

## **ANALIZA PRZYCZYŃ POWSTAWANIA PĘCHERZY GAZOWYCH NA STYKU WARSTWY IZOLACYJNEJ Z BETONOWĄ PŁYTĄ ESTAKADY**

Alfred Tramer, Teresa Topolnicka, Teresa Kordas, Halina Wałęga – Chwastek, Teresa Wala\*

***W trakcie prowadzenia prac związanych z budową estakady drogowej, w terminie 2 tygodni od położenia izolacji zaobserwowano powstawanie pęcherzy gazowych. Gazy zbierały się pomiędzy warstwą materiału gruntującego, a warstwą izolacji. Celem podjętych prac badawczych było określenie przyczyn powstawania opisanego powyżej zjawiska.***

***Badania obejmowały analizę składu chemicznego produktów gazowych oraz ocenę zastosowanych materiałów izolujących i betonu. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych nad określeniem natury zjawisk fizykochemicznych.***

***Przemiany zachodzące w warstwie betonowej były potencjalną przyczyną wydzielania się gazów bogatych w wodór. Zróżnicowanie próbek betonu wykazano metodą dyfrakcji rentgenowskiej.***

### **1. Wstęp**

Wybudowana estakada jest obiektem z betonu sprężonego, klasy B 60. Składa się z dwóch nitek jezdnych, które budowano w różnym czasie. Nitka budowana jako pierwsza jest prawidłowa. Natomiast podczas prowadzenia prac wykończeniowych drugiej nitki estakady, na zaizolowanej powierzchni zaobserwowano nietypowe zjawisko; po upływie 2 tygodni od położenia izolacji powstały pęcherze gazowe. Nawierzchnia izolacyjna składała się z warstwy materiału gruntującego, polepszającej kohezję do betonu oraz nakładanej na ciepło warstwy papy termozgrzewalnej. Pęcherze gazowe utworzyły się pomiędzy warstwą gruntującą powierzchnię betonową a warstwą papy termozgrzewalnej. Bardzo dobre warunki atmosferyczne panujące podczas układania nawierzchni a następnie wystawienie zaizolowanej powierzchni drogowej na intensywne nagrzewanie promieniami słońca, spowodowało zaostrzenie zaistniałej sytuacji i powstanie większych pęcherzy. Stwierdzono, iż pęcherze gazowe umiejscowione są w sposób przypadkowy, na całej szerokości i występują praktycznie na całej długości nawierzchni wykańczanej właśnie nitki estakady. Z informacji uzyskanych od Kierownictwa Budowy został zarysowany plan prac technologicznych i sytuacji podczas budowy. W trakcie budowy nitki estakady, na której wystąpiło nietypowe zjawisko, zmieniano plastyfikatory do mieszanki betonowej. Należy podkreślić, iż nowo zastosowany plastyfikator wykazuje inny skład chemiczny niż stosowany przy budowie prawidłowej nitki. Po wykonaniu każdej płyty, kiedy osiągnięto 80% w stosunku do zakładanej wytrzymałość betonu, prowadzono prace związane ze sprężaniem konstrukcji przęsła. Wykonywanie tych prac wiązało się z przygotowaniem uszczelniającej mieszanki gazobetonowej zapewniającej szczelne wypełnienie kanałów kablowych. W trakcie przygotowywania mieszanki betonowej zgodnie z recepturą do jej składu dodawany był proszek aluminiowy, charakteryzujący się powierzchnią krycia 5000cm<sup>2</sup>. Stanowisko do przygotowywania betonowej mieszanki iniektującej było przesuwane w trakcie postępu prac po płycie estakady. Stwierdzono zanieczyszczenie płyty mieszanką iniektującą, które usunięto sprężonym powietrzem i strumieniem wody.

Po krótkim okresie czasu stwierdzono obecność szczelin na wierzchniej warstwie betonu w związku z tym przeprowadzono prace naprawcze nawierzchni polegające na uzupełnieniu szczelin i wgłębień dwuskładnikową żywicą epoksydową z utwardzaczem aminowym.

Tak przygotowaną betonową płytę estakady oczyszczono z luźnych elementów poprzez przedmuchiwanie sprężonym powietrzem a następnie zaimpregnowano środkiem gruntującym polimerowo-bitumiczny środek gruntujący w swym składzie zawiera kauczuk butadienowo styrenowy, bitumy pochodzenia petrochemicznego, rozpuszczalnik oraz środek powierzchniowo czynny. Na każdy z etapów budowy wykonawca posiada wymagane aprobaty techniczne IBDiM.

Pomimo nadzoru oraz kontroli wykonania poszczególnych etapów budowy obiektu, zaistniała sytuacja awaryjna polegająca na powstaniu pęcherzy gazowych pod warstwą papy termozgrzewalnej, skutkująca koniecznością wykonania analiz i wstrzymania dalszego postępu prac.

