploitation of newly constructed pavements. These failures result in premature damage to asphalt pavements. Most often they are manifested as linear cracks, potholes, grain and bonding agent deficit [5, 6]. Less frequently they lead to discoloration of the asphalt pavement, potentially reducing aggregate durability causing damage. However, most often they worsen the aesthetic and visual assessment of road infrastructure.

Każdy rodzaj nawierzchni, bez względu na kategorię obciążenia ruchem, odznacza się projektowanym cyklem życia i określoną trwałością konstrukcji ustaloną na 20 lub 30 lat [1]. Powody przedwczesnego uszkodzenia nawierzchni drogowych, to m.in. niedostosowanie konstrukcji do warunków obciążenia od pojazdów przeciążonych [2], bądź błędy projektowe, które mogą wpływać na realizację inwestycji budowlanych [3] i jakość nawierzchni [4]. Błędy wykonawcze spowodowane są najczęściej niedochowaniem reżimów technologicznych, wadami materiałowymi lub złą jakością robót. Nieprawidłowo przygotowane podłoże, na skutek niewłaściwego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych, stanowi również istotny problem podczas eksploatacji nowo wykonanych nawierzchni. Nieprawidłowości te skutkują przedwczesnymi uszkodzeniami nawierzchni asfaltowych. Najczęściej są to pęknięcia liniowe, wyboje, ubytki ziaren i lepiszcza [5, 6]. Nieco rzadziej występują przebarwienia nawierzchni asfaltowej, które mogą prowadzić do pogorszenia jej trwałości i uszkodzenia ziaren kruszywa. Najczęściej jednak pogarszają estetykę i ocenę wizualną infrastruktury drogowej.

<sup>1)</sup> Instytut Badawczy Dróg i Mostów

<sup>2)</sup> Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych

<sup>3)</sup> Uczelnia Techniczno-Handlowa im. H. Chodkowskiej

\* Correspondence address: wjasinski@ibdim.edu.pl

## Objective and research program

The anomalies described in this article involved the occurrence of rusty spots on the surface of the wearing layer. This phenomenon has been presented in the literature as caused by the presence of iron compounds known as pyrites in the aggregate structure and the resulting reactions [7]. According to the authors, the oxidation of pyrite releases Fe(II) and sulfate ions into the solution. It requires seven electrons from each sulfur atom to be transferred into the mineral. This process is complex due to the possibility of transferring only one or a maximum of two electrons simultaneously. Furthermore, pyrite, being a semiconductor, facilitates electron transfer from sulfur atoms to cathodic sites of Fe(II), where they are retrieved by oxidizers. The occurrence of rusty spots on the surface of the wearing course made with amphibolite aggregate has been covered by other authors [8]. The mechanism of discolouration in this case was associated with the weathering of iron sulfides present in the aggregate and the leaching of iron from highly transformed amphiboles and biotite. This iron precipitated on the asphalt pavement in the form of sulfates and hydroxides.

The occurrence of rusty spots (Photos 1 and 2) on the surface of the mineral-asphalt mixture mainly composed of coarse gabbro aggregate has been researched. The phenomenon was observed during a visual inspection of the road section after approximately three years of road exploitation. The discolouration occurred on the asphalt pavement of emergency lanes, but they were not found on the main road which was constructed using cement concrete technology. For research purposes, samples of the discoloured aggregate grains were taken from the surface, and bores were drilled using a diamond crown.

The research program was designed to determine the cause of discolouration and to establish whether the colour changes were caused by chemical reactions occurring in the aggregate or, e.g., by surface contamination with a foreign substance.

**Field Research.** During the site inspection, the frequency of rusty spots occurrence was determined by counting their average number per 1 m<sup>2</sup> in five locations. It was found to be 5 – 40 pcs/m<sup>2</sup>. Some rusty spots were accompanied by occasional cracking or chipping of the aggregate grain, but this did not exceed 1 pc/m<sup>2</sup>. Therefore, it was concluded that this phenomenon had a greater impact on the aesthetic deterioration of the surface rather than its durability.

