

dr inż. ZBIGNIEW ISAKOW
mgr inż. JACEK JUZWA
mgr IRENA J. KUCIARA
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

Nowatorskie rozwiązania dotyczące problematyki monitorowania i oceny zagrożeń powierzchni terenu górniczego

Zagadnienie zagrożeń powstających wskutek osiadania i deformacji terenów kopalnianych jest jednym z najpoważniejszych problemów będących skutkami działalności wydobywczej. Zrealizowany w ramach Funduszu Coal & Steel projekt pt. "Prognozowanie i monitorowanie zagrożeń spowodowanych osiadaniem na obszarach kopalń węgla" był próbą wszechstronnego podjęcia tej tematyki przez partnerów z kilku krajów Unii Europejskiej. Artykuł w zwięzłej formie omawia cele projektu, zastosowane techniki oraz uzyskane wyniki w świetle zadań realizowanych przez poszczególne jego uczestników.

1. WPROWADZENIE

Deformacja terenów górniczych jest jednym z najważniejszych skutków wydobywania złóż surowców, a wśród nich węgla kamiennego. Wywołane nią zniszczenie środowiska jest odczuwalne jeszcze długo po zakończeniu eksploatacji wyrobisk – szczególnie na powierzchni, gdzie powoduje zagrożenia dla ludzi i obiektów naziemnych: konstrukcji budynków, infrastruktury sieci transportowych, energetycznych czy telekomunikacyjnych oraz niszczenie środowiska naturalnego. Ze względu na istotę tematyki stała się ona przedmiotem projektu badawczego pt. „Prognozowanie i monitorowanie zagrożeń spowodowanych osiadaniem na obszarach kopalń węgla” o kryptonimie „PRESIDENCE” współfinansowanego przez Fundusz Badawczo-Rozwojowy Coal & Steel oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Projekt zrealizowano w latach 2007-2010 przy współudziale Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG. W artykule przedstawiono główne cele i dokonania w czasie realizacji projektu.

2. CELE PROJEKTU

Przedstawiona propozycja zrealizowanego projektu obejmowała zintegrowane podejście do inżynierii osiadania na terenach górniczych, z uwzględnieniem **prognozowania** (ocena stabilności długoterminowej) oraz **monitorowania** (monitorowanie i kontrola efektów osiadania, deformacji i sejsmiczności).

W projekcie założono następujące generalne cele badawcze:

- poszerzenie wiedzy i doświadczeń dotyczących mechaniki osiadania terenów górniczych w aspekcie prognozowania ewentualnych zdarzeń i skutków,
- zastosowanie nowatorskich narzędzi do monitorowania osiadania powierzchni,
- wykorzystanie wyników prognozowania oraz monitorowania osiadania na terenach górniczych do lepszego, bezpiecznego i dokładniejszego zarządzania wykorzystaniem terenów w obszarach eksploatacji górniczej i zamkniętych kopalń.

Zrealizowanie powyższych celów ogólnych zostało uwarunkowane osiągnięciem szeregu celów cząstko-

wych zgrupowanych w trzech zasadniczych blokach tematycznych:

- prognozowanie osiadania,
- monitorowanie osiadania,
- zarządzanie wykorzystaniem terenów górniczych.

W ramach każdego z nich założono podjęcie przedstawionej poniżej problematyki.

W zakresie prognozowania osiadania:

- opracowanie doskonalszych narzędzi do prognozowania efektów osiadania form skalnych przy wykorzystaniu modelowania numerycznego 2- i 3-wymiarowego,
- opracowanie metodologii dla zabezpieczenia deformacji powierzchni spowodowanych wodami kopalnianymi,
- opracowanie nowatorskich i ekonomicznych technik dla badań obudów chodników podziemnych i ich wpływu na osiadanie,
- opracowanie nowatorskich technik dla badań szybów oraz modelowania i metodologii do prognozowania ruchów szybów,
- opracowanie metody dla neutralizacji niekorzystnych efektów działania wód kopalnianych na podszkłę i obudowy wyrobisk górniczych,
- opracowanie oraz wdrożenie metodologii zapobiegania uszkodzeniom szybów i chodników kopalnianych.