Na początku podejrzewano, iż nietypowa sytuacja powstała na wskutek zastosowania materiałów izolacyjnych o niewłaściwej jakości. Przed wykonaniem szczegółowych analiz przeprowadzono prace naprawcze nawierzchni izolującej estakady. Zerwano izolację z miejsc gdzie stwierdzono obecność pęcherzy, usunięto resztki starej izolacji wodą pod wysokim ciśnieniem oraz metodą śrutowania. Oczyszczone miejsca ponownie zagruntowano i ułożono izolację z papy termozgrzewalnej. Materiały izolacyjne pochodziły od innego producenta. Na tak zaizolowaną nawierzchnię estakady położono dwuwarstwową nawierzchnię asfaltową. Po upływie dwóch miesięcy na obiekcie ponownie zaobserwowano powstawanie pęcherzy gazowych.

## 2. Część doświadczalna

### 2.1. Pobranie próbek materiałów do badań:

2.1.1 Pobór gazu do badań. Poboru gazu dokonano w trzech różnych miejscach (**Tedlar 1, Tedlar 2 i Tedlar 3**). W pierwszym etapie pracy pobór gazu spod warstwy izolacyjnej przeprowadzono za pomocą układu złożonego z zaostromej rurki miedzianej z współśrodkowo umieszczoną drugą rurką połączoną węzłem teflonowym z pompą i tedlarem o pojemności 2 l - rys1. W drugim etapie pracy z pęcherzy gazowych (rozieszczonych jak na rysunku 2 i 3) pod warstwą asfaltu za pomocą układu do poboru gazu spod nawierzchni asfaltowej złożonego z wiertarki do wstępnego wywiercenia otworu w warstwie asfaltu, przebijaka oraz współśrodkowo umieszczonej sondy połączonej z pompą i odbiornikami - tedlarmi pobrano trzy próby gazu: - próba gazu oznaczona symbolem „**Tedlar 4**”, „**Tedlar 5**” i „**Tedlar 6**”

2.1.2 Pobór próbek papy termozgrzewalnej. Pobrano następujące próbki papy: na obiekcie znad pęcherzy, **próbka C**, z miejsc nieuszkodzonych **próbka E**, a także próbek właściwych surowców tj. materiału gruntującego **próbka A** i papy termozgrzewalnej dostarczonego przez producenta **próbka G** oraz próbkę pochodzącą z budowy znajdującą się w oryginalnym opakowaniu **próbka B**

2.1.3 Symulacje laboratoryjne. Przeprowadzono laboratoryjne symulacje nad określeniem potencjalnych przyczyn powstawania produktów gazowych w trakcie procesu technologicznego układania nawierzchni izolacyjnej.

2.1.4 Pobór próbek betonu Specjalistycznym sprzętem dokonano poboru próbek betonu (walec  $h=15$  cm,  $r=3$  cm) na obiekcie z miejsc uszkodzonych pod pęcherzami gazowymi **próbka D** oraz z prawidłowej nitki jezdnej estakady **próbka F**.

### 2.2. Metodyka badań

- Określenie składu gazu wg PN-93/C-96012
- Określenie zawartości VOCs wg metodyki ICHPW
- Oznaczenie temperatury mięknienia metodą Mettlera wg PN-C-97067:1999 1
- Oznaczenie zawartości składników nierozpuszczalnych w toluenie wg PN-82/C- 97057
- Oznaczenie jakościowego składu fazowego betonu metodą dyfrakcji rentgenowskiej wg Instrukcji Badawczej IBS-3-2 IMO
- Oznaczenie mikrostruktury metodą mikroskopii optycznej w świetle odbitym wg Instrukcji Badawczej IBS-1-2 IMO

### 3. Wyniki badań

Stwierdzono, iż skład gazu pobranego z pęcherzy gazowych umiejscowionych pod warstwą izolacyjną (Tedlary 1,2,3) wykazuje zadziwiająco dużą zawartość wodoru i śladowe ilości gazów pochodzenia organicznego. Gazowe produkty o charakterze organicznym (tablica 2) występujące w niewielkich ilościach ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) pochodzi niewątpliwie z odparowania rozpuszczalnika środka gruntującego. Natomiast znaczna zawartość wodoru w pobranym gazie (ponad 40%) mogło wynikać wyłącznie z przemian chemicznych. Poszukiwanie przyczyn tak zaskakującego zjawiska wiązało się z przebadaniem jakości zastosowanych materiałów impregnacyjno - izolujących.

Metodą mikroskopową stwierdzono, iż impregujący środek polimerowo-bitumiczny próbka A i próbka B różnią między sobą, próbka B zmieniła strukturę nadcząsteczkową wyraźne są aglomeraty.

