

# Długoterminowe badania stwardniałych zaczynów cementowych w warunkach odwzorowujących pracę podziemnych magazynów wodoru

## Long-term studies of hardened cement slurries under conditions simulating the operation of underground hydrogen storage facilities

Marcin Rzepka, Miłosz Kędzierski

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych stwardniałych zaczynów cementowych przeznaczonych do użycia w podziemnych magazynach wodoru. Testy laboratoryjne prowadzone były dla trzynastu receptur zaczynów cementowych (dziesięć receptur wykonano na 3-proc. roztworze KCl, natomiast trzy receptury na solance NaCl o pełnym nasyceniu). Do zaczynów wprowadzano różne dodatki modyfikujące (m.in. nanomateriały w postaci nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lateks oraz środek polimerowy). Ponadto w skład zaczynów cementowych wchodziły domieszki odpieniające, upłynniające, antyfiltracyjne, spęczniające oraz opóźniacz czasu wiązania. Badania prowadzono w autoklawach ciśnieniowych, jak i przy ciśnieniu atmosferycznym. Do sporządzania zaczynów cementowych używano mikrocementu, gipsu modelowego i cementu wiertniczego klasy G. Określano parametry technologiczne stwardniałych zaczynów cementowych, tj. wytrzymałość na ściskanie, przyczepność do rur stalowych oraz porowatość. Spośród testowanych receptur zarabianych 3-proc. roztworem KCl najkorzystniejsze parametry technologiczne uzyskano dla próbki zawierającej w swym składzie 0,5% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (nanoglinu) oraz 20% mikrocementu. Kamień cementowy powstały po związaniu tego zaczynu cechował się niezwykle wysoką wytrzymałością mechaniczną. Po 20 miesiącach hydratacji próbki osiągnęły wytrzymałość ok. 53–55 MPa. Przyczepność do rur stalowych próbek cementowych również była bardzo wysoka i wynosiła ok. 12 MPa. Kamień cementowy z nanoglinem i mikrocementem posiadał również najniższą porowatość spośród badanych próbek (jego porowatość po deponowaniu w autoklawie wyniosła 19%). Pory o najmniejszych rozmiarach (poniżej 100 nm) stanowiły zdecydowaną większość z ogólnej ilości porów występujących w matrycy cementowej (było to ponad 95% ogólnej ilości porów). W przypadku próbek sporządzanych na bazie solanki NaCl o pełnym nasyceniu zauważano nieznaczną poprawę parametrów technologicznych zaczynów wzbogaconych nanokomponentami w porównaniu z zaczynem bazowym. Uogólniając, parametry mechaniczne zaczynów cementowych zarabianych wodą, w której rozpuszczono 360 g/l soli NaCl, były słabsze niż te, jakie uzyskano dla próbek wykonanych na 3-proc. roztworze KCl. Zaprezentowane w artykule receptury zaczynów cementowych o najlepszych parametrach, zawierające odpowiednio dobrane komponenty, mogą być rekomendowane do prac związanych z uszczelnianiem rur okładzinowych w otworach wierconych dla magazynowania wodoru.

**Słowa kluczowe:** zaczyn cementowy, kamień cementowy, magazynowanie wodoru.

**ABSTRACT:** The article presents the results of laboratory tests on hardened cement slurries intended for use in underground hydrogen storage facilities. Laboratory tests were conducted for thirteen cement slurry formulations (ten prepared using a 3% KCl solution, and three using a fully saturated NaCl brine). Various modifying additives were introduced into the slurries (including nanomaterials in the form of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, latex, and a polymer agent). Furthermore, the cement slurries contained defoaming, fluidizing, anti-filtration, and expansive admixtures, as well as a set retarder. The tests were carried out both in pressure autoclaves and at atmospheric pressure. Microcement, modeling gypsum, and API Class G well cement were used to prepare the cement slurries. The technological parameters of the hardened cement slurries, i.e., compressive strength, adhesion to steel pipes, and porosity, were determined. Among the tested formulations prepared using a 3% KCl solution, the most favorable technological parameters were obtained for the sample containing 0.5% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (nanoalumina) and 20% microcement. The cement stone formed after the setting of this slurry was characterized by exceptionally high mechanical strength. After 20 months of hydration, the samples reached a strength of approximately 53–55 MPa. The adhesion of the cement samples to steel pipes was also very high, amounting to approximately 12 MPa. The formulation containing nanoalumina and microcement also had the lowest porosity among the tested samples (its porosity after deposition in the autoclave was 19%). The smallest pores, with diameters below 100 nm, constituted the vast majority of the total number of pores present in the cement matrix, accounting for over 95% of the total number of pores. For samples prepared with fully saturated NaCl brine, a slight improvement in the technological parameters of the cement slurries enriched with nanocomponents was observed compared with the base slurry. In general, the mechanical parameters of cement slurries mixed with water in which 360 g/L of NaCl salt had been dissolved

Autor do korespondencji: M. Rzepka, e-mail: [rzepka@inig.pl](mailto:rzepka@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 26.01.2026 r. Zatwierdzono do druku: 02.06.2026 r.

were lower than those obtained for samples prepared using a 3% KCl solution. The cement slurry formulations presented in the article, exhibiting the most favorable parameters and containing appropriately selected components, can be recommended for use in sealing casing pipes in boreholes designed for hydrogen storage.

Keywords: cement slurry, cement stone, hydrogen storage.

## Wprowadzenie

Magazynowanie wodoru pod ziemią można traktować jako innowacyjną formę zagospodarowania energii wytworzonej w okresie, w którym występują nadwyżki jej produkcji. Proces magazynowania może być realizowany z wykorzystaniem wyeksploatowanych złóż gazu ziemnego i ropy, kawern solnych, a także w warstwach wodonośnych. W literaturze naukowej omówiono zarówno zatłaczanie wodoru w wyeksploatowane złoża gazu ziemnego i ropy (Such, 2020; Labus i in., 2022; Miziołek i in., 2022; Rzepka i Kędziński, 2025), jak i zatłaczanie go do kawern solnych (Kędziński i Rzepka, 2022, 2023, 2024). Dla zapewnienia bezpiecznego zmagazynowania wodoru pod ziemią konieczne jest zapewnienie jak najwyższej szczelności całej infrastruktury zarówno napowierzchniowej, jak i węgłębnej. Ma to związek m.in. z koniecznością dobrania odpowiednich zaczynów cementowych, cechujących się jak najniższą porowatością i przepuszczalnością. Zaczyny użyte do cementowania powinny po związaniu w otworze wiertniczym utworzyć nieprzepuszczalną barierę, wypełniającą przestrzeń pierścieniową pomiędzy stalowymi rurami a ścianą otworu.

