

dr inż. Damian Stefaniuk¹⁾

ORCID: 0000-0003-0078-192X

dr inż. Konrad J. Krakowiak²⁾

ORCID: 0000-0003-0374-9554

dr inż. Marcin Świtala^{3)*)}

ORCID: 0000-0002-4001-8948

dr inż. Danuta Beblacz³⁾

ORCID: 0000-0003-1895-7970

dr inż. Piotr Przybylski³⁾

ORCID: 0009-0004-7227-8711

DOI: 10.15199/33.2025.10.01

Abstract: Electrically conductive concrete (ECC) is an innovative cementitious composite. The principle of operation, conduction mechanisms, and the influence of conductive additives on mechanical and electrical parameters are discussed. Literature results indicate that the use of suitable conductive admixtures reduces the resistivity of such a concrete from 10^2 – $10^6 \Omega \cdot m$ to even below $10^{-1} \Omega \cdot m$ (ECC), enabling effective heat generation. Examples of laboratory studies, pilot projects, and real-world implementations are presented, taking into account performance efficiency, durability, and practical applicability under winter conditions. Special attention is given to the implementation potential of ECC in Poland. Key technological, organizational, and economic barriers to ECC deployment are also identified, along with suggested directions for future research. ECC is considered to have strong potential to enhance infrastructure resilience to extreme weather events and to reduce winter maintenance costs.

Keywords: electron-conductive concrete; ECC; multi-functional concrete; deicing; transport infrastructure; conductive admixtures.

In the context of intensifying climate change, the growing importance of infrastructure resilient to extreme weather events [1], and the rising costs of winter maintenance of roads and airports, there is an increasing need for engineering solutions that integrate structural functionality with the ability to actively respond to changing atmospheric conditions [2]. One of the most promising directions in this regard is electrically conductive concrete (ECC), which combines structural properties with additional functional capabilities [3, 4]. This material can simultaneously serve as a load-bearing component and as an active element of a heating system, enabling the conduction of electric current and the generation of heat distributed throughout its entire volume. The ability to produce heat without surface-mounted or embedded heating elements constitutes a significant advantage in terms of reducing energy losses and improving user safety.

In moderate climates, surface icing is a serious problem [5]. Conventional winter maintenance methods (snow removal,

¹⁾ Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology

²⁾ Civil and Environmental Engineering Department, Cullen College of Engineering, University of Houston

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów

*) Correspondence address: marcin.switala@ibdim.edu.pl

Electron-conductive concrete as a self-deicing system

Beton przewodzący prąd jako system samoodładzający

Streszczenie: Beton przewodzący prąd (ECC) to innowacyjny kompozyt cementowy. W artykule omówiono zasadę działania materiału, mechanizmy przewodnictwa oraz wpływ rodzaju domieszek przewodzących na parametry mechaniczne i elektryczne. Wyniki badań dostępnych w literaturze wskazują, że zastosowanie odpowiednich dodatków pozwala zmniejszyć rezystywność tradycyjnego betonu z 10^2 – $10^6 \Omega \cdot m$ do nawet $10^{-1} \Omega \cdot m$ (ECC), co umożliwia efektywne wydzielanie ciepła. Przedstawiono również przykłady badań, wdrożeń pilotażowych i rzeczywistych, uwzględniając efektywność działania, trwałość oraz potencjał praktycznego zastosowania w warunkach zimowych. Szczególną uwagę poświęcono potencjałowi wdrożeniowemu ECC w Polsce. Zidentyfikowano najważniejsze bariery technologiczne, organizacyjne i ekonomiczne wdrażania ECC oraz wskazano potencjalne kierunki dalszych badań. Ocenia się, że ECC umożliwia zwiększanie odporności infrastruktury na zjawiska ekstremalne oraz ograniczanie kosztów jej utrzymania w warunkach zimowych.

Słowa kluczowe: beton przewodzący prąd elektryczny; ECC; beton wielofunkcyjny; odładzanie; infrastruktura transportowa; dodatki przewodzące.

W warunkach nasilających się zmian klimatycznych, wzrostu znaczenia infrastruktury odpornej na ekstremalne zjawiska pogodowe [1] oraz zwiększających się kosztów zimowego utrzymania dróg i lotnisk, pojawia się potrzeba wdrażania rozwiązań inżynierskich, które łączą funkcjonalność konstrukcyjną z możliwością aktywnego reagowania na zmienne warunki atmosferyczne [2]. Jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju w tym zakresie jest beton przewodzący prąd (ECC), łączący właściwości konstrukcyjne z dodatkowymi funkcjami użytkowymi [3, 4]. Może on pełnić jednocześnie rolę elementu konstrukcyjnego i aktywnego komponentu systemu grzewczego, umożliwiając przewodzenie prądu elektrycznego i generowanie ciepła w sposób rozproszony w całej swojej objętości. Zdolność do wytwarzania ciepła bez użycia elementów grzewczych umieszczonych na powierzchni lub pod nią stanowi istotny atut w kontekście ograniczania strat energii i poprawy bezpieczeństwa użytkowników. W klimacie umiarkowanym oblodzenie nawierzchni jest poważnym problemem [5]. Tradycyjne metody zimowego utrzymania (odsnieżanie, stosowanie soli) są kosztowne i powodują degradację infrastruktury, środowiska oraz korozję pojazdów [6–8]. W związku z tym rozwój ECC

deicing salt application) are costly and contribute to infrastructure degradation, environmental damage, and vehicle corrosion [6–8]. Consequently, the development of ECC aligns with the pursuit of sustainable and low-emission technologies.

Traditional concrete is widely used in the construction of transportation infrastructure. Due to its very high resistivity, it exhibits minimal electrical conductivity. Advances in nanotechnology and materials engineering have enabled the development of cementitious composites with conductive additives that form three-dimensional conductive networks within the concrete matrix [9, 10]. Such modified materials not only preserve concrete's mechanical properties but also enable it to conduct electricity and generate heat in a controlled manner under an applied voltage. From this perspective, ECC can be applied as a construction material for road, bridge, and airport pavements, capable of self-deicing under winter conditions [11].

The article presents the operating principle of electrically conductive concrete as a self-deicing system, a review of available material technologies that enable electrical conductivity in concrete, selected research studies and pilot implementations worldwide, as well as an assessment of the feasibility of implementing this technology under Polish conditions.

Characteristics of Self-Deicing Concrete

ECC is based on the utilization of Joule's effect [12], i.e., it operates on the principle of heat generation resulting from the flow of electric current through a conductive material with sufficiently low resistivity. To achieve this, conductive additives must be incorporated into its structure, enabling the formation of so-called percolation pathways, three-dimensional conductive networks that allow the flow of electric charges [13]. The use of appropriate materials, such as carbon black, steel fibers, carbon fibers, carbon nanotubes, or graphene nanoplatelets, significantly reduces the resistivity of the cementitious composite. The parameters of conductive additives applied in ECC composites are presented in Table 1. With these additives, ECC can achieve resistivity values as low as $10^{-1} \Omega \cdot m$ [14]. In contrast, conventional Portland cement concrete without conductive admixtures typically exhibits resistivity in the range of 10^2 – $10^4 \Omega \cdot m$, and in the case of dry, high-density concretes, values may exceed $10^6 \Omega \cdot m$ [15].