Skład chemiczny gruntującego środka polimerowo-bitumicznego zawierającego w swym składzie kauczuk butadienowo-styrenowy, bitum pochodzenia petrochemicznego, rozpuszczalniki oraz środki powierzchniowo czynne jest niezwykle złożony i praktycznie niemożliwy do rozłożenia na poszczególne związki. Dla scharakteryzowania tego składu przyjęto upraszczający podział na grupy związków o zbliżonej budowie, wykorzystując fakt, że związki te ulegają rozpuszczeniu w określonych rozpuszczalnikach organicznych. Przeprowadzono analizę ekstrakcyjną z rozdzieleniem na frakcję aromatyczną i alifatyczną oraz polarną. Materiał do ekstrakcji przygotowano przez naniesienie ich na powierzchnię szklaną i odparowanie rozpuszczalników w warunkach laboratoryjnych. Po 24 h zeszkrobano i poddano ekstrakcji benzenem w aparacie Soxletta. Ekstrakcję prowadzono do uzyskania przeźroczystego rozpuszczalnika spływającego z gilzy. Wyniki analizy przedstawiono w tablicy 3. Stwierdzono wyraźną różnicę pomiędzy zawartością związków rozpuszczalnych w benzenie w próbce substancji polimerowo bitumicznej pobranej z miejsca występowania pęcherza gazowego (próbka D) w porównaniu z warstwą polimerowo bitumiczną pobraną z prawidłowej nitki estakady (próbka E).

Zróżnicowanie zawartości frakcji rozpuszczalnej w acetonie dla środka gruntującego może mieć wpływ na właściwości technologiczne tego materiału (zwilżalność powierzchni betonowej, trwałość wiązania warstwy izolacyjnej), natomiast nie może być przyczyną wydzielania wodoru. Konieczne, zatem stało się przeprowadzenie odpowiednich testów symulacyjnych.

### 3.1. Symulacyjne badanie laboratoryjne procesu układania nawierzchni izolacyjnej.

Na próbki betonu dostarczone przez Wykonawcę, po dokładnym oczyszczeniu powierzchni, pędzlem naniesiono ciekłą warstwę materiału gruntującego - Próbki A w analogiczny sposób przygotowano powierzchnię z uśrednioną próbką B. Po upływie 14h na tak zagruntowane powierzchnie betonowe nałożono po uprzednim rozgrzaniu kwadratowe kształtki papy termozgrzewalnej o boku 12 cm. Starannie ułożono i lekko dociśnięto uzyskując 1 cm wyptyw wokół papy termozgrzewalnej.

Symulacje laboratoryjne układania powierzchni izolującej przeprowadzono w następujących układach:

1. Podłoże betonowe - Próbka A – Próbka G
2. Podłoże betonowe - Próbka B – Próbka G
3. Podłoże betonowe - Próbka A – Próbka G – pył aluminiowy
4. Podłoże betonowe - Próbka A – Próbka G - żywica uszczelniająca + pył aluminiowy

Po kolejnych 14h – 16h zrywano przyklejoną papę, ostrym nożem kawałkowano, umieszczano w kolbie dwuszyjnej zaopatrzonej w termometr oraz układ do pobierania gazów. Próbkę ogrzewano w zakresie temperatur 29°C – 200°C prowadząc odbiór gazów. Sumaryczne gazy pobrane w trakcie termolizy analizowano analogicznie jak gazy z pęcherzy gazowych ze szczególnym uwzględnieniem obecności wodoru. Wyniki analiz zestawiono w tabelicy 6.

W trakcie przeprowadzanych laboratoryjnych symulacji izolowania powierzchni betonowej zarówno prawidłowym materiałem gruntującym - próbka A, jak i materiałem, którego struktura jest niejednorodna próbka B i prawidłową papą termoizolacyjną próbka G nie stwierdzono obecności wodoru w gazach powstających podczas ogrzewania próbek.

Obecności wodoru w gazach nie stwierdzono również w przypadku pokrycia środkiem gruntującym powierzchni betonu z pyłem aluminiowym. Zwiększoną emisję gazów o charakterze węglowodorowym stwierdzono w wypadku zastosowania żywicy uszczelniającej, jednakże również w tym przypadku nie stwierdzono obecności wodoru w gazach

Ponieważ nie udało się znaleźć, wśród materiałów polimerowo –bitumicznych, źródła emisji gazów o wysokiej zawartości wodoru, w Instytucie Materiałów Ogniotrwałych przeprowadzono badania próbek betonów pobranych spod pęcherzy gazowych oraz z prawidłowej nitki drogowej estakady. W tabelicy 7 zestawiono wyniki analiz składów fazowych warstw pobranych próbek betonu. Składy te wykazują różnicowanie jakościowe.

Wykonano również badania mikrostruktury betonu próbka D (Rys.3,4,5).

Badana próbka charakteryzowała się budową strefową wynikającą z zachodzących zmian w mikrostrukturze.

Zmiany widoczne były makroskopowo do głębokości około 0.5 mm od powierzchni zewnętrznej oraz zmiany mikroskopowe o głębszym zasięgu.

