

Diagnostyka przedwczesnych uszkodzeń betonowych posadzek przemysłowych utwardzanych powierzchniowo

Diagnostics of premature damage to surface-hardened industrial concrete floors

Michał A. Glinicki^{1,*}, Daria Józwiak-Niedźwiedzka¹, Andrzej M.Brandt¹

¹ Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Pawińskiego 5B, 02-106 Warsaw, Poland

*Corresponding author: M.A. Glinicki, e-mail: mglinic@ippt.pan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań diagnostycznych betonowych posadzek przemysłowych utwardzanych powierzchniowo. Wybrane przykłady posadzek obejmowały przedwczesne uszkodzenia warstw powierzchniowych, wykazujących intensywne pylenie, miejscowe delaminacje i obszarowe odpryski, bez uszkodzeń układu konstrukcyjnego. Zastosowano technikę ilościowych badań petrograficznych betonu na próbkach-odwiertach z posadzek, obejmujących analizę cyfrowych obrazów mikroskopowych z mikroskopu optycznego polaryzacyjnego i mikroskopu skaningowego. Posypkę utwardzającą i sproszkowane próbki matrycy cementowej badano za pomocą termicznej analizy różnicowej i dyfraktometrii rentgenowskiej. Metodę badania mikrotwardości wykorzystano do oceny miejscowego zróżnicowania właściwości mechanicznych. W przekrojach betonu zidentyfikowano obszary niejednorodności rozkładu porów powietrznych, zlokalizowano obszary o podwyższonej porowatości i obszary spękań w betonie, oznaczono lokalną zmienność składu fazowego produktów hydratacji cementu oraz występowanie obszarów skarbonatyzowanych. Na tej podstawie przedyskutowano przyczyny powstania uszkodzeń. Wykazano kluczową rolę ilościowych badań petrograficznych w diagnozowaniu przedwczesnych powierzchniowych uszkodzeń posadzek przemysłowych.

Słowa kluczowe: beton, delaminacja, mikroskopia ilościowa, porowatość, posadzki przemysłowe, pylenie, utwardzenie powierzchniowe

Summary

The article presents the diagnostic results on surface-hardened industrial concrete floors. Selected examples of floors showcased premature damage to surface layers, characterized by intense dusting, delamination, and local spalling, while the structural system remained unaffected. Quantitative petrographic analysis of concrete was applied to core specimens from the floors, involving the examination of digital images from a polarizing optical microscope and a scanning electron microscope. The hardening compound and powdered specimens of the cement matrix were characterized using differential thermal analysis and X-ray diffraction. A multiple microindentation method was employed to assess local variations in mechanical properties. Concrete cross-section analysis revealed areas with a non-uniform distribution of air voids, identified regions exhibiting increased porosity, highlighted areas of cracking in the concrete, indicated local variability in the phase composition of cement hydration products, and pointed out the presence of carbonated areas. The causes of the damage were discussed based on these findings. The crucial role of quantitative petrographic analysis in diagnosing premature surface damage to industrial floors was demonstrated.

Keywords: concrete, delamination, quantitative microscopy, porosity, industrial floors, dusting, surface hardening

1. Wprowadzenie

Posadzki betonowe znajdują zastosowanie w różnorodnych obiektach przemysłowych, w tym w magazynach i halach produkcyjnych, zarówno na podłożu gruntowym, jak i na piętach. Posadzka

1. Introduction

Concrete floors find application in various industrial facilities, including warehouses and production halls, both on ground level and upper floors. The floor, serving as the top functional layer

stanowiąca wierzchnią, użytkową warstwę podłogi w obiektach przemysłowych, jest poddawana większym i bardziej intensywnym obciążeniom niż podłogi budynków. Dlatego częstym rozwiązaniem w budownictwie przemysłowym są posadzki utwardzane powierzchniowo przy użyciu dedykowanych preparatów proszkowych. Dzięki odpowiedniej technologii zacierania mechanicznego materiał utwardzający, składający się ze spoiwa cementowego, dodatków, domieszek i trudnościeralnego kruszywa, łączy się z wodą obecną na powierzchni świeżo ułożonej i zagęszczonej mieszanki betonowej, tworząc monolityczną strukturę związaną z podkładem podłogowym (1). Zapewnienie odpowiedniej pielęgnacji zapobiegającej parowaniu wody z posadzki (2) oraz staranne wykonanie zaprojektowanych dylatacji (3) znacząco wpływają na końcową jakość wykonanej podłogi.

Doraźna diagnostyka posadzki przemysłowej ma miejsce w przypadku pojawienia się uszkodzeń lub usterek w określonych obszarach lub w całej konstrukcji podłogi. Do typowych uszkodzeń zalicza się rysy i spękania (4), (5), których obecność wskazuje na wystąpienie nadmiernych naprężeń rozciągających. Rysy powierzchniowe, a tym bardziej wskrośne, nie mogą być dopuszczane w użytkowanych pomieszczeniach magazynowych i komunikacyjnych, ponieważ są zapowiedzią dalszych uszkodzeń, a także utrudniają utrzymanie posadzek we właściwym stanie. Niekiedy wystąpienie spękań jest związane z nieprawidłowo wykonanymi dylatacjami. Odrębną formą uszkodzenia posadzki przemysłowej jest jej delaminacja, polegająca na odspajaniu i odpryskiwaniu fragmentów warstwy wierzchniej wraz z warstwą podkładu. Inne problemy obejmują nadmierne ścieranie [pylenie] lub miejscowe odpryskiwanie małych kawałków warstwy wierzchniej (6,7). Uszkodzenia dylatacji (8), prowadzące niekiedy do powstania znacznych nierówności powierzchni użytkowych posadzek, utrudniają transport i składowanie towarów oraz ruch personelu.

Przedwczesne uszkodzenia posadzek są powodowane różnymi przyczynami, wynikającymi z błędów projektowych i wykonawczych, nadmiernej oszczędności przy wymiarowaniu grubości i zbrojenia, a także na skutek lokalnych przeciążeń. Niekiedy określenie przyczyn uszkodzeń jest trudne i wymaga zaawansowanych badań. Celem artykułu jest omówienie metod identyfikacji kilku rodzajów uszkodzeń posadzek przemysłowych na podstawie doświadczeń autorskich. Celem szczególnym jest demonstracja skuteczności rozpoznania przyczyn uszkodzeń metodami diagnostyki wspomaganymi ilościową oceną mikrostruktury betonu metodami mikroskopowymi (9). W wieloletniej praktyce eksperckiej zespół autorski stosował rozmaite dostępne metody diagnostyczne i analizy obliczeniowe, wskazując na błędy w obliczeniach i wymiarowaniu posadzek i innych obiektów betonowych, a także na nieodpowiednie materiały i metody wykonawcze (10). Błędy te często były powodowane nadmierną oszczędnością materiałów i zabiegów wykonawczych.

in industrial facilities, is subjected to higher and more intense loads compared to conventional floors in buildings. Therefore, a common solution in industrial construction is the use of surface-hardened floors with dedicated dry-shake topping. Through proper mechanical trowelling technology, the dry-shake topping material, consisting of cementitious binders, additives, admixtures, and abrasion-resistant aggregate, combines with the water present on the surface of the freshly laid and compacted concrete mix, creating a monolithic structure bonded to the slab (1). Ensuring proper curing to prevent water evaporation from the floor (2) and careful execution of designed expansion or construction joints (3) significantly influence the final quality of the constructed floor.

Occasional diagnostics of industrial floors takes place when damages or defects appear in specific areas or throughout the entire floor structure. Typical damages include cracks (4, 5), which indicate the occurrence of excessive tensile stresses. Surface cracks, especially those that penetrate through the material, are not acceptable in occupied storage and traffic areas because they signal further damage and also make it difficult to maintain the floors in proper condition. Sometimes, the occurrence of cracks is related to improperly executed expansion or construction joints. Another form of damage to industrial floors is delamination, involving the separation and chipping of fragments from the top layer along with a layer of the slab. Other problems include excessive wear [dusting] or local chipping of small pieces of the top layer (6, 7). Damages to expansion joints (8), sometimes leading to significant surface irregularities in the functional areas of floors, impede the transportation and storage of goods as well as the movement of personnel.

Premature damage to floors is caused by various factors, stemming from design and construction errors, excessive cost-cutting in terms of thickness and reinforcement dimensions, as well as due to local overloads. Sometimes, determining the causes of damage is challenging and requires advanced investigations. The aim of the article is to discuss methods for identifying several types of damage to industrial floors based on the authors' experiences. A specific goal is to demonstrate the effectiveness of recognizing the causes of damage through diagnostic methods supported by a quantitative assessment of the concrete microstructure using microscopic methods (9). In their many years of expert practice, the authoring team has applied various available diagnostic methods and computational analyses, pointing out errors in the calculations and sizing of floors and other concrete structures, as well as inappropriate materials and construction methods (10). These errors were often a result of excessive material and construction cost-cutting measures.

2. Stages of technical diagnosis of damage

The conventional procedure for the technical assessment of damage to industrial floors consists of several stages (5, 11). It typically begins with the initial evaluation stage, involving a detailed analysis of technical documentation. This analysis includes the design of

2. Etapy technicznego rozpoznania uszkodzeń

Konwencjonalna procedura oceny technicznej uszkodzeń posadzki przemysłowej składa się z kilku etapów (5, 11). Rozpoczyna się zazwyczaj od etapu wstępnego rozpoznania, polegającego na dokładnej analizie dokumentacji technicznej. Analiza ta obejmuje projekt układu warstw posadzki, właściwości podbudowy i podłoża, właściwości składników betonu, charakterystykę posypki utwardzającej, recepturę mieszanki betonowej, warunki technologiczne i środowiskowe podczas wykonywania posadzki, dokumenty dostawy, wyniki badań kontrolnych, w tym badań mieszanki i stwardniałego betonu. Obowiązkowa wizytacja techniczna na budowie pozwala na inwentaryzację uszkodzeń, ich dokumentację oraz wybór miejsc do szczegółowych badań in-situ i pobrania próbek odwiertów. Po wstępnym rozpoznaniu opracowywany jest program badań diagnostycznych. Jeżeli trzeba, określa się właściwości geotechniczne materiału zalegającego pod posadzką (5, 11). W zakresie właściwości betonu program ten na ogół obejmuje określenie wytrzymałości betonu w próbkach-odwiertach i ewentualne określenie wytrzymałości na odrywanie metodą pull-off. Według (5) zastosowanie nieniszczącej metody sklerometrycznej do oceny wytrzymałości betonu w posadzkach z utwardzoną warstwą wierzchnią jest nieuprawnione, gdyż daje błędne wyniki. Wybór miejsc do wykonania prób wymaga starannego rozważenia w celu uzyskania reprezentatywnych próbek z obszarów wykazujących przedwczesne uszkodzenie i obszarów bez uszkodzeń do celów porównawczych.

Zasadniczym etapem diagnostyki wspomaganą metodami mikroskopowymi są laboratoryjne badania próbek-odwiertów pobranych z posadzki, najczęściej o średnicy 100 lub 150 mm. Badania te, oprócz wspomnianego już oznaczenia wytrzymałości betonu, obejmują na ogół:

1. Ocenę jednorodności składu betonu w przekroju poprzecznym, w tym ilościową ocenę rozkładu ziaren kruszywa, włókien zbrojenia, dużych pustek i spękań.
2. Ilościowe określenie rozmieszczenia i wielkości porów powietrznych w przekroju poprzecznym, pomiar grubości utwardzonej warstwy wierzchniej oraz ocenę mikrostruktury tej warstwy i warstw przyległych za pomocą mikroskopii optycznej i skaningowej.
3. Oznaczenie składu fazowego i lokalnych właściwości mechanicznych utwardzonej warstwy wierzchniej i matrycy cementowej metodami analizy termicznej, rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej i mikrotwardości.

Jeżeli dostępne są materiały archiwalne i surowce użyte do wykonania posadzki (cement, kruszywa, domieszki, posypka utwardzająca), przeprowadza się badania sprawdzające ich skład i właściwości. Za istotne uważa się takie parametry, jak wytrzymałość i czas wiązania cementu, obecność w kruszywach ziaren słabych i reaktywnych, kompatybilność domieszek z układem mineralnym spoiwa oraz wytrzymałość stwardniałej posypki mineralnej. Ostatnim etapem diagnostyki jest podsumowanie wyników i ich analiza, prowadząca do identyfikacji najważniejszych

the floor layer system, properties of the subbase and subgrade, properties of concrete constituents, characteristics of the dry-shake topping compound, concrete mix composition, technological and environmental conditions during floor construction, delivery documents, and results of control tests, including mixture and matured concrete tests. A mandatory technical site visit allows for inventorying damages, documenting them, and selecting locations for detailed in-situ examinations and core sample collection. After the initial evaluation, a diagnostic testing program is developed. If necessary, geotechnical parameters of the material beneath the floor are determined (5, 11). Regarding concrete properties, this program generally includes determining the strength of concrete in core samples and possibly assessing the pull-off strength. According to (5), the use of the non-destructive sclerometric method to assess the strength of concrete in floors with a hardened surface layer is unjustified, as it yields inaccurate results. Careful consideration is required in selecting locations for tests to obtain representative samples from areas showing premature damage and undamaged areas for comparative purposes.

