

ZAMRAŻANIE GRUNTU

i betonowanie w obniżonych temperaturach

dr hab. inż. Andrzej Więckowski,
prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Jednym ze sposobów stabilizacji ośrodka o niekorzystnych parametrach stateczności jest zamrożenie gruntu. Zamrożenie jest opłacalne przy uciążliwych, znacznych dopływach wód, zarówno w skałach luźnych, jak i szczelinowatych [1, 2]. Wysoka niezawodność metody zamrażania sprawia, że jest ona wykorzystywana zarówno w budownictwie, przy realizacji metra [3], w górnictwie, szczególnie przy drążeniu szybów, [4] oraz przy realizacjach innych obiektów podziemnych.

Obecne metody mrożenia bazują na dostarczaniu z powierzchni ziemi czynnika chłodzącego do rur mrożeniowych, zlokalizowanych w strefie zamrażanego gruntu. Tradycyjnie stosuje się tzw. metodę mrożenia z wykorzystaniem solanki schładzanej w agregatach mrożeniowych. Wówczas temperatury w pobliżu instalacji mrozącej mogą wynosić około -50°C [4]. Przy wykorzystaniu energii skroplonych gazów, w tzw. metodzie kriogenicznej, występują znacznie niższe temperatury, nawet poniżej -150°C .

Wokół rur mrożeniowych wytwarza się wodoszczelny pierścień zamrożonego ośrodka gruntowego, który wewnątrz umożliwia drąże-

Zamrażanie z wytworzeniem płaszcza sztucznej przegrody z występujących gruntów płynnych i skał luźnych, przy znacznych dopływach wód, stanowi skuteczne rozwiązanie w wielu przypadkach budów metra, jak też przy drążeniu głębokich szybów.

nie tunelu lub głębienie szybu i wykonywanie betonowej obudowy. Niezbędny jest specjalistyczny sprzęt do odpajania, gdyż w praktyce na powierzchni wyrobiska występują temperatury do około -15°C [4]. Również przy ujemnych temperaturach gruntu następuje betonowanie i dojrzewanie młodego betonu.

W artykule zaprezentowano stosowane metody mrożenia i zmienność parametrów fizycznych zamrożonych skał oraz wymagane ograniczenia wykonawcze wynikające z realizacji prac w warunkach obniżonych temperatur.

Zastosowanie metody mrożenia

Zamrażanie gruntu stanowi technikę wytworzenia sztucznej przegrody z występujących, płynących kurzawek, nawodnionych piasków, glin, ilów oraz innych skał luźnych i zwięzłych. Przegroda taka:

- charakteryzuje się zwiększoną nośnością, szczelnością i stabilnością względem właściwości w stanie wcześniejszym tych skał, z których powstała;
- jest zdolna przejmować i przenosić siły od występujących naprężeń;
- odgradza przed napływem wód i zasypywaniem;
- zostaje wytworzona w postaci zamrożonej, zamkniętej powierzchni walcowej, ściany lub sklepienia;
- stwarza warunki do urabiania skał i uzyskania przestrzeni umożliwiającej realizację robót budowlanych, obejmujących wydrążenie wykopu i wykonanie stałej jego obudowy.

Mrożenie, jako stabilizacja ośrodka gruntowego o niekorzystnych parametrach, znajduje szerokie zastosowanie w wykonawstwie obiektów inżynierii lądowej i w budownictwie górniczym. W przypadku obiektów górniczych mamy do czynienia z tzw. mrożeniem głębokim [5], nie- rzadko na kilkuset metrach [2], natomiast w bu-

downictwie lądowym, głównie przy wykonywaniu metra, stosuje się tzw. mrożenie płytkie [5]. W obydwu przypadkach zasadą jest zamrożenie, najczęściej zawadzonego lub luźnego ośrodka gruntowo-skalnego. Zamrożony materiał posiada zwiększone parametry wytrzymałościowe i może stanowić obudowę tymczasową dla drążonego otworu lub obiektu. Ponadto zamrożenie skutecznie blokuje dopływ wód. Ważną cechą metody mrożenia jest niewprowadzanie do górotworu obcych substancji, np. w postaci iniektów. Konieczne jest natomiast utrzymywanie obniżonej temperatury przez cały okres prowadzenia prac, zaś po zakończeniu robót wydobywczych i budowlanych oraz po zaprzestaniu mrożenia – zamrożone grunty i skały naturalnie wracają do stanu wyjściowego.