The effectiveness of ECC depends on the percolation threshold, i.e., the minimum amount of additive required to form a conductive network and reduce resistivity to a level that enables heating [16]. The decisive factors are: the type and concentration of additives; their spatial distribution; and the orientation of conductive fibers relative to the direction of current flow. Under real conditions, the moisture content of concrete decreases its resistivity. In the case of ECC, this effect is marginal, since the flow of electric charge is localized within three-dimensional pathways formed by conductive additives [17].

The efficiency of the system depends not only on the type and amount of the conductive additive but also on the homogeneity of its distribution within the cement matrix, the degree of

wpisuje się w trend poszukiwania technologii zrównoważonych i niskoemisyjnych.

Tradycyjny beton jest powszechnie stosowany w budowie infrastruktury transportowej. Ze względu na bardzo dużą rezystywność, wykazuje minimalną zdolność przewodzenia prądu. Dzięki rozwojowi nanotechnologii i inżynierii materiałowej możliwe stało się opracowanie mieszanek cementowych z dodatkami przewodzącymi, które tworzą trójwymiarowe sieci przewodzące w strukturze betonu [9, 10]. Tak zmodyfikowany materiał nie tylko zachowuje właściwości mechaniczne betonu, ale również nabywa zdolność do przewodzenia prądu i generowania ciepła w kontrolowany sposób pod wpływem zewnętrznego potencjału. Z tej perspektywy, ECC znajduje zastosowanie m.in. jako materiał konstrukcyjny nawierzchni drogowych, mostowych oraz lotniskowych, zdolnych do samoczynnego odładzania w warunkach zimowych [11].

W artykule przedstawiono zasadę działania betonu przewodzącego prąd jako systemu samoodładzającego, przegląd dostępnych technologii materiałowych umożliwiających przewodnictwo elektryczne w betonie, wybrane badania i wdrożenia pilotażowe na świecie oraz ocenę możliwości implementacji tej technologii w warunkach polskich.

Charakterystyka betonu samoodładzającego

ECC bazuje na wykorzystaniu efektu Joule'a [12], tzn. działa na zasadzie wytwarzania ciepła w wyniku przepływu prądu przez materiał przewodzący o odpowiednio małej rezystywności. Konieczne jest wprowadzenie do jego struktury dodatków przewodzących, które umożliwiają powstanie tzw. ścieżek perkolacyjnych, czyli trójwymiarowych sieci przewodzących umożliwiających przepływ ładunków elektrycznych [13]. Zastosowanie odpowiednich materiałów, takich jak sadza techniczna, włókna stalowe, włókna węglowe, nanorurki węglowe lub nanopłytki grafenowe, pozwala na znaczne zmniejszenie rezystywności kompozytu cementowego. Parametry dodatków przewodzących prąd stosowanych w kompozytach ECC przedstawiono w tabeli 1. Dzięki nim ECC może osiągnąć wartość rezystywności o wartości nawet poniżej $10^{-1} \Omega \cdot m$ [14], podczas gdy w przypadku tradycyjnego betonu portlandzkiego bez dodatków przewodzących wynosi ona zwykle 10^2 – $10^4 \Omega \cdot m$, a betonów w stanie suchym i o zwiększonej gęstości może przekraczać $10^6 \Omega \cdot m$ [15].

Efektywność ECC zależy od progu perkolacyjnego, tzn. minimalnej ilości dodatku, który tworzy sieć przewodzącą i obniża rezystywność do poziomu umożliwiającego ogrzewanie [16]. Decydujące znaczenie mają: rodzaj i koncentracja dodatków; ich rozmieszczenie przestrzenne oraz orientacja włókien przewodzących względem kierunku przepływu prądu. W warunkach rzeczywistych, zawilgocenie betonu zmniejsza jego rezystywność. W przypadku ECC ten efekt jest marginalny, gdyż przepływ ładunku elektrycznego jest zlokalizowany w trójwymiarowych ścieżkach z dodatków przewodzących [17].

Efektywność działania systemu zależy nie tylko od typu i ilości dodatku przewodzącego, ale również od jednorodności jego rozmieszczenia w matrycy cementowej, stopnia hydratacji matrycy cementowej, zastosowanego napięcia oraz materiału wy-

Table 1. Properties of conductive additives used in ECC composites

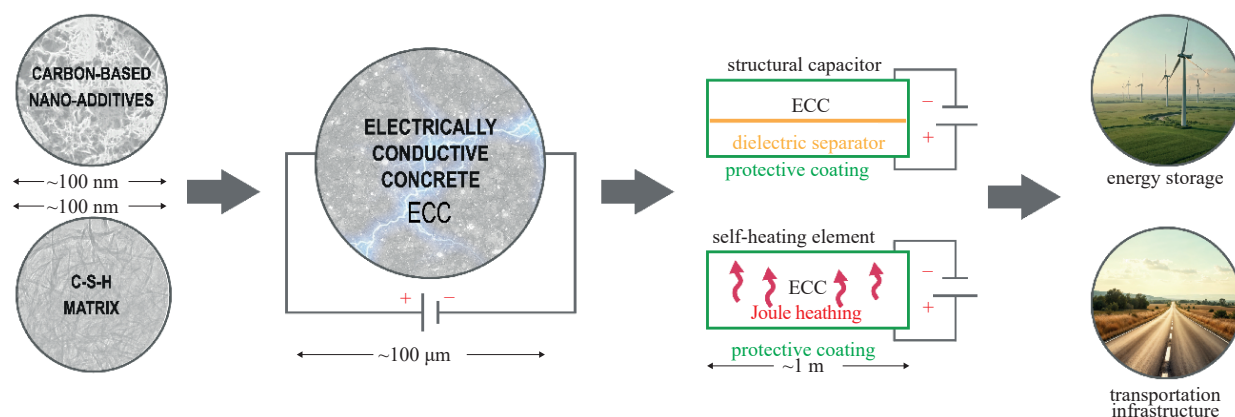
Tabela 1. Właściwości dodatków przewodzących prąd stosowanych w kompozytach ECC