The fundamental stage of microscopy-assisted diagnostics involves laboratory testing of core samples obtained from the floor, typically with a diameter of 100 or 150mm. These tests, in addition to the previously mentioned determination of concrete strength, generally include:

1. Assessment of the homogeneity of concrete composition in cross-section, including quantitative evaluation of the distribution of aggregate grains, reinforcing fibres, large voids, and cracks.
2. Quantitative determination of the distribution and size of air voids in cross-section, measurement of the thickness of the hardened surface layer, and evaluation of the microstructure of this layer and adjacent layers using optical and scanning microscopy.
3. Determination of the mineral composition and local mechanical properties of the hardened surface layer and cement matrix using thermal analysis, X-ray diffraction analysis, and multiple microindentation.

If archival materials and the raw materials used in the construction of the floor (cement, aggregates, additives, hardening compound) are available, tests are conducted to verify their composition and properties. Parameters such as the strength and setting time of cement, the presence of weak and reactive grains in aggregates, compatibility of additives with the mineral system of the binder, and the strength of the cured mineral topping are considered essential. The final stage of the diagnosis involves summarizing the results and their analysis, leading to the identification of the key factors influencing the assessment of the floor's technical condition. Conclusions from the expertise determine potential causes of damage and the necessary scope of repairs.

czynników wpływających na ocenę stanu technicznego podłogi. Wnioski z ekspertyzy określają potencjalne przyczyny uszkodzeń i niezbędny zakres naprawy.

3. Metodyka ilościowej oceny mikrostruktury metodami mikroskopowymi

Ilościową ocenę mikrostruktury betonu przeprowadza się na próbkach wyciętych z odwiertów z przedmiotowej posadzki i odpowiednio spreparowanych do badań. Oprócz wiertnicy z wiertłem koronowym do betonu niezbędne są liczne urządzenia i specjalistyczna aparatura badawcza, w tym: polerki, urządzenia do impregnacji i napyłania próbek, mikroskop optyczny i polaryzacyjny z cyfrową akwizycją obrazów, mikroskop skaningowy z mikrosondą rentgenowską, maszyny wytrzymałościowe do oznaczania wytrzymałości oraz do oznaczania mikrotwardości metodą indentacji wielokrotnej (9, 12, 13).

Wybrane próbki-odwierty przecina się wzdłużnie, aby odsłonić przekrój poprzeczny płyty podłogowej [rys.1]. Jeżeli odwiert jest silnie spękany, wstępnie wykonuje się impregnację żywiczną. Makroskopową ocenę rozkładu ziaren kruszywa i defektów przeprowadza się na poboczniczy walca i w przekroju poprzecznym gołym okiem lub przy użyciu ręcznego mikroskopu cyfrowego [zwykle do 40-krotnego powiększenia]. Ocena ta obejmuje zawartość i równomierność rozmieszczenia ziaren kruszywa grubego, obecność dużych pustek powietrznych oraz ewentualnych ubytków lub rozległych spękań (9). W przypadku betonu z rozproszonym zbrojeniem stalowym makroskopowe zliczenie śladów włókien ciętych w przekroju poprzecznym określa zawartość i równomierność przestrzennego rozmieszczenia włókien w betonie. Dodatkowe obserwacje obejmują reakcję sproszkowanych fragmentów betonu z kwasem solnym i fenolftaleiną (14).

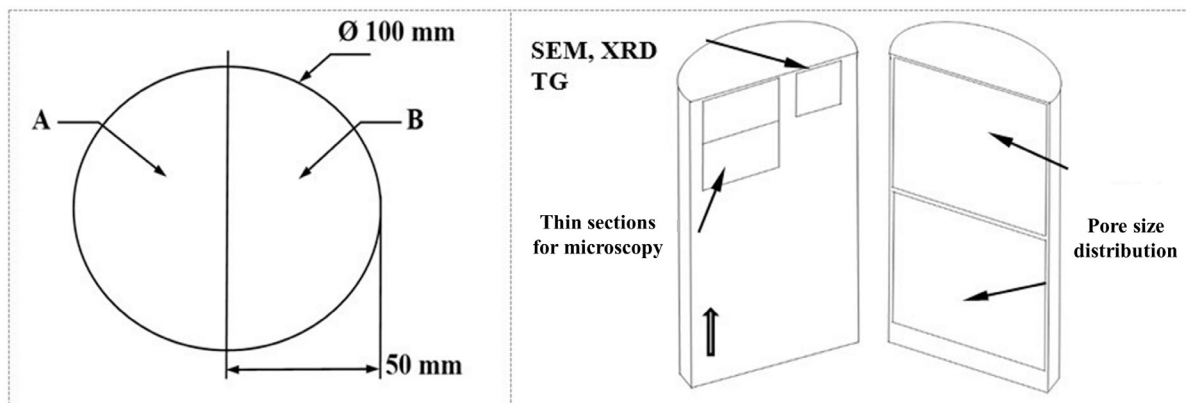
Mikroskopia optyczna w świetle widzialnym na polerowanych i kontrastowanych próbkach służy do określenia rozkładu i wielkości porów w betonie. Charakterystykę porów określa się metodą trawersową zgodnie z PN-EN 480-11 (15) na zglądach o wymiarach 100x100x20 mm wyciętych w przekroju podłogi. Całkowita długość

3. Methodology for quantitative assessment of microstructure using microscopic methods

Quantitative assessment of concrete microstructure is conducted on specimens cut from cores drilled in the specific floor and appropriately prepared for analysis. In addition to a diamond core drill for concrete, numerous devices and specialized research equipment are necessary, including polishers, devices for specimen's impregnation and sputtering, optical and polarizing microscopes with digital image acquisition, an electron scanning microscope with X-ray analysis, materials testing machine for determining concrete strength and determining microhardness using the multiple indentation method (9, 12, 13).

The selected cores are longitudinally cut to expose the cross-section of the floor slab, as shown in Figure 1. If the core is heavily cracked, a resin impregnation is carried out as a preliminary step. Macroscopic assessment of the distribution of aggregate grains and defects is performed on the side of the core and in the cross-section either with the naked eye or using a hand-held digital microscope [typically up to 40x magnification]. This evaluation includes the content and uniformity of the distribution of coarse aggregate grains, the presence of large air voids, and any voids or extensive cracks (9). In the case of concrete with dispersed steel reinforcement, macroscopic counting of traces of cut fibres in the cross-section determines the content and uniformity of the spatial distribution of fibres in the concrete. Additional observations include the reaction of powdered concrete fragments with hydrochloric acid and phenolphthalein (14).

Optical microscopy in visible light on polished and contrasted specimens is used to determine the distribution and size of air voids in concrete. The air voids characteristics are determined using the traversing method according to PN-EN 480-11 (15) on specimens with dimensions of 100x100x20 mm cut from the floor cross-section. The total length of the traverse line on one specimen is at least 1200 mm. Using a computerized image analysis system (15), the total air void content [A], specific surface area of voids [α], and content of microvoids with a diameter smaller than 300 μm [A_{300}] are determined.



Rys. 1. Schematyczny widok odwiertu z posadzki z zaznaczonymi miejscami wykonania próbek do badań mikroskopowych

Fig. 1. Schematic view of the concrete core from the floor with marked places where specimens were taken for microscopic analysis

linii trawersowej na jednej próbce wynosi co najmniej 1200 mm. Za pomocą komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu (15) określa się całkowitą zawartość porów powietrza [A], powierzchnię właściwą porów [α] oraz zawartość mikroporów o średnicy mniejszej niż 300 μm [A_{300}].

Mikroskopia w świetle widzialnym i ultrafioletowym na cienkich szlifach umożliwia analizę składników w przekrojach warstwy utwardzającej i warstw znajdujących się pod nią [rys. 1]. Pomiar wykonuje się na próbkach o wymiarach 40x30 mm i grubości $25 \pm 1 \mu\text{m}$ (12). Analizę mikrostruktury betonu na cienkich przekrojach przeprowadza się w świetle przechodzącym z polaryzatorami skrzyżowanymi lub równoległymi oraz w świetle ultrafioletowym, zgodnie z wytycznymi ASTM (16). Wykrywane i mierzone są rysy i mikrorysy, pustki i pory soczewkowe, określaną jest wielkość defektów, identyfikowane są obszary o podwyższonej porowatości i obszary segregacji ziaren. Mapowanie intensywności barwy matrycy cementowej w świetle ultrafioletowym, oznaczanej cyfrowo na obszarze mikroobrazów, pozwala na porównawczą, jakościową ocenę lokalnego wskaźnika wodno-cementowego (17).

Obserwacje pod mikroskopem skaningowym prowadzone są na próbkach wypolerowanych lub na przelamach warstwy utwardzonej i sąsiadującej warstwy betonu, stosując tryb elektronów odbitych lub elektronów wtórnych, zgodnie z wytycznymi ASTM (18). Skaningowa mikroskopia elektronowa ze spektrometrią rentgenowską [SEM-EDX] pozwala na identyfikację produktów hydratacji, relikwów spoiwa, poszczególnych minerałów, jak również na analizę występowania rys i mikrorys (19,20). Termiczną analizę różnicową oraz rentgenowską analizę dyfrakcyjną (20) stosuje się do oznaczenia składu mineralnego i fazowego próbek utwardzonej warstwy powierzchniowej i składu posypki. Badania przeprowadza się na proszkach o uziarnieniu poniżej 45 μm , przygotowanych z fragmentów odwiertu [rys. 1] lub z materiałów wyjściowych. Analizę termiczną przeprowadza się w zakresie temperatury 20-1000°C przy szybkości nagrzewu 10°C/min, a dyfraktogramy rentgenowskie otrzymuje się przy w zakresie kątowym 2θ od 5° do 70°.

Do oceny lokalnych właściwości mechanicznych warstwy utwardzającej stosuje się metodę badania mikrotwardości (21), polegającą na miejscowych pomiarach mikrotwardości i współczynnika sprężystości w próbkach z fragmentów pobranych odwiertów albo w próbkach zaprawy wzorcowej. Sposób badania odpowiada mapowaniu właściwości wytrzymałościowych w obszarach zajmowanych przez matrycę cementową i twarde kruszywa mineralne.

4. Zastosowanie metodyki ilościowej oceny mikrostruktury w diagnostyce posadzek

4.1. Badanie wybranych posadzek utwardzanych powierzchniowo

Spośród różnych diagnozowanych posadzek przemysłowych do szczegółowego przedstawienia wybrano przykłady zestawione w tablicy 1. Posadzki stanowiły warstwę wierzchnią dość typowych

Optical and ultraviolet microscopy on thin sections allows for the analysis of constituents in the cross-sections of the hardening layer and the layers beneath it, as shown in Figure 1. Measurements are performed on specimens with dimensions of 40x30mm and a thickness of $25 \pm 1 \mu\text{m}$ (12). The analysis of concrete microstructure on thin sections is conducted in transmitted light with crossed or parallel polarizers and in UV light, following ASTM guidelines (16). Cracks and microcracks, air voids and lens-shaped pores are detected and measured, the size of defects is determined, areas with increased porosity and grain segregation are identified. Mapping the colour intensity of the cement matrix in UV light, digitally recorded in the micro images, allows for a comparative, qualitative assessment of the local water-cement ratio (17).

Observations under a scanning electron microscope are conducted on polished specimens or on fresh fractures between the hardened layer and the adjacent concrete layer, using backscattered or secondary electron mode, following ASTM guidelines (18). Scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX) allows for the identification of hydration products, remnants of the binder, individual minerals, as well as the analysis of the occurrence of cracks and microcracks (19),(20). Differential thermal analysis and X-ray diffraction analysis (20) are used to determine the mineral and phase composition of the hardened surface layer and the composition of the hardening compound. The tests are performed on powders with a particle size below 45 μm , prepared from core fragments [Figure 1] or from original materials. Thermal analysis is conducted in the temperature range of 20-1000°C with a heating rate of 10°C/min, and X-ray diffraction patterns are obtained in the 2θ angular range from 5° to 70° with a step of 1°/min.

To assess the local mechanical properties of the top layer, the methodology of multiple microindentation is employed (21). This method involves local measurements of microhardness and elastic modulus in specimens taken from core fragments or in specimens of reference mortar. The testing procedure corresponds to mapping the mechanical properties in areas occupied by the cement matrix and hard mineral aggregates.

4. Application of the methodology for quantitative microstructure assessment in concrete floor diagnostics

4.1. Characteristics of selected surface hardened floors

Among various diagnosed industrial floors, selected examples are detailed in Table 1. Fairly typical layered floor structures were applied, consisting of a concrete slab laid on a cement-bonded subbase layer or mechanically compacted unbonded subbase on a suitable soil. The floors were constructed using surface hardening technology with dry-shake toppings [designated as DST1-DST5], spread over the surface of freshly laid concrete and mechanically trowelled.