**Laboratory Tests.** Three grains of discoloured aggregate extracted from the surface were subjected to laboratory tests, which included:

- a petrographic description according to the PN-EN 932-3:2022-12 standard using thin sections under transmitted light;

## Cel i program badań

Opisane w artykule nieprawidłowości polegały na występowaniu rdzawych plam na powierzchni warstwy ścieralnej. Zjawisko to wcześniej prezentowane w literaturze było spowodowane występowaniem związków żelaza zwanych pirytami w strukturze kruszywa oraz zachodzącej na skutek tego reakcji [7]. Zdaniem autorów oksydacja pirytu uwalnia jony Fe(II) i siarczanowe do roztworu. Wymagany jest transfer siedmiu elektronów z każdego atomu siarki w minerał. Proces ten jest złożony ze względu na możliwość przeniesienia jedynie jednego lub maksymalnie dwóch elektronów jednocześnie. Ponadto piryt, będący półprzewodnikiem, umożliwia transfer elektronów z atomów siarki do miejsc katodowych Fe(II), gdzie są pobierane przez utleniacze. Inni autorzy opisywali i charakteryzowali występowanie rdzewienia na powierzchni warstwy ścieralnej wykonanej z kruszywem amfibolitowym [8]. Mechanizm powstawania przebarwień w tym wypadku związany był z wietrzeniem występujących w nim siarczków żelaza oraz z ługowaniem żelaza z silnie przeobrażonych amfiboli i biotyty. Żelazo to wytrącało się na nawierzchni asfaltowej w formie siarczanów oraz wodorotlenków.

Badano przyczyny wystąpienia rdzawych plam (fotografie 1 i 2) na nawierzchni z mieszanki mineralno-asfaltowej składającej się przede wszystkim z kruszywa grubego gabbro. Zjawisko zostało zaobserwowane podczas wizualnego przeglądu pasa drogowego po ok. trzech latach eksploatacji drogi. Przebarwienia występowały na nawierzchni asfaltowej przejazdów awaryjnych, natomiast nie stwierdzono ich na jezdni głównej, która była wykonana w technologii betonu cementowego. Do badań pobrano z nawierzchni próbki zmienionych kolorystycznie ziaren kruszywa oraz wykonano w niej odwierty przy użyciu koronki diamentowej.

Program badań dobrano w celu określenia przyczyny występowania przebarwień oraz odpowiedzi na pytanie, czy zmiany kolorystyczne były wywołane reakcjami chemicznymi zachodzącymi w kruszywie czy np. następstwem zanieczyszczenia nawierzchni substancją obcą.

**Badania terenowe.** Podczas wizji lokalnej określono częstotliwość występowania rdzawych plam przez zliczenie ich średniej liczby na 1 m<sup>2</sup> powierzchni w pięciu lokalizacjach. Stwierdzono 5 – 40 szt./m<sup>2</sup>. Niektórym rdzawym plamom towarzyszyło sporadyczne pęknięcie lub wykruszenie ziarna kruszywa, ale nie przekraczało to 1 szt./m<sup>2</sup>. Uznano zatem, że zjawisko to bardziej wpływało na pogorszenie estetyki nawierzchni niż na jej trwałość.

**Badania laboratoryjne.** Poddano im 3 ziarna przebarwionego kruszywa wydzielonego z nawierzchni i zaplanowano:

- opis petrograficzny wg normy PN-EN 932-3:2022-12 [9] na szlifach cienkich do światła przechodzącego;



Photo 1. The asphalt pavement damages  
Fot. 1. Uszkodzenia nawierzchni



Photo 2. Rust spot on the asphalt pavement  
Fot. 2. Rdzawe plamy w nawierzchni

- X-ray fluorescence (XRF) analysis;
- scanning electron microscopy (SEM-EDS) analysis.

A microscopic analysis was conducted using a polarizing microscope on thin sections under transmitted light. Microscopic analysis is a fundamental petrographic test used for the identification of minerals and rocks.

XRF analysis was used to determine the elemental composition of the tested samples both qualitatively and quantitatively. Thin sections under transmitted light and SEM-EDS tests were conducted at the Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, at an accelerating voltage of 15 kV, in low vacuum mode (30 – 35 Pa). The objective was to assess the internal structure, the extent of the phenomenon, changes, and processes occurring in the tested samples. This method involves qualitative, quantitative, and spatial analysis of the occurring process.