Type of additive/ Rodzaj dodatku	Morphology/Form/ Postać	Density/ Gęstość [g/cm ³]	Specific surface area/ Powierzchnia właściwa [m ² /g]	Electrical conductivity/ Przewodność elektryczna (S/m)
Steel fibers/ Włókna stalowe	Short metallic fibers/ krótkie włókna metaliczne	~7,8	N/D (<<1)	~6×10 ⁶
Carbon fibers/ Włókna węglowe	Long graphite fibers/ długie włókna grafitowe	1,6–2,1	N/D (≈0,3)	~10 ⁴ –10 ⁵ (anisotropic)/(anizotropowe)
Carbon nanofibers/ Nanowłókna węglowe	“Whisker-like” fibrous form/ „wasy” włókienkowate	0,06/2,1 (apparent/true)/ (pozorna/rzeczywista)	13–1000	~10 ⁴
Carbon nanotubes/ Nanorurki węglowe	Nanotubes (1D fibers)/ nanorurki (włókna 1D)	0,17/2,1 (pozorna/ rzeczywista)	50–1315	~10 ⁵
Graphite powder/ Proszek grafitowy	Plate-like particles/ cząstki płytkowe	2,1–2,3	<5	~10 ³ (in-plane)/ (w płaszczyźnie)
Graphene nanoplatelets/ Nanopłytki grafenowe	Flat platelets/ płytki płaskie	~2,2	13–45	~10 ⁴ (in-plane)/ (w płaszczyźnie)
Carbon black (nanocarbon)/ Nanowęglowa sadza	Fine spherical particles/ drobne cząstki sferyczne	0,5–1,98	30–1307	~10 ² –10 ³

cement matrix hydration, the applied voltage, and the electrode material. Properly designed conductive concrete, supported by an appropriately adapted monitoring and control system, can de-ice its surface autonomously under winter conditions, eliminating the need for chemical agents or mechanical snow and ice removal [18].

As shown in Figure 1, the transition from a traditional cementitious matrix to an electrically conductive composite (ECC) involves a fundamental change in the mechanism of charge transport. In conventional Portland cement, conductivity is limited to the electrolyte filling the pore network in the cement paste. In contrast, the introduction of carbon nanofillers enables the formation of a percolation network that significantly increases conductivity throughout the material volume. Thus, ECC can function not only as a structural element but also as pavement with electric heating capability, opening new perspectives for applications in road infrastructure [19]. Electrically conductive concrete can also serve as an energy-storage medium (a supercapacitor).

korzystanego w elektrodach. Właściwie zaprojektowany beton przewodzący, wspomagany przez odpowiednio dostosowany system monitorująco-sterujący jest w stanie samodzielnie odładować swoją powierzchnię w warunkach zimowych, eliminując potrzebę stosowania środków chemicznych lub mechanicznego usuwania śniegu i lodu [18]. Jak pokazano na rysunku 1, przejście od tradycyjnej matrycy cementowej do kompozytu przewodzącego prąd (ECC) wiąże się z zasadniczą zmianą w mechanizmie transportu ładunku. W klasycznym cemencie portlandzkim przewodnictwo ogranicza się do elektrolitu wypełniającego sieć porów w zaczynie cementowym, natomiast wprowadzenie nanododatków węglowych umożliwia utworzenie sieci perkolacyjnej, która znacznie zwiększa przewodnictwo w całej objętości materiału. Dzięki temu ECC może pełnić funkcję nie tylko elementu konstrukcyjnego, lecz także nawierzchni z funkcją podgrzewania prądem elektrycznym, otwierając nowe perspektywy zastosowań w infrastrukturze drogowej [19]. Beton przewodzący prąd elektryczny może również pełnić funkcję magazynu energii elektrycznej (superkondensatora).

**Fig. 1. Conduction mechanism and potential applications of electrically conductive concrete (ECC)**

Rys. 1. Mechanizm przewodnictwa i potencjalne zastosowania betonu przewodzącego prąd (ECC)

Power Supply and Control Systems in ECC Technology

The effectiveness of self-deicing concrete pavements depends not only on the material properties of ECC but also on the quality and configuration of the power supply and control systems. In pilot implementations, including the Roca Spur Bridge in Nebraska (USA) and projects in Japan, alternating current (AC) in the range of 120–240 V was used, supplying concrete panels through electrode wires embedded in the mix or connected to built-in steel meshes [20].

In ECC systems, AC power supply has so far been the most frequently analyzed, which is associated with easier integration into the power grid and lower corrosion risk. However, data concerning direct current (DC) supply are also available in the literature. This solution requires a different electrode arrangement and carries the risk of accelerated ion migration and microstructural degradation. However, it represents an interesting direction for further research on optimizing power supply systems tailored to application-specificity and operational conditions. Studies indicate that the flow of direct current through cementitious materials initially leads to microstructural densification and a temporary improvement of mechanical properties, reduction of porosity, decrease in resistivity, and a reduction in long-term durability of the material [21]. Additionally, the resistivity of cement under DC voltage depends on curing age, water-to-cement ratio, and the presence of ions in the environment, which confirms the necessity of individual optimization of power supply systems [22].

In the case of a potential future application in Poland, it will be essential to develop universal, energy-efficient control systems that enable adaptation to local climatic conditions and integration with the energy infrastructure (e.g., photovoltaics and energy storage). The challenges include not only minimizing transmission losses but also ensuring user safety, system reliability in automatic operation mode, and ease of maintenance by service teams.

Examples of Research and Implementations

Examples of concrete used as a structural material capable of conducting energy are primarily found in international projects. Table 2 presents selected implementations, including full-scale realizations, pilot tests, and laboratory studies. The applied solutions include, among others: heating concrete used for de-icing road and airport pavements, cementitious composites with thermoelectric properties, and intelligent pavements with self-diagnostic functions. These projects are carried out by research institutions and international consortia, mainly in the United States and East Asia.

In the analyzed cases, energy-conducting concrete is used primarily in transportation infrastructure, serving both heating functions and enabling the generation of electrical energy from captured thermal energy. The successful implementation at the Roca Spur Bridge demonstrated that ECC can effectively operate as a de-icing system for bridge decks under operational conditions. These experiences have become a point of reference for further research and investment in this field,

Systemy zasilania i sterowania w technologii ECC

Skuteczność działania betonowych nawierzchni samoodładzających zależy nie tylko od właściwości materiałowych ECC, ale również od jakości i konfiguracji systemów zasilania oraz automatyki sterującej. W testowanych wdrożeniach, m.in. na moście Roca Spur w Nebrasce oraz w projektach w Japonii, wykorzystywano napięcie przemienné (AC) w zakresie 120–240 V, zasilające betonowe panele przez przewody elektrody zatopione w mieszance lub przyłączone do wbudowanych siatek stalowych [20].

W systemach ECC dotychczas najczęściej analizowano zasilanie prądem zmiennym (AC), co związane jest z łatwiejszą integracją z siecią elektroenergetyczną oraz mniejszym ryzykiem korozyjnym. W literaturze dostępne są również dane dotyczące zasilania prądem stałym (DC). Rozwiązanie to wymaga odmiennego rozmieszczenia elektrod i wiąże się z ryzykiem przyspieszonej migracji jonów oraz degradacji mikrostruktury, ale stanowi interesujący kierunek dalszych badań nad optymalizacją układów zasilania w zależności od specyfiki aplikacji i warunków eksploatacyjnych. Badania wskazują, że przepływ prądu stałego przez materiały cementowe początkowo prowadzi do zagęszczenia mikrostruktury i chwilowej poprawy właściwości mechanicznych, a w dłuższej perspektywie sprzyja rozwojowi porowatości, spadkowi rezystywności oraz zmniejszaniu trwałości materiału [21]. Dodatkowo rezystywność cementu pod napięciem DC zależy od wieku dojrzewania, stosunku woda-cement oraz obecności jonów w środowisku, co potwierdza konieczność indywidualnej optymalizacji systemów zasilania [22].