Tablica 1

PRZEZNACZENIE I NAJWAŻNIEJSZE USZKODZENIA POSADZEK PRZEMYSŁOWYCH

Oznaczenie posadzki	Przeznaczenie	Projektowana grubość i klasa betonu	Najważniejsze uszkodzenia posadzki
P1	Hala magazynu wysokiego składowania	18 cm, C25/30	Wykruszenia betonu wzdłuż prowadnic listew, spękania w poprzek prowadnic, nierówności
P2	Hala hartowni	18 cm, C20/25	Siatka spękań, miejscowe odspojenia warstwy utwardzonej
P3	Hala magazynowa	18 cm, C20/25	Siatka spękań, miejscowe odspojenia warstwy utwardzonej
P4	Hala magazynowa	17 cm, C25/30	Intensywne pylenie, miejscowe odspojenia warstwy utwardzonej
P5	Magazyn warsztatu samochodowego	18 cm, C25/30	Intensywne pylenie

Table 1

INTENDED USE AND MAIN DAMAGES OF CONCRETE INDUSTRIAL FLOORS

Floor designation	Intended use	Designed thickness and concrete class	Major floor defects
P1	High-rack storage warehouse	18 cm, C25/30	Concrete chipping along guide rails, cracking across the guides, unevenness
P2	Tempering hall	18 cm, C20/25	Crack pattern, local delamination of the hardened layer
P3	Warehouse hall	18 cm, C20/25	Crack pattern, local delamination of the hardened layer
P4	Warehouse hall	17 cm, C25/30	Intensive dusting, local delamination of the hardened layer
P5	Automotive workshop storage	18 cm, C25/30	Intensive dusting

warstwowych konstrukcji podłóg, tworzonych przez płytę betonową ułożoną na warstwie podbudowy związanej cementem lub niezwiązanej zagęszczonej mechanicznie, na odpowiednim podłożu gruntowym. Posadzki wykonano w technologii powierzchniowego utwardzania przy użyciu posypek mineralnych [ozn. DST1-DST5], rozsypywanych na powierzchni świeżo ułożonego betonu i zacieranymi mechanicznie.

W mieszankach betonowych do wykonania posadzek stosowano różne rodzaje cementu, a maksymalny wymiar ziaren kruszywa wynosił 16 mm [tablica 2]. W celu utrzymania pożądanej konsystencji mieszanki [zwykle w zakresie opadu stożka od 80 do 150 mm] stosowano domieszki uplastyczniające i opóźniające. Najczęściej stosowano zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowych od różnych producentów.

4.1.1. Badanie posadzki P1

Badania diagnostyczne posadzki P1 miały w większości charakter konwencjonalny. Uszkodzenia koncentrowały się w pasach wzdłuż zabetonowanych prowadnic listew, które tworzyły złącza technologiczne w kierunku poprzecznym, jak pokazano na rys. 2. System nieregularnych spękań występujących w kierunku prostopadłym do prowadnic sięgał do głębokości 130 mm. Posadzka w korytarzach pomiędzy stelażami regałów była nierówna, co powodowało nadmierne przechyły wózków podczas jazdy. Poza tym stwierdzono dobry stan powierzchni, nie stwierdzono żadnych odprysków.

Badania betonu na próbkach wyciętych z posadzki P1 wykazały średnią wytrzymałość na ściskanie 46,4 MPa przy minimalnej

Different types of cement were used in concrete mixes for floor construction, and the maximum aggregate particle size was 16 mm [Table 2]. To maintain the desired consistency of the mix [usually in the slump range of 80 to 150 mm], plasticizing and retarding admixtures were used. Dispersed reinforcement, commonly in the form of steel fibres from various manufacturers, was most frequently applied.

4.1.1. Results of the P1 floor diagnostics

The diagnostic tests of the P1 floor were mostly of a conventional nature. The damages were concentrated in strips along the permanent rail guides, which formed technological joints [Figure 2]. The system of irregular cracks occurring perpendicular to the screed rails reached a depth of 130 mm. The floor in the corridors between the racks was uneven, causing excessive tilting of the trucks during movement. Additionally, the surface condition was found to be good, with no observed chipping.

The concrete tests on specimens cut from the P1 floor showed an average compressive strength of 46.4 MPa with a minimum strength of 37.8 MPa, indicating good quality of the embedded concrete. An exception was observed in areas near the screed rails where careful compaction of the concrete mix was neglected. As a result of the excessive voids, the concrete was locally much weaker and, under the influence of truck loads, underwent systematic destruction and crumbling. In places where the concrete slab was laid on a fill of artificial aggregate [steel slag 0-8 mm], inadequate compaction of the fill was observed. Documentation

Tablica 2

PODSTAWOWE MATERIAŁY STOSOWANE DO WYKONANIA POSADZEK PRZEMYSŁOWYCH

Ozn.	Rodzaj cementu	Rodzaj kruszywa	Zbrojenie	Utwardzacz powierzchniowy
P1	CEM I 32,5 R-NA ^{*)}	piasek 0-2 mm, żwir 2-16 mm	siatki stalowe 150x150 mm	DST1
P2	CEM I 42,5 R	piasek 0-2 mm, grys dolomitowy 2-8 mm, 8-16 mm	włókna stalowe, 25 kg/m ³	DST2
P3	CEM III/A 42,5N	piasek 0-2 mm, grys dolomitowy 2-8 mm, 8-16 mm	włókna stalowe, 25 kg/m ³	DST3
P4	CEM II B/S 42,5N	piasek 0-2 mm, grys granitowy 2-16 mm, żwir 8-16 mm	włókna stalowe, 25 kg/m ³	DST4
P5	CEM I 42,5 R	piasek 0-2 mm, żwir 2-16 mm	włókna stalowe, 25 kg/m ³	DST5

^{*} oraz dodatek popiołu lotnego krzemionkowego w ilości 20% masy cementu

Table 2

BASIC MATERIALS USED FOR THE CONSTRUCTION OF CONCRETE INDUSTRIAL FLOORS

Floor designation	Type of cement	Type of aggregate	Reinforcement	Surface hardener
P1	CEM I 32,5 R-NA ^{*)}	sand 0-2mm, gravel 2-16mm	steel meshes 150x150mm	DST1
P2	CEM I 42,5 R	sand 0-2mm, dolomite 2-8mm, 8-16mm	steel fibres, 25kg/m ³	DST2
P3	CEM III/A 42,5N	sand 0-2mm, dolomite 2-8mm, 8-16mm	steel fibres, 25kg/m ³	DST3
P4	CEM II B/S 42,5N	sand 0-2mm, granite 2-16mm, gravel 8-16mm	steel fibres, 25kg/m ³	DST4
P5	CEM I 42,5 R	sand 0-2mm, gravel 2-16mm	steel fibres, 25kg/m ³	DST5

^{*} as well as the addition of siliceous fly ash in an amount of 20% by mass of cement.

wytrzymałości 37,8 MPa, co świadczy o dobrej jakości wbudowanego betonu. Wyjątkiem były obszary przy prowadnicach, w których zaniedbano staranne zagęszczenie mieszanki betonowej. W efekcie powstały pustki powietrznych i raków beton był lokalnie dużo słabszy i pod wpływem obciążenia wózkami ulegał systematycznemu niszczeniu i kruszeniu. W miejscach, gdzie płyta betonowa została ułożona na nasypie z kruszywa sztucznego [żuźła stalownicze 0-8 mm] stwierdzono niedostateczne zagęszczenie nasypu. Analiza dokumentacji wykazała, że w 1/3 punktów kontrolnych wskaźnik odkształcenia znacznie przekraczał projektowaną wartość graniczną 2,5, zatem w tych obszarach należało dogęścić nasyp. Sprawdzenie grubości warstw podłogi wykazało znaczne różnice w stosunku do projektowanej grubości 180 mm: stwierdzono grubość płyty od 145 mm do 200 mm. W konkluzji stwierdzono, że kilka wymienionych czynników przyczyniło się do przedwczesnych uszkodzeń posadzki P1, z tym że zasadnicze znaczenie przypisano błędom stosowania prowadnic [miejscowe niedogęszczenie betonu] i błędom ułożenia zbrojenia.

4.1.2. Wyniki badań posadzek P2 i P3

Wykonane w odstępie roku w tym samym obiekcie posadzki P2 i P3 wykazały miejscowe uszkodzenia: już po 7 dniach w magazynie oraz po roku w hartowni, kiedy temperatura podczas jej użytkowania osiągnęła 30°C. Uszkodzeniom w postaci siatki spękań towarzyszył głuchy odgłos przy uderzaniu posadzki metalowym trzpieniem. Oprócz zróżnicowanego rodzaju cementu [tablica 1] różnice w składzie projektowanej mieszanki betonowej na obie posadzki były niewielkie, dlatego omawiane są razem.

Badania gęstości i wytrzymałości betonu [tablica 3] wykazały jednorodność gęstości objętościowej - różnice poniżej 3% oraz pra-

analysis revealed that in 1/3 of the control points, the deformation index significantly exceeded the design limit of 2.5; therefore, in these areas, the fill needed to be compacted further. Checking the floor thickness showed significant differences compared to the designed thickness of 180 mm: the slab thickness ranged from 145 mm to 200 mm. In conclusion, it was found that several factors contributed to the premature damage of the P1 floor, with



Rys. 2. Uszkodzenia posadzki w magazynie P1 obejmujące znaczne wykruszenia w pasach wzdłuż wbudowanych prowadnic listew

Fig. 2. Damage to the floor in warehouse P1, including significant chipping along the embedded guide bars

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE I GĘSTOŚĆ BETONU W PRÓBKACH- ODWIERTACH ORAZ GRUBOŚĆ WARSTWY UTWARDZONEJ WIDOCZNA NA PRZEKROJACH ODWIERTÓW

COMPRESSIVE STRENGTH AND DENSITY OF CONCRETE IN CORE DRILL SPECIMENS, AS WELL AS THE THICKNESS OF THE HARDENED LAYER VISIBLE ON THE CORE DRILL CROSS-SECTIONS

Lokalizacja próbek / Core location	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	Gęstość objętościowa Density, kg/m ³	Thicknes of hardened layer Grubość warstwy utwardzonej, mm
Hala magazynowa P3 / Warehouse P3	35.2 – 48.0	2390 - 2460	2 - 8
Hala hartowni P2 / Hardening hall P2	44.4 – 54.1	2370 - 2420	3 - 6

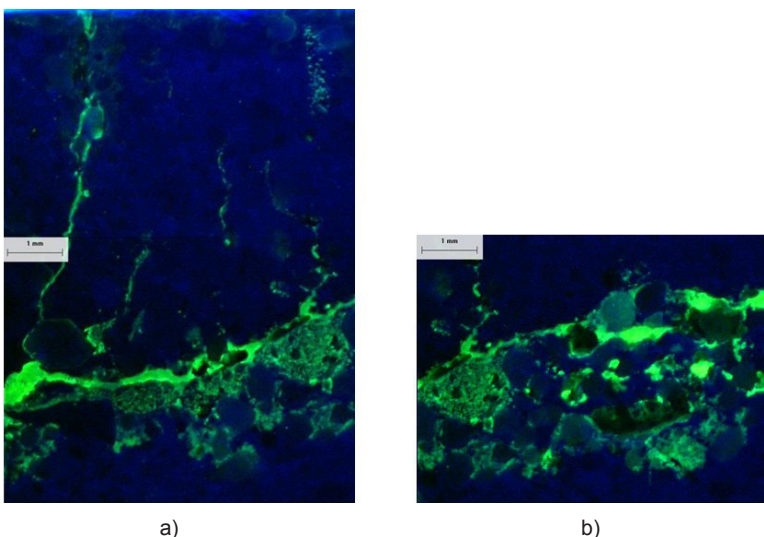
Tablica 4 / Table 4

CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH W PRÓBKACH BETONU WG PN-EN 480-11

CHARACTERISTICS OF AIR VOIDS IN CONCRETE SPECIMENS ACCORDING TO PN-EN 480-11

Lokalizacja próbek Core location	A, %	α , mm ⁻¹	A ₃₀₀ , %
Hala magazynowa P3 Warehouse P3	1.66; 4.63	22.48; 8.91	0.47; 0.13
Hala hartowni P2 Hardening hall P2	1.78; 2.53	16.76; 16.99	0.28; 0.72

widlową wytrzymałość na ściskanie odpowiadającą klasie C35/45. Grubość warstwy utwardzonej wykazywała znaczną zmienność, co sugeruje występowanie problemów podczas utwardzania i wykańczania warstwy wierzchniej. Pomiar wielkości porów w betonie na przekrojach odwiertów [tablica 4] wykazały strukturę porów typową dla betonów nienapowietrzonych, tj. znikoma zawartość



Rys. 3. Przekrój posadzki P3 do głębokości 10 mm widoczny w świetle ultrafioletowym: a) drobne spękania w warstwie utwardzonej prostopadłe do powierzchni, strefa zwiększonej porowatości i poziome pęknięcia na głębokości około 7 mm [obraz 9,2x6,4 mm]; b) strefa podwyższonej porowatości poniżej warstwy utwardzonej [obraz 4,8x6,4 mm]

Fig. 3. Cross-section of the P3 floor to a depth of 10 mm visible in ultraviolet light: a) small cracks in the hardened layer perpendicular to the surface, a zone of increased porosity, and horizontal cracking at a depth of approximately 7 mm [image 9.2x6.4 mm]; b) zone of increased porosity below the hardened layer [image 4.8x6.4 mm].

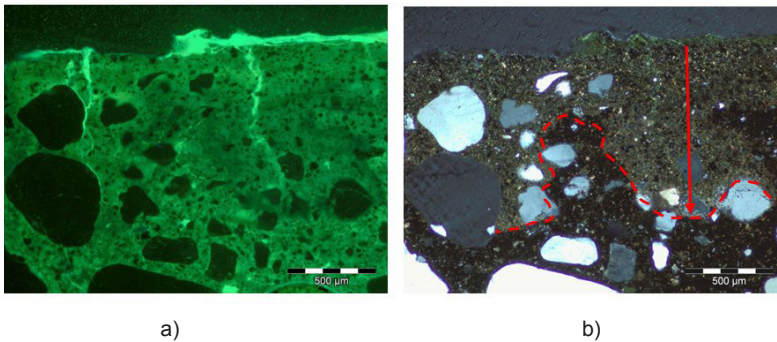
the primary importance attributed to errors in the application of permanent screed rails [local insufficient compaction of concrete] and errors in the placement of reinforcement.