The research was performed on the surface of the aggregate grain as well as on the fracture surface of the aggregate grain. This allowed for the possible exclusion of the influence of the mineral-asphalt mixture production technology. The research plan for the collected samples is presented in Table 1.

**Table 1. Testing programme of the samples**

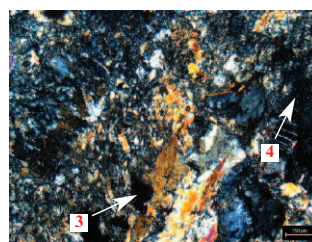
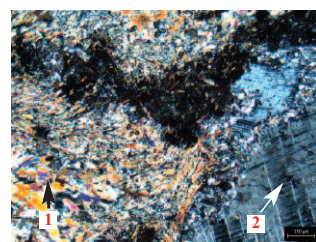
*Tabela 1. Plan badań pobranych próbek*

Sample number/ Nr próbki	Petrographic description on thin section/ Opis petrograficzny na szlifie cieniaku	XRF	SEM-EDS	
			grain surface/ powierzchnia ziarna	grain fracture/ przełam ziarna
1	■	■	□	□
2	■	■	■	■
3	■	■	■	■

## Test results

**Microscopic Analysis on Thin Sections under Transmitted Light.** Microscopic analysis of the aggregate grains under transmitted light revealed the presence of major minerals (sodium-calcium feldspars, pyroxenes, amphiboles) constituting the rock, which were heavily cracked and subjected to undergoing transformation processes. In aggregate samples No. 2 and 3, a significant amount of opaque (ore) minerals was found, occurring between rock-forming minerals and as inclusions within these minerals (Photo 3). Under the microscope (without an analyser) rust-orange and rust-brown cryptocrystalline forms were observed within some opaque minerals, mostly occurring in cracks and at the grain boundaries. These are likely transformation products containing iron compounds.

**X-Ray Fluorescence (XRF) Analysis.** Chemical composition analysis using X-ray fluorescence (XRF) revealed a higher content of iron (Fe) and magnesium (Mg) oxides in aggregate samples No. 2 and 3 compared to sample No. 1 (Table 2), which could be related to the higher con-



**Photo 3. Microscopic image of samples 1 and 2 on thin sections for transmitted light: 1 – multi-coloured crystals of pyroxenes and amphiboles while undergoing transformation processes; 2 – sodium-calcium feldspar (plagioclase) with polysynthetic twinning; 3 – multi-coloured crystals of pyroxenes and amphiboles while undergoing advanced transformation processes; 4 – opaque (ore) minerals**

*Fot. 3. Mikroskopowe obrazy próbek nr 1 i 2 na szlifach cienkich do światła przechodzącego; 1 – wielobarwne kryształy piroksenów i amfiboli z zachodzącymi procesami przemian; 2 – skałen sodowo-wapniowy (plagioklaz) ze zbliźniczeniem polisynetycznym; 3 – wielobarwne kryształy piroksenów i amfiboli z zaawansowanymi procesami przemian; 4 – minerały nieprzezroczyste (rudne)*

- analizę metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF);
- badania metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM-EDS).

Analizę mikroskopową przeprowadzono przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego na szlifach cienkich do światła przechodzącego. Analiza mikroskopowa jest podstawowym badaniem petrograficznym służącym do identyfikacji minerałów i skał.

Badania XRF metodą fluorescencji rentgenowskiej posłużyły do określenia składu pierwiastkowego badanych próbek pod względem jakości i ilości. Szlify do światła przechodzącego oraz badania metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM-EDS) wykonane zostały w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego przy napięciu przyspieszającym 15 kV, w trybie niskiej próżni (30 – 35 Pa). Badania wykonano w celu oceny budowy wewnętrznej, zasięgu występowania zjawiska, zmian i procesów przemian zachodzących w badanych próbkach.

Metoda polega na jakościowej, ilościowej oraz przestrzennej analizie zachodzącego procesu.

Badania wykonywano w wariacie na powierzchni ziarna kruszywa oraz na powierzchni przełamu ziarna kruszywa. Pozwoliło to na ewentualne wykluczenie wpływu technologii produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej. Plan badań pobranych próbek przedstawia tabela 1.