W obrazie mikroskopowym w mikrostrukturze betonu wyróżniono 4 strefy:

- bezpośredniej reakcji (zewnętrzna),
- reakcyjną,
- betonu częściowo zmienionego (wewnętrzna),
- betonu mniej zmienionego.

Strefa bezpośredniej reakcji stanowiła warstewkę barwy czarnej do ciemno popielatej, porowata o grubości od około 0,3 – 0,7 mm. Głównymi składnikami fazowymi były:

**kwarc -  $\text{SiO}_2$**  - w postaci lokalnie spękanych i skorodowanych ziaren o rozmiarach od 60 - 1400 $\mu\text{m}$ ,

**wtórne produkty** – w postaci nierównomiernie rozmieszczonych skupień, kryptokrystalicznych o rozmiarach ziaren znacznie poniżej 1 $\mu\text{m}$  (poniżej zdolności rozdzielczej mikroskopu optycznego),

**wtrącenia metaliczne** - nieregularne o wielkości do 20 $\mu\text{m}$ , występowały pojedynczo, sporadycznie. Obserwowano na powierzchni jedno ziarno o wielkości około 120 $\mu\text{m}$ , które mogło być Al metalicznym.

Pory: występowały w miejscach pierwotnej osnowy. Wśród nich dominowały pory otwarte, szczelinowe o szerokości od około 10 - 200 $\mu\text{m}$

Strefa reakcyjna – popielata, o grubości od około 3 - 50 $\mu\text{m}$  (0,003 - 0,05 mm), niejednorodna, nieciągła, występowała w obszarach pierwotnej osnowy. Najczęściej była zwarta, oddzielona od strefy zewnętrznej obecnością porów szczelinowych. Różniła się od strefy zewnętrznej udziałem zwartych skupień wtórnych produktów ( $\text{CaCO}_3$ ). Miejscami obserwowano mikropęknięcia i objawy korozji w pojedynczych ziarnach kwarcu oraz wydzielenie wtórnych produktów w mikropęknięciach.

Strefa betonu częściowo zmienionego była obserwowana na grubości około 0,1 – 0,3 mm. Mikrostruktura charakteryzowała się zachowaną pierwotną budową różnicowaną na ziarna kwarcu i osnowę z udziałem pojedynczych ziaren klinkieru portlandzkiego.

Zmiany pierwotnej mikrostruktury dotyczyły osnowy i ziaren kwarcu. Osnowa ulegała w większym stopniu korozji, której efekty były widoczne w postaci zwiększonego udziału porów i krystalizacji wtórnych produktów. Obserwowano zachowane ziarna klinkieru portlandzkiego (zbudowane

głównie z C<sub>2</sub>S- belit i C<sub>3</sub>S- alit), które cechowały się postrzępionymi brzegami, powstałymi wskutek przebudowy struktury w wyniku reakcji chemicznych, zachodzących z mniejszą intensywnością w tej części betonu.

W ziarnach kwarcu obserwowano mikropęknięcia. Wśród porów dominowały pory nieregularne o wielkości do około 30µm, których udział malał wraz z głębokością.

Strefa betonu mniej zmienionego wykazywała bardziej zwartą mikrostrukturę w stosunku do strefy wyżej opisanej. W drobnokrystalicznym tle osnowy zbudowanej głównie z glinianów wapnia (C<sub>3</sub>A) i krzemianów wapnia (C<sub>3</sub>S-„alit”), przypuszczalnie częściowo uwodnionych, występowały niezmiennione ziarna klinkieru portlandzkiego zbudowane m.in. z belitu (C<sub>2</sub>S) i ferrytów glinowo-wapniowych typu brownmillerytu (C<sub>4</sub>AF). Obszary przypominające pustki najprawdopodobniej związane były ze skupieniami portlandytu [(Ca(OH)<sub>2</sub>]. Lokalnie obserwowano wtrącenia metaliczne.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