Drążenie wyrobisk w sztucznie zamrożonym gruncie o niekorzystnych parametrach jest zaliczane do sposobów specjalistycznych drążenia górotworu [6] i w wielu przypadkach wykonawczych jest aktualnie niezastąpionym sposobem stabilizacji takiego trudnego ośrodka dla realizacji robót budowlanych. Wówczas w wywierconych w skale równoległych otworach, zlokalizowanych obok siebie, usytuowanych na obwodzie pierścienia otaczającego od zewnątrz planowane wyrobisko (wykop), montuje się rury mrożeniowe. Po wprowadzeniu czynnika schładzającego do rur ma miejsce zamrażanie przylegających doń gruntów. Wraz z upływem czasu schładzania powiększa się grubość zamrożonej skały wokół każdej rury. Zamrożone obszary przy sąsiednich rurach łączą się i rozrastają. Po połączeniu się zmarzliny (wokół sąsiadujących rur) powstaje monolityczny, szczelny pierścień zamarzonego gruntu, w którego wnętrzu możliwe jest drążenie wyrobiska i wykonanie obudowy.

Szczególnymi wskazaniem do stosowania metody mrożenia gruntu jest występowanie:

Metoda mrożenia gruntu pozwala skutecznie stabilizować bardzo niekorzystne wykonawczo ośrodki płynących kurzawek, nawodnionych piasków, glin, ilów oraz innych skał luźnych i zwięzłych.



Rys. 1. Przemarznięta ściana od strony zamrożonego gruntu pod tunelem Wisłostrada [3]
Frozen wall from the side of the frozen ground under the tunnel Wisłostrada.



Rys. 2. Instalacja rozdzielająca LIN do rur mrozeniowych [3]
Installation dividing LIN to pipe freezing.

gruntów ilastych przewarstwionych gruntów wodonośnymi, gruntów kurzawkowych, mało-spoistych, o współczynniku filtracji mniejszym od 1-10–5 m/s lub występowanie gruntów zwięzłych, wodonośnych o dużych wypływach wody pod znacznym ciśnieniem [1].

Przeciwskazaniem do stosowania metody zamrażania górotworu jest wysoka temperatura wód podziemnych, zbyt duża prędkość ich przepływu lub duże zasolenie. Wadą jest wysoka energochłonność mrożenia. Istotnym zagadnieniem jest wymóg wysokiej jakości prac, szczególnie w zakresie równoległego usytuowania i rozmieszczenia rur mrozeniowych w gruntach.

Okres mrożenia

W czasie mrożenia wyróżnia się dwa okresy:

- aktywnego schładzania gruntu,
 - biernego podtrzymywania ujemnej temperatury już schłodzonego (zamrożonego) gruntu.
- W okresie aktywnym, inaczej wstępnym, ma miejsce schłodzenie i zamrożenie gruntu, które zależnie od zastosowanej metody trwa od kilku dni do około miesiąca i dłużej; rys. 1. Podczas zamrażania jest prowadzony monitoring procesu narastania pierścieni

zmarzliny wokół poszczególnych otworów oraz ma miejsce odpowiednie sterowanie intensywnością chłodzenia w celu stworzenia zamkniętego płaszcza zmarzliny (lodowej). Naturalnie monitoring i sterowanie również są realizowane w okresie utrzymywania obniżonej temperatury.

Prace główne, obejmujące drążenie i wykonywanie obudowy, są realizowane w okresie biernym, przy podtrzymywaniu obniżonej temperatury już schłodzonego gruntu. Zatem chłodzenie jest konieczne przez cały czas drążenia zamrożonego gruntu, konstruowania obudowy (w czasie zbrojenia, deskowania i betonowania), a także jeszcze w okresie dojrzewania betonu.

Po wstrzymaniu dostarczania medium chłodzącego zamrożone grunty w naturalny sposób rozmrażają się i powracają do stanu sprzed okresu mrożenia w ciągu kilku tygodni.

W praktyce wykonawczej, zależnie od czynnika mrozącego, wyróżnia się dwie metody mrożenia:

- tzw. kriogeniczną, z rozprężaniem skroplonych gazów;
- klasyczną, z zastosowaniem solanki schładzanej w agregatach mrozeniowych.