## Wyniki badań

**Analiza mikroskopowa na szlifach cienkich do światła przechodzącego.** Analiza mikroskopowa ziaren kruszywa w świetle przechodzącym wykazała obecność minerałów głównych (skaleni sodowo-wapniowych, piroksenów, amfiboli) budujących skałę, mocno spękanych, ulegających procesom przeobrażenia. W próbkach kruszywa nr 2 i 3 stwierdzono znaczną ilość minerałów nieprzezroczystych (rudnych), występujących między minerałami skałotwórczymi oraz jako wrostki w tych minerałach (fotografia 3). W obrazie mikroskopowym bez analizatora stwierdzono w obrębie niektórych minerałów nieprzezroczystych obecność rdzawopomarańczowych i rdzawobrunatnych skrytokrystalicznych form, które występują przeważnie w spękaniach oraz na granicy ziaren. Prawdopodobnie są to produkty przemian zawierające związki Fe.

**Analiza metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF).** Oznaczenie składu chemicznego metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF) wykazało większą zawartość tlenków Fe i Mg w próbkach kruszywa nr 2 i 3 w porównaniu z próbką nr 1 (tabela 2), co może być związane z większą zawartością mine-



tent of opaque (ore) minerals and transformation processes occurring in the minerals present in the tested samples.

**Scanning Electron Microscopy (SEM-EDS)**

**Analysis.** This article presents the results of SEM-EDS analysis for aggregate samples No. 2 and 3 due to the transformation processes of minerals observed during microscopic and XRF tests and the higher content of opaque (ore) minerals.

The aggregate grain of samples No. 2 and 3 was divided into two parts to obtain a fresh fracture. SEM-EDS observations concerned the surface of the grains and the fresh fracture.

**Examination of the surface of aggregate sample No. 2.** Many small grains or aggregates, ranging in size from a few to a maximum of 50 μm, were present on the surface of the sample. They formed a porous layer composed mainly of sharp-edged mineral grains which included silicates and aluminosilicates. The distribution of elements indicated that most of them were light minerals, likely quartz, alkali feldspar, and plagioclase. Some mineral phases were likely clusters of clay minerals. Dark minerals, likely representing pyroxenes and/or amphiboles, were less frequent. Point analyses revealed significant amounts of iron on the EDS spectra, with a strong iron band visible on practically every spectrum, alongside bands of other elements that make up the mentioned aluminosilicate and silicate phases. Area analysis revealed the presence of iron relatively evenly distributed on the surface of the sample. Observations of the sample surface at high magnifications documented the presence of encrustations and coatings binding a significant portion of the mineral particles and aggregates. Within the encrustations, point analyses spectra revealed varying relative intensities of iron and oxygen bands as dominant elements, with collateral presence of carbon and sulfur. Other elements, such as silicon and aluminium, were characterized by weak intensities on the EDS spectra (Photo 4).

The observed macroscopic rusty spots on the surface of the test sample and the varying proportions of oxygen and iron might indicate that the encrustations were likely composed of iron (Fe) hydroxides (goethite, limonite), and the presence of sulfur suggested that some of the iron was in the form of sulfides. Additionally,

**Table 2. Determination of the chemical composition of aggregate samples**

*Tabela 2. Oznaczenie składu chemicznego próbek kruszyw*

Label/ Ozna- czenie	Sample No./percentage [%]/ Nr próbki/udział [%]		
	1	2	3
LOI	1,13	8,19	8,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,66	7,03	5,69
CaO	12,70	14,39	14,66
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,050	0,050	0,039
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,02	10,49	7,85
K <sub>2</sub> O	0,29	0,19	0,19
MgO	4,23	11,43	14,02
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,114	0,157	0,184
Na <sub>2</sub> O	2,270	1,027	0,828
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,005	0,008	0,005
SO <sub>3</sub>	<0,02	1,420	0,784
SiO <sub>2</sub>	52,10	45,26	46,89
SrO	0,014	0,004	0,001
TiO <sub>2</sub>	0,326	0,348	0,390
ZnO	<0,002	<0,002	<0,002

rałów nieprzezroczystych (rudnych) oraz procesami przemian zachodzącymi w minerałach zawartych w badanych próbkach.