1. Przeprowadzone badania kluczowych właściwości fizykochemicznych pobranych próbek środka gruntującego dostarczonego przez producenta oraz pochodzącego z budowy wskazują na pewne różnicowania właściwości. Może to w bezpośredni sposób wpłynąć na właściwości wytrzymałościowe i trwałość układu izolującego nawierzchnię betonową. Nie stwierdzono różnicowania właściwości fizykochemicznych papy termozgrzewalnej mogącej mieć wpływ na zaistniały stan izolacji betonu. Materiały te nie były źródłem gazów bogatych w wodór.
2. Przeprowadzone symulacje laboratoryjne układania na powierzchni betonu izolacji z udziałem prawidłowego układu izolującego, z udziałem niepełnej jakości surowca impregnującego oraz z udziałem ewentualnych składników dodatkowych jak pył aluminiowy, żywice uszczelniające połączone z analizą składu produktów gazowych ogrzewania nie wskazują na możliwość zaistnienia w warstwie polimerowo – bitumicznej procesów, które są źródłem emisji gazów o składzie zbliżonym do gazu, który pobrano z pęcherzy gazowych na estakadzie. W drugim etapie pracy stwierdzono, iż mimo starannego przeprowadzenia prac naprawczych położenia nowej izolacji, ułożenia warstwy asfaltowej, pęcherze gazowe tworzą się nadal. W składzie chemicznym zebranych gazów wodór jest nadal gazem dominującym.
3. Przeprowadzone badania składu fazowego betonu oraz badania jego mikrostruktury, zwłaszcza zmiany zaobserwowane na powierzchni warstwy betonowej wskazują, że najbardziej prawdopodobną przyczyną powstawania pęcherzy gazowych pomiędzy warstwą gruntującą a warstwą izolującą betonu było zanieczyszczenie płyty betonowej injektem uszczelniającym kanały kablowe (zawierającym pył aluminiowy), co z kolei zainicjowało reakcje ze składnikami betonu, których produktem reakcji był wodór.

\*Dr inż. Alfred Tramer , mgr inż. Teresa Topolnicka, mgr inż. Teresa Kordas

*Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze ul. Zamkowa 1,*

Mgr inż. Halina Wałęga – Chwastek , mgr Teresa Wala

*Instytut Materiałów Ogniotrwałych, Gliwice ul. Toszecka 99*

Tablica1. Oznaczenie zawartości poszczególnych składników gazowych w gazie metodą chromatografii gazowej wg PN-93/C-96012

Związek	Stężenie [% v/v]					
	<b>Tedlar nr1</b>	<b>Tedlar nr2</b>	<b>Tedlar 3</b>	<b>Tedlar 4</b>	<b>Tedlar 5</b>	<b>Tedlar 6</b>
H <sub>2</sub>	40,17	40,89	43,37	6,17	27,38	37,90
O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>	55,30	55,71	51,77	92,07	70,65	59,40
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	<0,01
CH <sub>4</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	<0,01	0,15
CO <sub>2</sub>	0,11	0,04	0,01	0,00	<0,01	0,05
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,01	0,01	0,01	0,00	<0,01	<0,01
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,02	0,01	0,01	0,00	<0,01	<0,01
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> +C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,03	0,01	0,01	0,00	<0,01	<0,01
n- C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02	0,01	<0,10	<0,01	<0,01	<0,01
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	<0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Suma	95,66	96,68	95,17	98,24	98,03	97,57

Tablica 2. Zawartość lotnych związków organicznych (VOC<sub>s</sub>) w pęcherzach oznaczonych wg, procedury IChPW

Związek	Zawartość w gazie mg/m <sup>3</sup>					
	<i>Tedlar 1</i>	<i>Tedlar 2</i>	<i>Tedlar 3</i>	<i>Tedlar 4</i>	<i>Tedlar 5</i>	<i>Tedlar 6</i>
Pentan	4,052	2,846	8,939	0,006	1,268	3,109
Aceton	2,880	5,363	7,302	0,365	0,390	1,230
2-Methylpentan	0,235	1,071	2,520	0,713	1,163	1,179
Heksan	1,495	0,864	0,159	0,092	0,044	0,031
Metyloetyloketon	1,155	0,961	1,617	0,00	0,00	0,000
Cyklohekan	2,821	1,449	7,220	0,104	0,288	0,613
Benzen	2,619	0,326	1,623	1,317	0,605	0,858
Heptan	0,740	0,453	0,962	0,001	0,128	0,269
Tetrametyloheptan	0,042	0,130	0,208	0,00	0,000	0,000
Toluen	2,412	1,316	1,685	3,616	5,221	5,751
n- oktan	0,223	0,282	0,50	0,019	0,032	0,072
p-ksylen	3,066	2,367	2,386	1,189	0,742	1,090
Nonan	<0,001	2,696	2,956	0,247	0,000	0,309
o-ksylen	1,643	1,329	1,306	1,066	1,1,07	1,394
Propylobenzen	1,073	0,475	0,578	0,000	0,157	0,122
1,2,3Trimetylobenzen	1,393	1,132	1,530	0,000	6,587	7,232
n- dekan	1,848	2,618	2,758	0,000	1,462	1,963
1,2,4 Trimetylobenzen	3,286	1,759	2,613	5,100	4,961	8,114

Tablica 3. Zawartość związków rozpuszczalnych w benzenie wyekstrahowanych izolacji próbek betonu oraz z próbek papy

Wyszczególnienie	<i>Próbka C</i>	<i>Próbka D</i>	<i>Próbka E</i>	<i>Próbka F</i>
Skłaniki rozpuszczalne, [%m/m.]	57,94	6,78	62,20	60,19
Fracja alifatyczna [%m/m.]	14,71	10,00	17,93	6,39
Fracja aromatyczna [%m/m.]	72,65	88,67	80,34	71,11
Składniki polarne [%m/m.]	12,64	1,33	1,73	22,50