Mrożenie kriogeniczne

Mrożenie gruntów energią z rozprężenia skroplonych gazów oraz z ich ogrzania, tzw. kriogeniczne (nazwa z uwagi na występowanie bardzo niskich temperatur, poniżej -150°C) zostało spopularyzowane głównie w dwóch ostatnich dziesięcioleciach. Do zamrażania najczęściej jest stosowany skroplony azot. Niekiedy zamiennie wykorzystuje się skroplony dwutlenek węgla.

Azot o nazwie handlowej LIN lub LN2 jest przemysłowo wytwarzany w stacjach separacji powietrza. W temperaturach z przedziału od -196°C do -155°C i przy ciśnieniach odpowiednio od atmosferycznego do około 20 barów, w postaci cieczy, jest przechowywany i transportowany w próżniowo izolowanych termicznie zbiornikach i cysternach [7]. Przenikające z zewnątrz ciepło powoduje ogrzewanie ciekłego azotu i jego parowanie. Parowaniu towarzyszy intensywne pobieranie ciepła od pozostającej cieczy, tym samym następuje mocne jej schładzanie (ciepło parowania azotu wynosi $198,4 \text{ kJ/kg}$). Automatyczne zawory umożliwiają uchodzenie odparowanego azotu na zewnątrz, zapobiegając nadmiernemu wzrostowi ciśnienia w zbiorniku. Na ogół przy stosowaniu azotu w postaci ciekłej używane są ciśnienia do $0,5 \text{ MPa}$, zaś przy korzystaniu z fazy gazowej ciśnienia są wyższe, do 2 MPa . Rozprężenie skroplonego gazu w rurach mrozeniowych zamontowanych w gruncie umożliwia bardzo intensywne dostarczenie dużych ilości energii i „szybkie” zamrożenie gruntu (w okresie około 1 tygodnia). Po schłodzeniu azot lub dwutlenek węgla jest uwalniany bezpośrednio do atmosfery, gdyż nie są to gazy toksyczne [7].

Naturalnie do zamrożenia gruntów i skał zużycie energii jest bardzo duże. Wynika to z dużych wartości ciepła właściwego zamrażanych materiałów, szczególnie wody, oraz z wysokiej wartości ciepła zamrażania, jak też z ogromnych strat energii przy intensywnym przenikaniu ciepła do gruntu przez znaczną, schładzaną powierzchnię (termicznie nieizolowaną). W praktyce do odparowania 1 kg skroplonego azotu z gruntu jest pobierane około 200 kJ energii, a następnie do ogrzania powstałego gazu (o ciepłe właściwym $1,04 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$) do temperatury zamrażania górotworu zostaje pobrane jeszcze dodatkowo około 150 kJ . Na zużycie „ciekłego” azotu przy zamrażaniu górotworu mocno wpływają czynniki geologiczne, szczególnie rodzaj występujących skał, ich temperatura i przepływ wód. Stąd zużycie ciekłego azotu (LIN) jest mocno zróżnicowane i wynosi od 1100 do 2500 litrów na 1 m^3 zamrażanego górotworu [3].

W drugiej fazie mrożenia, w okresie biernym, zużycie LIN jest znacznie mniejsze. Obszar zamrażanego gruntu zachowuje swoją objętość. Na podtrzymanie w stanie zamrożonym 1 m^3 skał potrzeba rozprężyć około 90 litrów LIN dziennie. Na ogół w okresie biernego chłodzenia niezbędne moce, zależnie od

warunków realizacyjnych, są nawet do kilku razy mniejsze niż w czasie aktywnego zamrażania [7, 8]. Po wstrzymaniu dozowania LIN zamrożony grunt rozmraża się energią ciepłą od otaczających skał i powraca do poprzedniego stanu przez kilka tygodni.

Kriogeniczna metoda mrożenia jest wygodna. Następuje szybkie zamrożenie gruntu. Okres zamrażania jest krótki i wynosi 5÷7 dni. Uzyskuje się wówczas zamkniętą i wodoszczelną ścianę o grubości około 1 m. Poza szybszym zamrożeniem, zaplecze techniczne w metodzie kriogenicznej jest znacznie ograniczone – do zbiornika skroplonego gazu z systemem sterowania.

