

dr inż. Maciej Sobótka^{1)*}
 ORCID: 0000-0001-5166-5060
 mgr inż. Bartłomiej Bodak¹⁾
 ORCID: 0009-0003-0162-9492
 mgr inż. Michał Pachnicz¹⁾
 ORCID: 0000-0002-7274-0580
 Davide Papurello, Ph.D.²⁾
 ORCID: 0000-0003-1455-0964

Impact of contact combustion of lithium-ion batteries on the microstructure of cement mortar

Wpływ kontaktowego spalania akumulatorów litowo-jonowych na mikrostrukturę zaprawy cementowej

DOI: 10.15199/33.2025.09.14

Abstract: This study presents preliminary results concerning the potential effects of fires involving battery-powered electric vehicles on concrete. In particular, the microstructural properties of standard mortar exposed to contact combustion of Li-ion cells were assessed. Microstructural analyses were performed on a control sample not subjected to thermal exposure, as well as on samples exposed to one, two, and three cycles of Li-ion battery contact combustion. A significant effect of battery combustion on the degradation of cement mortar microstructure was observed. This was manifested primarily by the development of a microcrack network and the penetration of elements originating from the battery – carbon and metallic inclusions of Ni, Co, and Mn, which are initially components of the electrodes – into the mortar microstructure. The presented study is intended to serve as an incentive for further research in this area.

Keywords: microstructure; composite; Li-ion battery; concrete; fire

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań dotyczących wpływu potencjalnego wpływu pożaru, zasilanych baterijnie pojazdów elektrycznych, na beton. Oceniono przede wszystkim mikrostrukturę zaprawy normowej poddanej oddziaływaniu kontaktowego spalania akumulatora Li-ion. Badaniom mikrostrukturalnym poddano próbkę kontrolną oraz próbki po 1, 2 i 3 cyklach spalania. Wykazano wyraźny wpływ kontaktowego spalania akumulatorów na degradację mikrostruktury zaprawy cementowej. Uwidacznia się on przede wszystkim jako rozwój sieci mikrospeków, a także wnikanie w mikrostrukturę zaprawy pierwiastków pochodzących z baterii, tj. węgla oraz wtrąceń metalicznych Ni, Co, Mn, będących pierwotnie składnikami elektrod. Zaprezentowane w pracy badania mają stanowić zachętę do dalszych prac badawczych w tym obszarze.

Słowa kluczowe: mikrostruktura; kompozyt; akumulator Li-ion; beton; pożar

The dynamic increase in the number of electric vehicles in recent years has caused significant changes in road transport. This trend is particularly visible in highly developed countries such as Norway, where in 2022 as much as 83.7% of new registrations were electric cars [1]. Such a high share results primarily from an extensive system of government incentives, the availability of charging infrastructure, and strong commitment to the reduction of greenhouse gas emissions [2]. Despite numerous ecological and economic benefits, the increase in the number of electric cars is associated with new challenges, particularly in the context of transport infrastructure safety. The growing popularity of battery-powered electric vehicles (BEVs) highlights a key hazard related to lithium-ion batteries, which is the risk of fire and explosion resulting from uncontrolled temperature rise of the battery (thermal runaway). This process, triggered by mechanical damage, overcharging, or environmental conditions [3], may lead to violent fire incidents, especially dangerous in enclosed spaces such as tunnels or underground car parks [4].

Thermal damage to concrete tunnel linings constitutes a serious threat, particularly due to the extreme temperature and rapid heating rate, which may cause significant damage, including spalling of layers of structurally significant thickness [5, 6]. As a consequence, this leads to a reduction of the structural

dynamiczne zwiększenie liczby pojazdów elektrycznych w ostatnich latach spowodowało znaczne zmiany w transporcie drogowym. Trend ten jest szczególnie widoczny w państwach wysoko rozwiniętych, takich jak Norwegia, w której w 2022 r. aż 83,7% nowych rejestracji stanowiły samochody elektryczne [1]. Tak duży udział wynika przede wszystkim z rozbudowanego systemu rządowych ulg, dostępności infrastruktury ładowania oraz silnego zaangażowania w redukcję emisji gazów cieplarnianych [2]. Pomimo licznych korzyści ekologicznych i ekonomicznych, zwiększenie liczby samochodów elektrycznych wiąże się z nowymi wyzwaniami, szczególnie w kontekście bezpieczeństwa infrastruktury transportowej. Coraz większa popularność pojazdów elektrycznych, zasilanych bateriami (BEV), uwydatnia kluczowe zagrożenie związane z akumulatorami litowo-jonowymi, takie jak ryzyko pożaru i eksplozji, wynikające z niekontrolowanego wzrostu temperatury akumulatora (*thermal runaway*). Proces ten, wywołany uszkodzeniami mechanicznymi, przeładowaniem lub warunkami środowiskowymi [3], może prowadzić do gwałtownych incydentów pożarowych, szczególnie niebezpiecznych w zamkniętej przestrzeni, takiej jak tunele czy parkingi podziemne [4].

Uszkodzenia termiczne betonowych obudów tuneli stanowią poważne zagrożenie, szczególnie ze względu na ekstremalną temperaturę i gwałtowne tempo nagrzewania, które mogą powodować znaczne uszkodzenia, w tym odpryskiwanie warstw

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Politecnico di Torino, Energy Center of Turin

^{*)} Correspondence address: maciej.sobotka@pwr.edu.pl



cross-section and a significant degradation of the mechanical properties of concrete [5, 7]. While the literature contains many analyses concerning the impact of typical fires on the performance of concrete tunnel linings or on changes in the properties of concrete [7÷10], the influence of conditions specific to BEV fires, such as high heat release rates and the presence of specific combustion products, e.g. hydrogen fluoride [4], on cement composites is not well studied. The article presents the results of preliminary research concerning the microstructural properties of mortar exposed to the effects of contact combustion of Li-ion cells. Results from X-ray microtomography and scanning electron microscopy are presented, focusing on changes in the crack network caused by cell contact combustion.