W przypadku przyszłego zastosowania w Polsce istotne będzie opracowanie uniwersalnych i energooszczędnych układów sterowania, które umożliwią adaptację do lokalnych warunków klimatycznych oraz integrację z infrastrukturą energetyczną (np. fotowoltaika, magazyny energii). Wyzwania obejmują nie tylko minimalizację strat przesyłowych, ale również zapewnienie bezpieczeństwa użytkowników, niezawodności systemów w trybie pracy automatycznej oraz łatwości obsługi przez służby utrzymaniowe.

Przykłady badań i wdrożeń

Przykłady zastosowania betonu jako materiału konstrukcyjnego przewodzącego energię są dostępne przede wszystkim w projektach międzynarodowych. W tabeli 2 zestawiono wybrane wdrożenia obejmujące zarówno realizacje pełnoskalowe, jak i testy pilotażowe oraz badania laboratoryjne. Zastosowane rozwiązania obejmują m.in.: beton grzewczy wykorzystywany do odładzania nawierzchni drogowych i lotniskowych, kompozyty cementowe o właściwościach termoelektrycznych oraz inteligentne nawierzchnie z funkcjami samodiagnozy. Projekty te są realizowane przez instytucje badawcze i konsorcja międzynarodowe, głównie w Stanach Zjednoczonych oraz Azji Wschodniej.

W analizowanych przypadkach beton przewodzący energię znajduje zastosowanie głównie w infrastrukturze transportowej, pełniąc funkcje grzewcze oraz umożliwiające wytwarza-

Table 2. Characteristics of selected projects using ECC [9, 10, 19, 20, 23, 26÷29]

Tabela 2. Charakterystyka wybranych projektów wykorzystujących ECC [9, 10, 19, 20, 23, 26÷29]

Location/ Lokalizacja	Institution/ Instytucja	Project Description/ Opis projektu	Technology/Material/ Technologia/Materiał	Objective/ Cel
Nebraska (USA)	Uniwersytet Nebraska–Lincoln	demonstration project – Roca Spur Bridge/ projekt demonstracyjny mostu Roca Spur	steel fibers, steel shavings, carbon-based fillers/ włókna stalowe, wióry stalowe i wypełniacze na bazie węgla	bridge deck pavement de-icing/ odladzanie nawierzchni mostu
Ames (USA)	Iowa State University	full-scale ECON HPS system on road pavements/ pełnoskalowy system ECON HPS na nawierzchniach drogowych	conductive concrete with steel electrodes, PLC control/ beton przewodzący z elektrodami stalowymi, sterowanie PLC	effective de-icing, safety improvement/ skuteczne odladzanie, poprawa bezpieczeństwa
Des Moines International Airport (USA)	Iowa State University	test ECON HPS slabs in airport infrastructure/ testowe płyty ECON HPS w infrastrukturze lotniskowej	concrete with temperature and current sensors/ beton z czujnikami temperatury i prądu	evaluation of heating efficiency/ ocena efektywności grzewczej
Gyeonggi (Korea Pld.)	Hankyong National University	cement composites in cold climates/ kompozyty cementowe w klimacie zimnym	carbon fibers, CNT, CNF, graphite/ włókna węglowe, CNT, CNF, grafit	de-icing, accelerated concrete curing/ odladzanie, przyspieszone dojrzewanie betonu
Arlington, Texas (USA)	University of Texas at Arlington	TE-CO ₂ NCRETE project – thermoelectric concrete/ projekt TE-CO ₂ NCRETE – beton termoelektryczny	concrete with CNT and graphene/ beton z CNT i grafenem	thermal-to-electric energy conversion, CO ₂ capture from environment/ konwersja energii cieplnej, wychwyt CO ₂ z otoczenia
Cambridge, Massachusetts (USA)/Fukushima (Japonia)	MIT in collaboration with a Japanese consortium led by Aizawa Concrete Corp. MIT we współpracy z konsorcjum w Japoni na czele z Aizawa Concrete Corp.	ec ³ hub project – concrete as supercapacitor/ projekt ec ³ hub – beton jako superkondensator	concrete with conductive carbon black/ beton z dodatkiem sadzy przewodzącej (carbon black)	energy storage, active de-icing/ magazynowanie energii, aktywne odladzanie

contributing to the development of ECC applications in other areas of transportation infrastructure, the collected data demonstrated that electrically conductive concrete generated an average of 500 W/m², which allowed for an increase in slab temperature of approximately 9°C compared to the ambient temperature, with an average operating cost of around USD 250 per snowfall event.

Another example of a successful ECC application is the ECON HPS project conducted by Iowa State University, which developed and implemented full-scale heated pavements. Research results indicate that these systems effectively de-ice parking and airport surfaces, thereby enhancing user safety and reducing the use of chemical agents. An analysis of the documentation and publications related to the ECON HPS project shows that the construction process of the heated pavement proceeded in stages, combining traditional concrete techniques with the integration of conductive elements [22, 30]. As illustrated in Figure 2, a Portland cement concrete layer with electrodes and cable channels was placed, followed by the connection of the electrical installation. On top, the ECON composite was compacted and treated with a curing compound, resulting in a conductive pavement capable of generating heat.

nie energii elektrycznej z pozyskanej energii cieplnej. Udane wdrożenie na moście Roca Spur pokazało, że ECC może skutecznie pełnić funkcję systemu odladzania nawierzchni mostowych w warunkach eksploatacyjnych. Doświadczenia te stały się punktem odniesienia do dalszych badań i inwestycji w tej dziedzinie, przyczyniając się do rozwoju zastosowań ECC w innych obszarach infrastruktury transportowej. Zebrane dane wykazały, że beton przewodzący prąd generował średnio 500 W/m², co pozwalało na zwiększenie temperatury płyty o ok. 9°C w porównaniu z temperaturą otoczenia, przy średnim koszcie eksploatacji ok. 250 USD na jeden epizod opadów śniegu.