Mrożenie z wykorzystaniem solanki

Mrożenie gruntu solanką schładzaną w agregatach mroźniowych jest sposobem starszym – tradycyjnym. Czynnikiem chłodzącym są wodne roztwory soli, chlorek magnezu ($MgCl_2$), chlorek wapnia ($CaCl_2$) lub amoniaku (NH_3) o minimalnych temperaturach schłodzenia odpowiednio do $-34^\circ C$ i do $-55^\circ C$.

Mrożenie odbywa się przy zastosowaniu czynnika mroźącego w postaci schłodzonej solanki przepływającej w rurach mroźniowych. Ważnym aspektem metody jest dobór zespołu agregatów chłodniczych o dużych, niezbędnych wydajnościach, dostosowanych do okresu aktywnego schładzania gruntu, a następnie do biernego podtrzymywania temperatury gruntu już schłodzonego.

W okresie aktywnym mrożenia na początku stosuje się solankę mniej schłodzoną, np. do temperatury $-15^\circ C$, następnie do temperatury niższej, np. $-30^\circ C$ lub do temperatury jeszcze niższej. Rozwiązanie takie umożliwia zastosowanie agregatów mroźniowych o zredukowanych (względnie mniejszych) mocach. Pomimo takiego stopniowego schładzania moce zastosowanych agregatów muszą być bardzo duże i wynoszą nawet kilka milionów watów. Np. w Legnickim Zagłębiu Miedziowym, przy mrożeniu szybu GG-1, o głębokości około 1350 m, w warunkach temperatury gruntu podwyższonej do $+48^\circ C$, zastosowano stację agregatów chłodniczych o zainstalowanej mocy 3 MW [9].

Równocześnie przy tak dużych mocach agregatów czas zamrażania górotworu wynosi kilka miesięcy lub dłużej, zależnie od występujących warunków miejscowych.

Właściwości zamrożonych gruntów

Przy zamrożeniu następuje zmiana parametrów fizykotermicznych oraz wytrzymałościowych gruntów luźnych. Zamrożenie nawodnionych gruntów skutecznie je uszczelnia i następuje naturalna likwidacja przecieków, gdyż ewentualnie penetrująca woda ulega zmrożeniu, a powstały lód zamyka nieszczelności. Zasadniczemu polepszeniu ulegają charakterystyki wytrzymałościowe, umożliwiające przenie-

sienie dużych naprężeń. Zamrażane materiały wraz z obniżaniem ujemnych temperatur posiadają coraz większe wytrzymałości doraźne na ściskanie [8]. Np. piaski charakteryzują się wytrzymałościami R_c od 8,7 MPa do 20 MPa odpowiednio w temperaturach $-10^\circ C$ i $-20^\circ C$ [10, 11].

Wysoka wytrzymałość doraźna na ściskanie zamrożonego gruntu jest bardzo korzystna dla zachowania stateczności wyrobiska podczas wykonywania przewidzianych prac. Z drugiej zaś strony ta wysoka wytrzymałość zamrożonych materiałów stanowi poważną trudność w ich usuwaniu oraz wymaga wykonywania robót w niekorzystnych, ujemnych temperaturach, ze stosowaniem specjalistycznego sprzętu do urabiania skał – rys. 3.

Przy zamrożeniu materiałów zasadniczej zmianie ulega współczynnik przewodności cieplnej λ względem jego wartości w temperaturach dodatnich. Na przykład lód charakteryzuje się przewodnością ciepłą 4 razy większą od wody i około 80 razy większą od powietrza zawartego w porach [10]. Skutkuje to poważną

zmiennością intensywności chłodzenia, zależnie od występujących warunków.