Research methods

The analysis was carried out on samples of standard cement mortar, prepared in accordance with the guidelines of PN-EN 196-1. Cement CEM I 42.5 N was used, and the proportions of the mixture (cement: sand: water) were as follows: 1:3:0.5. After a 28-day curing period, strength tests were conducted on three formed beams $4 \times 4 \times 16$ [cm], obtaining an average flexural tensile strength of 8.22 MPa and a compressive strength of 45.0 MPa. From the remaining material, samples were prepared for further tests. Using a precision saw, cubes with an edge length of approx. 1.0 cm were cut. The size of the samples was selected due to the specificity of the testing methods used (and further described) in the microscale.

Because of the small size of the samples and the scope of the preliminary tests being conducted, cement mortar was tested, and not concrete, which most often constitutes the material of tunnel lining structures. The prepared samples were subjected to fire exposure in the measurement chamber at the Energy Center of the Polytechnic University of Turin. Li-ion cells were placed together with the mortar samples in the THT EV+ ARC accelerating calorimeter, and internal short-circuiting of the cell was induced in the nail penetration test [11]. During the test, the temperature distribution, the curve of the cell's temperature change over time, its voltage, and the content and chemical composition of the gaseous combustion products were examined. The maximum recorded temperature was at the level of 650°C, the total time to reach the maximum temperature was approx. 18.3 s, with a peak rate of temperature rise at the level of 540°C/s. Microstructural examinations were carried out on the control mortar sample "K" (not subjected to thermal exposure) and on the samples after 1, 2, and 3 cycles of contact combustion of a Li-ion cell, designated "S1," "S2," and "S3."

Microtomography, in particular X-ray microtomography (micro CT) is an advanced, non-destructive imaging technique widely applied in studies of the microstructure of heterogeneous materials. The method is based on recording the intensity of radiation passing through a sample as it rotates relative to the detector, which enables the reconstruction of three-dimensional images of the microstructure with micrometer-scale spatial resolution, for example using the Feldkamp algorithm [12]. This allows for detailed analysis of the internal morphology of the sample [13], including the identification of pores, cracks, and

o konstrukcyjnie istotnej grubości [5, 6]. W konsekwencji dochodzi do zmniejszenia przekroju konstrukcji oraz znacznej degradacji właściwości mechanicznych betonu [5, 7]. O ile w literaturze można znaleźć wiele analiz dotyczących wpływu typowych pożarów na pracę betonowej obudowy tunelowej czy zmianę właściwości betonu [7÷10], wpływ warunków charakteryzujących pożary BEV, takich jak wysokie tempo wydzielania ciepła oraz obecność specyficznych produktów spalania, jak np. fluorowodor [4], na kompozyty cementowe nie jest dobrze zbadany.

W artykule przedstawiono rezultaty wstępnych badań dotyczących właściwości mikrostruktury zaprawy normowej poddanej oddziaływaniu kontaktowego spalania ogniw Li-ion. Zaprezentowano wyniki obrazowania w mikrotomografii rentgenowskiej oraz skaningowym mikroskopie elektronowym, ukierunkowane przede wszystkim na określenie zmian w sieci spękań powstających na skutek oddziaływania kontaktowego spalania ogniw.

Metody badań

Analizie poddano próbki cementowej zaprawy normowej, przygotowanej zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 196-1. Zastosowano cement CEM I 42,5 N, a proporcje mieszanki (cement : piasek : woda) były następujące 1 : 3 : 0.5. Po 28-dniowym okresie dojrzewania przeprowadzono testy wytrzymałościowe na trzech uformowanych beleczkach $4 \times 4 \times 16$ [cm], uzyskując średnią wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, 8,22 MPa i wytrzymałość na ściskanie 45,0 MPa. Z pozostałego materiału przygotowano próbki do dalszych, właściwych badań. Z wykorzystaniem piły precyzyjnej wycięto sześciiany o długości krawędzi ok. 1,0 cm. Wielkość próbek została dobrana ze względu na specyfikę wykorzystanych (i opisanych dalej) metod badań w skali mikro. Z powodu małej wielkości próbek oraz skali prowadzonych obecnie badań wstępnych badaniu poddano zaprawę cementową, a nie beton, który najczęściej stanowi materiał konstrukcji obudów tunelowych. Przygotowane próbki poddano oddziaływaniu pożaru w komorze pomiarowej w Energy Center na Politechnice w Turynie. Ogniwa Li-ion umieszczono wraz z próbkami zaprawy w kalorymetrze przyspieszającym THT EV+ ARC i dokonywano zwarcia wewnętrznego ogniwa w teście penetracji igłą (*nail penetration test*) [11]. Podczas testu badano rozkład temperatury, krzywą zmian temperatury ogniwa w czasie, jego napięcie oraz zawartość i skład chemiczny gazowych produktów spalania. Maksymalna rejestrowana temperatura była na poziomie 650°C, całkowity czas do osiągnięcia temperatury maksymalnej to ok. 18,3 s, ze szczytowym tempem jej wzrostu na poziomie 540°C/s. Badaniom mikrostrukturalnym poddano próbkę kontrolną zaprawy „K” (niepoddaną oddziaływaniu termicznemu) oraz próbki po 1, 2 i 3 cyklach spalania kontaktowego akumulatora Li-ion, które oznaczono „S1”, „S2” i „S3”.