W zakresie monitorowania osiadania:

- zbudowanie prototypu dla kontroli deformacji gruntu na bazie badań i technik fotogrametrycznych przy wykorzystaniu przetworzonych obrazów wykonanych przy pomocy kamer cyfrowych,
- rejestrację wszystkich trójosiowych ruchów powierzchni terenu spowodowanych działalnością górnictwem, w ujednoczonej postaci i przy wykorzystaniu koncepcji sieci czujników,
- opracowanie zaawansowanych systemów pomiarowych dla wykrywania zjawisk sejsmicznych i deformacji na powierzchni wykorzystujących trójskładowe czujniki zsynchronizowane z GPS oraz dane uzyskane przy pomocy technik satelitarnych INSAR,
- opracowanie efektywnego ekonomicznie systemu do pomiarów i monitorowania bezpośrednio stanu wyrobiska szybowego.

W zakresie zarządzania wykorzystaniem terenów:

- utworzenie systemu informacji do uzyskiwania danych pierwotnych (mierzonych) oraz wyników analiz opartych o GIS dla oceny stanu osiadania,
- utworzenie systemu informacji dla interpretacji monitorowania deformacji na podstawie danych satelitarnych i danych z naziemnych systemów pomiarowych.

3. ZAKRES TEMATYCZNY ZREALIZOWANY W PROJEKCIE

Projekt był realizowany przez konsorcjum dziewięciu partnerów z pięciu państw Unii Europejskiej. Każdy z nich miał wydzielony własny zakres tematyczny, który był przedmiotem jego pracy. W projekcie uczestniczyli następujący partnerzy:

- **GEOCONTROL** z Hiszpanii – koordynator projektu,
- **AITEMIN** (Asociacion Para La Investigacion Y Desarrollo Industrial De Los Recursos Naturales) z Hiszpanii,
- **ARMINES** (Association Pour La Recherche Et Le Developpement Des Methodes Et De Processus Industriels) z Francji,
- **DMT** (Deutsche Montan Technologies) z Niemiec,
- **DSK** (Deutsche Steinkohle) z Niemiec – obecnie **RAG**,
- **EMAG** (Instytut Technik Innowacyjnych) z Polski,
- **MRSLS** (Mines Rescue Service Ltd.) z Wielkiej Brytanii,
- **RMT** (Rock Mechanics Technology Ltd.) z Wielkiej Brytanii,
- **UK COAL** producent węgla z Wielkiej Brytanii.

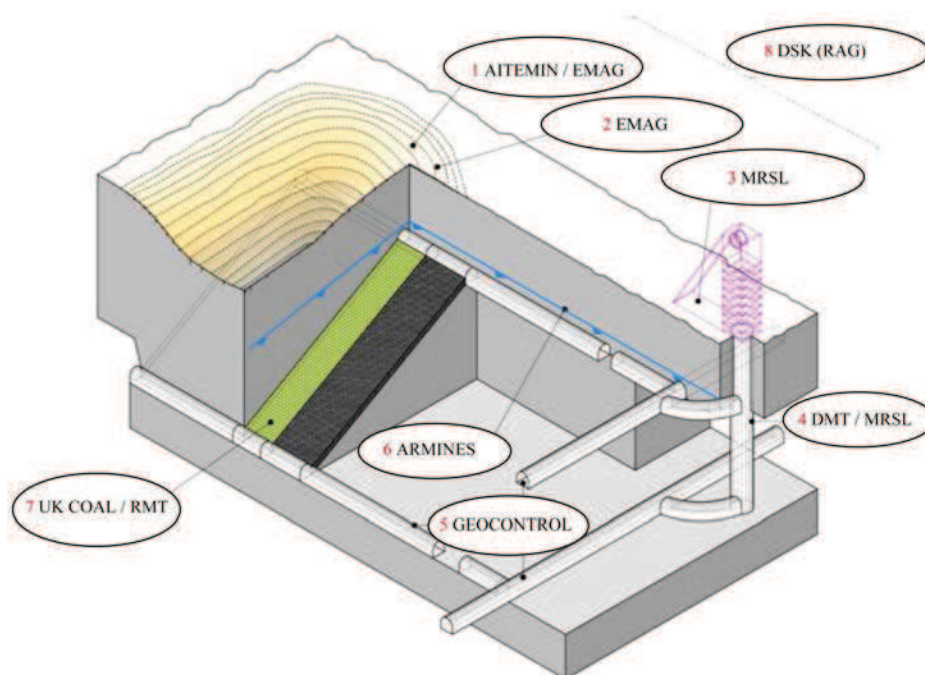
Ze względu na istnienie ścisłej współzależności przyczynowo-skutkowej pomiędzy działalnością wydobywczą a jej wpływem na powierzchnię, niektórzy uczestnicy koncentrowali się na problemach występujących w podziemnych kopalniach, a inni na zjawiskach występujących na powierzchni. Zamieszczony rysunek przedstawia schematyczny zakres zadań przydzielonych poszczególnym uczestnikom projektu.