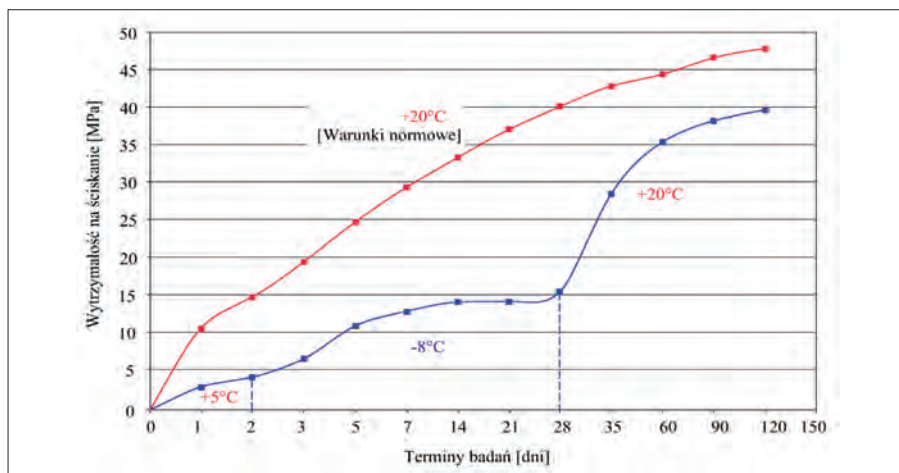
Betonowanie w obniżonych temperaturach

Zamrożony grunt również stwarza niekorzystne termiczne warunki wykonania docelowej betonowej obudowy drążonego otworu, bowiem temperatury na powierzchni wyrobiska na ogół zawierają się w przedziale od $-5^\circ C$ do $-15^\circ C$ [12, 13].

Zgodnie z normą PN-EN206-1:2003 mieszanka betonowa w chwili wbudowania powinna mieć temperaturę nie niższą niż $5^\circ C$ [14÷16]. Według prenormy PN-EN 13670-1:2000 [17] minimalny okres pielęgnacji betonu jest uzależniony od: okresów wiązania, szybkości rozwoju wytrzymałości, temperatury na powierzchni betonu oraz klasy ekspozycji betonu, zaś betonowanie i pielęgnacja młodego betonu są zalecane w temperaturach z przedziału od $+5^\circ C$ do $+25^\circ C$. Zgodnie z rozdziałem 2, punktem 8.5 powyższej normy: „Temperatura powierzch-



Rys. 3. Głowica frezująca do odpajania zmarzniętego gruntu [3]
Milling head for digging frozen ground.



Rys. 4. Wytrzymałości próbek betonu schłodzonego do temperatury $-8^\circ C$ oraz próbek betonu przechowywanych w warunkach normowych, opis w tekście [19]
The strength of the concrete samples cooled to $-8^\circ C$ and the concrete samples stored under conditions of code, the description in the text.

ni betonu nie powinna spadać poniżej 0°C, dopóki powierzchnia betonu nie osiągnie wytrzymałości, przy której jest odporna na zamarzanie bez uszkodzeń (zazwyczaj gdy $f_{c,0} > 5 \text{ MPa}$). Ponadto, wg rozdziału 2, punkt 8.3: „Zaleca się, aby temperatura powierzchni złącz technologicznych betonowanej konstrukcji w czasie betonowania była wyższa niż 0°C”.

W wytycznych ITB [18] scharakteryzowano zagadnienie dokładniej. Wskazano, że odporność betonu na działanie czynników atmosferycznych uzyskuje się dopiero przy wytrzymałościach na ściskanie, które wynoszą co najmniej: 5 MPa – w przypadku użycia cementu portlandzkiego bez dodatków, 8 MPa – przy zastosowaniu cementu portlandzkiego z dodatkami i dopiero przy około 10 MPa przy betonach wykonanych z cementu hutniczego.

Zatem zgodnie z wytycznymi [18] uzyskanie przez beton granicy wytrzymałości równej 5MPa nie gwarantuje, iż niska temperatura nie wpłynie negatywnie na dalszy przebieg procesu hydratacji. Równocześnie wg tej instrukcji [18]: „jeśli przed osiągnięciem wytrzymałości betonu na zamarzanie jego temperatura spadnie do -1°C, nastąpi zniszczenie struktury młodego betonu przez zamrażanie”.