Mikrotomografia, a przede wszystkim mikrotomografia rentgenowska (x-ray micro-CT), stanowi zaawansowaną, niszczącą technikę obrazowania, często stosowaną w badaniach mikrostruktury materiałów niejednorodnych. Metoda ta polega na rejestracji intensywności promieniowania przechodzącego przez próbkę w trakcie jej obrotu względem de-



the spatial distribution of individual phases of the material (Figure 1). In this study, the mortar specimens were imaged using a GE Phoenix v|tome|x s microtomograph, with scanning parameters summarized in the table. To ensure consistent scanning conditions for all samples, imaging was carried out using the multi-scan method, in which the final dataset was composed of three consecutive scans performed sequentially within a single run. This approach allowed all analyses to be considered as conducted under identical experimental conditions. The projec-

tor, co umożliwia uzyskanie trójwymiarowych obrazów mikrostruktury próbki o rozdzielczości przestrzennej (rzędu mikrometrów) na drodze rekonstrukcji matematycznej (np. algorytmem Feldkampa [12]). Dzięki temu możliwa jest szczegółowa analiza wewnętrznej morfologii ośrodka [13], obejmująca identyfikację porów, rys oraz rozkładu przestrzennego poszczególnych faz materiału (rysunek 1). W ramach prezentowanych badań, próbki zaprawy poddano obrazowaniu z wykorzystaniem mikrotomografu GE Phoenix v|tome|x s, z wy-

korzystaniem parametrów skanowania zestawionych w tabeli.

Chcąc zapewnić jednolite warunki skanowania wszystkich próbek, obrazowanie wykonano metodą multi-scan, tj. wynikowy scan próbek złożony był z trzech pojedynczych skanów, wykonywanych sekwencyjnie w ramach jednego badania. Dzięki temu wszystkie analizy można traktować jako wykonywane w tych samych warunkach badania. Projekcje uzyskane na drodze skanowania zrekonstruowano z wykorzystaniem oprogramowania *datos|x 2 rec*, a następnie poddano interpretacji z wykorzystaniem algorytmów analizy obrazu, zaimplementowanych w oprogramowaniu CTAn.

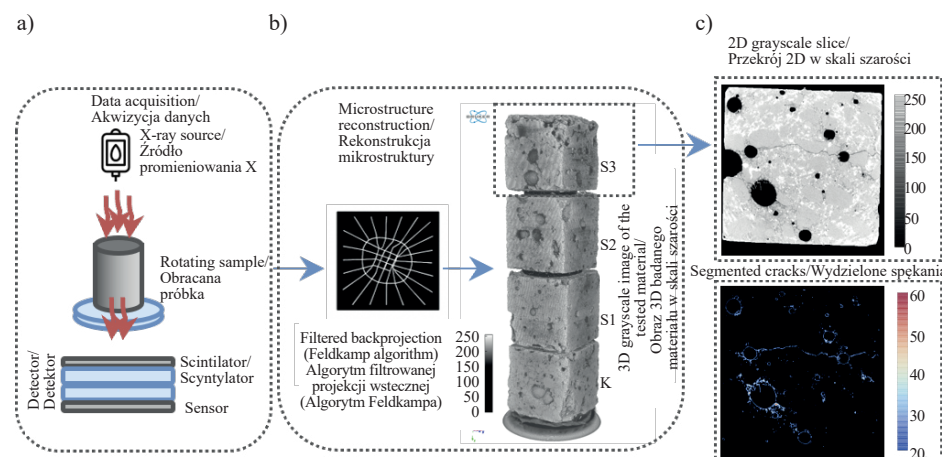


Fig. 1. Diagram of the microtomography analysis: a) data acquisition; b) view of reconstructed samples; c) exemplary cross-section of a sample, and identified microcracks

Rys. 1. Schemat badania w mikrotomografii: a) akwizycja danych; b) widok zrekonstruowanych próbek; c) przykładowy przekrój poprzeczny próbki oraz zidentyfikowane na nim mikrospekowania

Scanning and acquisition parameters

Parametry skanowania

Parametr/ Parametr	Resolution/ Rozdzielczość	Acceleration voltage/ Napięcie lampy rentgenowskiej	Beam current/ Prąd lampy	Number of projections/ Liczba projekcji	Projection size/ Rozmiar projekcji	Filter/ Filtr
Value/ Wartość	19,9 $\mu\text{m}/\text{vx}$	80 kV	100 μA	3×1500	3×1 Mpx	0,5 mm Cu

tions obtained during scanning were reconstructed with *datos|x 2 rec* software and subsequently subjected to analysis using image processing algorithms implemented in CTAn software.

Imaging with a Thermo Fisher Scientific Phenom-World BV scanning electron microscope (SEM) was carried out on the surfaces of the examined samples (Figure 2). In addition, after the microtomography analysis, the samples were cut with a precision saw in a way that allowed the examination of central cross-sections. The samples were then embedded in conductive phenolic resin, and their surfaces were ground and polished on diamond discs to obtain a flat, scratch-free surface. To improve electrical conductivity, the surface was coated with a thin Au-Pd layer using a vacuum sputter coater. The investigations included analyses in backscattered electron (BSE) imaging mode as well as energy-dispersive spectroscopy (EDS).

Results

The external surface of the tested samples (Photo 1a) was first examined using SEM. The aim was to determine the changes occurring on the sample surfaces during the fire. On the walls of

Obrazowanie w skaningowym mikroskopie elektronowym SEM Thermo Fisher Scientific Phenom-World BV przeprowadzono na powierzchni badanych próbek (rysunek 2). Dodatkowo, po analizie w mikrotomografii, przecięto je precyzyjną piłą w sposób umożliwiający badanie przekrojów środkowych. Następnie próbki zatopiono w przewodzącej żywicy fenolowej, a ich powierzchnię wyszlifowano i wypolerowano na tarczach diamentowych do uzyskania płaskiej powierzchni, wolnej od rys. W celu poprawy przewodnictwa elektrycznego powierzchnię pokryto warstwą Au-Pd przy użyciu napylarki próżniowej. W ramach badań wykonywano analizy w trybie obrazowania elektronów wstecznie-rozproszonych (BSE) oraz spektroskopii dyspersyjnej energii (EDS).

