

Jerzy KWIATEK
Główny Instytut Górnictwa, Katowice

PROBABILISTYCZNA OCENA WPLYWU KRZYWIZN POWIERZCHNI NA BUDYNKI

Streszczenie. W ocenie wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na budynki na terenach górniczych na ogół pomija się wpływ krzywizn powierzchni. Uzasadnia się to małymi ich wartościami. Doświadczenia wskazują jednak na występowanie uszkodzeń budynków, przypisywanych krzywiznom powierzchni. Wykazano, że wobec dużego losowego rozproszenia krzywizn, jest możliwe wystąpienie na terenach górniczych krzywizn na tyle dużych, aby ich szkodliwość dla budynków była niepomijalna.

PROBABILISTIC ASSESMENT OF SURFACE CURVATURE IMPACT ON BUILDINGS

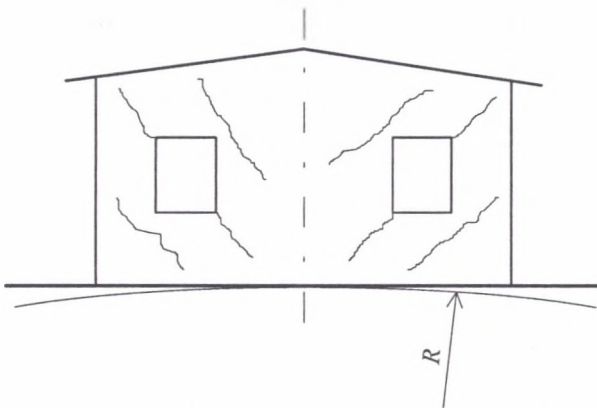
Summary. In assessment of underground mining impact on buildings on mining terrain the impact of surface curvatures is generally omitted. It finds its justification in their small values. However, an extended experience shows that the occurrence of damages of building structures, which are attributed to the surface curvature has place. It was shown that in the presence of great random curvature distribution the occurrence of so big curvatures on the mining terrain is possible which makes their adverse effects for buildings non-neglected.

1. Wprowadzenie

W problemach ochrony budynków na terenach górniczych na ogół uważa się, że podstawowym wskaźnikiem deformacji powierzchni są poziome odkształcenia, pomija się natomiast krzywizny. W prognozach deformacji powierzchni podaje się wartości poziomych odkształceń i na tej podstawie określa się przewidywane kategorie terenu górniczego, co stanowi podstawę do oceny możliwości przeprowadzenia zamierzonej eksploatacji z punktu widzenia ochrony znajdujących się na powierzchni budynków. W przypadku projektowania

na terenach górniczych budynków nowych, potrzebne wartości promieni krzywizn ustala się na podstawie zaliczenia terenu górniczego do odpowiedniej kategorii, stosownie do zaprognozowanych poziomych odkształceń powierzchni.

Pogląd o małym znaczeniu krzywizn powierzchni w ochronie terenów górniczych ma swoje źródło w małej ich stabilności jako wskaźnika intensywności skutków eksploatacji na powierzchni, a także w dużych średnich wartościach promieni powstających krzywizn i wobec tego przypisywania im małego udziału w uszkodzeniach budynków. Codzienne doświadczenia wskazują jednak na niepomijalny udział różnic obniżen podłoża budynków w powstających szkodach górniczych, które to różnice mogą być przypisywane przede wszystkim powstającym krzywiznom powierzchni. Na rysunku 1 przedstawiono schemat pęknięć muru budynku, spowodowanych wypukłą krzywizną powierzchni o promieniu R . W referacie przedstawiono, w ujęciu probabilistycznym i w skrócie stosownym do objętości referatu, wpływ krzywizn powierzchni na budynki.



Rys. 1. Pęknięcia muru budynku spowodowane krzywizną powierzchni
Fig. 1. Fractures of building wall caused by a ground curvature

2. Rozproszenie krzywizn powierzchni

Doświadczenia wskazują na zależne od warunków geologiczno-górniczych, niepomijalne w problemach ochrony terenów górniczych, losowe rozproszenie wskaźników deformacji powierzchni wokół ich wartości średnich. Dotyczy to w szczególności krzywizn powierzchni. W przypadku opisu losowego rozproszenia wskaźników funkcją gęstości prawdopodobieństwa Gaussa, miarą rozproszenia krzywizn wokół jej wartości średniej \bar{K}

jest współczynnik zmienności M_K . Wartości ekstremalne krzywizn K^{ekstr} (maksymalne w przypadku wartości dodatnich i minimalne w przypadku wartości ujemnych) określa zależność

$$K^{ekstr} = \bar{K}(1 + n|M_K|) \quad (1)$$

gdzie n jest współczynnikiem zależnym od wymaganego prawdopodobieństwa P nieprzekroczenia przez krzywizny K powierzchni wartości określonej zależnością (1). W przypadku, na przykład, często stosowanego w budownictwie prawdopodobieństwa $P = 0,95$ współczynnik $n = 1,65$.