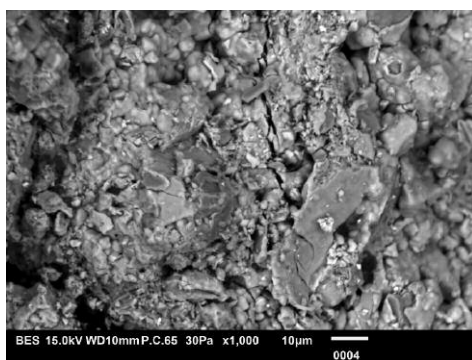
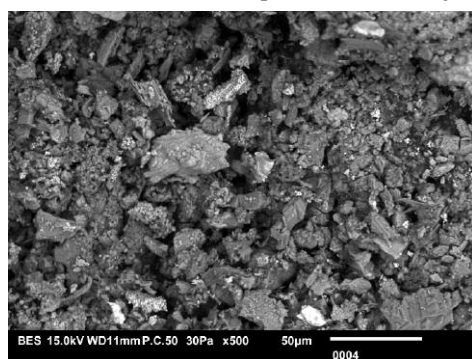
**Badania metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM-EDS).** W artykule zaprezentowano wyniki badań próbek kruszywa nr 2 i 3 ze względu na zaobserwowane podczas badań mikroskopowych oraz XRF procesy przemian minerałów oraz większą zawartość minerałów nieprzezroczystych (rudnych). Ziarno kruszywa próbki nr 2 i 3 podzielono na dwie części, tak aby uzyskać świeży przełam. Obserwacje SEM-EDS dotyczyły powierzchni ziaren oraz świeżego przełamu.

**Badania powierzchni próbki kruszywa nr 2.**

Na powierzchni próbki występowało dużo niewielkich ziaren bądź agregatów, których wielkość wahała się od kilku do maksymalnie 50 μm. Tworzyły one porowatą warstwę składającą się głównie z ostrokrawędzistych ziaren mineralnych, w skład których wchodziły krzemiany i glinokrzemiany. Rozmieszczenie pierwiastków wskazywało, że większość z nich stanowiły minerały jasne, prawdopodobnie kwarc, skałenie alkaliczne i plagioklasy. Część faz mineralnych była prawdopodobnie skupiskami minerałów ilastych. Rzadziej występowały minerały ciemne, prawdopodobnie reprezentujące pirokseny i/lub amfibole. Analizy punktowe wykazały na widmach EDS znaczne ilości żelaza, którego silne pasmo widoczne jest praktycznie na każdym widmie, obok

pasem innych pierwiastków budujących wymienione fazy glinokrzemianowe i krzemianowe. Analiza w obszarze wykazała obecność żelaza, które było relatywnie równomiernie rozmieszczone na powierzchni próbki. Obserwacje powierzchni próbki przy dużych powiększeniach dokumentowały obecność naskorupień oraz pól, spajających znaczną część drobin mineralnych i agregatów. W obrębie naskorupień widma analiz punktowych wykazywały zmienną względną intensywność pasm żelaza, tlenu jako dominujących pierwiastków, przy podrzędnej obecności węgla i siarki. Inne pierwiastki, takie jak krzem, glin, charakteryzowały się na widmach EDS słabą intensywnością (fotografia 4).

Obserwowane makroskopowo rdzawe zabarwienie występujące na powierzchni próbki badawczej oraz zmienna proporcja tlenu i żelaza mogły wskazywać, że naskorupienia przypuszczalnie składały się z wodorotlenków Fe (goethyt, limonit), a obecność siarki, że część żelaza związana była w



**Photo 4. Image of sample No 2 surface in BSE backscattered electrons**

*Fot. 4. Obraz w elektronach wstecznie rozproszonych BSE powierzchni próbki nr 2*

it cannot be excluded that the presence of iron with carbon might have resulted from an unidentified substance.

**Fracture Analysis of Aggregate Sample No. 2** showed a different character. In backscattered electrons, the crystals forming the aggregate grain were clearly visible, manifesting fissility and representing amphiboles and sodium-calcium feldspars. Unlike the point surface analyses, EDS spectra from the fracture exhibited relatively strong intensity bands from silicon, magnesium, calcium, aluminium, and oxygen, and weak intensity bands from iron, which likely entirely entered the structure of the rock-forming minerals of the aggregate grain (Photo 5).