Na szczelność podziemnego magazynu wodoru zasadniczy wpływ będzie mieć struktura warstw geologicznych, do których zatłaczany będzie gaz, a także rodzaj warstw nadkładu (które powinny stanowić barierę przed wyciekami wodoru na powierzchnię terenu). Proces cementowania otworu wiertniczego dla potrzeb magazynu gazu powinien zagwarantować jak najlepsze uszczelnienie całej przestrzeni pierścieniowej. Przestrzeń pierścieniowa pomiędzy rurami a ścianą otworu powinna być wypełniona trwałym i nieprzepuszczalnym spoiwem wiążącym. Stąd też główną rolę odgrywa tu zapewnienie solidnej integralności kamienia cementowego ze skałą i rurą okładzinową. Ważnym warunkiem jest również to, aby podziemne magazyny wodoru były bezwzględnie bezpieczne i maksymalnie wydajne.

Zagrożenia związane z integralnością magazynu wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów stosunkowo szczegółowo przedstawili Zeng i in. (2023). Autorzy stwierdzają, że wodór w magazynie może między innymi przenikać przez skały nadkładu, przenikać przez spękane skały lub wzdłuż uskoku skalnego. Oprócz tego wodór może ulegać mieszanemu z gazem ziemnym, wyciekać podczas cyklu wtłaczania i wytlaczania z magazynu czy też być narażony na aktywność mikrobiologiczną występującą w złożu.

Analizę stabilności geochemicznej cementu w odwiercie podczas geologicznego składowania wodoru zamieszczono w innej publikacji (Aftab i in., 2023). Stwierdzono tam, że wodór nie wywierał istotnego wpływu na zmiany geochemiczne i strukturalne testowanych cementów. Analizy wykonane przez badaczy prowadzone były dla próbek cementowych deponowanych w autoklawie w środowisku wodoru. Stwierdzono, że wodór nie zmienia w znaczący sposób właściwości kamieni cementowych, co stanowi ważną obserwację, jeśli chodzi o zapewnienie integralności odwiertu na wszystkich etapach prac związanych z magazynowaniem tego paliwa.

Wpływ oddziaływania wodoru na integralność kamienia cementowego w szcerpanych złożach gazu omawiano m.in. w badaniach przedstawionych w publikacji (Al-Yaseri i in., 2023). Autorzy stwierdzili, że działanie wodoru miało ograniczony wpływ na płaszcz cementowy. Podczas testów rdzeni wykonanych z cementu klasy G, które poddawano oddziaływaniu wodoru, zanotowano jedynie niewielkie zmiany w mineralogii matrycy cementowej. Można zatem założyć, że najważniejsze składniki kamienia cementowego nie uległy pogorszeniu pod wpływem działania wodoru.

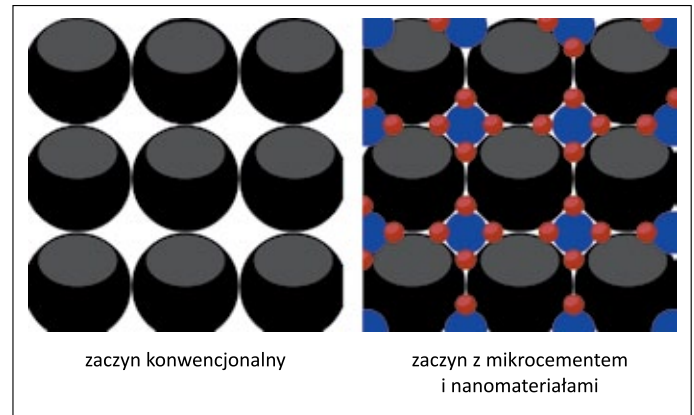
W kawernach w pokładach soli kamiennej udowodniono możliwość magazynowania czystego wodoru w warunkach przemysłowych. Uszczelnienie otworów wiertniczych wykonywanych w warstwach solnych wymaga zastosowania odpowiedniego rodzaju receptury cementowej. Jednym z podstawowych wymagań koniecznych do sporządzenia odpowiedniego zaczynu cementowego, jest zastosowanie solanki o pełnym nasyceniu jako wody zarobowej oraz wykorzystanie jej jako środowiska do sezonowania próbek kamieni cementowych (obecność soli NaCl w środowisku otworu wiertniczego). Produkty mineralne powstałe po związaniu zaczynów cementowych muszą charakteryzować się między innymi niską przepuszczalnością, jak również wysoką odpornością na destrukcyjne oddziaływanie warunków otworowych, takich jak wysoka temperatura, wysokie ciśnienie oraz obecność zmineralizowanych wód złożowych (Kędziński i Rzepka, 2022, 2023, 2024).

Autorzy w publikacjach naukowych na świecie zalecają szczegółowe badania laboratoryjne kamieni cementowych w celu poznania procesów zachowywania się wodoru w podziemnych systemach magazynowania (Gaitero i in., 2008). Proponowane są badania zaczynów cementowych wraz z domieszkami, które mogą zwiększyć odporność cementu na korozyjny wpływ środowiska otworu wiertniczego.

Dla przykładu wspomniano o wykorzystaniu nanocząsteczek (nano-SiO<sub>2</sub>) w celu zmniejszenia szybkości wypłukiwania wapnia z kamienia cementowego, co w efekcie pozwoli zwiększyć trwałość matrycy w kamieniu cementowym. W literaturze nie ma bezpośrednich wytycznych dotyczących typów zaczynów cementowych, jakie należy stosować w procesie uszczelniania rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru.

**Badania laboratoryjne zaczynów i kamieni cementowych**

W badaniach laboratoryjnych prowadzonych w latach ubiegłych na świecie, a także w INiG – PIB stwierdzono duże możliwości wykorzystania nanomateriałów oraz środków polimerowych w procesie poprawy właściwości technologicznych zaczynów cementowych (Rzepka i Kędzierski, 2019, 2020; Bayanak i in., 2020). W tym celu wykorzystuje się głównie nanokrzemionkę – nano-SiO<sub>2</sub> (Patil i Deshpande, 2012; Biricik i Sarier, 2014) oraz nanotlenek glinu – nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Hadi i Ameer, 2017). Po wzbogaceniu zaczynów cementowych dodatkiem nanomateriałów stwierdzono gęściej upakowaną strukturę ziaren w porównaniu z próbkami wykonanymi z konwencjonalnego stwardniałego zaczynu cementowego. Kamienie cementowe z nanododatkami cechowały się ponadto obniżoną porowatością i przepuszczalnością dla gazu. Wzbogacenie



**Rysunek 1.** Schemat ziaren cementu, mikrocementu i nanomateriałów (rysunek autorów)

**Figure 1.** Schematic diagram of cement, microcement and nanomaterial grains (authors' drawing)

zaczynów lateksem czy też innymi odpowiednio dobranymi środkami polimerowymi, które przeciwdziałają migracji gazu, również dawało pozytywne efekty, polepszając parametry matrycy cementowej (Rocha i in. 2013; Velayati i in., 2015).