Wyniki

Powierzchnię zewnętrzną badanych próbek (fotografia 1a) poddano w pierwszej kolejności obrazowaniu SEM. Jego celem było określenie zmian zachodzących na powierzchni próbek podczas pożaru. Na ścianach próbek zaobserwowano odkładanie się produktów spalania w postaci sadzy, której charakter różnił się

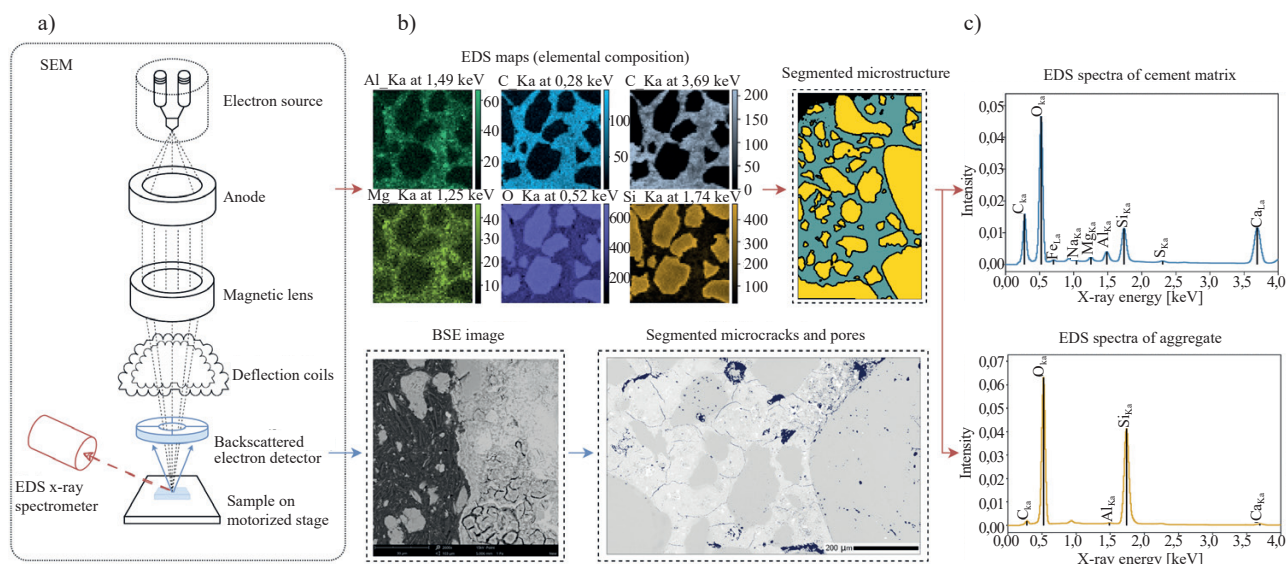


Fig. 2. Diagram illustrating the methodology of scanning electron microscopy (a); data acquisition (b); and analysis (c)

Rys. 2. Schemat obrazujący metodę badania w skaningowym mikroskopie elektronowym (a); akwizycja danych (b) oraz ich analiza (c)

the samples, the deposition of combustion products in the form of soot was observed, with its character differing depending on the number of contact combustion cycles. The sample after one cycle was covered with a continuous, though locally cracked, soot layer (Photo 1b), which, however, became progressively degraded with subsequent cycles. In the samples subjected to two and three cycles, this layer was highly discontinuous and heterogeneous (Photo 1c), and, in addition, particles of transition metals originating from inside the battery were found within it.

Both the three-dimensional reconstruction of the sample microstructures performed with X-ray microtomography and the imaging of flat cross-sections of these samples using scanning electron microscopy demonstrated that the crack network forming in the mortar evolves significantly with successive fire exposure cycles (Photo 2). After the first cycle of the cell combustion, the cement matrix largely retains its structural integrity – the near-surface layer develops individual cracks, but the extent of the affected zone does not exceed 100 μm (S1). After the subsequent fire cycle, the affected zone expands – microcracks are observed up to about 500 μm from the surface of the cube in contact with the battery, while at the same time the near-surface layer of the matrix (approx. 200 μm) undergoes significant degradation (S2).

w zależności od liczby cykli spalania kontaktowego. Próbkę po jednym cyklu oddziaływania charakteryzowała ciągła, choć miejscami spękana powierzchnia sadzy (fotografia 1b), która jednak wraz z kolejnymi cyklami ulegała postępującemu zniszczeniu. Warstwa ta na próbkach po dwóch i trzech cyklach była silnie nieciągła i niejednorodna (fotografia 1c), a dodatkowo znaleziono w niej cząstki metali przejściowych z wnętrza akumulatora.