**Surface Analysis of Aggregate Sample No. 3** showed irregularly cracked encrustations. This was a relatively compact mass with an uneven surface, containing small particles up to a few micrometres in size, creating characteristic irregularities. These particles were silicates and aluminosilicates, primarily represented by atoms of quartz, feldspar, and possibly aggregates of clay minerals. The surface was surrounded by a compact mass (like sample No. 2) consisting mainly of iron, oxygen, and sulfur forming a mixture of iron hydroxides, possibly sulfides, and minor amounts of silicon, aluminium, and other elements constituting the silicate and aluminosilicate grains (Photo 6).

The presence of sulfur might indicate that some of the iron was in the form of sulfides, which was also suggested by the presence of a small amount of copper. The presence of sulfur with carbon might also be related to unidentified substances, just like what was observed in sample No. 2.

**Fracture Analysis of Aggregate Sample No. 3**, like sample No. 2, revealed the internal structure of the aggregate grain, built from clearly visible crystals of amphibole and sodium-calcium feldspars. Additionally, unlike sample No. 2, the analysed fracture showed locally occurring accumulations of ore minerals, consisting of iron and sulfur, sometimes accompanied by minor amounts of copper. These could likely be iron sulfides (e.g., pyrite) and copper-iron sulfides, such as chalcopyrite (Photo 7).

postaci siarczków. Nie można również wykluczyć, że obecność żelaza z węglem wynikała z niezidentyfikowanej substancji.

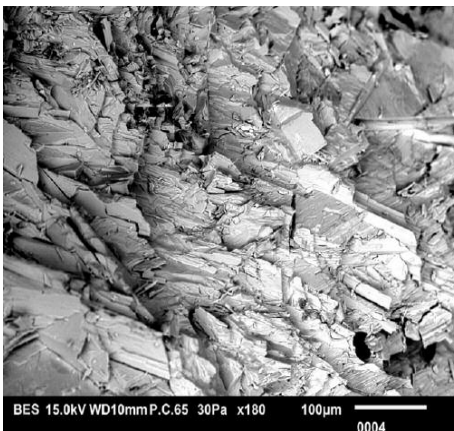
**Przełam próbki kruszywa nr 2** miał charakter odmienny. W elektronach wstecznie rozproszonych doskonale widoczne były kryształy budujące ziarno kruszywa, ukazujące łupliwość i re-

prezentujące amfibole i skalenie sodowo-wapniowe. W odróżnieniu od analiz punktowych powierzchni próbki, widma EDS z przełamu charakteryzowały się relatywnie silną intensywnością pasm od krzemu, magnezu, wapnia, glinu i tlenu, a małą intensywnością pasma pochodzącego od żelaza, które prawdopodobnie w całości wchodziło w strukturę minerałów skałotwórczych ziarna kruszywa (fotografia 5).

**Na powierzchni próbki kruszywa nr 3** widoczne były nieregularnie spękane naszkorupienia. Była to relatywnie zwarta masa, o nierównej powierzchni, w obrębie której znajdowały się niewielkie drobiny o rozmiarach do kilku mikrometrów, tworzące charakterystyczne nierówności. Te ostatnie to ziarna krzemianów i glinokrzemianów, w większości reprezentowane przez drobiny kwarcu, skałeni oraz prawdopodobnie agregaty minerałów ilastych. Powierzchnię otaczała zwarta masa (podobnie jak w przypadku próbki nr 2), składająca się głównie z żelaza, tlenu i siarki, tworzących mieszaninę tlenowodorotlenków żelaza, być może również siarczków oraz podrzędnych ilości krzemu, glinu i innych pierwiastków budujących ziarna krzemianów i glinokrzemianów (fotografia 6).