Na rysunku 1 zobrazowano schematycznie upakowanie ziaren cementu, mikrocementu i nanomateriałów w zaczynie cementowym. Po lewej stronie widać zaczyn konwencjonalny (widoczne są pustki pomiędzy ziarnami cementu). Po prawej pokazano zaczyn z mikrocementem i nanomateriałami (widoczne wyraźne wypełnienia pustek pomiędzy ziarnami cementu).

**Tabela 1.** Składy testowanych zaczynów cementowych  
**Table 1.** Compositions of tested cement slurries

Symbol składu zaczynu cementowego	Główne składniki zaczynu cementowego w [%]								
	Woda	KCl/NaCl*	Nano-SiO <sub>2</sub>	Nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LW	GS	Gips modelowy	Mikro CEM	CEM G
Q	0,44	3	–	–	–	–	–	–	100
R	0,48	3	–	–	–	7	–	5	100
S	0,46	3	–	–	10	–	–	5	100
T	0,50	3	–	–	10	–	–	20	100
U	0,46	3	–	0,5	–	–	–	20	100
V	0,44	3	–	0,5	–	–	–	5	100
W	0,46	3	–	1,0	–	–	–	5	100
X	0,44	3	0,3	–	–	–	–	5	100
Y	0,44	3	0,3	–	–	–	–	20	100
Z	0,44	3	0,5	–	–	–	–	5	100
S1	0,62	36*	–	–	–	–	10	10	100
S2	0,62	36*	0,3	–	–	–	10	10	100
S3	0,62	36*	–	0,5	–	–	10	10	100

Oznaczenia w tabeli 1: LW – lateks wiertniczy, Polimer GS – polimer wielocząsteczkowy, Mikro CEM – mikrocement (mielony cement portlandzki), CEM G – cement wiertniczy G. Ponadto do zaczynów wprowadzono domieszkę odpinającą (w ilości około 0,3–0,5%), upłynniacz (w ilości ok. 0,2–0,5%), domieszkę antyfiltracyjną (w ilości około 0,1–0,2%) opóźniacz wiązania w pierwszych dziesięciu recepturach (w ilości około 0,15%), domieszkę spęczniającą w trzech ostatnich recepturach (ok. 0,15%) w stosunku do masy suchego cementu (bwoc). KCl/NaCl\* dodawano w stosunku do masy wody zarobowej (bwow).

Biorąc pod uwagę testy wykonywane w latach ubiegłych w artykule skoncentrowano się na wykonywaniu receptur zawierających wspomniane wcześniej materiały modyfikujące. Ramowe składy zaczynów i kamieni cementowych zamieszczono w artykule testowane były w INiG – PIB na przenikalność względem wodoru w 2022 roku (Rzepka i Kędzierski, 2023) oraz w innych pracach, których wyniki publikowano m.in. na łamach czasopisma „Nafta-Gaz” (Kędzierski i Rzepka, 2023, 2024).

Testy laboratoryjne zaczynów i kamieni cementowych wykonywano w Zakładzie Technologii Wiercenia INiG – PIB zgodnie z normami PN-EN ISO 10426-1:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 1: Specyfikacja oraz PN-EN ISO 10426-2:2003 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.

Testy wykonywano dla dziesięciu receptur oznaczonych Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z (okres badań od 1 miesiąca do 20 miesięcy) oraz trzech receptur na bazie solanki o pełnym nasyceniu NaCl oznaczonych S1, S2 i S3 (okres badań od 1 miesiąca do 9 miesięcy).

Składy receptur oraz wyniki uzyskanych badań zamieszczono w tabelach 1–4 i na rysunku 2.

Po utwardzeniu próbek zaczynów cementowych po 1 miesiącu prowadzono pierwsze pomiary, a następnie połowę próbek przekładano do autoklawów (w których kamienie cementowe poddawano cyklicznym zmianom ciśnienia – indeks 2 przy oznaczeniu próbki), a drugą połowę (tzw. próbki porównawcze) umieszczano w pojemnikach, deponując je w ciśnieniu atmosferycznym (indeks 1 przy oznaczeniu próbki). Ciśnienie w autoklawach, w których deponowano próbki, zadawano i odpuszczano okresowo (w granicach od 0,1 MPa do około 15 MPa).

**Tabela 2.** Wytrzymałość na ściskanie kamieni cementowych testowanych w temp. 60°C (Q-Z) i 25°C (S1-S3)

**Table 2.** Compressive strength of cement stones tested at 60°C (Q-Z) and 25°C (S1-S3)

Symbol zaczynu	Gęstość zaczynu [g/cm <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość na ściskanie kamienia cementowego [MPa]							
		Wyniki dla próbek deponowanych w ciśnieniu atmosferycznym (indeks 1 w opisie)				Wyniki dla próbek deponowanych w autoklawie poddawanych cyklicznym zmianom ciśnienia (indeks 2 w opisie)			
		1 m-c	9 m-cy	14 m-cy	20 m-cy	1 m-c	9 m-cy	14 m-cy	20 m-cy
Q	1,910	29,4	36,7	37,0	39,7	–	35,8	36,7	38,4
R	1,880	27,5	35,2	37,2	38,7	–	33,0	35,6	37,0
S	1,840	28,8	36,5	36,7	37,0	–	35,0	35,3	36,1
T	1,860	29,4	39,7	40,0	40,9	–	37,8	38,3	39,4
U	1,920	36,7	51,6	52,3	53,3	–	55,2	55,7	55,9
V	1,900	33,5	47,3	48,8	49,0	–	48,7	49,0	49,6
W	1,910	30,2	40,2	40,7	41,0	–	40,7	41,2	41,8
X	1,910	29,5	40,2	41,5	42,1	–	40,9	41,3	42,5
Y	1,935	32,2	46,0	49,7	49,9	–	47,2	48,9	49,7
Z	1,915	29,9	41,0	43,0	44,4	–	41,6	42,8	44,7
S1	1,920	22,4	–	–	–	–	22,9	23,9	26,4
S2	1,925	23,8	–	–	–	–	24,0	25,8	28,0
S3	1,925	24,0	–	–	–	–	24,1	26,0	28,6