Zarówno trójwymiarowa rekonstrukcja mikrostruktur próbek,

wykonana w mikrotomografii komputerowej, jak i obrazowanie płaskich przekrojów tych próbek w skaningowym mikroskopie elektronowym wykazały, że sieć spękań tworzących się w zaprawie w istotny sposób ewoluuje wraz z kolejnymi cyklami oddziaływania pożaru (fotografia 2). Po pierwszym cyklu spalania ogniwa matryca cementowa zachowuje swoją integralność strukturalną – w warstwie przypowierzchniowej tworzą się pojedyncze spękania, lecz zasięg strefy oddziaływania nie przekracza 100 μm (S1). Po kolejnym cyklu pożarowym strefa oddziaływania poszerza się – mikrospeknięcia obserwowane są w strefie do ok. 500 μm od powierzchni kostki mającej kontakt z akumulatorem, lecz jednocześnie przypowierzchniowa (ok. 200 μm) warstwa matrycy ulega znacznej degradacji (S2). Ponadto, począwszy od drugiego cyklu spalania, obserwuje się propagację mikro-

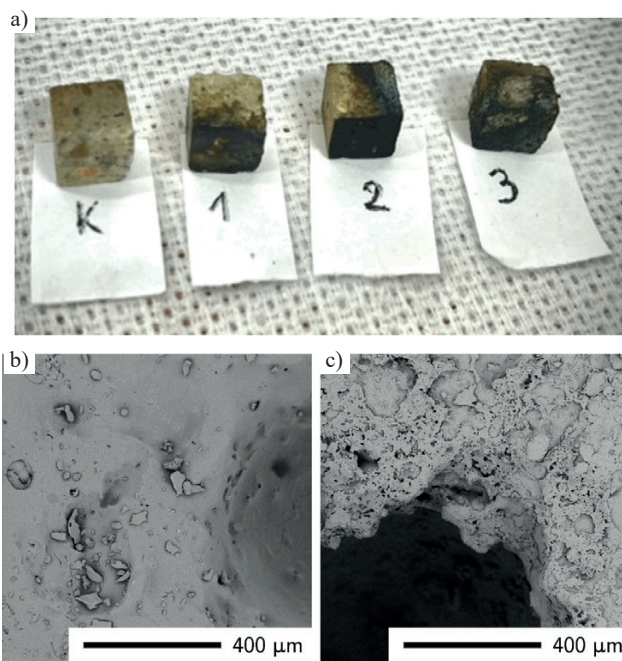


Photo 1. Samples tested: a) standard mortar cubes („K” denotes the control sample: 1, 2, 3 denote samples after 1, 2, and 3 fire exposure cycles, respectively); b) BSE micrograph of the sample surface after 1 cycle; c) BSE micrograph of the sample surface after 3 fire exposure cycles

Fot. 1. Próbkę poddane badaniom: a) kostki zaprawy normowej („K” – próbka kontrolna: 1, 2, 3 – próbki po 1, 2 i 3 cyklach oddziaływania pożaru); b) mikrogram BSE powierzchni próbki po 1 cyklu; c) mikrogram BSE powierzchni próbki po 3 cyklach oddziaływania