Kolejnym przykładem skutecznego zastosowania ECC jest projekt ECON HPS realizowany przez Iowa State University, w ramach którego opracowano i wdrożono pełnoskalowe nawierzchnie grzewcze. Wyniki badań wskazują, że systemy te skutecznie odladzają powierzchnie parkingowe i lotniskowe, zwiększając bezpieczeństwo użytkowników i ograniczając użycie środków chemicznych. Analiza dokumentacji i publikacji dotyczących projektu ECON HPS wskazuje, że proces budowy nawierzchni grzewczej przebiegał etapami, które łączyły tradycyjne techniki betonowe z integracją elementów przewodzących prąd [22, 30]. Jak pokazano na rysunku 2,

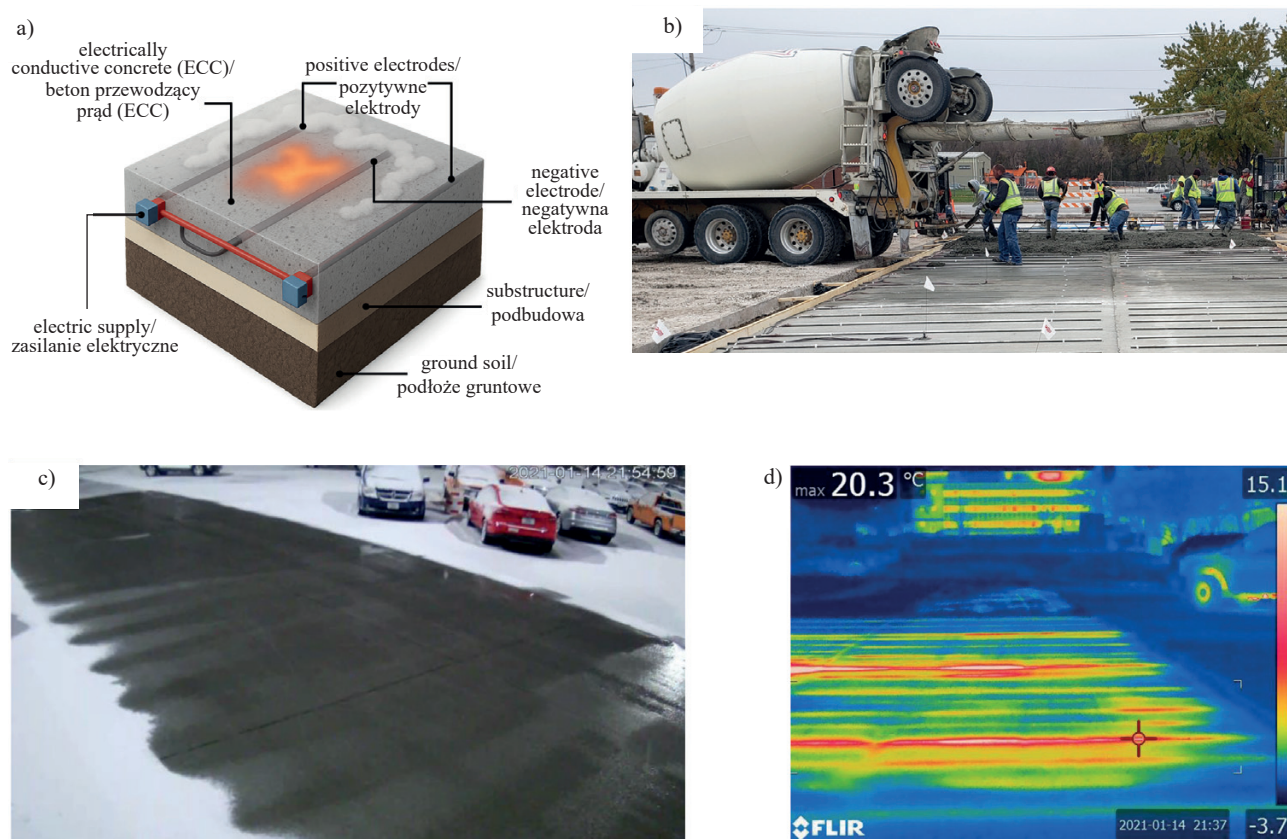


Fig. 2. Schematic of a deicing system ECON HPS based on electrically conductive concrete (ECC) with powered electrodes (a); field-scale construction of an ECC pavement (b); surface view of the concrete during deicing test under winter conditions (c); thermographic image of the ECC surface showing uniform slab heating (d)

Source: Institute for Transportation, used with permission [20]

Rys. 2. Schemat systemu odładzającego ECON HPS z betonu przewodzącego prąd (ECC) z elektrodami zasilanymi elektrycznie (a); wykonanie nawierzchni z ECC w skali rzeczywistej (b); widok powierzchni betonu podczas testu odładzania w warunkach zimowych (c); termograficzny obraz powierzchni ECC pokazujący równomierne nagrzewanie się płyty (d) Źródło: Institute for Transportation, użyto za zgodą [20]

In South Korea, research is advancing on cement composites incorporating carbon fibers and graphite [27, 28]. These materials are able to heat under electrical current and efficiently convert electrical energy into thermal energy. The main areas of application include both de-icing and accelerated curing of concrete under winter conditions.

A novel direction involves the design of concretes that not only generate electricity from the temperature gradient between the concrete and the environment, conducted within the cement matrix via carbon nanotubes, but also capture carbon dioxide from the air. Such solutions are being tested, among others, within the TE-CO₂NCRETE project at the University of Texas at Arlington [29], which combines advanced material properties with sustainable development goals.

Finally, it is worth mentioning the MIT ec³ hub project, carried out by the Massachusetts Institute of Technology in collaboration with a Japanese consortium led by Aizawa Concrete. This significant initiative aims to develop conductive concrete that – in addition to functioning as an active pavement de-icing system – may also serve simultaneously, or separately, as a supercapacitor, i.e., store electrical energy [19]. Technologies of this type may also find applications in Poland, for instance, on road sections particularly exposed to icing or in modern urban energy management systems.

ułożono warstwę betonu portlandzkiego z elektrodami i kanałami przewodów, a następnie podłączono instalację elektryczną. Na wierzchu zagęszczono kompozyt i zabezpieczono go środkiem pielęgnacyjnym, uzyskując nawierzchnię przewodzącą prąd i generującą ciepło.

W Korei Południowej rozwija się technologia kompozytów cementowych z dodatkiem włókien węglowych i grafitu. Materiały te potrafią podgrzewać się prądem i efektywnie zamieniać energię elektryczną na ciepłą. Główne obszary zastosowania obejmują zarówno odładzanie, jak i przyspieszone dojrzewanie betonu w warunkach zimowych [27, 28].

Nowym kierunkiem jest projektowanie betonów, które nie tylko generują prąd z różnicy temperatur między betonem a otoczeniem, przewodzony w matrycy cementowej, wykorzystując efekt Seebecka, przez nanorurki węglowe, ale również wychwytyują dwutlenek węgla z powietrza. Takie rozwiązania są testowane m.in. w ramach projektu TE-CO₂NCRETE realizowanego na University of Texas w Arlington, który łączy zaawansowane właściwości materiałowe z celami zrównoważonego rozwoju [29].