**Tabela 3.** Przyczepność kamieni cementowych do rur stalowych testowanych w temp. 60°C (Q-Z) i 25°C (S1-S3)

**Table 3.** Adhesion of cement stones to steel pipes tested at 60°C (Q-Z) and 25°C (S1-S3)

Symbol zaczynu	Gęstość zaczynu [g/cm <sup>3</sup> ]	Przyczepność kamienia cementowego do rur stalowych [MPa]							
		Wyniki dla próbek deponowanych w ciśnieniu atmosferycznym (indeks 1 w opisie)				Wyniki dla próbek deponowanych w autoklawie poddawanych cyklicznym zmianom ciśnienia (indeks 2 w opisie)			
		1 m-c	9 m-cy	14 m-cy	20 m-cy	1 m-c	9 m-cy	14 m-cy	20 m-cy
Q	1,910	7,6	9,5	9,7	9,7	–	9,2	9,4	9,5
R	1,880	7,1	8,4	8,9	9,0	–	8,2	8,7	8,8
S	1,840	7,5	8,5	8,6	8,7	–	8,4	8,5	8,7

cd. Tabela 3/ cont. Table 3

Symbol zaczynu	Gęstość zaczynu [g/cm <sup>3</sup> ]	Przyczepność kamienia cementowego do rur stalowych [MPa]							
		Wyniki dla próbek deponowanych w ciśnieniu atmosferycznym (indeks 1 w opisie)				Wyniki dla próbek deponowanych w autoklawie poddawanych cyklicznym zmianom ciśnienia (indeks 2 w opisie)			
		1 m-c	9 m-cy	14 m-cy	20 m-cy	1 m-c	9 m-cy	14 m-cy	20 m-cy
<b>T</b>	1,860	8,3	9,1	9,2	9,2	–	8,5	8,8	9,0
<b>U</b>	1,920	9,2	10,8	11,1	11,3	–	12,0	12,1	12,2
<b>V</b>	1,900	8,0	9,6	10,0	10,1	–	10,6	10,6	10,8
<b>W</b>	1,910	8,0	9,8	10,0	10,5	–	9,8	10,1	10,5
<b>X</b>	1,910	8,2	9,8	10,0	10,2	–	10,0	10,1	10,4
<b>Y</b>	1,935	9,0	10,0	10,3	10,4	–	10,6	10,7	10,7
<b>Z</b>	1,915	8,5	10,0	10,3	10,5	–	10,5	10,6	10,8

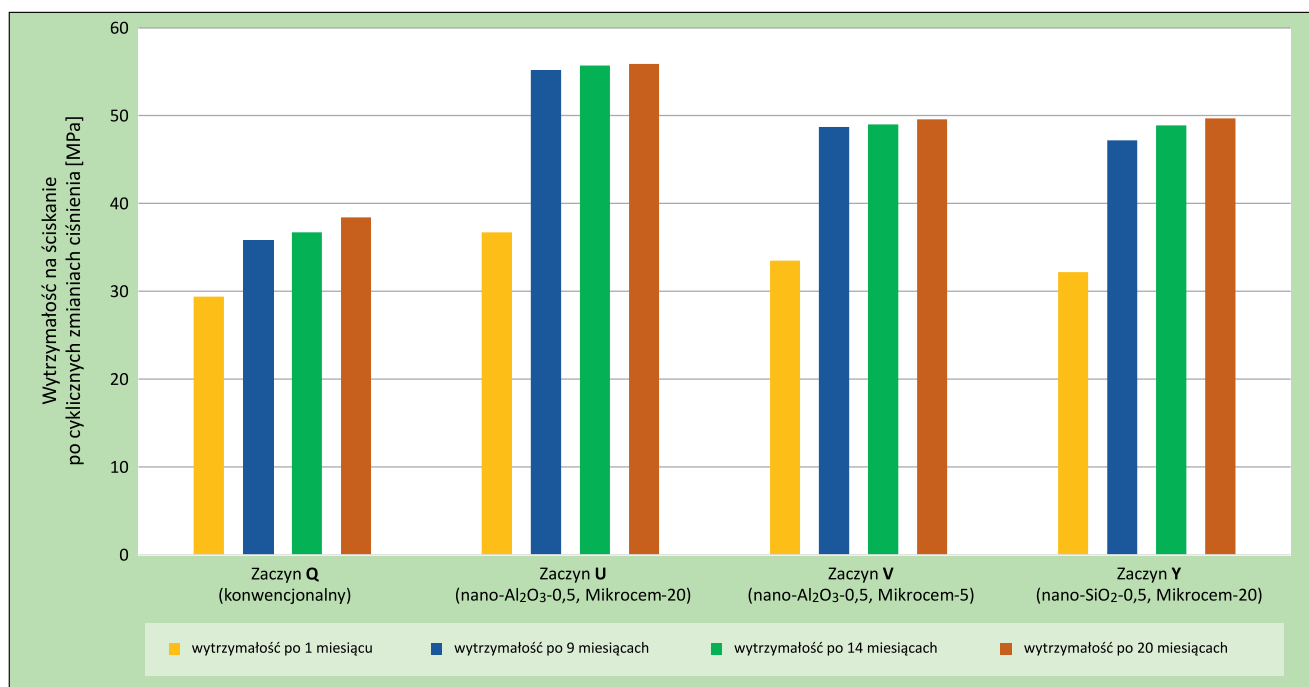
**Tabela 4.** Wyniki badań porowatości dla testowanych próbek kamieni cementowych

**Table 4.** Results of porosity tests for the tested samples of cement stones

Symbol zaczynu (kamienia) cementowego badanego w konkretnych warunkach:		Porowatość ogólna [%]	Udział procentowy porów o danej średnicy w stosunku do całkowitej ilości porów [%]		
			>10,000 nm	10,000–100 nm	<100 nm
<b>Q</b>	ciśnienie atmosferyczne: 9 m-cy (Q(1) 9)	34,14	2,6	2,3	95,1
	autoklaw: 9 m-cy: (Q(2) 9)	31,87	4,4	2,2	93,4
	autoklaw: 20 m-cy: (Q(2) 20)	26,31	2,3	2,4	95,3
<b>U</b>	ciśnienie atmosferyczne: 9 m-cy (U(1) 9)	28,28	3,1	3,0	93,9
	autoklaw: 9 m-cy: (U(2) 9)	23,78	3,2	1,6	95,2
	autoklaw: 20 m-cy: (U(2) 20)	19,09	1,7	2,5	95,8
<b>V</b>	ciśnienie atmosferyczne: 9 m-cy (V(1) 9)	31,64	2,8	2,5	94,7
	autoklaw: 9 m-cy: (V(2) 9)	29,87	2,5	2,7	94,6
	autoklaw: 20 m-cy: (V(2) 20)	25,06	1,9	2,0	96,1
<b>S1</b>	ciśnienie atmosferyczne: 1 m-c (S1(1) 1)	34,30	2,1	2,3	95,6
	autoklaw: 9 m-cy: (S1(2) 9)	33,45	2,2	4,4	93,4
<b>S2</b>	ciśnienie atmosferyczne: 1 m-c (S2(1) 1)	28,00	2,5	2,2	95,4
	autoklaw: 9 m-cy: (S2(2) 9)	27,67	3,7	1,0	95,3
<b>S3</b>	ciśnienie atmosferyczne: 1 m-c (S3(1) 1)	27,60	2,7	1,3	96,0
	autoklaw: 9 m-cy: (S3(2) 9)	26,96	2,7	4,4	92,9