4.1.2. Results of the P2 and P3 floors diagnostics

The floors P2 and P3, executed with a one-year interval in the same facility, exhibited localized damage: already after 7 days in the warehouse and after a year in the tempering hall, where the temperature during its use reached 30°C. The observed damages in the form of a network of cracks were accompanied by a dull sound when striking the floor with a metal pin. In addition to the different types of cement [Table 1], the differences in the composition of the designed concrete mix for both floors were minor, so they are discussed together.

The analysis of the density and strength of concrete [Table 3] showed homogeneity of volumetric density (differences below 3%) and correct compressive strength corresponding to the class C35/45. The thickness of the hardened layer exhibited significant variability, suggesting problems during the hardening and finishing of the surface layer. The air voids characteristics in the concrete, determined on core drill cross-sections [Table 4], revealed typical microstructure parameters for non-air-entrained concrete, i.e., negligible content of microvoids and specific surface area of voids well below 23 mm⁻¹. Concerns arise from the significant variability in the content of air voids in specimens from the warehouse, especially the elevated 4.6% content of large-sized voids, indicating local insufficient compaction of the concrete.

Microscopic observations of thin sections from the P3 floor [Figs. 3-6] revealed the presence of cracks perpendicular to the surface in the hardened layer, areas with increased porosity, and traces of horizontal cracking just below the hardened layer. In contrast to the drawing on Fig. 3a, small cracks visible on Fig. 4a, likely induced by drying shrinkage, do not necessarily lead to detachment of the near-surface layer. Only the presence of a zone weakened by increased porosity and concentration of voids [light green areas in Figs. 3a and b] is associated with detachment. Yellow colour on Fig. 5 indicates irregular air voids arranged horizontally under aggregate grains [light grey colour], while dark brown colour indicates the area of the



Rys. 4. Przekrój posadzki P3 do głębokości około 1,4 mm od powierzchni, widoczny obraz 1,6x2,2 mm: a) drobne spękania w warstwie utwardzonej prostopadłe do powierzchni [światło UV], b) przebieg frontu karbonatyzacji [polaryzatory skrzyżowane]

Fig. 4. Cross-section of the P3 floor to a depth of approximately 1.4 mm from the surface, visible image 1.6x2.2 mm: a) small cracks in the hardened layer perpendicular to the surface [UV light], b) course of the carbonation front [crossed polarizers].

mikroporów i powierzchnia właściwa porów wyraźnie poniżej 23 mm^{-1} . Zastrzeżenia wzbudza duże zróżnicowanie zawartości porów powietrznych w próbkach z hali magazynowej, a zwłaszcza podwyższona do 4,6% zawartość porów o dużych rozmiarach. Wskazuje to na miejscowe niedostateczne zagęszczenie betonu.

Mikroskopowe obserwacje cienkich szlifów z posadzki P3 [rys. 3-6] wykazały występowanie prostopadłych do powierzchni spękań w warstwie utwardzonej, obecność stref o podwyższonej porowatości i ślady poziomego pęknięcia nieco poniżej warstwy utwardzonej. W odróżnieniu od rys na rysunku 3a, drobne spękania widoczne na rys.4a, wywołane prawdopodobnie skurczem wysychania, niekoniecznie prowadzą do odspojenia warstwy przypowierzchniowej. Dopiero obecność strefy osłabionej przez zwiększoną porowatość i udział pustek [jasnozielone pola na rys.3a i b] wiąże się z odspojeniem. Kolorem żółtym na rys. 5 pokazane są nieregularne pustki powietrzne układające się poziomo, pod ziarnami kruszywa [kolor jasnoszary], natomiast kolor ciemnobrązowy wskazuje obszar utwardzonej matrycy cementowej. Widoczny na rys. 4b zasięg frontu karbonatyzacji warstwy utwardzonej wynosi średnio 1 mm, w miejscu spękań sięga do głębokości ok. 3,5 mm od powierzchni.

Histogramy intensywności przechodzącego światła ultrafioletowego na rys.6 ilustrują barwę matrycy cementowej na cienkim szlifie na zróżnicowanej głębokości. Każdy z przedstawionych histogramów cechuje zbliżony kształt oraz pik intensywności odpowiadający barwie 80-100 w skali szarości. Świadczy to o dość jednorodnym współczynniku w/c na głębokości od 0 do 40 mm od powierzchni posadzki.

Mikroskopowe obserwacje cienkich szlifów przeprowadzono na próbkach wyciętych z odwiertów z posadzki P2 w miejscach, gdzie nie było widać delaminacji, ale zanotowano głuchy odgłos podczas ostukiwania. W przekrojach [rys. 7-8] stwierdzono występowanie strefy nieciągłości przybierającej postać głównej rysy i siatki spękań, głównie równoległych do powierzchni posadzki. Zróżnicowanie jasności barwy na rys. 7 pokazuje zróżnicowanie porowatości i spękań na grubości posadzki. Na głębokości około

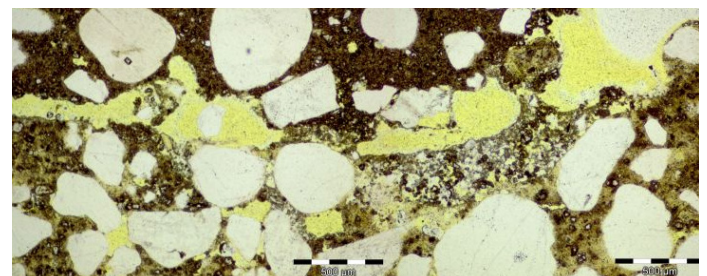
hardened cementitious matrix. The extent of carbonation front in the hardened layer, visible on Fig. 4b, averages 1 mm, reaching a depth of approximately 3.5 mm from the surface in cracked areas.

Histograms of UV light intensity on Fig. 6 illustrate the colour of the cement matrix on a thin section at various depths. Each of the presented histograms exhibits a similar shape and intensity peak corresponding to the colour of 80-100 on the grayscale. This indicates a relatively uniform water-to-cement ratio at depths from 0 to 40mm from the floor surface.

Microscopic observations on thin sections were conducted on samples taken from the P2 floor where no delamination was visible, but a dull sound was noted upon tapping. In the cross-sections [Figs. 7-8], the presence of a discontinuity zone was observed, taking the form of the

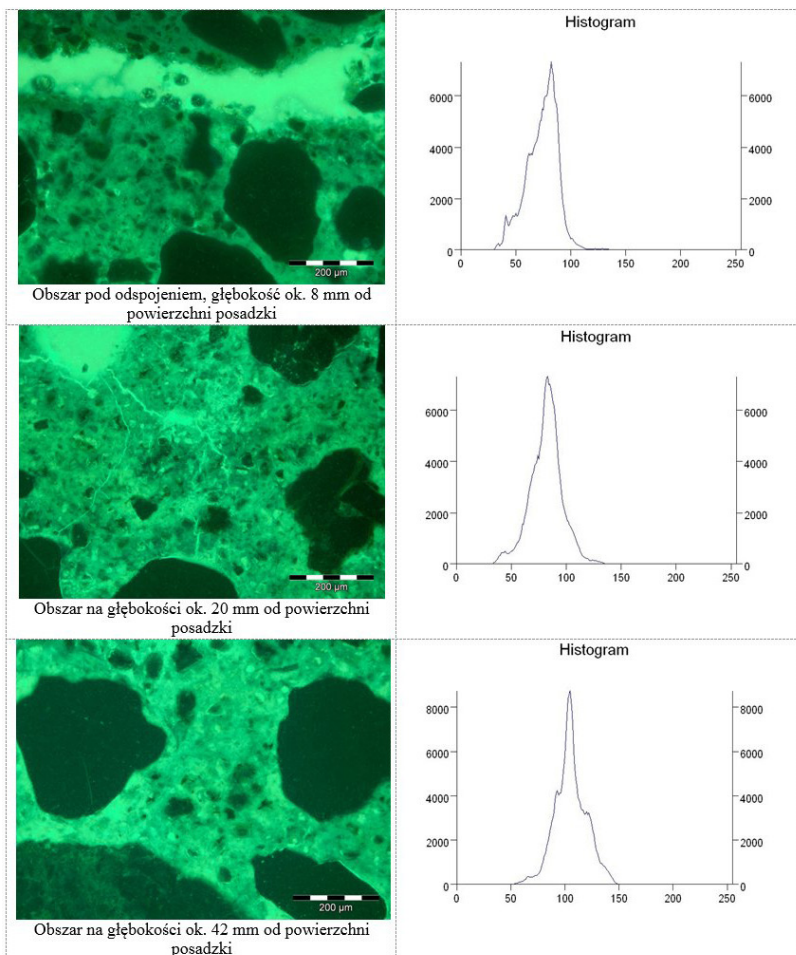
main crack and a network of cracks, mainly parallel to the surface of the floor. The variation in colour brightness in Fig. 7 indicates differences in porosity and cracks throughout the thickness of the floor. At a depth of about 3-4 mm, an area of horizontal cracks is visible. Both below the hardened layer and in deeper layers of concrete [the analysed area reached up to 40 mm], numerous and large lens-shaped pores are present, Fig. 8. Lens-shaped pores are often located beneath coarse aggregates, as shown in Fig. 8b at a depth of approximately 30-35 mm from the surface. Carbonation of the surface layer of the floor to a depth of about 1-1.5 mm was also observed.

The diagnosis of the hardening layers DST2 and DST3 included specimens separated from the top layer of the P2 and P3 floors, as well as model mortar specimens made from the above hardening materials. The marked mass content of the binder and mineral filler was 63% and 37%, respectively, in DST3, and 60% and 40% in DST2. In the composition of the cement matrix of the hardened layer of the P3 floor, the presence of clinker relics, hydration products of the C-S-H type in the form of very fine grains, clusters of elongated ettringite crystals, and larger, layered portlandite crystals were observed. In specimens from the hardened layer of P2, significant amounts of carbonation products of hydrated cement binder were found. The hardened layers of the floors differ



Rys. 5. Porowaty obszar w przekroju posadzki P3 na głębokości ok. 3-5 mm [wymiarzy obrazu ok. 1,7x4,1 mm; polaryzatory równoległe]

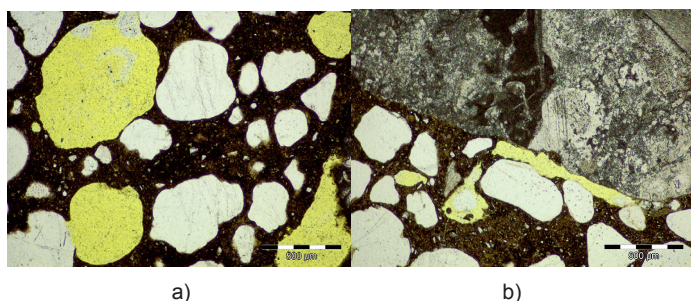
Fig. 5. Porous area in the cross-section of the P3 floor at a depth of approximately 3-5 mm [image dimensions approximately 1.7x4.1 mm; parallel polarizers]



Rys. 6. Intensywność przechodzącego światła ultrafioletowego przez cienkie szlify w wybranych obszarach na głębokości 8 mm, 20 mm i 42 mm od powierzchni posadzki P3

Fig. 6. Intensity of ultraviolet light passing through thin sections in selected areas at depths of 8 mm, 20 mm, and 42 mm from the surface of the P3 floor

3-4 mm widoczny jest obszar spękań horyzontalnych. Zarówno pod warstwą utwardzoną, jak i w głębszych warstwach betonu [obszar analizy sięgał do 40 mm], występują liczne i duże pory o kształcie soczewkowym [rys. 8]. Pory soczewkowe często zlokalizowane są pod kruszywem grubym, jak na rys. 8b na głębokości ok. 30-35 mm od powierzchni. Stwierdzono też karbonatyzację wierzchniej warstwy posadzki do głębokości ok. 1-1,5 mm.



Rys. 8. Pustki powietrzne i pory soczewkowe pod kruszywem grubym w betonie na głębokości 20-35 mm poniżej powierzchni utwardzonej P2 [wymiar obrazu 1,6x2,2 mm; polaryzatory równoległe]

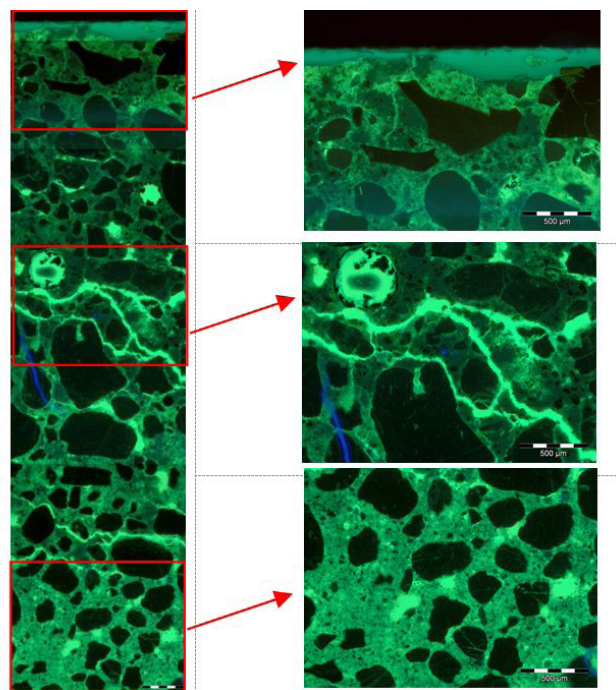
Fig. 8. Air voids and lens-shaped pores below coarse aggregate in the concrete at a depth of 20-35 mm below the hardened surface of P2 [image dimensions 1.6x2.2 mm; parallel polarizers]

from their corresponding mortar models primarily in terms of portlandite and calcite content [Table 5]. This leads to the conclusion of excessive carbonation of the hardened layer of the floor and partial carbonation of the DST3 dressing even before its use. In conclusion, a connection between floor delamination and the occurrence of horizontally cracked areas and areas with increased porosity, especially irregularly shaped pores suggesting their formation due to water accumulation under the aggregate grains in a few millimetres below the hardened layer, has been demonstrated.