Tablica 4. Zawartość związków rozpuszczalnych w próbkach środka gruntującego

Wyszczególnienie	<i>Próbka A</i>	<i>Próbka B</i>
Zawartość frakcji rozpuszczalnej w acetonie, % m/m.	72,61	41,62
Zawartość frakcji rozpuszczalnej w toluenie %m/m.	99,90	99,92

Tablica 5. Temperatura mięknięcia próbek papy termoizolacyjnej oznaczonej metodą Mettlera

Wyszczególnienie	<i>Próbka C</i>	<i>Próbka E</i>	<i>Próbka G</i>
Temperatura mięknięcia, [°C]	136,0	135,3	139,1

Tablica 6. Oznaczenie zawartości składników gazowych w gazie metodą chromatografii gazowej wg PN-93/C-96012

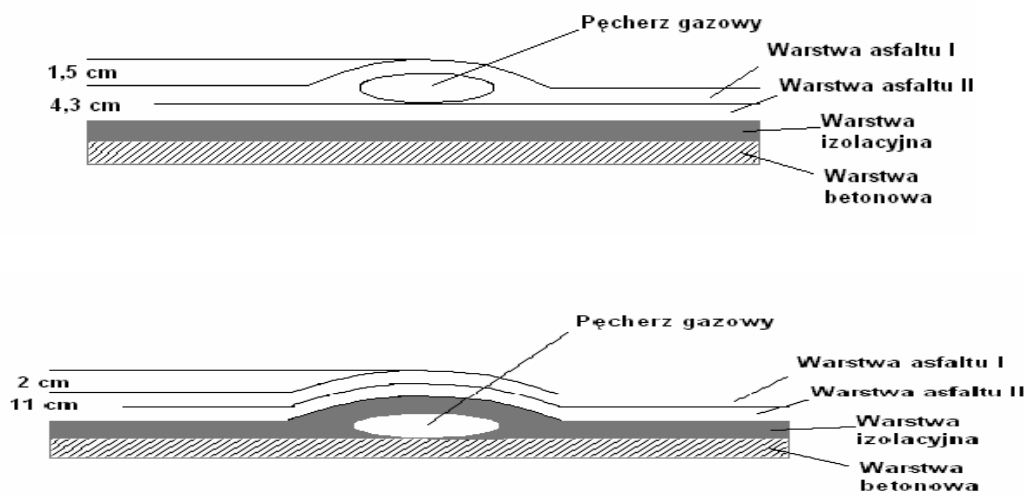
Składnik	Symulacja 1	Symulacja 2	Symulacja 3	Symulacja 4
	Zawartość [% v/v ]			
H <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00
N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	90,86	93,05	86,71	73,91
CO	0,65	1,11	0,00	1,06
CH <sub>4</sub>	0,20	0,21	< 0,01	3,19
CO <sub>2</sub>	1,22	2,0	1,16	9,51
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,16	0,07	0,47	5,49
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		0,08	0,15	1,66
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,10	0,07	0,10	1,32
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,12	0,20	0,20	1,63
C <sub>5</sub> H <sub>n</sub>	0,02	0,05	0,04	< 0,01
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	< 0,01	<0,01	0,02	< 0,01

Tablica 7. Analiza jakościowa składu fazowego betonu oznaczana metodą dyfrakcji rentgenowskiej