Warto również wspomnieć o projekcie MIT ec³ hub, realizowanym przez Massachusetts Institute of Technology we współpracy z konsorcjum w Japonii, na którego czele stoi Aizawa Concrete. Celem przedsięwzięcia jest opraco-

Implementation Potential in Poland

Due to frequent snowfall and icing, Poland requires self-de-icing technologies, particularly at intersections, bridges, overpasses, bus stops, and airport runways. ECC can improve safety and reduce winter maintenance costs in such locations. In the 2024/2025 season, expenditures for national roads exceeded PLN 631 million; in Warsaw alone, PLN 34.5 million (an average of PLN 22,965/km); and at airports, they reached up to PLN 20 million annually [31–33].

The scale of these expenditures justifies the search for alternative solutions that reduce the consumption of chemical de-icing agents and mechanical energy. ECC, when applied selectively – for example, on bridges, interchanges, roundabouts, expressway sections, or airport infrastructure – can significantly reduce demand for traditional de-icing methods. In the longer term, ECC may therefore substantially contribute to reducing operational costs, limiting environmental damage, and increasing the availability and safety of infrastructure under winter conditions.

It appears that, under Polish climatic conditions, the greatest potential lies in local heating systems that can be selectively activated, for example, on hazardous curves, at viaduct exits, or in the vicinity of pedestrian crossings. The possibility of integrating ECC with renewable energy sources (RES) opens additional opportunities for this technology in energy self-sufficient models, e.g., in combination with photovoltaic installations located within the roadway corridor or alongside auxiliary infrastructure. ECC technologies may also become part of a broader *smart city* approach, integrating safety, monitoring, and weather-adaptive functions into transport infrastructure [34]. However, this requires interdisciplinary cooperation between research units, local governments, and road network operators.

Potential pilot implementation sites for de-icing systems include airport aprons and taxiways, as well as road interchanges and roundabouts in metropolitan areas prone to black ice formation. ECC could also be applied in modern multimodal terminals and on bridges along expressways, where low temperatures and humidity have particularly severe impacts on user safety.

The existing research and development facilities in Poland in the fields of concrete technology, conductive materials, and control systems enable comprehensive studies and validation of ECC adapted to domestic conditions. Research units and industry institutes have experience in the design, testing, and implementation of linear infrastructure solutions, which constitutes an advantage in preparing pilot ECC installations.

An additional factor supporting ECC implementation is the growing interest in infrastructure resilience to climate change, as reflected in the *Sustainable Transport Development Strategy until 2030* [35] and the *Polish Energy Policy until 2040* [36]. ECC directly contributes to the objectives of these documents: it enables CO₂ emission reduction (lower consumption of salt and chemicals), supports the development of renewable energy sources (possibility of supply from photovoltaics and energy storage systems), and enhances infrastructure adaptability by mitigating the impacts of extreme weather events.

wanie betonu przewodzącego, który – poza funkcją aktywnego odładzania nawierzchni – może pełnić także rolę superkondensatora, tj. magazynować energię elektryczną [19]. Technologie tego typu mogą znaleźć zastosowanie również w Polsce, np. na odcinkach dróg szczególnie narażonych na oblodzenia lub w nowoczesnych systemach zarządzania energią w miastach.

Potencjał wdrożeniowy w Polsce

Ze względu na częste opady śniegu i oblodzenia, Polska potrzebuje technologii samoodładzających, szczególnie na skrzyżowaniach, mostach, wiaduktach, przystankach i pasach startowych. ECC może poprawić bezpieczeństwo i obniżyć koszty ich zimowego utrzymania. W sezonie 2024/2025 wydatki na drogi krajowe przekroczyły 631 mln zł, w Warszawie 34,5 mln zł (średnio 22 965 zł/km), a w portach lotniczych sięgały nawet 20 mln zł rocznie [28÷33].

Skala tych wydatków uzasadnia poszukiwanie alternatywnych rozwiązań ograniczających zużycie środków do zimowego utrzymania i energii mechanicznej. ECC, stosowany punktowo, np. na mostach, węzłach, rondach, odcinkach ekspresowych czy infrastruktury portów lotniczych, może realnie zmniejszyć zapotrzebowanie na tradycyjne środki odładzające. W dłuższym okresie ECC może zatem istotnie przyczynić się do zmniejszenia kosztów operacyjnych, redukcji szkód środowiskowych oraz zwiększenia dostępności i bezpieczeństwa infrastruktury w warunkach zimowych.

Wydaje się, że w polskich warunkach klimatycznych największy potencjał mają lokalne systemy grzewcze, które mogą być aktywowane selektywnie, np. na niebezpiecznych łukach, zjazdach z wiaduktów czy w okolicach przejść dla pieszych. Możliwość integracji ECC z odnawialnymi źródłami energii (OZE) otwiera dodatkowe perspektywy wykorzystania tej technologii w modelach energetycznie samowystarczalnych, np. w połączeniu z instalacjami fotowoltaicznymi zlokalizowanymi w pasie drogowym lub przy infrastrukturze towarzyszącej. Technologie ECC mogą być też częścią szerszego podejścia tzw. *smart city*, integrując funkcje bezpieczeństwa, monitoringu i adaptacji do pogody w infrastrukturze transportowej [34]. Wymaga to jednak interdyscyplinarnej współpracy jednostek badawczych, samorządów i gestorów sieci drogowych.

Przykładowymi lokalizacjami pilotażowych wdrożeń systemów odładzających mogłyby być nawierzchnie postojowe i drogi kołowania w portach lotniczych, a także węzły drogowe i ronda w aglomeracjach narażonych na występowanie gołoledzi. ECC może również znaleźć zastosowanie w nowoczesnych terminalach multimodalnych oraz na mostach w ciągach dróg ekspresowych, gdzie niskie temperatury i wilgotność szczególnie intensywnie wpływają na bezpieczeństwo użytkowników.

Istniejące w Polsce zaplecze badawczo-rozwojowe w dziedzinie technologii betonu, materiałów przewodzących oraz układów sterowania umożliwia przeprowadzenie kompleksowych badań i walidacji ECC, dostosowanych do warunków krajowych. Jednostki badawcze oraz instytuty branżowe mają

Implementation Barriers

Despite promising research results and pilot tests, implementing ECC in Poland may be hampered by numerous technological, organizational, economic, and energy-related barriers. The most important challenges include, among others, the high cost of conductive additives, the lack of technical standards and certification systems, limited contractor experience, and difficulties in integrating with the existing energy infrastructure. Another significant issue remains the uncertainty of long-term operational costs and the need to develop appropriate financing models. A detailed review of implementation barriers is presented in Table 3.

Summary

This article serves as a brief technological review and is based on an analysis of the relevant literature, as well as research and implementation, indicating that ECC opens new perspectives for adaptive road and airport infrastructure, particularly in the field of automatic pavement de-icing. On this basis, the following conclusions and recommendations can be formulated:

Material efficiency: conductive additives (e.g., steel fibers, carbon fibers, CNTs, graphite, carbon black) enable the reduction of the resistivity of conventional concrete from $10^2\text{--}10^6\ \Omega\cdot\text{m}$ to even below $10^{-1}\ \Omega\cdot\text{m}$, which allows for effective self-deicing of surfaces.

doświadczenie w projektowaniu, testowaniu i wdrażaniu rozwiązań infrastruktury liniowej, co stanowi atut w kontekście przygotowania pilotażowych instalacji ECC.