4.1.3. P4 floor diagnostics results

Damage to the P4 floor appeared approximately 2 weeks after its construction, manifesting itself through intense dusting during ongoing assembly work. Immediate repair involving the application of an impregnating agent to the surface proved to be ineffective. After thorough cleaning of the floor, numerous surface delamination with a diameter of approximately 200 mm were detected [about a month after the floor was constructed]. Figure 9 shows an example of cracks on the floor surface and delamination of the surface layer with a thickness of about 3 mm, visible on the side surface of the drilled core.

The compressive strength of the concrete cores ranged from 37.3 to 42.2 MPa [average 39.6 MPa], which was consistent with the designed strength class. The macroscopic assessment of the concrete uniformity in the sections was positive regarding the uniform distribution of coarse aggregates and reinforcing fibres. However, it



Rys. 7. Przekrój posadzki P2 do głębokości około 7,8 mm od powierzchni [wymiar obrazu 8,0x2,0 mm]

Fig. 7. Cross-section of the P2 floor to a depth of about 7.8 mm from the surface [image dimensions 8.0x2.0 mm]

Diagnostyka posypok utwardzających DST2 i DST3 objęła próbki wyseparowane z warstwy utwardzonej posadzek P2 i P3 oraz próbki zapraw modelowych wykonanych z powyższych materiałów posypkowych. Oznaczona masowa zawartość spoiwa i wypełniacza mineralnego wynosiła odpowiednio 63% i 37% w DST3 oraz 60% i 40% w DST2. W składzie matrycy cementowej warstwy utwardzonej posadzki P3 stwierdzono obecność relików klinkieru, produktów hydratacji: fazy C-S-H w postaci bardzo drobnych ziaren, skupiska wydłużonych kryształów ettringitu oraz większych, warstwowych kryształów portlandytu. W próbkach warstwy utwardzonej P2 stwierdzono znaczące ilości produktów karbonatyzacji zhydratyzowanego spoiwa cementowego. Utwardzone warstwy posadzek różnią się od odpowiadających im zapraw modelowych przede wszystkim w zakresie zawartości portlandytu i kalcytu [tablica 5]. Prowadzi to do wniosku o nadmiernej karbonatyzacji warstwy utwardzonej posadzki oraz częściowej karbonatyzacji posypki DST3 jeszcze przed jej użyciem. W konkluzji można stwierdzić, że wykazano związek delaminacji posadzek z występowaniem obszarów spękanych horyzontalnie i obszarów o zwiększonej porowatości, zwłaszcza o nieregularnym kształcie porów sugerującym ich powstanie w rezultacie gromadzenia się wody pod ziarnami kruszywa w kilkumilimetrowej strefie poniżej warstwy utwardzonej.

4.1.3. Wyniki diagnostyki posadzki P4

Uszkodzenia posadzki P4 pojawiły się po około 2 tygodniach od jej wykonania, ujawniając się przez intensywne pylenie podczas prowadzonych prac montażowych. Doraźna naprawa polegająca na pokryciu powierzchni posadzki preparatem impregnującym okazała się nieskuteczna. Po starannym umyciu posadzki wykryto liczne powierzchniowe odspojenia o średnicy około 200 mm [po upływie około miesiąca od wykonania posadzki]. Na rys. 9 pokazano przykładowy widok zarysowań na powierzchni posadzki oraz odspojenie warstwy powierzchniowej o grubości ok. 3 mm, widoczne na powierzchni bocznej odwiertu.

Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu -odwiertów wynosiła od 37,3 do 42,2 MPa [średnio 39,6 MPa], zatem była zgodna z projektowaną klasą wytrzymałości. Makroskopowa ocena jednorodności betonu w przekrojach była pozytywna w zakresie jednorodności rozkładu grubych ziaren i włókien zbrojenia, ale negatywna w za-

Tablica 5 / Table 5

ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH SKŁADNIKÓW W PRÓBKACH ZAPRAW MODELOWYCH I PRÓBKACH UTWARDZONYCH WARSTW Z POSADZEK P2 I P3 [%] OZNACZONA METODĄ TERMICZNEJ ANALIZY RÓŻNICOWEJ

CONTENT OF SELECTED COMPONENTS IN MODEL MORTARS AND SPECIMENS FROM HARDENED LAYERS OF FLOORS P2 AND P3 [%] DETERMINED BY THE METHOD OF DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS

Specimen / Pochodzenie próbki	Bound water Woda związana	Wodorotlenek wapnia Calcium hydroxide	Węglan wapnia Calcium carbonate	Strata prażenia do 1000 °C Loss on Ignition up to 1000°C
Model Mortar` DST3 / Zaprawa modelowa` DST3	5.1	1.6	10.2	10.1
Model Mortar` DST2 / Zaprawa modelowa` DST2	5.8	4.5	3.4	7.9
Hardened Layer / Warstwa utwardzona P3 [DST3]	4.6	3.3	13.8	11.2
Hardened Layer / Warstwa utwardzona P2 [DST2]	4.9	2.1	11.8	10.4

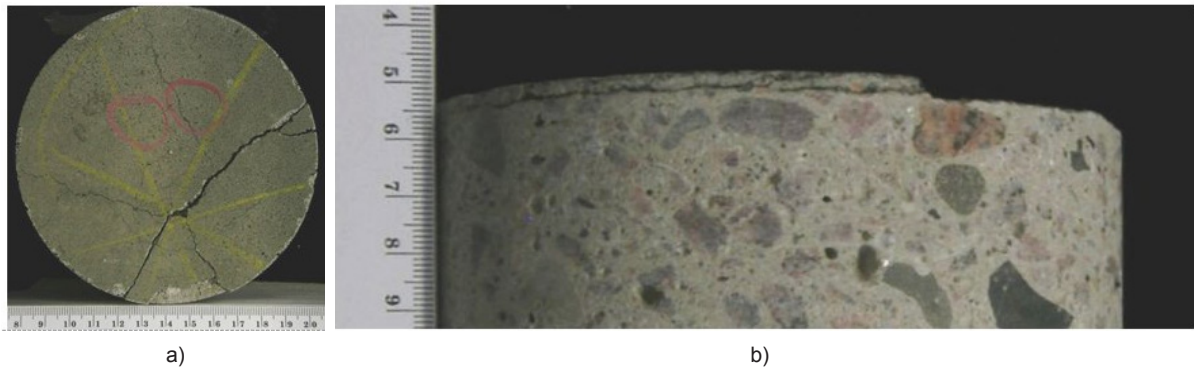
*stosunek masy wody do masy suchej posypki = 0,11; dojrzewanie 28 dni w wodzie w temperaturze laboratoryjnej / The model mortars were matured for 28 days in water at room temperature. with a water-to-dry-matter ratio of 0.11

was negative due to the observed presence of large voids above 2 mm, reaching up to 3.7%. A more detailed microscopic analysis of the air voids in the concrete according to PN-EN 480-11 (15) revealed an elevated total air void content ranging from 3.9 to 4.4%, a low specific surface area of voids at 13.71 mm⁻¹, and a low content of microvoids at 0.59%. The characteristics of the air voids indicate the presence of relatively large voids, quite distinct from the case of using air-entraining admixtures (22).

Microscopic observations of thin sections from floor P4 revealed the presence of microcracks within the hardened layer, positioned horizontally at a depth of approximately 500 µm. Below, within the concrete, at a depth of about 4-6 mm from the surface, microcracks and discontinuities were observed in a pattern parallel to the floor surface [Fig. 10]. Clusters of air voids and a crack filled with resin containing a fluorescent additive are depicted in yellow under polarized light. An analysis of the colour intensity of the cement matrix under UV light on thin sections did not show a significant variation in the w/c ratio indicator at depths ranging from 0 to 40 mm.

Observations of polished sections using scanning microscopy confirmed the localization of areas with increased porosity below the hardened layer. The measured sizes of the voids beneath the aggregate and the length of the cracks are shown in Fig. 11. An adhesive crack is visible. Based on the above microscopic observations, a connection was identified between the delamination of the floor and the presence of clusters of irregularly shaped voids in the concrete below the hardened layer.

The examination of the DST4 hardening topping was limited to the analysis of the composition of archival topping specimen [DST4a], used to create the P4 floor, and comparative topping samples from a newer batch [DST4b]. Both specimens strongly effervesced under the influence of HCl, indicating the presence of calcium carbonate. Upon wetting with water and applying phenolphthalein, both specimens immediately turned raspberry pink, indicating the presence of compounds of high alkalinity, e.g. calcium hydroxide and/or lime. In addition to very fine grains, both specimens showed the presence of larger grains up to 5 mm. The topping grains had an irregular shape and varied in size from 1 to 40 µm, with the DST4a specimen having noticeably more grains with irregular and tabular shapes.



Rys. 9. Widok próbki pobranej z posadzki P4: a) widok z góry, b) fragment powierzchni bocznej przy powierzchni posadzki [widoczne odspojenie warstwy, fragment oderwany]

Fig. 9. View of the concrete core taken from floor P4: a) top view, b) fragment of the side surface near the floor surface [visible delamination of the surface layer, detached fragment]

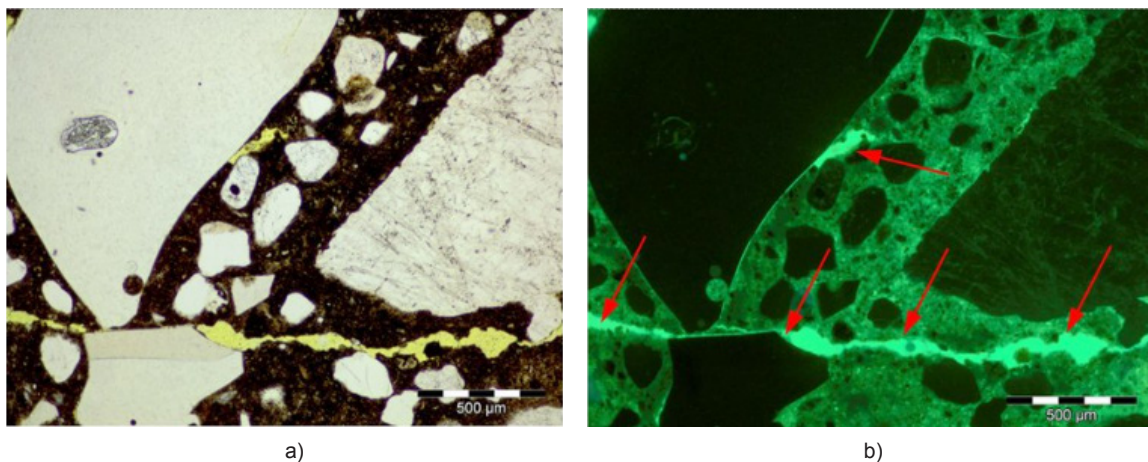
kresie stwierdzonej obecności dużych pustek powyżej 2 mm, sięgającej do 3,7%. Bardziej dokładna mikroskopowa analiza zawartości i wielkości porów powietrznych w betonie według PN-EN 480-11 (15) wykazała zwiększoną całkowitą zawartość porów od 3,9 do 4,4%, małą powierzchnię właściwą porów $13,71 \text{ mm}^{-1}$ oraz małą zawartość mikroporów 0,59%. Rozkład wielkości porów powietrznych świadczy o obecności dość dużych pustek, całkiem odmiennych od przypadku stosowania domieszek napowietrzających (22).

Obserwacje mikroskopowe cienkich szlifów z posadzki P4 ujawniły w obrębie warstwy utwardzonej występowanie mikrorys usytuowanych horyzontalnie na głębokości ok. 500 μm . Poniżej w betonie, na głębokości ok. 4-6 mm od powierzchni, występowały mikropęknięcia oraz nieciągłości w układzie równoległym do powierzchni posadzki [rys. 10]. Skupisko pustek powietrznych i rysa wypełniona żywicą z dodatkiem fluorescencyjnym są zobrazowane kolorem żółtym w świetle spolaryzowanym. Przeprowadzona na cienkich szlifach analiza intensywności barwy matrycy cementowej w świetle ultrafioletowym nie wykazała wyraźnego zróżnicowania wskaźnika w/c na głębokości od 0 do 40 mm.

The composition of the hardening topping included cement components in the form of alite, belite, tricalcium aluminate, tetracalcium aluminoferrate, gypsum and anhydrite, as well as small amounts of portlandite and calcite. Additionally, significant amounts of quartz, silicon carbide, and small amounts of dolomite were present, suggesting the addition of limestone powder with a dolomite admixture to the hardening topping. The toppings did not differ significantly from each other in terms of the morphology of the components or in terms of the qualitative phase composition. No fundamental anomalies in the composition of the hardening toppings were observed.