Zaczyn o symbolu Q to tzw. konwencjonalny zaczyn cementowy bez specjalnych dodatków modyfikujących. Gęstość zaczynu Q wynosiła 1,91 g/cm<sup>3</sup>. Po 1 miesiącu hydratacji jego wytrzymałość na ściskanie wynosiła 29,4 MPa, a przyczepność do rur stalowych 7,6 MPa. Po umieszczeniu próbek w autoklawach (w których poddawano je cyklicznym zmianom ciśnienia) i po przełożeniu do pojemników w ciśnieniu atmosferycznym wykonywano dalsze testy kamieni cementowych po 9, 14 i 20 miesiącach. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur zarówno w testach ciśnieniowych (Q(2)), jak i tych prowadzonych w warunkach atmosferycznych (Q(1)) wzrastała wraz z upływem czasu. Po 20 miesiącach kamienie cementowe Q(1) uzyskały wytrzymałość na ściskanie 39,7 MPa

oraz przyczepność do rur 9,7 MPa. Próbki Q(2) po 20 miesiącach uzyskały wytrzymałość 38,4 MPa i przyczepność do rur 9,5 MPa. Konwencjonalny kamień cementowy po 9 miesiącach w warunkach atmosferycznych posiadał porowatość – Q(1) wynoszącą ok. 34,1%, a po cyklicznych zmianach ciśnienia Q(2) ok. 31,9%. Rozkład wielkości porów Q(1) oraz Q(2) był podobny (pory najmniejsze, o średnicy poniżej 100 nm, zajmowały ok. 93–95% całkowitej ilości porów). Po 20 miesiącach porowatość kamienia cementowego deponowanego w warunkach cyklicznych zmian ciśnienia (Q(2) 20) zmniejszyła się do 26,3%. Kolejny zaczyn R zawierał m.in. polimer zapobiegający migracji gazu o nazwie Gas Seal. Zaczyn ten cechował się gęstością 1,88 g/cm<sup>3</sup>. Po nastawieniu próbek



**Rysunek 2.** Zmiany wytrzymałości na ściskanie próbki Q (porównawczej – zaczyn konwencjonalny) oraz U, V, Y podczas 20-miesięcznego deponowania w autoklawach i cyklicznych zmianach ciśnienia

**Figure 2.** Changes in compressive strength of sample Q (comparative – conventional slurry) and U, V, Y during 20 months of deposition in autoclaves and cyclic pressure changes

kamieni cementowych określono wytrzymałość na ściskanie po 1 miesiącu, która wyniosła 27,5 MPa, oraz przyczepność do rur 7,1 MPa. W dalszych badaniach wykonywanych dla próbek z cyklicznymi zmianami ciśnienia R(2) i próbek w ciśnieniu atmosferycznym R(1) notowano stopniowy wzrost wytrzymałości i przyczepności po 9, 14 i 20 miesiącach. W końcowych okresach badawczych (po 20 miesiącach) próbka R(1) osiągnęła wytrzymałość na ściskanie 38,7 MPa i przyczepność 9,0 MPa, a próbka R(2) wytrzymałość 37 MPa i przyczepność 8,8 MPa. Zaczyn o symbolu S (na bazie lateksu wiertniczego z dodatkiem 5% mikrocementu) posiadał gęstość 1,84 g/cm<sup>3</sup>. Po 1 miesiącu hydratacji jego wytrzymałość na ściskanie wynosiła 28,8 MPa, a przyczepność do rur stalowych 7,5 MPa. Po umieszczeniu próbek w autoklawach (w których poddawano je cyklicznym zmianom ciśnienia) i po przełożeniu do pojemników w ciśnieniu atmosferycznym wykonywano dalsze testy kamieni cementowych. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur zarówno w testach ciśnieniowych (S(2)), jak i tych prowadzonych w warunkach atmosferycznych (S(1)) wzrastała wraz z upływem czasu. Po 20 miesiącach kamienie cementowe S(1) uzyskały wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 37,0 MPa oraz przyczepność do rur 8,7 MPa. Próbki S(2) po 20 miesiącach uzyskały wytrzymałość 36,1 MPa i przyczepność do rur 8,7 MPa. Zaczyn T (z dodatkiem lateksu i mikrocementu) był podobny do poprzedniej receptury S, zawierał jednak zwiększoną dawkę mikrocementu, wynoszącą 20%. Jego gęstość była równa 1,86 g/cm<sup>3</sup>. Po nastawieniu próbek

kamieni cementowych określono wytrzymałość na ściskanie po 1 miesiącu, która wyniosła 29,4 MPa, oraz przyczepność do rur 8,3 MPa. W dalszych badaniach wykonywanych dla próbek z cyklicznymi zmianami ciśnienia T(2) i próbek w ciśnieniu atmosferycznym T(1) notowano stopniowy wzrost wytrzymałości i przyczepności po 9, 14 i 20 miesiącach. W końcowych okresach badawczych (po 20 miesiącach) próbka T(1) osiągnęła wytrzymałość na ściskanie 40,9 MPa i przyczepność 9,2 MPa, a próbka T(2) wytrzymałość 39,4 MPa i przyczepność 9,0 MPa.