Rezultatem podziału celów na trzy wzmiankowane bloki tematyczne było pogrupowanie zadań na odpowiadające im trzy pakiety robocze. Prace w poszczególnych pakietach i zadaniach objęły przedstawione poniżej przedsięwzięcia tematyczne.

Pakiet roboczy „**Prognozowanie**” został podzielony na dwie części, których każda obejmowała trzy zadania.

W części „**Prognozowanie osiadania wskutek działalności górniczej**” podjęto prace nad następującą tematyką:

- **Prognozowanie deformacji powierzchni** – w zadaniu uczestniczyli UK Coal oraz RMT we współpracy z Uniwersytetem w Nottingham.



Podział zadań realizowanych przez poszczególnych wykonawców projektu

- 1 AITEMIN/EMAG** – deformacja powierzchni – narzędzia geometryczne, fotogrametria i InSar,
- 2 EMAG** – monitorowanie powierzchni: GPS i sejsmika,
- 3 MRSL** – monitoring stabilności szybów,
- 4 DMT/MRSL** – długoterminowa ocena stabilności szybów,
- 5 GEOCONTROL** – długoterminowa ocena infrastruktury podziemnej,
- 6 ARMINES** – wpływ kopalnianych wód podziemnych na powierzchnię,
- 7 UK COAL/RMT** – ocena osiadania ponad ścianami i wyrobiskami,
- 8 DSK (RAG)** – zintegrowany monitoring na bazie GIS i różnych typów czujników.

Na podstawie bazy danych, obejmującej ewidencję wszystkich zjawisk związanych z deformacjami terenów górniczych w Wielkiej Brytanii od lat osiemdziesiątych XX wieku, dokonano analizy zapisów. W wyniku tych prac określono wzory osiadania, zależności naprężenie-odkształcenie oraz wpływ warunków geologicznych i parametrów geomechanicznych na osiadanie. W rezultacie przeprowadzonych rozważań opracowano modele numeryczne uwzględniające wpływ zmian stosowanych w nich parametrów na efekty deformacji powierzchni. Przewiduje się zastosowanie efektów prac w czynnych brytyjskich kopalniach węgla.

Rezultatem podziału celów na trzy wzmiankowane bloki tematyczne było pogrupowanie zadań na odpowiadające im trzy pakiety robocze. Prace w poszczególnych pakietach i zadaniach objęły przedstawione poniżej przedsięwzięcia tematyczne.

Pakiet roboczy „**Prognozowanie**” został podzielony na dwie części, których każda obejmowała trzy zadania.

W części „**Prognozowanie osiadania wskutek działalności górniczej**” podjęto prace nad następującą tematyką:

- **Prognozowanie deformacji powierzchni** – w zadaniu uczestniczyli UK Coal oraz RMT we współpracy z Uniwersytetem w Nottingham.