4.4. P5 floor diagnostics results

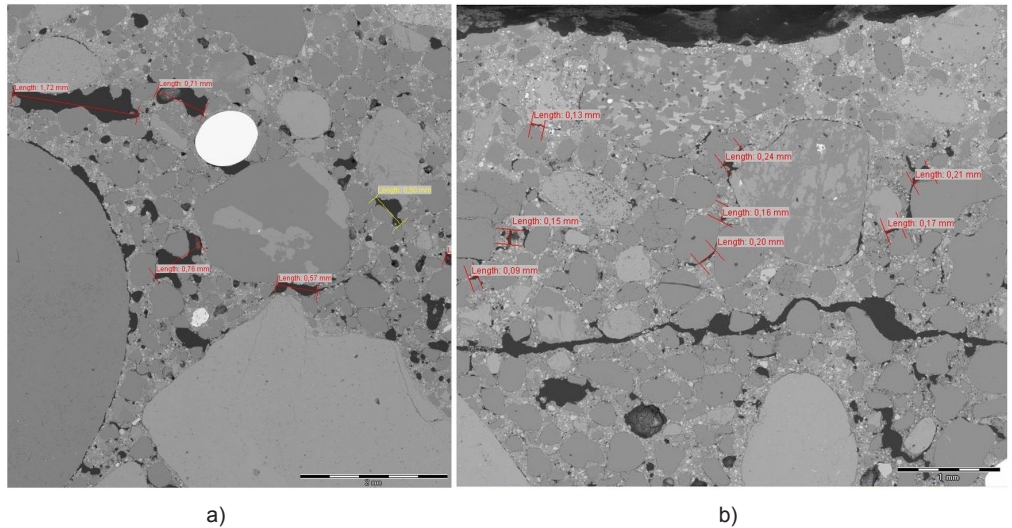
The specific damages observed on the P5 floor, involving accelerated surface wear and dusting, prompted diagnostic investigations on the hardening layer in cores, DST5 hardening toppings, and model mortar made with DST5 hardening topping. The concrete properties determined on core specimens were satisfactory. The compressive strength of the concrete ranged from 35.0 to 49.1 MPa, with an average of 44 MPa. The air content was 2.64% and 3.34%, with a small specific surface area of air voids and



Rys. 10. Nieciągłość w układzie równoległym do powierzchni P4 - pory soczewkowe łączące się w rysę oraz osobny por soczewkowy przy krawędzi ziarna kruszywa: a) w świetle przechodzącym - polaryzatory równoległe, b) w świetle UV; wymiary obrazu 1,6x2,2 mm

Fig. 10. Discontinuity in a pattern parallel to the surface of P4 - lens-shaped voids merging into a crack and a separate lens-shaped void at the edge of an aggregate grain: a) in transmitted light - parallel polarizers, b) under UV light; image dimensions 1.6x2.2 mm

Obserwacje polerowanych zglądów za pomocą mikroskopii skaningowej potwierdziły lokalizację stref o podwyższonej porowatości poniżej warstwy utwardzonej. Zmierzone wielkości porów pod kruszywem i długość spękań pokazano na rys. 11. Widoczna jest rysa odspojeniowa. Na podstawie omówionych powyżej obserwacji mikroskopowych stwierdzono związek delaminacji posadzki z występowaniem skupisk porów o nieregularnym kształcie w betonie poniżej warstwy utwardzonej.



Rys. 11. Mikrofotografia SEM wycinka przekroju posadzki P4 - widoczne nieciągłości w strefie kontaktowej kruszywo-zaczyn i pustki powietrzne (a) oraz rysa odspojeniowa na głębokości ok. 3 mm; wymiary obrazu (a) 6,6x6,0 mm, (b) 4,7x5,4 mm

Fig. 11. SEM micrograph of a cross-section specimen from the P4 floor - visible discontinuities in the aggregate-paste contact zone and voids (a), as well as a delamination crack at a depth of approximately 3 mm; image dimensions (a) 6.6x6.0 mm, (b) 4.7x5.4 mm

Sprawdzenie posypki utwardzającej DST4 ograniczyło się do analizy składu próbek posypki archiwalnej [DST4a], stosowanej do wykonania posadzki P4 i próbek posypki porównawczej pochodzącej z nowszej partii [DST4b]. Obie próbki bardzo

silnie burzyły pod wpływem HCl, co świadczy o obecności w nich węgla wapnia. Pod działaniem fenoloftaleiny obie próbki, po zwilżeniu wodą, natychmiast zabarwiały się na kolor malinowy, co świadczy o obecności w nich substancji zasadowych, np. wodorotlenku i/ lub tlenku wapnia. Oprócz bardzo drobnych ziaren, w obu próbkach wyróżniono obecność większych ziaren do 5 mm. Ziarna kruszywa miały nieregularny kształt i zróżnicowaną wielkości w granicach od 1 do 40 μm , przy czym w próbce DST4a było jednak wyraźnie więcej ziaren o kształcie nieregularnym oraz zbliżonym do tabliczek.

W składzie posypki utwardzającej zidentyfikowano składniki cementu w postaci alitu, belitu, glinianu trójwapniowego, glinożelazianu czterowapniowego oraz gipsu i anhydrytu, a także w niewielkiej ilości portlandyt i kalcyt. Ponadto występowały znaczące ilości kwarcu, węgla krzemu i małe ilości dolomitu, co może świadczyć o dodatku do posypek mączki wapiennej z domieszką dolomitu. Próbki posypek nie różniły się zasadniczo między sobą pod względem morfologii składników ani pod względem jakościowego składu fazowego. Nie stwierdzono zasadniczych anomalii składu posypek.

4.3.4. Wyniki badań posadzki P5

Specyficzne uszkodzenia posadzki P5, obejmujące przyspieszone ścieranie i pylenie powierzchni, skłoniły do przeprowadzenia badań diagnostycznych na warstwie utwardzającej w próbkach-odwiertach, na próbkach posypki DST5 oraz próbkach zaprawy modelowej wykonanej z użyciem posypki DST5. Właściwości betonu oznaczone na próbkach odwiertach nie budziły zastrzeżeń. Wytrzymałość betonu na ściskanie mieściła się w granicach 35,0-49,1 MPa, średnio 44 MPa. Zawartość powietrza wynosiła 2,64% i 3,34% przy niewielkiej powierzchni właściwej porów i znikomej zawartości mikroporów 0,32% i 0,35%. Zróżnicowanie zawartości porów powietrznych w górnej i dolnej części próbek-odwiertów nie przekraczało 0,6%.

negligible microvoids content of 0.32% and 0.35%. The variation in the air voids content between the upper and lower parts of the core samples did not exceed 0.6%.

The thermal analysis of DST5 hardening topping revealed the presence of cementitious binder that underwent partial hydration/ carbonation, evidenced by the mass loss in the temperature range of 182-380°C. Additionally, the content of portlandite was 1.2%. The content of calcium carbonate exceeded 13%. X-ray diffraction analysis identified cement components and mineral filler in the hardening topping material. Among the cement components, silicate phases - alite and belite, aluminate phases - tricalcium aluminate and tetracalcium alumino-ferrite, as well as calcium sulfates - gypsum and anhydrite, were identified (20, 23). The analysis also detected the presence of quartz and mullite, which could originate from the addition of fly ash to cement or the aggregate, as well as weathering products of cement in the form of portlandite and calcite. The filler in the topping was identified as fragments of a glassy phase with a relatively small addition of silicon carbide and corundum. In the X-ray diffraction pattern of the aggregate fraction above 1 mm, mainly containing larger filler grains, a significant background increase in the range of 20-30° in the 2 θ scale, typical of glaze, was observed. The pattern also exhibited diagnostic reflections of crystalline phases: quartz, mullite, corundum, and silicon carbide. In the fractures of specimens from the hardened surface layer from various locations on the P5 floor, the presence of filler and cement hydration products was confirmed, along with spherical grains characteristic of siliceous fly ash [Fig. 12a], with the number of visible spherical grains varying in specimens from different locations. The presence of thin plates and distinct crystals with characteristics typical of calcite was also noted [Fig. 12b].

The differentiation of identified components in specimens from the hardened layers of the floor and the model mortar (Table 6)

Analiza termiczna posypki DST5 wskazała na zawartość spoiwa cementowego, które uległo częściowej hydratacji/karbonatyzacji, o czym świadczy ubytek masy próbki w zakresie temperatury 182-380°C, obecność portlandytu w ilości 1,2% oraz stosunkowo wysoka zawartość węgla wapnia w ilości ponad 13%. Rentgenowska analiza dyfrakcyjna pozwoliła zidentyfikować składniki cementu i wypełniacza mineralnego. Ze składników cementu zidentyfikowano fazy krzemianowe – alit i belit, glinianowe – glinian trójwapniowy i glinożelazian czterowapniowy oraz siarczan wapnia – gips i anhydryt (20,23). Stwierdzono także obecność kwarcu i mulitu, które mogą pochodzić z dodatku popiołu lotnego do cementu lub do posypki oraz produkty wietrzenia cementu w postaci portlandytu i kalcytu. Jako wypełniacz w posypce zidentyfikowano okruchy fazy szklistej ze stosunkowo małym dodatkiem węgla krzemu i korundu. Na dyfraktogramie posypki frakcji powyżej 1 mm, zawierającej głównie większe ziarna wypełniacza, stwierdzono znaczące podniesienie tła w zakresie 20-30 stopni w skali 2θ , typowe dla szkliska i obecność refleksów diagnostycznych faz krystalicznych: kwarcu, mulitu oraz korundu i węgla krzemu. W przełamach próbek utwardzonej warstwy powierzchniowej z różnych miejsc posadzki P5 zanotowano występowanie wypełniacza i produktów hydratacji cementu, a także ziaren kulistych charakterystycznych dla popiołu lotnego krzemionkowego [rys. 12a], przy czym liczba widocznych ziaren kulistych była zróżnicowana w próbkach z różnych miejsc posadzki. Stwierdzono obecność cienkich płytek i wyraźnych kryształów o pokroju typowym dla kalcytu [rys. 12b].

Zróżnicowanie wyodrębnionych składników w próbkach warstw utwardzonych posadzki i zaprawy modelowej [tablica 6] wskazuje na różnice stopnia ich hydratacji i karbonatyzacji, a pośrednio na różnice w warunkach ich dojrzewania. Stosunek zawartości węgla wapnia do zawartości wody związanej w produktach hydratacji cementu [HI] wskazuje, jak dużo produktów hydratacji uległo procesowi karbonatyzacji. Dla próbki zaprawy modelowej ten stosunek wynosi 0,9, natomiast w próbkach utwardzonej warstwy był wielokrotnie większy, wynosił 7,1; 11,5 oraz 30,4. Konfrontując rezultaty ze słownym opisem miejsc pochodzenia próbek okazało się, że im bardziej pyłaca próbka, tym większy jest ten stosunek. Na podstawie porównania intensywności refleksów dyfrakcyjnych alitu oszacowano stopień jego uwodnienia w próbce zaprawy modelowej i próbkach utwardzonej warstwy posadzki P5: odpowiednio około 50% i 73-75%. Analiza intensywności refleksów kalcytu potwierdziła wielokrotnie mniejszą jego zawartość w próbce zaprawy modelowej niż w próbkach warstwy utwardzonej.

Badania mikrotwardości wykazały grupowanie się mikrotwardości próbek modelowych stwardniałej posypki mineralnej DST5 w dwóch przedziałach: od 0,7 do 1,0 GPa [matryca cementowa] oraz od 4 do 5 GPa [ziarna kruszywa mineralnego], (21). W około 50% miejsc w przekroju badania wykazały mikrotwardość < 1,0 GPa. Natomiast w próbkach utwardzonej warstwy posadzki P5 zanotowano mikrotwardość matrycy w przedziale 0,25-0,5 GPa. Na podstawie skumulowanej częstości występowania stwierdzono, że mikrotwardość < 1,0 GPa charakteryzuje ok. 90% miejscowych odcisków. Mniejsza mikrotwardość stwardniałej matrycy cementowej i większy udział miejsc o obniżonej mikrotwardości w próbkach

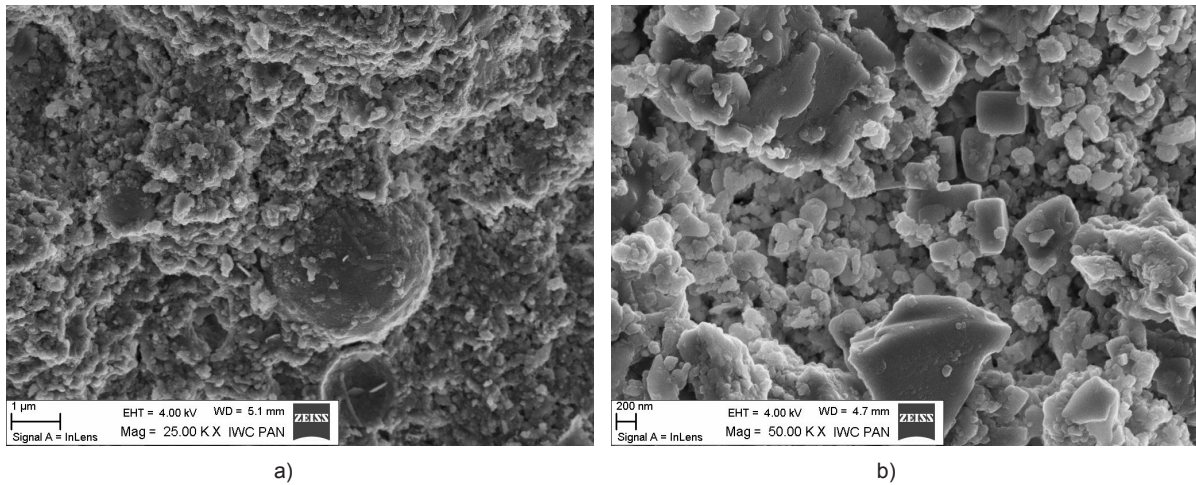
indicates differences in their hydration and carbonation degrees, indirectly reflecting variations in their curing conditions. The ratio of calcium carbonate content to the content of water bound in cement hydration products [HI] indicates how much of the hydration products have undergone carbonation. For the model mortar, this ratio is 0.9, while in the specimens from the hardened layer, it is significantly higher, ranging from 7.1 to 30.4. Comparing the results with the verbal description of the specimen origins revealed that the higher the dusting of the specimen the greater this ratio. Based on the comparison of the intensity of diffractive reflections of alite, the degree of its hydration was estimated to be around 50% in the model mortar and 73-75% in the specimens from the hardened layer of the P5 floor. The analysis of the intensity of calcite reflections confirmed a significantly lower content in the model mortar compared to the specimens from the hardened layer.