Wyniki badań doświadczalnych Henga [19] wykazują, że beton dojrzewający w warunkach obniżonych temperatur charakteryzuje się znacznie mniejszą wytrzymałością, niż próbki referencyjne dojrzewające w warunkach normowych określonych przez PN-EN 12390-2:2009 [20]. Liczne badania porównawcze dla betonów dojrzewających w różnych temperaturach, wykonane przez Henga, zostały przedstawione w pracy [19]. Na rys. 4. przedstawiono przykładowe przyrosty wytrzymałości betonu, jeśli badane próbki przez pierwsze dwie doby dojrzewały w temperaturze 5°C, następnie w temperaturze -8°C, a po 28 dniach w temperaturze 20°C. Wówczas od 6. doby stwierdzono znaczne spowolnienie przyrostu wytrzymałości, a po 21 dniach przyrost wytrzymałości praktycznie został zatrzymany i wytrzymałość próbki stanowiła zaledwie około 30% wytrzymałości próbki referencyjnej (dojrzewającej w normowych warunkach). Po zwiększeniu temperatury do 20°C, od 28 dnia następował szybki wzrost wytrzymałości. Wytrzymałość betonu 4-miesięcznych próbek (wcześniej umieszczonych w temperaturze -8°C) była o około 15% niższa, niż próbek referencyjnych dojrzewających w warunkach normowych.

W przypadku zamrażania górotworu zgodnie z normą PN-G-05015:1997 [21], należy zapewnić grubość betonowej obudowy nie mniejszą niż:

- 0,50 m przy temperaturze próbek poniżej -15°C,
- 0,40 m przy temperaturze próbek zawartej w granicach od -10°C do -15°C,
- 0,35 m przy temperaturze próbek zawartej w granicach od -5°C do -9°C.

Zwiększenie grubości obudowy betonowej wynika z obniżenia wytrzymałości betonu dojrzewającego w ujemnej temperaturze, na skutek

stykania się z zamrożonym gruntem najpierw mieszanki, a później młodego betonu [18, 19].

Podsumowanie

Metoda mrożenia gruntów pozwala skutecznie stabilizować silnie nawodnione ośrodki płynących kurzawek, nawodnionych piasków, glin, ilów oraz skał luźnych i zwięzłych. Powstały, o podwyższonej nośności i szczelny, płaszcz z gruntu podczas zamrożenia stanowi stabilną obudowę tymczasową drążonego wykopu i blokadę dla napływającej wody, umożliwiając prowadzenie prac budowlanych w warunkach, w których nie jest to możliwe przy zastosowaniu innych metod.

W mrożeniu gruntu tzw. metodą kriogeniczną wykorzystuje się energię z rozprężenia skroplonych gazów oraz z ich ogrzania (najczęściej jest stosowany skroplony azot, niekiedy skroplony dwutlenek węgla). Duże ciepło parowania i bardzo niska temperatura skroplonego gazu (z przedziału od -196°C do -155°C) umożliwiającą szybkie schłodzenie i zamrożenie gruntu, na ogół w czasie około 1 tygodnia (przy zapleczu ograniczonym do specjalistycznych termoizolowanych zbiorników z systemem sterowania). Konieczna do zamrożenia bardzo duża ilość energii powoduje wielkie zużycie ciekłego azotu nawet do 2500 litrów na 1 m³ gruntu, zaś później, przy tzw. mrożeniu biernym, zużycie skroplonego gazu może być nawet kilka razy mniejsze, zależnie od warunków realizacyjnych.

W klasycznej metodzie mrożenia gruntów solanką schładzaną w agregatach mroźniowych czynnikiem chłodzącym są wodne roztwory soli, zazwyczaj chlorku wapnia (CaCl₂, o możliwym schłodzeniu nawet do temperatury -55°C). Wówczas na budowie występuje konieczność zorganizowania zaplecza agregatami chłodniczymi o dużych mocach, nawet do kilku MW. Okresy zamrażania wynoszą do kilku miesięcy.

Realizowane drążenie wykopu i wykonywanie obudowy (w okresie mrożenia biernego) ma miejsce w niekorzystnych temperaturach, na ogół z przedziału od -5°C do poniżej -15°C, może się odbywać przy zastosowaniu specjalistycznego sprzętu do frezowania skał.

Ujemne temperatury ośrodka również występują przy układaniu mieszanki i dojrzewaniu młodego betonu. Zgodnie z wytycznymi [18], jeśli przed osiągnięciem przez beton wytrzymałości na ściskanie z przedziału od 5 MPa do 10 MPa (zależnie od zastosowanego cementu) następuje obniżenie temperatury dojrzewania już do -1°C, zamarzanie powoduje zniszczenie struktury młodego betonu i znaczący spadek jego wytrzymałości względem betonu dojrzewającego w warunkach normowych. Ponadto zgodnie z normą [21] zależnie od temperatury próbek minimalne grubości przylegających, betonowych warstw wynoszą od 0,35 m do 0,50 m.