Na podstawie bazy danych obejmującej ewidencję wszystkich zjawisk związanych z deformacjami terenów górniczych w Wielkiej Brytanii od lat osiemdziesiątych XX wieku, dokonano analizy zapisów. W wyniku tych prac określono wzory osiadania, zależności naprężenie-odkształcenie oraz wpływ warunków geologicznych i parametrów geomechanicznych na osiadanie. W rezultacie przeprowadzonych rozważań opracowano modele numeryczne uwzględniające wpływ zmian stosowanych w nich parametrów na efekty deformacji powierzchni. Przewiduje się zastosowanie efektów prac w czynnych brytyjskich kopalniach węgla.

- **Prognozowanie deformacji powierzchni jako efektu oddziaływania wód kopalnianych** – zadanie realizował ARMINES.

Zastosowano tu nowe podejście do zagadnienia dokładniejszej oceny wpływu zbierania się wody

w wyrobiskach ścianowych na powierzchnię na podstawie danych uzyskanych w różnych miejscach w Europie, gdzie już nastąpiło zalanie podziemnych struktur kopalnianych. Tematykę zrealizowano w trzech kolejnych etapach. W pierwszym dokonano analizy zalanych obszarów w celu identyfikacji zachodzących zjawisk, w drugim wykonano testy laboratoryjne dla zbadania wpływu wody na próbki skał i na modele fizyczne, w tym na komory podziemne. Wyniki testów wykorzystano do opracowania modeli zaobserwowanych zjawisk. W trzecim etapie dokonano walidacji modeli poprzez ich zastosowanie dla prognozowania osiadania w kopalniach brytyjskich, co umożliwiło porównanie efektów prac wykonanych w zadaniu w punkcie „Prognozowanie deformacji powierzchni”. Zdefiniowane wytyczne kontroli bezpieczeństwa po zakończeniu wydobywania oraz opracowane modele są przewidziane do zastosowania w zalewanych kopalniach francuskich w zagłębiu Lotaryngii.

- **Prognozowanie deformacji pod powierzchnią** – zadanie realizowali UK Coal oraz RMT.

W zadaniu udoskonalono narzędzia do projektowania metodologii planowania kopalń na podstawie przypadków wytypowanych w zadaniu „Prognozowanie deformacji powierzchni”. Wykorzystano w nim uwiarygodnione dane wejściowe dla modelowania numerycznego w postaci pomiarów pola naprężeń oraz wyników testów laboratoryjnych skał w postaci parametrów opisujących pękanie górotworu. Zaproponowano ulepszone przedstawienie procesów pęknięcia przy użyciu modelowania w celu ich zastosowania dla prognozowania prawdopodobieństwa warunków powstających w nieckach osiadających górotworu. Celem ostatecznym zadania było sformułowanie zaleceń i ogólnych wytycznych dla udoskonalonej strategii tworzenia planów wydobywania.

W części „**Prognozowanie osiadania spowodowanego przez struktury podziemne**” podjęto prace nad następującą tematyką:

- **Badania szybów z użyciem nowatorskich narzędzi geofizycznych** – w zadaniu uczestniczyli MRSL oraz DMT.

Wykonane prace obejmowały problematykę oceny statycznych i dynamicznych technik skanowania szybów kopalnianych w połączeniu z bezwładnościowymi technikami pomiarowymi. Opracowano i wykonano oprogramowanie dla dynamicznego ska-

nowania obserwowanych procesów. Efekty prac wdrożono w formie testów skaningu laserowego dokumentowanego zdjęciami cyfrowymi. W sferze naukowej opracowano georeferencyjne metody pomiaru danych dla interpretacji mechanizmu związanego z ruchami wewnątrz i wokół szybów.

- **Badania chodników z użyciem nowatorskich narzędzi geofizycznych** – zadanie realizował Geocontrol.

W zadaniu na podstawie przeglądu wiedzy dokonano oceny metod nieniszczących, takich jak: skaning laserowy, wizualizacja, termografia opornościowa oraz GPR (*Ground Penetrating Radar*), w celu opracowania metodologii pomiarów dla badania obudów chodników i stanu górotworu w ich sąsiedztwie. Opracowano modele numeryczne oraz wykonano pomiary, które na bazie analizy zależności naprężenie-odkształcenie wykorzystano do oceny osiadania wybranych podziemnych ciągów komunikacyjnych. Przeprowadzone testy umożliwiły rozwój metodologii w celu ustalenia kryteriów powstawania uszkodzeń spowodowanych procesami rozciągania i ściskania w strukturach powierzchni, a w efekcie udoskonalenie dotąd obowiązujących kryteriów.