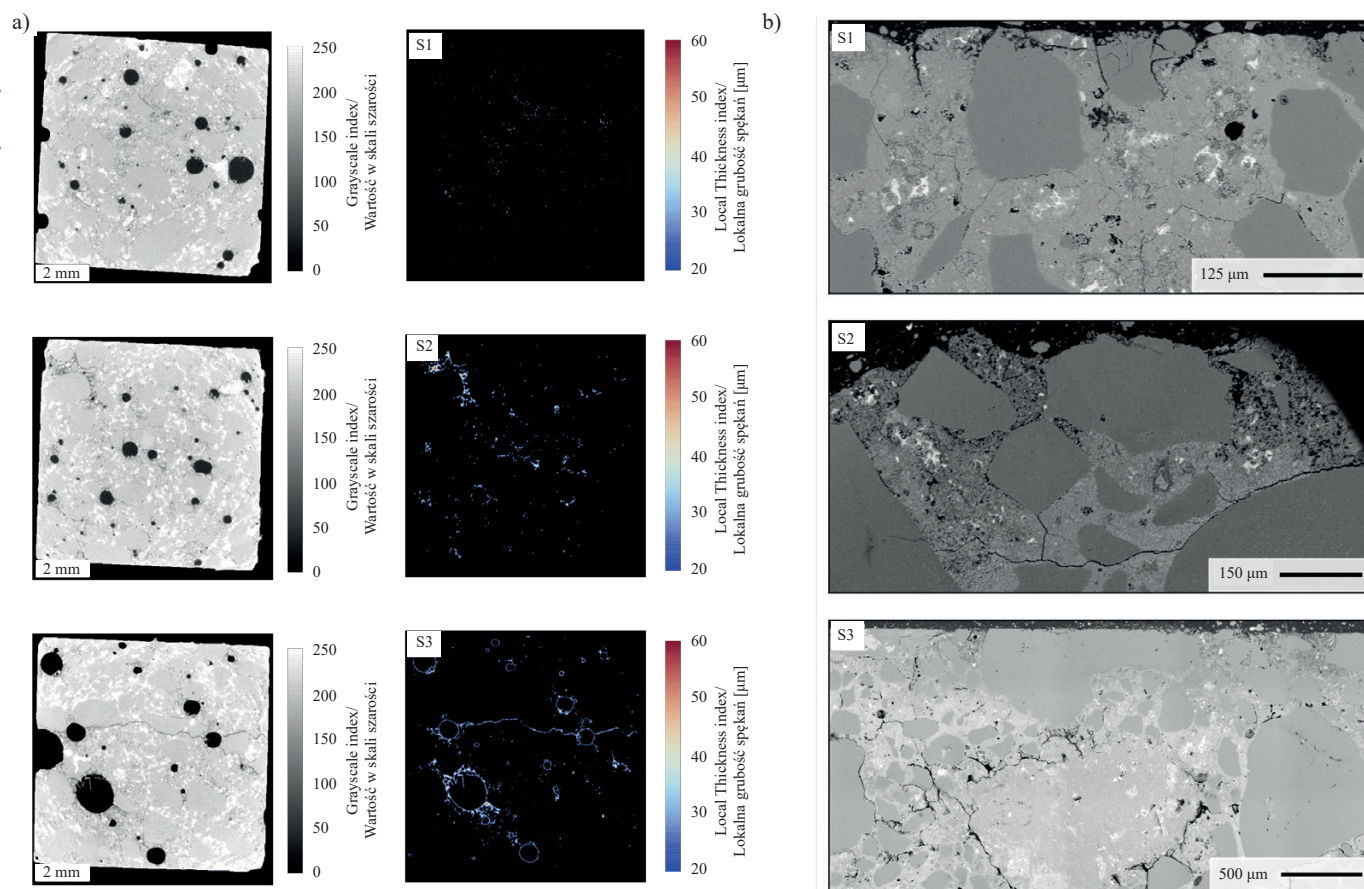


Photo 2. Crack network observed in the samples using: a) X-ray microtomography – sample cross-sections and local crack thickness maps, b) cross-sectional imaging of the samples in SEM

Fot. 2. Sieć spękań zaobserwowana w próbkach z wykorzystaniem: a) mikrotomografii rentgenowskiej – przekroje próbek oraz mapy lokalnej grubości spękań, b) obrazy przekrojów próbek w SEM

Moreover, starting from the second combustion cycle, propagation of microcracks in the matrix is observed in the immediate vicinity of existing pore space. In both of these cases, however, the effect of the burning cell remains local. No significant increase in the number or size of cracks was observed outside the mentioned zones, i.e. near the surface and in the vicinity of existing pores. The sample after three fire cycles (S3) is characterized, in addition to a heavily degraded surface layer of the matrix (as in sample S2), by the presence of a considerable number of larger cracks (up to about 60 μm in width) that penetrate the entire volume of the tested sample. In this case, transverse cracking of sand (aggregate) grains was also observed. The cracks that develop propagate from existing pores, forming a continuous, open pore space.

As a result of the combustion effects of the lithium-ion battery, a soot layer was observed on the surface of the cement mortar samples, whose characteristics indicate a complex chemical composition. Analyses conducted both on the soot-covered surface and on the cross-sections of the samples revealed the presence of metallic combustion products, including fine particles containing nickel and cobalt. These particles appeared in the form of characteristic “spheres” deposited on the surface as well as inside larger cracks (Photo 3a).

To examine the deposition of soot in the mortar samples in greater detail, SEM-EDS analyses were carried out. The results indicated that during combustion, soot penetrated the material, reaching both open cracks extending from the surface

spękań matrycy w bezpośrednim otoczeniu istniejącej przestrzeni porowej. W obu tych przypadkach oddziaływanie płonącego ogniwa ma jednak charakter lokalny. Nie zaobserwowano znacznego zwiększenia liczby i rozmiaru spękań, poza wspomnianymi strefami, przy powierzchni i w sąsiedztwie istniejących porów. Próbką po trzech cyklach pożaru (S3) charakteryzuje się, oprócz silnie zdegradowanej powierzchniowej warstwy matrycy (jak w próbce S2), występowaniem znacznej liczby spękań o większym rozmiarze (nawet do ok. 60 μm szerokości), które penetrują całą objętość badanej próbki. W tym przypadku zaobserwowano również występowanie skrośnych spękań ziaren piasku (kruszywa). Tworzące się spękania propagują od istniejących porów, formując ciągłą, otwartą przestrzeń porową.

W wyniku oddziaływania efektów spalania akumulatora litowo-jonowego zaobserwowano na powierzchni próbek zaprawy cementowej obecność warstwy sadzy, której charakterystyka wskazuje na złożony skład chemiczny. Analizy przeprowadzone zarówno na powierzchni pokrytej sadzą, jak i na przekrojach próbek ujawniły obecność metalicznych produktów spalania, w tym drobnych cząstek zawierających nikiel oraz kobalt. Cząstki te występowały w formie charakterystycznych „kulek” osadzonych na powierzchni oraz wewnątrz większych spękań (fotografia 3a).

W celu szczegółowego zbadania osadzania się sadzy w próbkach zaprawy przeprowadzono analizy SEM-EDS. Ich wyniki wskazały, że sadza w trakcie spalania wnika w głąb materiału, penetrując zarówno otwarte spękania prowadzące od powierzchni, jak i mikrospeknięcia w objętości matrycy cementowej. Zjawisko

and microcracks within the volume of the cement matrix. This phenomenon was confirmed by analyzing the intensity of the characteristic carbon lines in the EDS spectra, which showed a local increase in the content of this element not only within visible cracks (Photo 3b), but also throughout the entire near-surface degraded zone of the matrix (Photo 3c).

In addition to the analyses of the chemical composition of soot, in areas with high carbon concentration quantitative analyses were also performed on larger surfaces of the cement matrix (approximately 1.5 mm²). Normalized EDS spectra of the samples exposed to fire showed nearly twice the intensity of the carbon lines compared to the reference samples (Photo 3d). Such results may indicate the presence of carbon also within microcracks beyond the near-surface zone, which remain invisible in BSE imaging, and whose presence may have a significant impact on the mechanical and chemical properties of the cement matrix.

to potwierdzono na podstawie analizy intensywności linii charakterystycznych węgla w spektrach EDS, które wykazały lokalne zwiększenie zawartości tego pierwiastka nie tylko w obrębie widocznych spękań (fotografia 3b), lecz także w całej przypowierzchniowej strefie zdegradowanej matrycy (fotografia 3c).