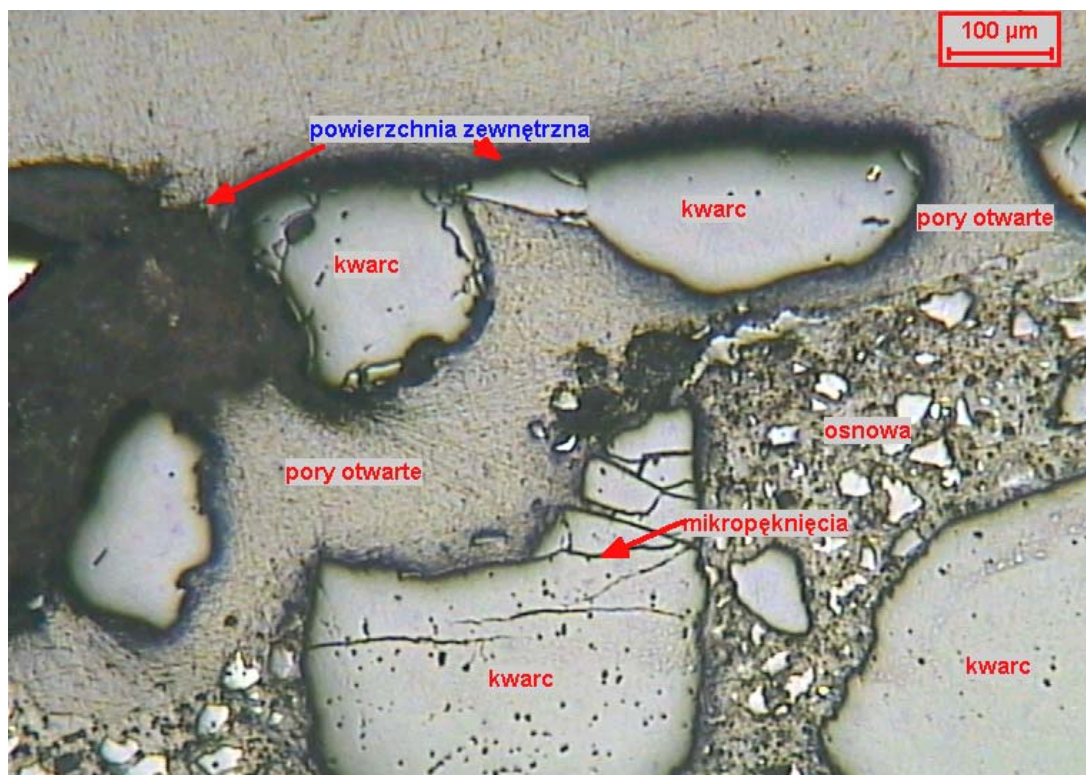
Opis próbki	Warstwa betonu pod papą próbka D	Próbka betonu 1,5 cm od powierzchni próbka D	Próbka betonu 7-8 cm od powierzchni próbka D	Warstwa betonu pod papą Próbka F
Skład fazowy	SiO <sub>2</sub> kwarc Ca(OH) <sub>2</sub> portlandyt Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> diopsyd Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnit Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> forsteryt NaAlSiO <sub>4</sub> nefelin	SiO <sub>2</sub> kwarc Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> diopsyd Ca(OH) <sub>2</sub> portlandyt Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> forsteryt Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnit NaAlSiO <sub>4</sub> nefelin Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> krzemian wapnia (belit)	SiO <sub>2</sub> kwarc Ca(OH) <sub>2</sub> portlandyt Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> diopsyd Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> larnit Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> forsteryt NaAlSiO <sub>4</sub> nefelin	SiO <sub>2</sub> kwarc CaCO <sub>3</sub> kalcyt Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> korund (Na,Ca)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub> albit



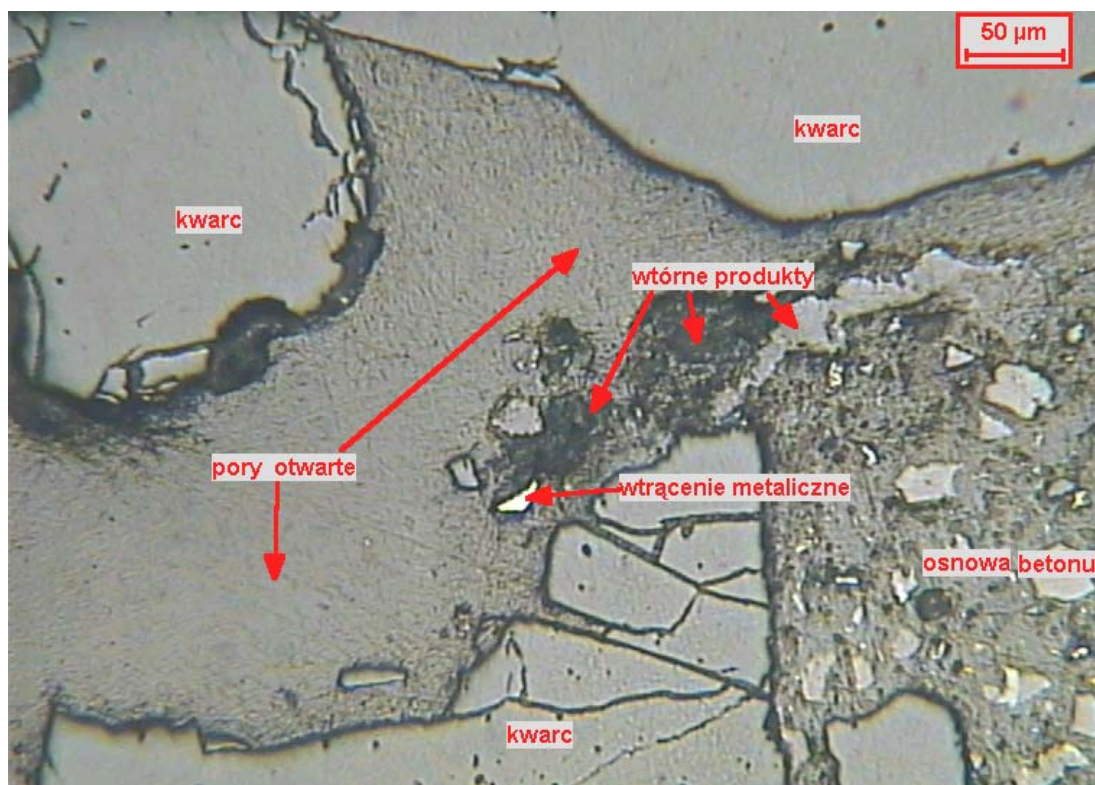
Rys.1



Rys.2 Schematyczny przekrój miejsca poboru próby gazu w drugim etapie pracy.