- **Wpływ wód kopalnianych na beton, zbrojony beton i materiały wypełniające** – wykonywał MRSL.

Prace objęły studia i kwantyfikację niekorzystnych efektów zanieczyszczeń wód kopalnianych na rodzaje materiałów wypełniających oraz obudów na podstawie badań laboratoryjnych, studia praktyczne wykorzystania metod dla neutralizacji niekorzystnych efektów zanieczyszczeń wód kopalnianych na infrastrukturę wypełnień oraz obudów, a także opracowanie monitoringu oraz oprzyrządowania telemetrycznego dla badania stabilności szybów w celu ich wykorzystania w pakiecie roboczym „Monitorowanie”.

W części „**Monitorowanie i kontrola wpływu osiadania na powierzchnię**” podjęto prace nad następującą tematyką:

- **Narzędzia do monitorowania oparte o metody geometryczne** – tematyka realizowana przez AITEMIN oraz EMAG.

W zadaniu tym Aitemin opracował nowoczesną metodę wysokiej rozdzielczości wykorzystującą cy-

frową technikę fotogrametryczną do zdalnego monitorowania deformacji gruntu. Wykonano i przetestowano prototyp systemu wykorzystujący przetwarzanie par obrazów uzyskiwanych przy pomocy sterowanych komputerowo dwóch kamer cyfrowych. Interpretacja uzyskiwanych w ten sposób wyników oferuje monitoring przestrzenny i czasowy stosunkowo niewielkich powierzchni i umożliwia wykorzystanie zastosowanych algorytmów do oceny osiadania i deformacji terenów oraz powierzchni – składowisk odpadów górniczych, hałd oraz stabilności zbroczy w kopalniach odkrywkowych.

EMAG natomiast wykonał interpretację wybranych zobrażeń satelitarnych pod kątem możliwości oceny wyników osiadania uzyskanych na podstawie badań prototypu systemu opracowanego w zadaniu „Sejsmiczne i oparte o GPS narzędzia do monitorowania zagrożeń powierzchni”.

- **Sejsmiczne i oparte o GPS narzędzia do monitorowania zagrożeń powierzchni** – zadanie wykonane przez EMAG.

Opracowany został system do kompleksowej oceny zagrożeń powierzchni spowodowanych skutkami działalności górniczej. Istotną zaletą systemu jest to, że jest on pierwszym rozwiązaniem uwzględniającym zagrożenia pochodzenia sejsmicznego oraz deformacyjne wynikające z przemieszczeń punktów powierzchni terenu górniczego. W ramach zadania opracowano modele matematyczne aproksymujące procesy sejsmiczne oraz deformacyjne towarzyszące działalności wydobywczej. Z tych względów system może być wykorzystywany zarówno do bieżącej obserwacji terenu na podstawie pomiarów oraz do predykcji zachowania powierzchni na podstawie obliczeń wykonywanych na bazie przyjętych modeli. Prototyp opracowanego systemu poddano testowaniu na poligonie jednej z kopalń węgla kamiennego. W ramach testowania podjęto próbę znalezienia powiązań pomiędzy zjawiskami deformacyjnymi oraz sejsmicznymi na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów. System może być wykorzystywany przez właścicieli gruntów na terenach górniczych: kopalń, samorządów i innych użytkowników. Zainteresowanie produktem wykazały również kopalnie chińskie.

- **Powierzchniowy monitoring stabilności szybów** – zadanie zrealizowane przez MRSL oraz DMT.

Zadanie stanowiło kontynuację prac partnerów zaangażowanych w monitoring szybów kopalnianych w bloku tematycznym „Prognozowanie”. Opracowa-

ne tam narzędzia telemetryczne i monitorowania zostały praktycznie sprawdzone pod kątem ich skuteczności, efektywności i możliwości wykorzystania. Przeprowadzono próby polowe zastosowanych technik. Wykonano studia nad rozwojem skutecznych technik monitoringu w szybach zalanych wodą o ograniczonej przejrzystości. Rozważono i przeprowadzono testy wykorzystania wysokiej rozdzielczości obrazów ultradźwiękowych w takim środowisku do oceny stabilności szybów.