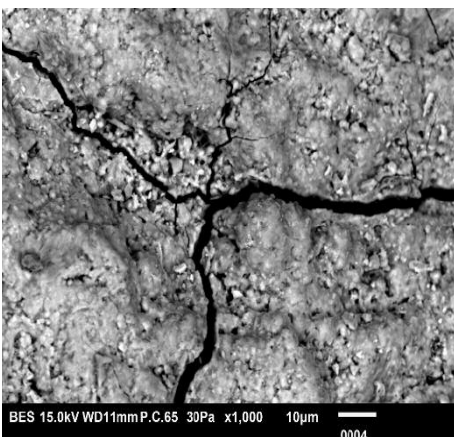
Obecność siarki mogła wskazywać na to, że część żelaza związana była w postaci siarczków, na co wskazywała także obecność niewielkiej ilości miedzi. Obecność siarki z węglem mogła być również powiązana z niezidentyfikowanymi substancjami – podobnie jak miało to miejsce w przypadku próbki kruszywa nr 2.

**Przełam próbki kruszywa nr 3**, podobnie jak w przypadku próbki nr 2, ukazywał strukturę wewnętrzną ziarna kruszywa, które zbudowane było z doskonale widocznych kryształów amfibolu i skałeni. Poza nimi, w odróżnieniu od próbki nr 2, na analizowanym przełamie widoczne były lokalnie występujące nagromadzenia minerałów rudnych, zbudowane z żelaza i siarki, którym niekiedy towarzyszyła podrzędna ilość miedzi. Prawdopodobnie mogły to być siarczki Fe (np. piryt) oraz siarczki Cu-Fe, np. chalkopiryt (fotografia 7).



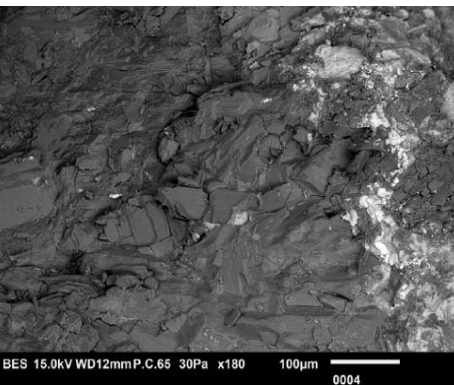
**Photo 5. Image of sample No 2 fracture in BSE backscattered electrons**

*Fot. 5. Obraz w elektronach wstecznie rozproszonych BSE przełamu próbki nr 2*



**Photo 6. Image of sample No 3 surface in BSE backscattered electrons**

*Fot. 6. Obraz w elektronach wstecznie rozproszonych BSE powierzchni próbki nr 3*



**Photo 7. Image of sample No 3 fracture in BSE backscattered electrons**

*Fot. 7. Obraz w elektronach wstecznie rozproszonych BSE przełamu próbki nr 3*



## Summary

Microscopic analysis revealed the presence of major minerals forming the rock (sodium-calcium feldspars, pyroxenes, amphiboles), which were heavily cracked and partially altered, undergoing transformation processes. Rust-orange and rust-brown cryptocrystalline forms were found, predominantly in cracks and at grain boundaries. They were likely transformation products containing iron compounds. X-ray fluorescence (XRF) analysis confirmed the highest content of iron and magnesium oxides in aggregate samples No. 2 and 3. SEM-EDS tests showed variable relative intensities of iron and oxygen bands as dominant elements, with minor presence of carbon and sulfur. Other elements, such as silicon and aluminium, demonstrated weak intensity on the EDS spectra.

The observed macroscopic rust discolouration present on the surface of aggregate samples collected from the road surface and the variable oxygen and iron ratio suggested that the encrustations consisted of iron hydroxides (e.g., goethite, limonite), while the presence of sulfur indicated that some iron was in the form of sulfides, sometimes accompanied by minor amounts of copper. These could likely be iron sulfides (e.g., pyrite) and copper-iron sulfides (e.g., chalcopyrite). It is also possible that the presence of iron with carbon was due to unidentified substances.

During the conducted research, **no direct evidence was found that the rusty spots present on the surface were caused by contamination with a foreign substance. Therefore, it is likely that the main cause of the discolouration was chemical reactions of the minerals contained in the aggregate.** The rusty spots on the pavement deteriorate its aesthetics, which may have negative consequences in terms of users' perception of road infrastructure quality. To prevent such phenomena, detailed verification of the aggregate, careful selection of raw materials, and control of their mineral composition are necessary, e.g., by microscopic analysis of the aggregate on thin sections, which would help avoid the issue of spots on the asphalt pavement.