Microindentation studies revealed a grouping of microhardness in the modelled hardened mineral topping DST5 in two ranges: from 0.7 to 1.0 GPa [cement matrix] and from 4 to 5 GPa [mineral aggregate grains], (21). In approximately 50% of the cross-sectional areas, microhardness < 1.0 GPa was observed. In the specimens of the hardened layer of the P5 floor, the microhardness of the matrix ranged from 0.25 to 0.5 GPa. Based on the cumulative frequency of occurrence, it was found that microhardness < 1.0 GPa characterizes about 90% of the local impressions. The lower microhardness of the hardened cement matrix and the higher proportion of areas with reduced microhardness in the specimens of the hardened floor layer indicate a lower density of hydration products and the presence of microcracks. The obtained mechanical characteristics of the cement matrix support the conclusion about the significant role of increased carbonation in the hardened topping layer, causing additional shrinkage and reducing resistance to dusting and wear.

5. Discussion

Determining the causes of premature floor damage is a complex process that can sometimes result in disputes among investors, concrete floor contractors, and material suppliers, making objective recognition challenging (24). Simplified hypotheses, such as excess water in the concrete mix or top layer, may emerge after an initial visual assessment. Excess water in the mix is identified based on systematic consistency evaluations during deliveries and control of concrete strength. In the discussed cases of floor diagnostics, the compressive strength of the concrete essentially met the design specifications, sometimes even exceeding them. Nevertheless, localized insufficient compaction of the mix at screed rails and errors in the positioning of reinforcement meshes led to premature cracking and extensive chipping of the P1 floor in the vicinity of the screed rails. The causes of damage to this floor could be identified without additional petrographic examinations of concrete.

Issues such as intense dusting and low wear resistance typically indicate reduced concrete strength, especially in the top layer, likely caused by excess water, the presence of undesirable components,



Rys. 12. Mikrostruktura utwardzonej warstwy posadzki P5 – obrazy SEM w przełomie: a) produkty hydratacji cementu w formie drobnoziarnistych C-S-H oraz kuliste ziarna popiołu lotnego, b) drobne kryształy o pokroju typowym dla kalcytu; wymiary obrazu (a) 9x12 µm, (b) 4,5x6,0 µm

Fig. 12. Microstructure of the hardened layer of the P5 floor – SEM images in fresh fracture: a) cement hydration products in the form of finely-grained C-S-H and spherical grains of fly ash, b) small crystals with a typical calcite shape; image dimensions (a) 9x12 µm, (b) 4.5x6.0 µm

Tablica 6 / Table 6

ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH SKŁADNIKÓW W PRÓBKACH ZAPRAWY MODELOWEJ I PRÓBEK UTWARDZONEJ WARSTWY POSADZKI POBRANYCH Z RÓŻNYCH MIEJSC P5 [%]

CONTENT OF SELECTED COMPONENTS IN MODEL MORTAR AND HARDENED LAYER OF THE FLOOR TAKEN FROM VARIOUS LOCATIONS IN P5 [%]

Pochodzenie próbki / Specimen origin	Woda związana Bound water			Wodorotlenek wapnia Calcium hydroxide	Węglan wapnia Calcium carbonate	Strata prażenia do 1000 °C / Loss on Ignition up to 1000°C
	HI	HCH	Suma Total			
Zaprawa modelowa` DST5 / Model Mortar (DST5) `	5.1	0.7	5.8	2,9	5.4	8.2
Warstwa utwardzona #302 / Hardened Layer #302	6.1	0.6	6.7	2,5	47.4	27.6
Warstwa utwardzona #205 / Hardened Layer #205	4.0	-	4.0	-	46.1	24.3
Warstwa utwardzona #202 / Hardened Layer #202	1.1	-	1.1	-	33.4	15.9

* stosunek masy wody do masy suchej posypki = 0,11; dojrzewanie 28 dni w wodzie w temperaturze laboratoryjnej / The ratio of water mass to dry mass of the coating = 0.11; curing for 28 days in water at laboratory temperature

utwardzonej warstwy posadzkowej świadczy o mniejszej zwartości produktów hydratacji i występowaniu mikropęknięć. Otrzymana charakterystyka mechaniczna matrycy cementowej wspiera wnioskowanie o istotnej roli zwiększonej karbonatacji warstwy utwardzonej posypki, prowokującej dodatkowy skurcz i obniżenie odporności na pylenie i ścieranie.

5. Dyskusja

Ustalenie przyczyn przedwczesnego uszkodzenia posadzki jest złożone i niekiedy prowadzi do sporów pomiędzy inwestorami, wykonawcami posadzek i dostawcami materiałów, co utrudnia obiektywne rozpoznanie (24). Uproszczone hipotezy, takie jak nadmiar wody w mieszance betonowej lub warstwie utwardzającej, mogą nasuwać się po wstępnej ocenie wizualnej. Nadmiar wody w mieszance rozpoznaje się na podstawie systematycznej oceny konsystencji przy dostawach oraz kontroli wytrzymałości wbudowanego betonu. W omawianych przypadkach diagnostyki

premature mechanical trowelling, or inadequate moisture curing (25, 26). In the case of the P5 floor, mapping the local microhardness of the top layer did not provide unequivocal confirmation of its reduced strength. However, based on microscopic observations and thermal analysis, evidence of accelerated carbonation of the curing layer was obtained, reaching a depth of up to 1.5 mm. The ratios of calcite content to water content bound in cement hydration products were correlated with a visual assessment of the intensity of dusting on the floor. Elevated operating temperatures in the hall contributed to accelerated carbonation. The DST5 topping also showed the presence of an undesirable component - fly ash, as well as insufficient content of the expected abrasion-resistant filler, replaced by quartz filler. Nevertheless, partially weathered binder and accelerated carbonation of the surface layer contributed to dusting and premature wear issues in both the P5 and P4 floors.

The technology of surface hardening using DST toppings is incompatible with the use of air-entrained concrete with air-entraining admixtures (27). Without an air-entraining admixture in the concrete

posadzek wytrzymałość na ściskanie betonu zasadniczo odpowiadała specyfikacjom projektowym, niekiedy je przekraczała. Mimo tego, miejscowe niedostateczne zagęszczenie mieszanki przy zabetonowanych prowadnicach oraz błędy pozycjonowania siatek zbrojenia doprowadziły do przedwczesnego spękania i rozległego wykruszenia posadzki P1 w otoczeniu prowadnic. Przyczyny uszkodzeń tej posadzki można było wskazać bez dodatkowych badań petrograficznych betonu.

Problemy takie jak intensywne pylenie i niska odporność na ścieranie zazwyczaj wskazują na zmniejszoną wytrzymałość betonu, szczególnie w warstwie przy powierzchni, prawdopodobnie spowodowaną nadmiarem wody, obecnością niepożądanych składników, przedwczesnym zacieraniem mechanicznym lub nieodpowiednią pielęgnacją wilgotnościową (25, 26). W posadzce P5 mapowanie miejscowej mikrotwardości warstwy utwardzającej nie przyniosło jednoznacznego potwierdzenia jej zmniejszonej wytrzymałości. Natomiast na podstawie obserwacji mikroskopowych i analizy termicznej uzyskano dowody przyspieszonej karbonatyzacji warstwy utwardzonej, sięgającą na głębokość do 1,5 mm. Proporcje zawartości kalcytu do zawartości wody związanej w produktach hydratacji cementu były skorelowane z wizualną oceną stopnia intensywności pylenia posadzki. Przyspieszonej karbonatyzacji sprzyjała podwyższona temperatura eksploatacji hali. W posypce DST5 wykazano również obecność niepożądanego składnika - popiołu lotnego, a także niedostateczną zawartość oczekiwanego trudnościeralnego wypełniacza, zastąpionego wypełniaczem kwarcowym. Niemniej jednak, to częściowo zwietrzałe spoiwo i przyspieszona karbonatyzacja warstwy wierzchniej przyczyniły się do wystąpienia problemów z pyleniem i przedwczesnym ścieraniem posadzki P5, jak również posadzki P4.

Technologia utwardzania powierzchni przy użyciu posypek DST jest niekompatybilna z użyciem betonu napowietrzonego przy użyciu domieszek napowietrzających (27). Bez domieszki napowietrzającej w mieszance betonowej pęcherzyki powietrza złapane podczas mieszania składników są z niej usuwane podczas układania i wibracyjnego zagęszczania. Kontrola zawartości pustek powietrznych w przekrojach betonu stwardniałego wykazuje ewentualny nadmiar zawartości porów powietrznych. Nadmiar powietrza w betonie nie jest zdefiniowany w PN-EN 206 (28) ani w normach związanych – konwencjonalnie przyjmuje się w dobrze zagęszczonym betonie zawartość porów powietrznych nie przekracza 2-3%. W omawianych przypadkach diagnozowanych posadzek P2, P3 i P5 wyznaczona zawartość powietrza w betonie na ogół nie przekraczała 3,3%, co przy uwzględnieniu niepewności pomiaru uznaje się za zgodne z konwencjonalnym wymaganiem. W przypadku posadzki P4 oraz miejscowo w posadzce P3 zanotowano wyraźnie zwiększoną zawartość powietrza, od 3,9% do 4,6%, przy jednoczesnej małej powierzchni właściwej porów i marginalnej zawartości mikroporów. Były to więc duże i nieregularne pustki powietrzne, które następnie zostały zlokalizowane w przekrojach betonu jako pustki koncentrujące się przede wszystkim w określonym obszarze kilku milimetrów poniżej warstwy utwardzającej. Stwierdzono korelację występowania miejscowo podwyższonej porowatości betonu z występowaniem delaminacji posadzek P3 i P4.

mix, air voids trapped during mixing are removed during placement and vibrational compaction. Monitoring the content of air voids in cross-sections of cured concrete indicates a potential excess of air void content. Excess air in concrete is not defined in PN-EN 206 (28) or related standards; conventionally, well-compacted concrete is assumed to have an air void content not exceeding 2-3%. In the discussed cases of diagnosed floors P2, P3, and P5, the determined air content in the concrete generally did not exceed 3.3%, which, considering measurement uncertainty, is deemed consistent with conventional requirements. However, in the case of floor P4 and locally in floor P3, a clearly elevated air content was noted, ranging from 3.9% to 4.6%, with simultaneous small specific surface area of air voids and marginal content of microvoids. These were large and irregular air voids, subsequently located in concrete cross-sections as voids primarily concentrated in a specific area a few millimetres below the top layer. A correlation was observed between the locally increased porosity of the concrete and the occurrence of delamination in floors P3 and P4.

Excessive air entrapped in concrete despite vibration can be caused by the viscosity of the concrete mix, which can be reduced by adjusting the mix design, i.e., by reducing the sand content by 60 to 120 kg/m³ and replacing it with an equal amount of the smallest available coarse aggregate (25). Sticky concrete mixes may be more prone to sealing during mechanical trowelling operations, as they tend to form a surface crust under the influence of dry winds, while deeper layers of concrete remain plastic. In challenging floor construction conditions, when a crust appears prematurely on the concrete surface, it is necessary to modify the compaction and finishing techniques. Inadequate compaction may not release entrapped air, and excessive vibrations may leave an excessive amount of fine material particles on the surface, causing crust formation and prompting premature finishing of the floor (25).

Air voids in concrete significantly affect the slowing down of the natural sedimentary transport phenomenon of concrete mix with water bleeding upward (29, 30). Due to the slowed water bleeding on the already levelled surface, additional moisture does not appear in the expected time, and the upper surface of the laid floor slab is susceptible to rapid stiffening due to evaporation. Concrete in the lower layers behaves normally and remains plastic, gradually stiffening due to the chemical reaction of cement with water. However, the condition of the surface determines the timing of finishing operations; otherwise, the proper finish becomes impossible. If mechanical trowelling of the floor using DST toppings is carried out prematurely, a hardened layer of the floor will form on the surface, closing the way for water bleeding from the laid concrete. The water bleeding phenomenon, slowed due to the excessive presence of air voids, will progress, causing water to accumulate in the concrete beneath the top layer, creating a zone with increased porosity. The occurrence of such a zone with increased porosity in the discussed floors P3 and P4, which underwent delamination, was precisely identified through quantitative petrographic examinations.