Poza analizami składu chemicznego sadzy, w miejscach o dużej koncentracji węgla, wykonano również analizy ilościowe na większych powierzchniach matrycy cementowej (ok 1,5 mm²). Znormalizowane spektra EDS próbek ekspozowanych na działanie pożaru wykazały niemal dwukrotnie większą intensywność linii węgla w porównaniu z próbkami referencyjnymi (fotografia 3d). Takie wyniki mogą świadczyć o obecności węgla również w mikrospekaniach poza strefą przypowierzchniową, które pozostają niewidoczne w obrazach uzyskanych w trybie BSE, a ich obecność może mieć istotny wpływ na właściwości mechaniczne i chemiczne matrycy cementowej.

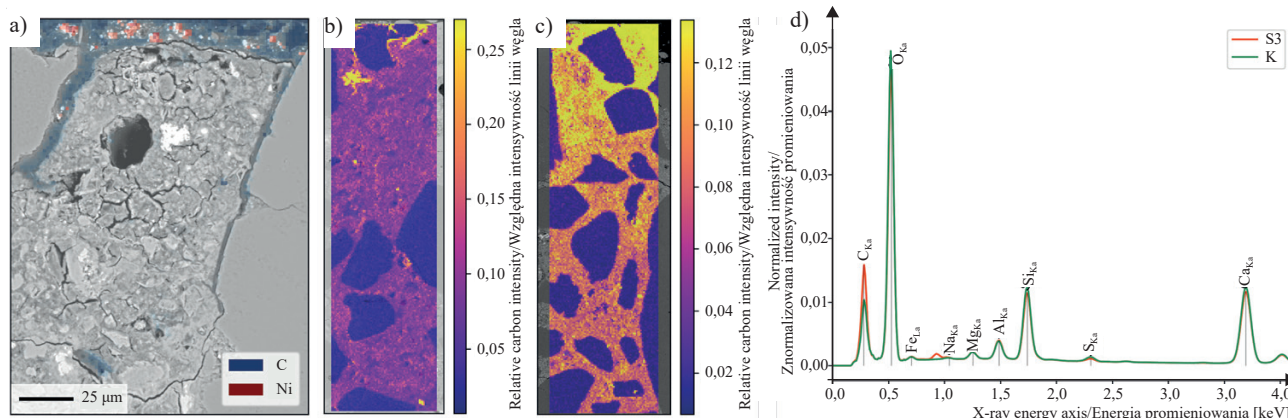


Photo 3. Penetration of carbon and combustion products into the cement matrix: a) soot layer with deposited metallic products of combustion; b) intensity map of characteristic carbon lines for the sample after one fire cycle; c) intensity map of characteristic carbon lines for the sample after two fire cycles showing an increase in carbon content in the degraded zone; d) spectra of characteristic line intensities observed in EDS analysis for the reference sample and the sample subjected to three fire cycles

Fot. 3. Wnikanie węgla oraz produktów spalania w matrycę cementową: a) warstwa sadzy wraz z osadzonymi metalicznymi produktami spalania; b) mapa intensywności linii charakterystycznych węgla dla próbki po jednym cyklu spalania; c) mapa intensywności linii charakterystycznych węgla w przypadku próbki po dwóch cyklach spalania z widocznym wzrostem zawartości węgla w strefie zdegradowanej; d) spektra intensywności linii charakterystycznych zaobserwowanych w analizie EDS w przypadku próbki referencyjnej oraz poddanej 3 cyklom pożaru

Summary

The impact of lithium-ion battery fires on cement composites, particularly in the context of the safety of road tunnel usage, remains insufficiently studied. Such events, due to their specific nature – rapid temperature rise and high maximum temperatures, as well as the presence of chemical compounds in the combustion products that differ from those in hydrocarbon fires – may affect the microstructure of concrete in a different way and consequently influence the performance of structures under fire conditions. At the same time, the share of electric vehicles in road traffic is steadily increasing, which translates into a growing potential threat to engineering structures. A lithium-ion battery fire has a significant effect on the microstructure of standard mortar. Changes in the microstructure of the samples tested are evident both in X-ray microtomography studies and in scanning electron microscopy imaging.

The formation of microcracks was identified, which gradually propagate with successive cycles of contact combustion – in the sample after one cycle they occur only in the near-

Podsumowanie

Wpływ pożarów akumulatorów litowo-jonowych na kompozyty cementowe, szczególnie w kontekście bezpieczeństwa użytkowania tuneli samochodowych, pozostaje w dużej mierze słabo zbadany. Zdarzenia tego typu, ze względu na specyfikę – szybkie tempo wzrostu temperatury i dużą jej wartość maksymalną, a także obecność związków chemicznych w produktach spalania innych niż w przypadku pożarów węglowodorów – mogą w inny sposób oddziaływać na mikrostrukturę betonu, a w konsekwencji wpływać na zachowanie konstrukcji w warunkach pożarowych. Jednocześnie udział pojazdów elektrycznych w ruchu lądowym systematycznie rośnie, co przekłada się na zwiększające się potencjalne zagrożenie konstrukcji inżynierskich.

Pożar akumulatora litowo-jonowego w istotny sposób wpływa na mikrostrukturę zaprawy normowej. Zarówno w badaniach mikrotomografii komputerowej, jak i w obrazowaniu skaningowym mikroskopem elektronowym widoczne są zmiany w mikrostrukturze badanych próbek. Zidentyfikowano powstawanie mikrorys, które wraz z kolejnymi cyklami spalania stykowego stopniowo propagują – w próbce po jednym cyklu występują wyłącznie



-surface layer, whereas in the sample after three cycles they already extend throughout its entire volume. It was also observed that in the case of the sample subjected to three combustion cycles, not only the cement matrix undergoes degradation, but cracking of sand grains also occurs. On the surfaces of the samples exposed to combustion products, a soot layer forms, composed mainly of carbon but also containing transition metals originating from the Li-ion battery. In the sample after one combustion cycle, this layer was found to be continuous and to partially protect the surface of the cement matrix against degradation (local cracks in the matrix do not occur in areas where the deposit layer remains uninterrupted). After subsequent fire cycles, however, this layer undergoes progressive destruction, and its further effect on protecting the mortar microstructure appears negligible.