W części „Zarządzanie ryzykiem zagrożeń spowodowanych osiadaniem powierzchni” opracowywano następujące zagadnienia:

- **Zintegrowane monitorowanie powierzchni – wykonawca RAG (dawniej DSK) z EMAG i AITEMIN.**

W zadaniu opracowano i utworzono bazę danych GeoMon umożliwiającą zintegrowany monitoring danych uzyskanych przy pomocy technik różnych typów. Baza pozwala powiązać wyniki pomiarów z różnych pól obserwacyjnych w jednym Ośrodku Informacji o Środowisku. Opracowana baza umożliwia przechowywanie danych z naziemnych pomiarów deformacyjnych typu tachimetria czy pomiary GPS oraz danych uzyskiwanych jako obrazy wykonane techniką fotogrametryczną lub techniką satelitarną przy wykorzystaniu różnych typów satelitów. Opracowany produkt został poddany testowaniu w oparciu o dane archiwalne oraz dane testowe uzyskane z prototypowych systemów zrealizowanych w ramach projektu przez EMAG i AITEMIN.

- **Wykrywanie zagrożonych obszarów na powierzchni** – zadanie realizowane przez wszystkich partnerów projektu.

Celem zadania było opracowanie instrukcji dla wykrywania obszarów zagrożeń powierzchni. Przy jej tworzeniu wykorzystano rezultaty uzyskane w ramach projektu w zakresie prognozowania i monitorowania stanu powierzchni dotyczące:

- projektowania kopalń i obudów podziemnych chodników,
- planowania działalności wydobywczej w aspekcie oceny ryzyka powstania potencjalnych zagrożeń,
- oznaczania obszarów zagrożonych na powierzchni wskutek ruchów szybów,
- oznaczania zagrożeń powierzchni na podstawie pomiarów wskaźników deformacji.

Opracowana instrukcja o charakterze poradnika adresowanego do właścicieli gruntów uwzględnia prak-

tyczne czynniki jakie mogą mieć wpływ na możliwość powstania szkód będących następstwem planowanej, aktualnej lub zakończonej działalności wydobywczej.

- **Walidacja i weryfikacja wyników** – zadanie realizowane przez wszystkich partnerów projektu.

Dokonano walidacji i oceny narzędzi prognozowania w kilku różnych wybranych miejscach, w których zastosowano systemy monitorowania opracowane w projekcie lub wykorzystano proponowane metody oceny.

PODSUMOWANIE

W wyniku zrealizowanego projektu uzyskano nowe, bardziej kompleksowe podejście do tematyki związanej z osiadaniem gruntu na terenach górniczych i pogórnich. Opracowano nową generację modeli pozwalających na predykcję dla oceny zjawisk powstających w efekcie działalności górniczej.

Wykonano i przetestowano prototypy nowych narzędzi monitoringu powierzchni, wykorzystujących rozmaite techniki uzyskiwania informacji o badanych obszarach. Dokonano zintegrowania uzyskanych danych w postaci wspólnej bazy informatycznej, umożliwiającej porównywanie wyników uzyskiwanych przy pomocy różnych technik i metod. Podjęto ponadto próbę znalezienia zależności pomiędzy różnymi fizykalnie zjawiskami generowanymi i obserwowanymi na powierzchni w wyniku procesu wydobywczego. Efektem zakończonego projektu jest oferta nowych narzędzi umożliwiających planowanie działalności wydobywczej oraz skierowana do właścicieli gruntów w rejonach górniczych instrukcja pozwalająca na ocenę zagrożeń powierzchni. Instrukcja ta oraz narzędzia monitoringu mogą przynieść wymierne efekty ekonomiczne oraz stanowić podstawę w rozstrzygnięciu sporów wynikających z oceny wielkości szkód powstających na terenach górniczych.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Wiesław Piwowarski