Postulated mechanism of floor delamination aligns with observations (24, 31, 32) and other researchers cited in (11). The slowing

Nadmierna ilość powietrza uwięzionego w betonie pomimo wibracji może być spowodowana lepkością mieszanki betonowej, którą można zmniejszyć poprzez korektę receptury, tj. zmniejszenie zawartości piasku o 60 do 120 kg/m³ i zastąpienie go taką samą ilością najmniejszego dostępnego kruszywa grubego, (25). Lepkie mieszanki betonowe mogą łatwiej ulegać uszczelnieniu podczas operacji mechanicznego zacierania, ponieważ mają tendencję do tworzenia powierzchniowej skorupy pod wpływem podmuchów suchego wiatru, podczas gdy głębsze warstwy betonu pozostają plastyczne. W trudnych warunkach wykonania posadzki, kiedy na powierzchni betonu przedwcześnie pojawia się skorupa, konieczna jest modyfikacja techniki zagęszczania i wykańczania. Niewystarczające zagęszczanie może nie uwolnić uwięzionego powietrza; nadmierne wibracje mogą spowodować pozostawienie na powierzchni nadmiernej ilości drobnych cząstek materiału, powodując powstawanie skorupy i prowokując do przedwczesnego wykończenia posadzki (25).

Pustki powietrzne w betonie znacząco wpływają na spowolnienie naturalnego zjawiska sedimentacji mieszanki betonowej z odsączaniem wody ku górze (29,30). Z powodu spowolnienia odsączania wody na wyrównanej już powierzchni w spodziewanym czasie nie pojawia się dodatkowa wilgoć i górna powierzchnia ułożonego podkładu podłogowego jest podatna na szybkie usztywnienie w wyniku parowania. Beton w niższych warstwach zachowuje się normalnie i pozostaje plastyczny, stopniowo sztywniejąc w wyniku reakcji chemicznej cementu z wodą. Niemniej jednak stan powierzchni decyduje o chwili rozpoczęcia zabiegów wykończeniowych, w przeciwnym razie stanie się to niemożliwe. Jeżeli mechaniczne zacieranie posadzki z użyciem posypki DST zostanie przeprowadzone przedwcześnie, to wytworzy się na powierzchni utwardzona warstwa posadzki, która od góry zamknie drogę dla wody odsączanej z ułożonego betonu. Spowolnione nadmierną obecnością pustek powietrznych zjawisko odsączania wody będzie postępować powodując gromadzenie się wody w betonie pod warstwą utwardzającą, tworząc strefę o podwyższonej porowatości. Właśnie występowanie takiej strefy o podwyższonej porowatości w omawianych posadzkach P3 i P4, które uległy delaminacji, zostało stwierdzone za pomocą ilościowych badań petrograficznych.

Postulowany mechanizm delaminacji posadzek jest zgodny z obserwacjami (24,31,32) i innych badaczy cytowanych w (11). Spowolnienie odsączania wody powoduje nie tylko nadmiar pustek powietrznych w betonie, ale także obecność nieklinkierowych składników cementu [w tym mielonego żużla wielkopieczowego], (30). Natomiast wzrost temperatury betonu przyspiesza odsączanie wody, przy czym obecność plastyfikatorów w mieszance zmniejsza odsączanie w podwyższonej temperaturze. Z uwagi na mnogość czynników materiałowych i środowiskowych wpływających na przebieg zjawiska odsączania wody i jego istotne znaczenie w technologii mechanicznego wykańczania posadzek utwardzanych powierzchniowo, jasne jest jak wielkie znaczenie ma doświadczenie wykonawcy robót posadzkowych.

Kryteria funkcjonalne posadzek przemysłowych obejmują równość powierzchni, nośność konstrukcji warstwowej i trwałość

down of water bleeding results not only from an excess of air voids in the concrete but also from the presence of non-clinker cementitious components [including ground granulated blast furnace slag] (30). Meanwhile, the increase in concrete temperature accelerates water bleeding but the presence of plasticizers in the mix reduces bleeding at elevated temperatures. Due to the multitude of material and environmental factors influencing the course of the water bleeding phenomenon and its significant importance in mechanically trowelled surface-hardened floors, the experience of the flooring contractor is crucial.

Functional criteria for industrial floors include surface evenness, load-bearing capacity of the layered structure, and material durability (3, 11). In the case of a monolithic connection between the surface layer and the concrete substrate, these criteria are integrally linked to the quality of the supplied concrete mix, the quality of its placement, and the finishing of the surface using DST toppings. Therefore, the normative approach to concrete quality according to PN-EN 206 (28) is not sufficient, and appropriately high competencies of the concrete technologist and flooring contractor are required. When the mix is cohesive and requires longer vibration and slower spreading, it would be advisable to either adjust the concrete mix recipe or adapt the pace of finishing work (25). By selecting the number and efficiency of machines for DST topping distribution and surface trowelling, and above all, an appropriate time regimen for finishing activities adapted to the ambient temperature, the contractor achieves the desired effect of a monolithic connection of the hardened surface layer with the substrate.

6. Conclusions

The application of quantitative petrography of concrete to drilled cores from surface-hardened industrial floors enabled the identification of causes of delamination, reduced wear resistance, and intense floor dusting. The inference relied on the quantitative assessment of the size and distribution of air voids and their clusters, areas exhibiting increased porosity due to the accumulation of bleeding water, areas of segregation of mineral aggregate grains, and the pattern of cracks. Recognizing the characteristic elements of the phase composition of the cement matrix and the hardened top layer, along with its local microhardness characteristics, significantly complemented the inference methodology. Quantitative petrography of concrete plays a crucial role in supporting the conventional methodology for diagnosing industrial floors in cases of surface damage.

Acknowledgment

The authors express their gratitude to doc dr inż. Róża Krzywobłocka-Laurów and mgr inż. Kazimierz Ładyżyński for their participation in diagnostic investigation.

materiałową, (3,11). Przy monolitycznym połączeniu warstwy wierzchniej z podkładem betonowym, kryteria te są integralnie związane z jakością dostarczonej mieszanki betonowej, jakością jej układania i wykończenia powierzchni z użyciem posypki DST. Dlatego normowe ujęcie jakości betonu według PN-EN 206 (28) nie jest wystarczające, wymagane są odpowiednio wysokie kompetencje technologa betonu i wykonawcy posadzki. Kiedy mieszanka jest spoista i wymaga dłuższego wibrowania i wolniejszego rozkładania, należałoby albo skorygować recepturę betonu albo dostosować tempo prac wykończeniowych (25). Przez dobór liczby i wydajności urządzeń rozkładających posypkę DST i zacierających powierzchnię, a przede wszystkim odpowiedni reżim czasowy czynności wykończeniowych, dostosowany do temperatury otoczenia, wykonawca osiąga pożądany efekt monolitycznego połączenia utwardzonej warstwy powierzchniowej z podkładem.

6. Wnioski

Zastosowanie metodyki ilościowej petrografii betonu na próbkach odwiertów z utwardzanych powierzchniowo posadzek przemysłowych pozwoliło na wykrycie przyczyn delaminacji, obniżonej odporności na ścieranie oraz intensywnego pylenia posadzek. Wnioskowanie opierało się na ilościowej ocenie wielkości i rozkładu występowania porów powietrznych i ich skupisk, obszarów o podwyższonej porowatości powodowanej gromadzeniem się odsączającej się wody, obszarów segregacji ziaren kruszywa mineralnego oraz układu spękań. Rozpoznanie charakterystycznych elementów składu fazowego stwardniałej matrycy cementowej i utwardzonej warstwy powierzchniowej, wraz z jej miejscową charakterystyką mikrotwardości, stanowiło istotne uzupełnienie metodyki wnioskowania. Ilościowa petrografia betonu istotnie wspiera konwencjonalną metodykę diagnostyki posadzek w przypadkach występowania uszkodzeń powierzchniowych.

Podziękowanie

Autorzy wyrażają podziękowanie doc dr inż. Róży Krzywobłockiej-Laurów i mgr inż. Kazimierzowi Ładyżyńskiemu za udział w badaniach diagnostycznych i współpracę w opracowaniu ekspertyz.

Literatura / References

1. A.Nowacki, Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych część B: Roboty wykończeniowe zeszyt 8: Posadzki betonowe utwardzone powierzchniowo preparatami proszkowymi, Instytut Techniki Budowlanej, 2023.
2. P.Woyciechowski, G.Adamczewski, W.Radomski, M.Jasak, R.Palacz, Warunki wykonywania posadzek betonowych a ich jakość eksploatacyjna, *Materiały Budowlane*, 9, 8-10 (2014).
3. Technical Report 34. Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction, Fourth Edition, The Concrete Society, 2016.
4. L.Czarnecki, Defects and damage of floors, in: *Industrial Floors - RILEM TC 184-IFE: State-of-the-Art Report*, 2006, 34-44.

5. Ł.Drobiec, Diagnostyka posadzek przemysłowych, *Materiały Budowlane*, nr 10, 6-8 (2021).
6. B.G.Chmielewska, G.Adamczewski, Wady i naprawy posadzek przemysłowych utwardzonych powierzchniowo, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna. Awary budowlane. Zapobieganie diagnostyka naprawy rekonstrukcje. 2013, 777-786.
7. M.A.Glinicki, R.Krzywobłocka-Laurów, K.Ładyżyński, Wpływ składu kruszywa na uszkodzenia betonowych posadzek przemysłowych, XVIII Konferencja Naukowo Techniczna „Beton i prefabrykacja - Jadwisin 2002”, CEBET, Tom 1, 106-111.
8. L.Wolff, Defects and Damage of Joints, in: *Industrial Floors - RILEM TC 184-IFE: State-of-the-Art Report*, 2006, 45-60.
9. A.M.Brandt i J.Kasperkiewicz, (red.) Metody diagnozowania betonów i betonów wysoko-wartościowych na podstawie badań strukturalnych, IPPT PAN - NATO, 2003.
10. A.M.Brandt, M.A.Glinicki, Ocena jakości betonu w budynku, który uległ katastrofie w wyniku przemrożenia betonu, XXII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, 2005, 163-171.
11. P.Hajduk, Projektowanie i ocena techniczna betonowych podłóg przemysłowych, PWN, 2018.
12. D.Jóźwiak-Niedźwiedzka, Z.Tucholski, Wiadukt żelbetowy z początków XX wieku - analiza mikrostruktury stuletniego betonu, *Drogi i Mosty*, 9(3), 23-37 (2010).
13. M.A.Glinicki, M. Zieliński, The influence of CFBC fly ash addition on phase composition of air-entrained concrete, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences -Technical Sciences*, 56(1), 45-52 (2008).
14. Instrukcja ITB nr 357/98 Badania składu fazowego betonu, Instytut Techniki Budowlanej, 1998.
15. PN-EN 480-11 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN 2008.
16. ASTM C856/C856M-20 Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, ASTM International, 2020.
17. M.A.T.M. Broekmans, I.Fernandes, O. Fredin, A. Margreth, Polarization-fluorescence Microscopy in the Study of Aggregates and Concrete, *Elements* 18(5), 321-326 (2022).
18. ASTM C1723-16 Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy, ASTM International, 2016.
19. R.Krzywobłocka-Laurów, D.Siemaszko-Lotkowska, Oznaczanie i ocena składu fazowego podstawowych cementów powszechnego użytku, *Prace Instytutu Techniki Budowlanej - Kwartalnik* 3(139), 17-43 (2006).
20. A.Bobrowski, M.Gawlicki, A.Łagosz, W. Nocuń-Wczelick, Cement. Metody badań. Wybrane kierunki stosowania, red. W. Nocuń-Wczelick, Wydawnictwa AGH, 2010.
21. Z.Ranachowski, M.A.Glinicki, G.Nowowiejski, Application of acoustic emission method for concrete component identification during microhardness testing, *Cem Wapno Beton* 15(4), 202-209 (2010).
22. M.Dąbrowski, A.Ignerowicz, M. Oleksik, P. Kucharski, M.A.Glinicki, Stabilność charakterystyki porów i przepuszczalność betonu nawierzchniowego z cementami z dodatkami mineralnymi, XI Konferencja DNI BETONU Tradycja i Nowoczesność, 2021, 699-713.
23. W.Kurdowski, Chemia cementu i betonu, SPC, 2010.
24. I. Fernandes, M.A.T.M. Broekmans, F.Noronha. Petrography and geochemical analysis for the forensic assessment of concrete damage, in: K.Ritz, L.Dawson, D.Miller (eds.), *Criminal and Environmental Soil Forensics*, Springer Science + Business Media, 2009, 163-180.

25. ACI 302.1, Guide to Concrete Floor and Slab Construction, American Concrete Institute, 2015.
26. P.Woyciechowski, G.Adamczewski, Przyczyny pylenia posadzki przemysłowej w hali magazynowej, Materiały Budowlane, 25-27 (2012).
27. D.R. Lankard, Air Entrainment and Delaminations, Concrete International, 26(11), 21-30 (2004).
28. PN-EN 206 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, PKN, 2016.
29. A.M. Neville, Właściwości betonu, Polski Cement, 2012.
30. S.H. Kosmatka, Bleed water.in: J. F. Lamond and J.H.Pielert (eds.), Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. ASTM STP 169D, ASTM International, 2006, 99-122.
31. M.A.T.M. Broekmans, Microscale sedimentary transport phenomena reveal the origin of delamination in an industrial floor, Mater. Character. **53**(2-4), 233–241 (2004).
32. W.Ryżyński, Utwardzanie powierzchniowe posadzki betonowej – cz. II, Inżynier Budownictwa, 15.04/2015; <https://inzynierbudownictwa.pl/utwardzanie-powierzchniowe-posadzki-betonowej-cz-ii/>.