Trzy następne receptury, oznaczone symbolami U, V, W, zawierały w swym składzie nanotlenek glinu (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oraz mikrocement w różnych ilościach. Zaczyn cementowy o symbolu U posiadał 0,5% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i 20% mikrocementu. Gęstość zaczynu wynosiła 1,92 g/cm<sup>3</sup>. Po 1 miesiącu hydratacji jego wytrzymałość na ściskanie była bardzo wysoka i wynosiła 36,7 MPa, a przyczepność do rur stalowych 9,2 MPa. Po umieszczeniu próbek w autoklawach i po przełożeniu do pojemników w ciśnieniu atmosferycznym wykonywano dalsze testy kamieni cementowych. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur zarówno w testach ciśnieniowych (U(2)), jak i tych prowadzonych w warunkach atmosferycznych (U(1)) wyraźnie wzrastała wraz z upływem czasu. Po 20 miesiącach kamienie cementowe U(2) uzyskały niezwykle wysoką wytrzymałość na ściskanie, która przekraczała 55 MPa (co było wartością rekordową spośród wszystkich testowanych próbek), a przyczepność do rur wyniosła 12 MPa. Próbki U(1) po 20 miesiącach również uzyskały bardzo wysoką wytrzymałość

– około 53 MPa, a ich przyczepność do rur wyniosła 11,3 MPa. Porowatość kamienia w warunkach atmosferycznych – U(1) wyniosła ok. 28,3%, a po cyklicznych zmianach ciśnienia U(2) ok. 23,8%. Były to zatem wartości bardzo niskie. Po okresie 20 miesięcy porowatość kamienia cementowego deponowanego w warunkach cyklicznych zmian ciśnienia (U (2) 20) zmniejszyła się do wartości zaledwie 19,1%. Bała to najniższa porowatość spośród wszystkich testowanych próbek cementowych. Pory poniżej 100 nm, tj. o najmniejszych rozmiarach, stanowiły aż 95,8% całkowitej ilości porów. Zaczyn V różnił się od poprzedniego składu U tym, że posiadał mniejszą ilość mikrocementu (tj. 5%). Zaczyn ten cechował się gęstością 1,90 g/cm<sup>3</sup>. Po nastawieniu próbek kamieni cementowych określono wytrzymałość na ściskanie po 1 miesiącu, która wyniosła 33,5 MPa, oraz przyczepność do rur 8,0 MPa. W dalszych badaniach wykonywanych dla próbek z cyklicznymi zmianami ciśnienia V(2) i próbek w ciśnieniu atmosferycznym V(1) notowano stopniowy wzrost wytrzymałości i przyczepności po 9, 14 i 20 miesiącach. W końcowych okresach badawczych (po 20 miesiącach) próbka V(1) osiągnęła wytrzymałość na ściskanie 49 MPa i przyczepność 10,1 MPa, a próbka V(2) wytrzymałość 49,6 MPa i przyczepność 10,8 MPa. W warunkach atmosferycznych porowatość próbki V(1) wyniosła ok. 31,6%, a po cyklicznych zmianach ciśnienia V(2) ok. 29,9%. Po 20 miesiącach porowatość kamienia cementowego deponowanego w warunkach cyklicznych zmian ciśnienia (V (2) 20) zmniejszyła się do 25,1%. Zaczyn oznaczony symbolem W różnił się od dwóch poprzednich U i V tym, że posiadał 1% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i 5% mikrocementu. Gęstość zaczynu wynosiła 1,91 g/cm<sup>3</sup>. Po 1 miesiącu hydratacji jego wytrzymałość na ściskanie była wysoka i wynosiła 30,2 MPa, a przyczepność do rur stalowych 8,0 MPa. Po umieszczeniu próbek w autoklawach i po przełożeniu do pojemników w ciśnieniu atmosferycznym wykonywano dalsze testy kamieni cementowych po 9, 14 i 20 miesiącach. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur zarówno w testach ciśnieniowych (W(2)), jak i tych prowadzonych w warunkach atmosferycznych (W(1)) wyraźnie wzrastała wraz z upływem czasu. Po 20 miesiącach kamienie cementowe W(1) uzyskały wysoką wytrzymałość na ściskanie, która wynosiła 41 MPa, a przyczepność do rur przekroczyła 10 MPa. Próbki W(2) po 20 miesiącach uzyskały podobną wytrzymałość – 41,8 MPa, a ich przyczepność do rur wyniosła 10,5 MPa.

Kolejne trzy receptury z głównej serii badawczej X, Y, Z zawierały w swym składzie różne ilości nanokrzemionki nano-SiO<sub>2</sub> i mikrocementu. Receptura X posiada 0,3% nano-SiO<sub>2</sub> i 5% mikrocementu. Gęstość tego zaczynu wynosiła 1,91 g/cm<sup>3</sup>. Po 1 miesiącu hydratacji jego wytrzymałość na ściskanie była wysoka i wynosiła 29,5 MPa, a przyczepność do rur stalowych 8,2 MPa. Po umieszczeniu próbek w autoklawach

i po przełożeniu do pojemników w ciśnieniu atmosferycznym wykonywano dalsze testy kamieni cementowych. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur zarówno w testach ciśnieniowych (X(2)), jak i tych prowadzonych w warunkach atmosferycznych (X(1)) wyraźnie wzrastała wraz z upływem czasu. Po 20 miesiącach kamienie cementowe X(1) uzyskały wysoką wytrzymałość na ściskanie przekraczającą 42 MPa, a przyczepność do rur wyniosła 10,2 MPa. Próbki X(2) po 20 miesiącach uzyskały podobną wytrzymałość i przyczepność do rur (odpowiednio 42,5 MPa i 10,4 MPa). Zaczyn Y, zawierający 0,3% nano-SiO<sub>2</sub>, różni się od poprzedniego składu X tym, że posiada większą ilość mikrocementu (tj. 20%). Zaczyn ten cechował się gęstością 1,935 g/cm<sup>3</sup>. Po nastawieniu próbek kamieni cementowych określono wytrzymałość na ściskanie po 1 miesiącu, która wyniosła 32,2 MPa, oraz przyczepność do rur 9,0 MPa. W dalszych badaniach wykonywanych dla próbek z cyklicznymi zmianami ciśnienia Y(2) i próbek w ciśnieniu atmosferycznym Y(1) notowano stopniowy wzrost wytrzymałości i przyczepności po 9, 14 i 20 miesiącach. W końcowych okresach badawczych po 20 miesiącach próbka Y(1) osiągnęła wytrzymałość na ściskanie prawie 50 MPa i przyczepność 10,4 MPa, a próbka Y(2) wytrzymałość 49,7 MPa i przyczepność 10,7 MPa. Zaczyn cementowy o symbolu Z różnił się od dwóch poprzednich X i Y tym, że posiadał 0,5% nano-SiO<sub>2</sub> i 5% mikrocementu. Gęstość zaczynu Z wynosiła 1,915 g/cm<sup>3</sup>. Po 1 miesiącu hydratacji jego wytrzymałość na ściskanie była wysoka i wynosiła 29,9 MPa, a przyczepność do rur stalowych 8,5 MPa. Po umieszczeniu próbek w autoklawach i po przełożeniu do pojemników w ciśnieniu atmosferycznym wykonywano dalsze testy kamieni cementowych po 9, 14 i 20 miesiącach. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur zarówno w testach ciśnieniowych (Z(2)), jak i tych prowadzonych w warunkach atmosferycznych (Z(1)) wzrastała wraz z upływem czasu. Po 20 miesiącach kamienie cementowe Z(1) uzyskały wytrzymałość na ściskanie równą 44,4 MPa i przyczepność do rur 10,5 MPa. Próbki Z(2) po 20 miesiącach uzyskały wytrzymałość 44,7 MPa, a ich przyczepność do rur wyniosła 10,8 MPa.