Dodatkowym czynnikiem wspierającym wdrażanie ECC jest rosnące zainteresowanie odpornością infrastruktury na zmiany klimatu, co znajduje odzwierciedlenie w *Strategii Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku* [35] oraz *Polityce Energetycznej Polski do 2040 roku* [36]. ECC bezpośrednio wpisuje się w cele tych dokumentów: umożliwia redukcję emisji CO₂ (mniejsze zużycie soli i chemikaliów), wspiera rozwój odnawialnych źródeł energii (możliwość zasilania z fotowoltaiki i magazynów energii) oraz zwiększa adaptacyjność infrastruktury przez ograniczenie skutków ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Barier implementacyjne

Mimo obiecujących wyników badań i testów pilotażowych, wdrożenie ECC w Polsce wiąże się z wieloma barierami natury technologicznej, organizacyjnej, ekonomicznej i energetycznej. Do najważniejszych wyzwań należą m.in. wysokie koszty dodatków przewodzących, brak norm technicznych i systemu certyfikacji, ograniczone doświadczenie wykonawców, a także trudności w integracji z istniejącą infrastrukturą energetyczną. Istotnym problemem pozostaje również niepewność długookresowych kosztów eksploatacyjnych oraz konieczność opracowania odpowiednich modeli finansowania. Szczegółowy przegląd barier wdrożeniowych przedstawiono w tabeli 3.

Table 3. Implementation barriers to ECC deployment in Poland
Tabela 3. Bariery implementacyjne wdrażania ECC w Polsce

Category/ Kategoria	Barriers/Bariery
Technological/ Technologiczne	high costs of conductive additives, lack of design and construction standards for ECC pavements, uncertainty regarding durability and resistance to freeze–thaw cycles and other pavement degradation mechanisms/ duże koszty dodatków przewodzących, brak norm projektowo-wykonawczych dotyczących nawierzchni ECC, niepewność trwałości i odporności na cykle zamrażania/rozmarzania i inne mechanizmy degradacji nawierzchni betonowych
Organizational/ Organizacyjne	absence of a material certification system, insufficient training of construction personnel, lack of standardized maintenance and operation procedures/ brak systemu certyfikacji materiałów, niewystarczające przeszkolenie kadr wykonawczych, brak standardowych procedur utrzymania i eksploatacji
Economic/ Ekonomiczne	high investment costs (CAPEX), uncertainty of long-term operational costs (OPEX), need to develop financing models, e.g., public–private partnerships/ duże koszty inwestycyjne (CAPEX), niepewność długookresowych kosztów eksploatacyjnych (OPEX), konieczność opracowania modeli finansowania, np. partnerstwa publiczno-prywatnego
Energy-related/ Energetyczne	integration with the power grid, ensuring a stable energy supply, minimization of transmission losses/ integracja z siecią energetyczną, zapewnienie stabilnych dostaw energii, minimalizacja strat przesyłowych, potrzeba integracji z OZE i magazynami energii

Podsumowanie

Zaprezentowany artykuł ma charakter przeglądowy i bazuje na analizie literatury przedmiotu oraz badań i wdrożeń, które wskazują, że ECC otwiera nowe perspektywy adaptacyjnej infrastruktury drogowej i lotniskowej, szczególnie w zakresie automatycznego odładzania nawierzchni. Na tej podstawie można sformułować następujące wnioski i rekomendacje:

Efektywność materiałowa: dodatki przewodzące (np. włókna stalowe, włókna węglowe, CNT, grafit, sadza) umożliwiają zmniejszenie rezystywności tradycyjnego betonu z $10^2\text{--}10^6\ \Omega\cdot\text{m}$ do nawet poniżej $10^{-1}\ \Omega\cdot\text{m}$, co pozwala na skuteczne samoodładzanie powierzchni.

Wdrożenia zagraniczne: doświadczenia z USA, Japonii i Korei Południowej potwierdzają praktyczną skuteczność ECC w odładzaniu, przyspieszonym dojrzewaniu betonu oraz wykorzystaniu właściwości termoelektrycznych.

Potencjał w Polsce: duże koszty zimowego utrzymania (np. ponad 631 mln zł w sezonie 2024/2025 na drogach krajowych) uzasadniają realizację programu pilotażowego obejmującego stanowiska

Foreign implementations: experiences from the USA, Japan, and South Korea confirm the practical effectiveness of ECC in de-icing, accelerated concrete curing, and the utilization of thermoelectric properties.

Potential in Poland: the high costs of winter maintenance (e.g., more than PLN 631 million in the 2024/2025 season for national roads) justify implementing a pilot program covering test sites, durability analyses, and energy efficiency studies.

Further research and implementation activities: it is necessary to develop national design and construction guidelines, conduct life-cycle cost analysis (LCCA), monitor CO₂ emissions, and integrate ECC with renewable energy sources.

Implementation barriers: the challenges remain high costs of conductive additives, the lack of standards and certification, insufficient contractor preparedness, and uncertainty regarding long-term maintenance costs.

Development perspectives: in the longer term, ECC may become an integral part of intelligent *smart city* systems, integrating safety, energy management, and weather adaptation in transport infrastructure. The development of ECC requires interdisciplinary collaboration among materials science, electrical engineering, geotechnics, and civil engineering. Only such an approach will enable the effective implementation of this technology in engineering practice and its full utilization under Polish conditions.

This article does not exhaust the complexity of ECC applications but serves as a starting point for further discussion and the search for optimal technological and organizational solutions. What is primarily needed are detailed studies on the durability of systems, energy efficiency, and the integration of ECC with other intelligent infrastructure technologies.

testowe, analizy trwałości oraz badania efektywności energetycznej.

Dalsze działania badawczo-wdrożeniowe: konieczne jest opracowanie krajowych wytycznych projektowo-wykonawczych, analiza kosztów cyklu życia (LCCA), monitorowanie emisji CO₂ oraz integracja ECC z odnawialnymi źródłami energii.

Bariera implementacyjna: wyzwaniem pozostają duże koszty dodatków, brak norm i certyfikacji, niewystarczające przygotowanie wykonawców oraz niepewność długookresowych kosztów utrzymania.

Perspektywy rozwoju: w dłuższym okresie ECC może stać się częścią inteligentnych systemów *smart city*, integrując bezpieczeństwo, zarządzanie energią i adaptację do warunków pogodowych w infrastrukturze transportowej. Rozwój ECC wymaga interdyscyplinarnej współpracy materiałoznawstwa, elektrotechniki, geotechniki i inżynierii lądowej. Tylko takie podejście umożliwi efektywne wdrożenie tej technologii w praktyce inżynierskiej oraz jej pełne wykorzystanie w warunkach polskich.