In the tested mortar samples, in addition to the effects associated with temperature exposure, penetration of combustion products into the cement matrix was also observed. Large-diameter particles, such as metallic electrode components (Ni, Co, Mn), deposit on the sample surfaces and within larger cracks, while smaller particles (graphite, carbon soot) also penetrate into microcracks. It was observed that in samples exposed to a burning battery, the carbon content within the matrix increases, suggesting that carbon soot also infiltrates cracks smaller than those directly observable in BSE micrographs. A more detailed investigation of the changes occurring in the cement matrix and aggregate grains is necessary, particularly in the context of a potential reduction of their microscopic mechanical properties and, consequently, the impact on the macroscopic strength parameters of the mortar.

w warstwie przypowierzchniowej, natomiast w próbce po trzech cyklach obejmują już całą jej objętość. Zauważono również, że w przypadku próbki poddanej trzem cyklom spalania degradacji ulega nie tylko matryca cementowa, ale także dochodzi do pęknięcia ziaren piasku.

Na powierzchni próbek mających kontakt z produktami spalania tworzy się warstwa sadzy, złożona głównie z węgla, ale zawierająca również metale przejściowe pochodzące z akumulatora Li-ion. W przypadku próbki po jednym cyklu spalania zaobserwowano, że warstwa ta jest ciągła i częściowo chroni powierzchnię matrycy cementowej przed degradacją (lokalne spękania matrycy nie występują w miejscach, w których warstwa nalotu jest nieprzerwana). Po kolejnych cyklach pożaru warstwa ta ulega jednak stopniowemu zniszczeniu, a jej dalszy wpływ na ochronę mikrostruktury zaprawy wydaje się znikomy.

W badanych próbkach zaprawy zaobserwowano, oprócz efektów związanych z oddziaływaniem temperatury, wnikanie produktów spalania w głąb matrycy cementowej. Częstki o dużej średnicy, takie jak m.in. metaliczne składniki elektrod (Ni, Co, Mn) osadzają się na powierzchni próbek oraz wewnątrz większych spękań, a drobne cząstki (grafit, sadza węglowa) wnikają również w mikrospeknięcia. Zaobserwowano, że w próbkach mających kontakt z płonącym akumulatorem zwiększa się zawartość pierwiastkowa węgla w matrycy, co sugeruje, że sadza węglowa penetruje także spękania o rozmiarach niższych niż te bezpośrednio możliwe do zaobserwowania na mikrogramach BSE.

Konieczne jest bardziej szczegółowe rozpoznanie zmian zachodzących w matrycy cementowej oraz ziarnach kruszywa, w szczególności w kontekście potencjalnego spadku ich mikroskopowych właściwości mechanicznych oraz, co za tym idzie, wpływu na obserwowane makroskopowe parametry wytrzymałościowe zaprawy.

Received: 31.03.2025

Revised: 03.06.2025

Published: 19.09.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 31.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.06.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Bjørge NM, Hjelkrem OA, Babri S. Characterisation of Norwegian Battery Electric Vehicle Owners by Level of Adoption. *World Electr Veh J.* 2022; <https://doi.org/10.3390/WEVJ13080150>.
- [2] Figenbaum E, Assum T, Kolbenstvedt M. Electromobility in Norway: Experiences and Opportunities. *Res Transp Econ.* 2015; <https://doi.org/10.1016/J.RETREC.2015.06.004>.
- [3] Zhang Z, Dong H, Wang L, Wang Y, He X. Tracing Root Causes of Electric Vehicle Fires. *Energy Technol.* 2024; <https://doi.org/10.1002/ENTE.202400931>.
- [4] Sturm P et al. Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire Saf J.* 2022; <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2022.103695>.
- [5] Yan ZG, Zhu HH, Woody Ju J, Ding WQ. Full-scale fire tests of RC metro shield TBM tunnel linings. *Constr Build Mater.* 2012; <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.06.006>.
- [6] Park S, Oh H, Shin Y, Oh S. A case study on the fire damage of the underground box structures and its repair works. *Tunn Undergr Space Technol.* 2006; <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2005.12.042>.
- [7] Savov K, Lackner R, Mang HA. Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load. *Fire Saf J.* 2005; <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2005.07.004>.
- [8] Li Q, Gao X, Xu S, Peng Y, Fu Y. Microstructure and mechanical properties of high-toughness fiber-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures. *J Mater Civ Eng.* 2016; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001647](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001647).
- [9] Georgali B, Tsakiridis PE. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cem Concr Compos.* 2005; <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.02.022>.
- [10] Healy J, Atefi-Monfared K. Fire-induced damage in tunnels: Thermo-mechanical modeling incorporating support system and geological conditions. *Tunn Undergr Space Technol.* 2023; <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105027>.
- [11] Hunt IA, Patel Y, Szczygielski M, Kabacik L, Offer GJ. Lithium sulfur battery nail penetration test under load. *J Energy Storage.* 2015; <https://doi.org/10.1016/J.EST.2015.05.007>.
- [12] Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW. Practical cone-beam algorithm, *JOSA A.* 1984; <https://doi.org/10.1364/JOSA.1.000612>.
- [13] Rajczakowska M, Stefaniuk D, Łydzba D. Microstructure Characterization by Means of X-ray Micro-CT and Nanoindentation Measurements. *Stud Geotech Mech.* 2015; <https://doi.org/10.1515/SGEM-2015-0009>.