Dalsze badania dotyczyły zaczynów cementowych zarabianych na solance o pełnym nasyceniu (z przeznaczeniem do zastosowania w magazynach wodoru w kawernach solnych). Część z testowanych zaczynów została zmodyfikowana tak, aby polepszyć ich parametry technologiczne, w porównaniu ze składami stosowanymi w ostatnich latach w kawernowych podziemnych magazynach gazu. Badane zaczyny oznaczono symbolami S1, S2 i S3. Zaczyn S1, zarabiany na solance NaCl o pełnym nasyceniu, był zaczynem „bazowym” (porównawczym). Zaczyn ten zawierał domieszkę odpinającą, domieszkę upłynniającą, domieszkę antyfiltracyjną, domieszkę spęczniającą, mikrocement w ilości 10%, gips modelowy w ilości 10%.

Spoiwem wiążącym był cement wiertniczy klasy G. Zaczyn S1 posiadał gęstość  $1,92 \text{ g/cm}^3$ , minimalny odstęp wody wynoszący  $0,02\%$ . Cechował się dodatnimi zmianami objętościowym ( $+0,146\%$  po 48 godzinach). Koniec wiązania zaczynu nastąpił po 30 h 45 min. Po 1 miesiącu kamień cementowy posiadał wytrzymałość na ściskanie  $22,4 \text{ MPa}$ . Wraz z upływem czasu następował wzrost wytrzymałości (po 9 miesiącach wytrzymałość na ściskanie wyniosła  $26,4 \text{ MPa}$ ). Porowatość próbki po 1 miesiącu wynosiła  $34,3\%$ . W ostatnim okresie badawczym po 9 miesiącach wartości porowatości obniżyła się do  $33,5\%$ . Kolejny zaczyn, oznaczony symbolem S2, zawierał  $0,3\%$  nanokrzemionki (nano-SiO<sub>2</sub>). Pozostałe składniki były takie same jak w zaczynie S1. Zaczyn charakteryzował się dodatnimi zmianami objętościowymi ( $+0,150\%$  po 48 godzinach). Koniec wiązania zaczynu nastąpił po 28 h 15 min. Wytrzymałość na ściskanie po 1 miesiącu była równa  $23,8 \text{ MPa}$ . W końcowym okresie badawczym, tj. po 9 miesiącach, wartość wytrzymałości wzrosła do  $28 \text{ MPa}$ . Po czasie 1 miesiąca porowatość próbki wynosiła  $28,0\%$ , a po 9 miesiącach obniżyła się do  $27,7\%$ . Zaczyn S3 posiadał w swym składzie  $0,5\%$  nanotlenku glinu (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), natomiast pozostałe komponenty wchodzące w skład zaczynu były tożsame z tymi, jakich użyto w recepturze S1. Zaczyn S3 posiadał gęstość  $1,925 \text{ g/cm}^3$ , odstęp wody nie występował. Zaczyn cechował się dodatnimi zmianami objętościowymi ( $+0,152\%$  po 48 godzinach). Zaczyn uzyskał koniec wiązania po 28 h 45 min. Po 1 miesiącu kamień cementowy posiadał wytrzymałość na ściskanie  $24 \text{ MPa}$ . Wraz z upływem czasu następował wzrost wytrzymałości (po 9 miesiącach wytrzymałość na ściskanie wyniosła  $28,6 \text{ MPa}$ ). Porowatość próbki po 1 miesiącu wynosiła  $27,6\%$ . W ostatnim okresie badawczym po 9 miesiącach wartość porowatości obniżyła się do  $27,0\%$ .



**Rysunek 3.** Próbki o symbolach od „Q” do „Z” wyjęte z autoklawów po 20 miesiącach deponowania

**Figure 3.** Samples marked from “Q” to “Z” after 20 months of storage in autoclaves

## Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule zaczyny cementowe zawierające domieszki nanocząsteczek mogą znaleźć zastosowanie podczas uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertconych w celu magazynowania wodoru.

- Testowane receptury zaczynów cementowych posiadały gęstość z przedziału około  $1,840\text{--}1,935 \text{ g/cm}^3$ .
- Wśród testowanych receptur najkorzystniejsze parametry technologiczne uzyskano dla próbki oznaczonej symbolem U. Próbka ta zawierała w swym składzie  $0,5\%$  nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (nanoglinu) oraz  $20\%$  mikrocementu. Optymalny współczynnik wodno-cementowy dla zaczynu U kształtował się na poziomie  $w/c = 0,46$ . Kamień cementowy powstały po związaniu zaczynu U cechował się niezwykle wysoką wytrzymałością mechaniczną. W warunkach cyklicznych zmian ciśnienia próbki kamienia U osiągały wytrzymałość na ściskanie powyżej  $55 \text{ MPa}$  po 20 miesiącach hydratacji (te same próbki deponowane w ciśnieniu atmosferycznym osiągnęły wytrzymałość powyżej  $53 \text{ MPa}$ ). Przyczepność do rur stalowych próbek z cementu U również była bardzo wysoka, dochodząc do  $12 \text{ MPa}$ . Kamień powstały z zaczynu o symbolu U posiadał również najniższą porowatość spośród badanych próbek, wynoszącą  $19,09\%$ . Pory o najmniejszych rozmiarach (poniżej  $100 \text{ nm}$ ) stanowiły zdecydowaną większość z ogólnej ilości porów występujących w matrycy cementowej.
- Równie dobre parametry technologiczne, choć nieco niższe niż w przypadku zaczynu U, uzyskano dla zaczynów V ( $0,5\%$  nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz  $5\%$  mikrocementu) oraz Y ( $0,3\%$  nano-SiO<sub>2</sub> oraz  $20\%$  mikrocementu). Wytrzymałości na ściskanie dla tych próbek po 20 miesiącach przekraczały  $49 \text{ MPa}$ , a przyczepności do rur dochodziły do  $11 \text{ MPa}$ .
- Większość badanych próbek kamieni cementowych posiadała bardzo niską (około  $2\%$ ) zawartość porów kapilarnych, mogących tworzyć kanaliki dla przepływu mediów złożonych przez płaszcz cementowy w otworze wiertniczym. Pory o rozmiarach poniżej  $100 \text{ nm}$  (czyli pory najmniejsze) stanowiły zdecydowaną większość (ok.  $95\%$ ) z ogólnej ilości porów w szkielecie kamienia cementowego.
- Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur stalowych (dla stwardniałych zaczynów cementowych badanych podczas realizacji niniejszej pracy w okresie od 1 do 20 miesięcy) wzrastały wraz z upływem czasu deponowania próbek.
- W recepturach na pełnym zasoleniu NaCl po zmodyfikowaniu ich nanododatkami nie występowała wolna woda.
- Zasolone NaCl zaczyny cementowe wykazują dodatnie zmiany objętościowe (pęcznienie) i wiążą po czasie około 28 do 33 godzin.