Zatem metody zamrażania gruntów i innych skał skuteczne w wielu niekorzystnych wykonawczo, niestabilnych ośrodkach mają zastosowanie, ale wymagają uwzględnienia właściwości dojrzewającego betonu.

Bibliografia

- [1] Gluch P., Szczepaniak Z.: Głębieńszy szybów, Dział wydawnictw PŚ, Gliwice, 1983.
- [2] Wichur A.: Uwagi o projektowaniu technologii zamrażania górotworu dla potrzeb głębieńszy szybów, Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 31, Zeszyt 3, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2007.
- [4] Pleśniak I., Przygodzka B.: Mrożenie gruntów przy budowie obiektów przemysłowych i górniczych, Wrocław: „Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej”, nr 56. Seria: Konferencje, nr 27, 1988.
- [5] Hydzik J., Czaja P.: Beton nowej generacji w budownictwie podziemnym, Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków 2010.
- [6] Kostrz J.: Górnictwo, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1964.
- [10] Miłoś T., Stewarski E.: Fizyka Górotworu, cz. II, Właściwości fizyczne skał, Kraków, 1977.
- [11] Reuther E.-U.: Einführung in den Bergbau. 1. Auflage., Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1982.
- [12] Hajto D., Proficz P.: Termiczne zróżnicowane warunki dojrzewania betonu w kontekście budownictwa podziemnego, Logistyka, 6/2014.
- [13] Hajto D., Więckowski A.: Właściwości betonu dojrzewającego w nienormowych warunkach kształtowanych przez górotwór, „Przegląd Górniczy”, 8/2014.
- [15] Jamroz Z.: Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2008.
- [16] Więckowski A.: Transport mieszanki betonowej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2014.
- [19] Heng S. S.: Wpływ obniżonej temperatury na rozwój wytrzymałości betonu. Dni betonu, Wisła 2010.

Normy

- [14] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [17] PN-EN 13670-1:2000 Wykonywanie konstrukcji z betonu. Część 1: Uwagi ogólne.
- [18] Wytyczne nr 282/2011. Instytut Techniki Budowlanej. Wykonywanie robót budowlanych w okresie obniżonej temperatury. Praca zbiorowa. Warszawa.
- [20] PN-EN 12390-2:2009 Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [21] PN-G-05015:1997: Szyby górnicze. Obudowa. Zasady projektowania.

Strony internetowe

- [3] <http://budowametra.pl/14216/>.
- [7] <https://www.airliquide.com/pl/polska, 20.10.2016>.
- [8] <http://www.boc-gas.com.au/en/index.html, 20.10.2016>.
- [9] <http://www.pebeka.pl/offers/3/szyby/inne-realizacje-szybow/, 11.12.2016>.

Streszczenie: Zamrażanie z wytworzeniem płaszczu sztucznej przegrody z występujących gruntów płynnych i skał luźnych, przy znacznych dopływach wód, stanowi skuteczne rozwiązanie w wielu przypadkach budów metra, jak też przy drążeniu głębokich szybów. Stosuje się metodę klasyczną, z wykorzystaniem agregatów chłodniczych o dużych mocach (nawet kilku MW) i solanki jako medium chłodzącego oraz tzw. metodę kriogeniczną (ze znacznie niższymi temperaturami), wykorzystującą do zamrożenia ośrodka energię skroplonych gazów, dostarczanych cysternami i okresowo przechowywanych w termoizolacyjnych zbiornikach na budowie. Wysoka wytrzymałość zamarzniętych materiałów wymaga stosowania specjalistycznego sprzętu do urabiania skał. Ujemne temperatury gruntu przy betonowaniu powodują znaczący spadek wytrzymałości betonu względem tego dojrzewającego w warunkach normowych. Metody zamrażania są skuteczne przy realizacjach robót w trudnych ośrodkach nawodnionych, ale są wysoko energochłonne i wymagają specjalistycznego wykonawstwa oraz spełnienia warunków minimalnych grubości betonowanych elementów.

Słowa kluczowe: zamrażanie gruntów, odpajanie zmarzliny, dojrzewanie betonu