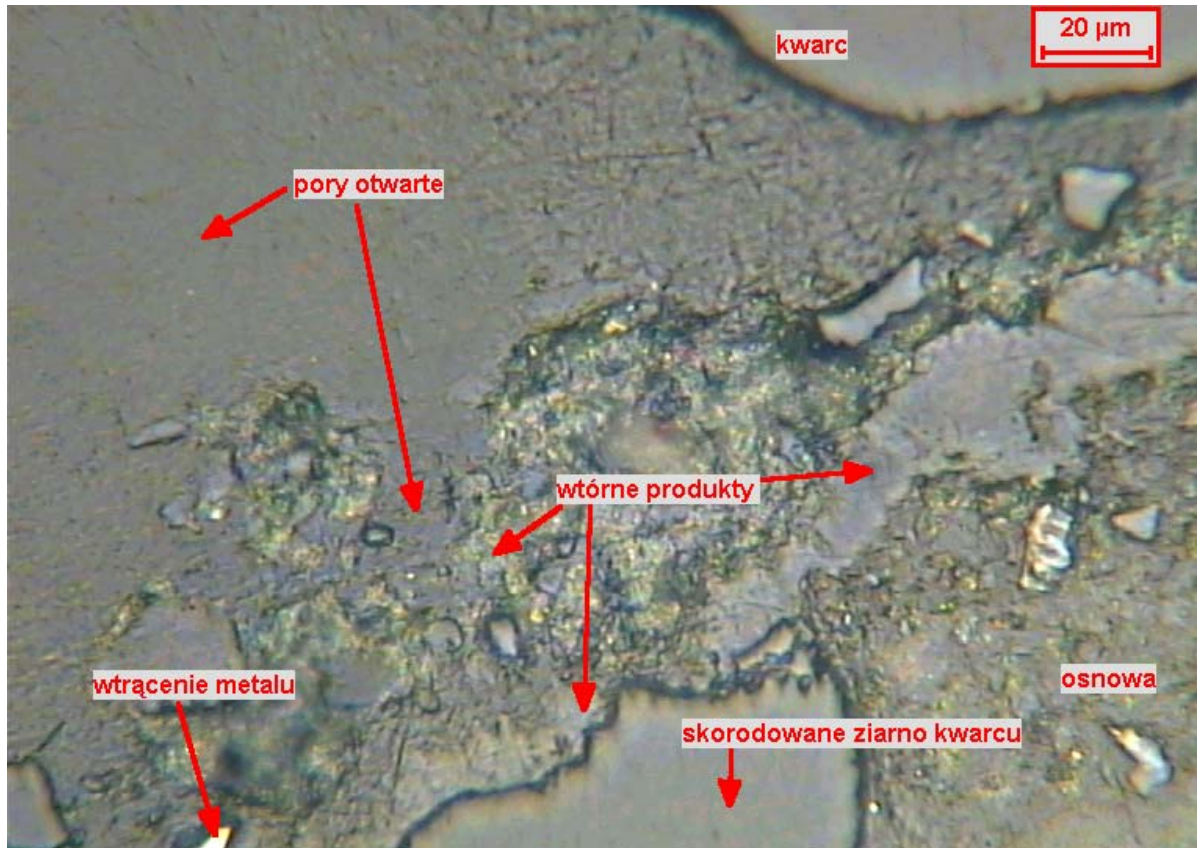


Rys. 3. Ogólny obraz mikrostruktury przy powierzchni betonu drogowego. Fragment mikrostruktury przedstawiającej strefę bezpośredniej reakcji. Czarne obszary – wtórne produkty w postaci materiału kryptokrystalicznego. Widoczna zmieniona pierwotna mikrostruktura betonu przy powierzchni. W miejsce osnowy, między częściowo zmienionymi ziarnami kwarcu, widoczne pory otwarte w mikrostrukturze.



Rys. 4. Obraz mikrostruktury na granicy zewnętrznej warstewki zmienionej betonu i warstewki betonu częściowo zmienionego. Na wewnętrznych ściankach porów od strony betonu częściowo zmienionego widoczne wtórne produkty reakcji.





Rys. 5. Mikrostruktura strefy reakcyjnej. W miejsce pierwotnej osnowy, między częściowo zmienionymi ziarnami kwarcu, widoczne pory otwarte i wtórne produkty. Lokalnie widoczne skorodowane ziarno kwarcu z wtórnymi produktami, powstałymi reakcyjnie.