Received: 09.05.2024  
Revised: 19.06.2024

## Podsumowanie

Analiza mikroskopowa wykazała obecność minerałów głównych budujących skałę (skaleni sodowo-wapniowych, piroksenów, amfiboli), mocno spękanych, częściowo zmienionych, ulegających procesom przeobrażenia. Stwierdzono obecność rdzawopomarańczowych i rdzawobrunatnych skrytokryształicznych form, które występowały przeważnie w spękaniach oraz na granicy ziaren. Przypuszczalnie były to produkty przemian zawierające związki Fe. Oznaczenie składu chemicznego metodą fluorescencji rentgenowskiej (XRF) kruszywa potwierdziło największą zawartość tlenków Fe i Mg w próbkach kruszywa nr 2 i 3. Badania metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM-EDS) wykazały zmienną względną intensywność pasm żelaza i tlenu jako dominujących pierwiastków, przy podrzędnej obecności węgla i siarki. Inne pierwiastki, takie jak krzem i glin, charakteryzowały się słabą intensywnością na widmach EDS.

Obserwowane makroskopowo rdzawe zabarwienie występujące na powierzchni próbek kruszywa pobranych z nawierzchni drogi oraz zmienna proporcja tlenu i żelaza mogły wskazywać, że naskorupienia składały się z wodorotlenków Fe (np. goethyt, limonit), natomiast obecność siarki, że część żelaza związana była w postaci siarczków, którym niekiedy towarzyszyć może podrzędna ilość miedzi. Prawdopodobnie mogły to być siarczki Fe (np. piryt) oraz siarczki Cu-Fe (np. chalkopiryt). Niewykluczone, że obecność żelaza z węglem mogła być również powiązana z niezidentyfikowanymi substancjami.

Podczas przeprowadzonych badań **nie stwierdzono bezpośredniego dowodu na to, że rdzawe plamy na nawierzchni były spowodowane zanieczyszczeniem substancją obcą, a zatem prawdopodobnie główną przyczyną przebarwień były reakcje chemiczne minerałów zawartych w kruszywie.** Rdzawe plamy na nawierzchni drogowej pogarszają jej estetykę. Może to mieć negatywne konsekwencje w kontekście postrzegania jakości infrastruktury drogowej przez użytkowników. W celu zapobiegania takim zjawiskom konieczna jest szczegółowa weryfikacja kruszywa, staranne dobieranie surowców oraz kontrola ich składu mineralnego, np. przez ocenę mikroskopową kruszywa na cienkich szlifach, która pozwoliłaby uniknąć problemu plam na powierzchni asfaltu.

Wpłynął do redakcji: 09.05.2024 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 19.06.2024 r.

## Literature

- [1] Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z 16.06.2014 r – praca zbiorowa pod kierunkiem prof. J. Judyckiego, Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, 1st ed. Gdańsk, 2012.
- [2] Karkowski M. The Problem of Overloaded Vehicles in Poland, Journal of Civil Engineering and Architecture. 2022; DOI: 10.17265/19347359/2022.12.004.
- [3] Urbański P. Dokumentacja projektowa jako element przewidywalności zakresu i czasu realizacji inwestycji. Materiały Budowlane. 2017; DOI: 10.15199/33.2017.05.17.
- [4] Judycki J, Dołżycki B, Jaskuła P. Premature failures of asphalt pavements // Przedwczesne uszkodzenia nawierzchni asfaltowych, Referat na I Kongres Drogowy, Warszawa: Kongres Drogowy, 2006.

- [5] Sybilski D, Bańkowski W, Maliszewski M, Maliszewska D, Zofka A. Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. 2014.
- [6] Iwański M. Awarie i diagnostyka asfaltowych nawierzchni drogowych. Builder. 2017; vol. 1, no. 1, pp. 112–115.
- [7] Rimstidt JD, Vaughan DJ. Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism. Geochim Cosmochim Acta. 2003; DOI: 10.1016/S0016-7037(02)01165-1.
- [8] Adamczyk Z, Nowak J, Grzesik B. Przebarwienia nawierzchni asfaltowej wykonanej na bazie kruszywa amfibolitowego. Górnictwo i Geologia. 2012; vol. 7, no. 3.
- [9] PN-EN 932-3:2022 Badania podstawowych właściwości kruszyw. Procedura i terminologia uproszczonego opisu petrograficznego.