Artykuł nie wyczerpuje złożonej problematyki zastosowania ECC, ale stanowi punkt wyjścia do dalszej dyskusji i poszukiwań optymalnych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych. Potrzebne są przede wszystkim szczegółowe badania dotyczące trwałości systemów, efektywności energetycznej oraz integracji ECC z innymi inteligentnymi technologiami infrastrukturalnymi.

Received: 27.05.2025

Revised: 14.07.2025

Published: 23.10.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 27.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.07.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literatura

- [1] Wan C, Yang Z, Zhang D, Yan X, Fan S. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transport reviews*. 2018; <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1383532>.
- [2] Das JT, Banerjee A, Puppala AJ, Chakraborty S. Sustainability and resilience in pavement infrastructure: a unified assessment framework. *Environmental Geotechnics*. 2022; <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00035>.
- [3] Ding S, Dong S, Wang X, Ding S, Han B, Ou J. (2023). Self-heating ultra-high performance concrete with stainless steel wires for active deicing and snow-melting of transportation infrastructures. *Cement and Concrete Composites*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105005>.
- [4] Król M. Łatwe technologie na trudne czasy – metody wzmacniania podłoża w budownictwie infrastrukturalnym. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*. 2023; 2 (107): 36–38.
- [5] Anis M, Abdel-Raheem M. A review of electrically conductive cement concrete pavement for sustainable snow-removal and deicing: road safety in cold regions. *Transportation Research Record*. 2024; <https://doi.org/10.1177/0361198123122521>.
- [6] Moman, A, Nassiri, S. Smart and environmentally friendly winter maintenance solutions for safe winter mobility: Use of a microwave method to prototype electrically conductive concrete (Final Project Report No. 2018-S-

-WSU-3). Pacific Northwest Transportation Consortium (PacTrans), Washington State University.

[7] Beblacz D. Zimowe utrzymanie nawierzchni betonowych. *Budownictwo, Technologie, Architektura*. 2008; 1: 45-47.

[8] Reiterman P, Keppert M. Effect of various de-icers containing chloride ions on scaling resistance and chloride penetration depth of highway concrete. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*. 2020; <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.003>.

[9] Chanut N, Stefaniuk D, Weaver JC, Zhu Y, Shao-Horn Y, Masic A, Ulm FJ. Carbon–cement supercapacitors as a scalable bulk energy storage solution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023; <https://doi.org/10.1073/pnas.2304318120>.

[10] Han B, Zhang L, Ou J. Smart and multifunctional concrete toward sustainable infrastructures (Vol. 399). Singapore: Springer; 2017.

[11] Oumer A, Lee C, Ahn E, Gwon S. Review on self-heating electrically conductive cementitious composites: focus on deicing and electrical curing. *Construction and Building Materials*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137232>.

[12] Wang J, An J, Li Y, Xiang Y, Xiao Q, Tang Z, Long G. Influencing factors of the temperature rise of direct electric curing concrete and its effect on

concrete properties. *Construction and Building Materials*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137110>

[13] Fulham-Lebrasseur R, Sorelli L, Conciatori D. Development of electrically conductive concrete and mortars with hybrid conductive inclusions. *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117470>.

[14] Soliman NA, Chanut N, Deman V, Lallas Z, Ulm FJ. Electric energy dissipation and electric tortuosity in electron conductive cement-based materials. *Physical Review Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.125401>

[15] Azarsa P, Gupta, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017; <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>

[16] Wen S, Chung DDL. Double percolation in the electrical conduction in carbon fiber reinforced cement-based materials. *Carbon*. 2007; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.09.031>.

[17] Ashby MF, Shercliff H, Cebon D. *Materials: Engineering, science, processing and design* (4th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann; 2018.

[18] Abdulla H. Design, construction, and performance of heated concrete pavements system (Doctoral dissertation, Iowa State University; 2018).

[19] Stefaniuk D, Weaver JC, Admir Masic A, Ulm FJ. Next-generation concrete: Combining load bearing and energy storage solutions; <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.mit.edu/dist/c/478/files/2024/09/ec%5E3-Overview.pdf>

[20] Malakooti A, Sadati S, Ceylan H, Kim S, Cetin KS, Taylor PC, Mina M, Cetin B, Theh WS. Self-Heating Electrically Conductive Concrete Demonstration Project. Institute for Transportation, Ames, IA; 2021.

[21] Susanto A, Koleva DA, Copuroglu O, van Beek K, van Breugel K. (2013). Mechanical, electrical and microstructural properties of cement-based materials in conditions of stray current flow. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2013; <https://doi.org/10.3151/jact.11.119>

[22] Peng Y, Gong F, Wang Z, Zhao Y, Jin W, Meng T, Maekawa K.. Experimental study on time-dependent DC resistivity of cement-based material considering microstructure and ion concentration. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129830>

[23] Malakooti A, Theh WS, Sadati SS, Ceylan H, Kim S, Mina M, Taylor PC. Design and full-scale implementation of the largest operational electrically

conductive concrete heated pavement system. *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119229>.

[24] <https://www.uta.edu/news/news-releases/2022/11/08/green-concrete-konsta-gdoutos>

[25] Tuan CY. Implementation of conductive concrete for deicing (Roca Bridge); <https://digitalcommons.unomaha.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=civilengfacproc>

[26] Tuan CY, and Yehia SA. Implementation of Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing at Roca, Nebraska. (2004). *Civil Engineering Faculty Proceedings & Presentations*. 2004; 3: 363-378

[27] Gwon S, Kim H, & Shin M. Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.104942>.

[28] Gwon S, Moon J, Shin M. Self-heating capacity of electrically conductive cement composites: Effects of curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129087>.

[29] Maglogianni ME. Cement-Based Nanocomposites with Tunable Electrical and Thermal Conductivity (Doctoral dissertation, The University of Texas at Arlington; 2023).

[30] Yehia SA, Tuan CY. Thin Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing and Anti-Icing. *Transportation Research Record*. 2000; <https://doi.org/10.3141/1698-07>.

[31] <https://www.gov.pl/web/gddkia/podsumowanie-zimy-2024/2025>

[32] <https://www.rynekinfrastruktury.pl/wiadomosci/intermodal-i-logistyka/rekordowy-koszt-zimowego-utrzymania-lotniska-chopina--17250.html>.

[33] <https://biznes.o2.pl/biznes/miliony-zlotych-tyle-kosztuje-utrzymanie-lotniska-chopina-708755623383216a>

[34] Su K, Li J, Fu H. Smart city and the applications. In 2011 international conference on electronics, communications and control (ICECC). 2011; <https://doi.org/10.1109/ICECC.2011.6066743>.

[35] Strategia Zrównoważonego Rozwoju Transportu do 2030 roku. Załącznik do uchwały nr 105/2009 Rady Ministrów z 24 września 2019 r.

[36] Polityka energetyczna Polski do 2040 r. Załącznik do uchwały nr 22/2021 Rady Ministrów z 2 lutego 2021 r., Warszawa 2021.