- Parametry mechaniczne stwardniałych zasolonych zaczynów cementowych są niższe niż w przypadku próbek zarabianych na wodzie wodociągowej. Po 9 miesiącach ekspozycji wytrzymałość na ścislenie testowanych próbek z nano-SiO<sub>2</sub> i nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wynosiła ok. 26–28 MPa, a przyczepność do rur ok. 6–7 MPa.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej *Długoterminowe badania stwardniałych zaczynów cementowych poddanych cyklicznym zmianom ciśnienia i temperatury w warunkach odwzorowujących pracę podziemnych magazynów wodoru*. Numer archiwalny DK-4100-13/25, zlecenie wewnętrzne INiG – PIB 0035/KW/25/01.

## Literatura

- Aftab A., Hassanpouryouzband A., Martin A., Kendrick J.E., Thaysen E.M., Heinemann N., Utley J., Wilkinson M., Haszeldine R.S., Edlmann K., 2023. Geochemical integrity of wellbore cements during geological hydrogen storage. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 10(7): 551–556.
- Al-Yaseri A., Fatah A., Zeng L., Al-Ramadhan A., Sarmadivaleh M., Xie Q., 2023. On hydrogen-cement reaction: investigation on well integrity during underground hydrogen storage. *Int. J. Hydrog. Energy*, 48(91): 35610–35623.
- Bayanak M., Zarinabadi S., Shahbazi K., Azimi A., 2020. Reduction of fluid migration in well cement slurry using nanoparticles. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 75: 67. DOI: 10.2516/ogst/2020044.
- Biricic H., Sarier N., 2014. Comparative Study Of The Characteristics Of Nano Silica-, Silica Fume- And Fly Ash-Incorporated Cement Mortars. *Mat. Res.*, 17(3). DOI: 10.1590/S1516-14392014005000054.
- Gaitero J.J., Campillo I., Guerrero A., 2008. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cem. Concr. Res.*, 38(8–9): 1112–1118.
- Hadi H.A., Ameer H.A., 2017. Experimental Investigation of Nano Alumina and Nano Silica on Strength and Consistency of Oil Well Cement. *Journal of Engineering*, 23(12): 51–69.
- Kędziński M., Rzepka M., 2022. Wstępne badania nad opracowaniem zaczynów cementowych przeznaczonych do podziemnego magazynowania wodoru w kavernach solnych. *Nafta-Gaz*, 2: 120–127. DOI: 10.18668/NG.2022.02.04.
- Kędziński M., Rzepka M., 2023. Badania nad opracowaniem zaczynów cementowych do podziemnego magazynowania wodoru w kavernach solnych. *Nafta-Gaz*, 2: 96–105. DOI: 10.18668/NG.2023.02.03.
- Kędziński M., Rzepka M., 2024. Doszczelnienie matrycy kamieni cementowych otrzymanych z zaczynów cementowych przeznaczonych do podziemnych magazynów wodoru w kavernach solnych. *Nafta-Gaz*, 1: 3–11. DOI: 10.18668/NG.2024.01.01.
- Labus K., Leśniak G., Cicha-Szot R., 2022. Geochemiczne modelowanie wpływu magazynowania wodoru na porowate skały zbiornikowe. *Materiały z Konferencji Geopetrol Zakopane 2022*: 201–208.
- Miziołek M., Filar B., Kwilosz T., 2022. Magazynowanie wodoru w szcerpanych złożach gazu ziemnego. *Nafta-Gaz*, 3: 219–239. DOI: 10.18668/NG.2022.03.06.
- Patil R., Deshpande A., 2012. Use of Nanomaterials in Cementing Applications. *SPE 155607*. DOI: 10.2118/155607-MS.
- Rocha J.S., Calado V., Tavares F., 2013. Study of the Influence of Cement Slurry Composition in the Gas Migration. OTC 24420, *Technology Conference Brasil held in Rio de Janeiro*, 29–31 October 2013. DOI: 10.4043/24420-MS.
- Rzepka M., Kędziński M., 2019. Zaczyny cementowe z dodatkiem nanokomponentów do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych o głębokości końcowej około 1000–2000 metrów. *Nafta-Gaz*, 11: 674–682. DOI: 10.18668/NG.2019.11.02.
- Rzepka M., Kędziński M., 2020. Możliwości zastosowania nanotlenku glinu w zaczynach cementowych przeznaczonych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 1: 46–56. DOI: 10.18668/NG.2020.01.06.
- Rzepka M., Kędziński M., 2023. Badania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 4: 244–251. DOI: 10.18668/NG.2023.04.02.
- Rzepka M., Kędziński M., 2025. Badania kamieni cementowych powstałych z zaczynów przeznaczonych do uszczelniania podziemnych magazynach wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 5: 325–333. DOI: 10.18668/NG.2025.05.03.
- Such P., 2020. Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 11: 794–798. DOI: 10.18668/NG.2020.11.04.
- Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B., 2015. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study. *Int. J. Min. & Geo-Eng.*, 49(2): 281–288. DOI: 10.22059/ijmge.2015.56113.
- Zeng L., Sarmadivaleh M., Saedi A., Chen Y., Zhong Z., Xie Q., 2023. Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs. *Earth-Science Reviews*, 247: 10462.

## Akty prawne, dokumenty normatywne i patenty

- PN-EN ISO 10426-1:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 1: Specyfikacja.
- PN-EN ISO 10426-2:2003 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.



Dr inż. Marcin RZEPKA  
Kierownik Laboratorium Zaczynów Uszczelniających w Zakładzie Technologii Wiercenia  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [marcin.rzepka@inig.pl](mailto:marcin.rzepka@inig.pl)



Mgr inż. Miłosz KĘDZIŃSKI  
Asystent w Zakładzie Technologii Wiercenia  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [miłosz.kedziński@inig.pl](mailto:miłosz.kedziński@inig.pl)