Podstawowym elementem prawidłowej oceny wpływu krzywizn powierzchni na budynki jest właściwe określenie wartości współczynnika zmienności M_K . Pierwsze badania w tym zakresie wykonał Popiołek [3] i uzyskał $M_K = 0,43$. W latach 1994–1997 realizowany był w Akademii Górniczo-Hutniczej projekt badawczy [4], którego jednym z zadań było określenie współczynników zmienności dla wskaźników deformacji powierzchni, w tym dla jej krzywizn. Przeanalizowano 26 przypadków i uzyskano dla krzywizn powierzchni wartości współczynników zmienności w granicach od 0,16 do 1,18 oraz wartość średnią wskaźnika zmienności krzywizn $\bar{M}_K = 0,46$. Duże rozproszenie losowe wskaźników zmienności krzywizn, w zależności od warunków geologiczno-górnicych, skłania do uwzględnienia tego rozproszenia poprzez wprowadzenie do rozważań współczynnika zmienności M_{M_K} współczynnika zmienności krzywizn. Dla analizowanego zbioru przypadków uzyskuje się $M_{M_K} = 0,25$. Wynika stąd, że dla często stosowanego w budownictwie kwantyla 0,95 wartość współczynnika zmienności krzywizn jest równa

$$M_K(P = 0,95) = \bar{M}_K(1 + 1,65M_{M_K}) = 0,65$$

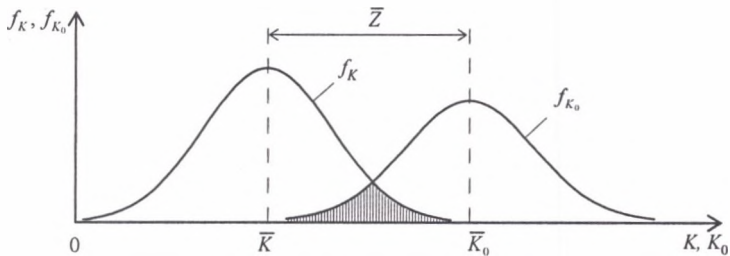
W przypadku stosowanego niekiedy jednostronnego rozproszenia równemu jednemu odchyleniu standardowemu otrzymuje się $M_K(P = 0,84) = 0,58$, a w przypadku nieuwzględniania rozproszenia jest oczywiste, że otrzymuje się $M_K(P = 0,50) = \bar{M}_K = 0,46$.

Uzyskane wartości rozproszenia wskaźników zmienności krzywizn powierzchni należy traktować jako orientacyjne, a w konkretnych przypadkach należałoby wyznaczać wartości tego wskaźnika dla danych warunków geologiczno-górnicych, na podstawie pomiarów przemieszczeń powierzchni. Przyjmując na przykład w zależności (1) $M_K = 0,65$ i kwantyl dla współczynnika zmienności krzywizn równy 0,95 otrzymuje się $K^{ekstr} = 2,07\bar{K}$. Oznacza to możliwość wystąpienia z przyjętym prawdopodobieństwem $P = 0,95$ rzeczywistych

krzywizn powierzchni przekraczających ponad dwukrotnie ich wartość prognozowaną. Zauważyć należy, że w przypadku nietrafnego przyjęcia parametrów teorii i dużych różnic w długościach terenowych baz pomiarowych i budynków, różnice krzywizn prognozowanych i rzeczywistych mogą się zwiększyć.

3. Bezpieczne krzywizny powierzchni

Niech na budynek działa krzywizna K powierzchni, a budynek charakteryzuje się możliwością przejścia krzywizny K_0 powierzchni, wykazując przy tym skutki nie przekraczające poziomu uznanego za dopuszczalny. W ujęciu probabilistycznym niezawodność konstrukcji budynku zależy od losowego rozkładu wskaźników $K(\omega)$ i $K_0(\omega)$, określonego w przestrzeni zdarzeń elementarnych ω . Przyjmuje się, że $K(\omega)$ i $K_0(\omega)$ mają rozkłady normalne o wartościach średnich \bar{K} i \bar{K}_0 oraz odchyleniach standardowych s_K i s_{K_0} . Gęstości prawdopodobieństwa f_K zmiennej losowej $K(\omega)$ i f_{K_0} zmiennej losowej $K_0(\omega)$ przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Losowy charakter K i K_0
Fig. 2. Random characteristics of K and K_0

Miarą niezawodności R konstrukcji jest zależność

$$R = P\{K_0(\omega) > K(\omega)\}$$

gdzie P oznacza prawdopodobieństwo. Przypadek

$$A = P\{K_0(\omega) < K(\omega)\}$$

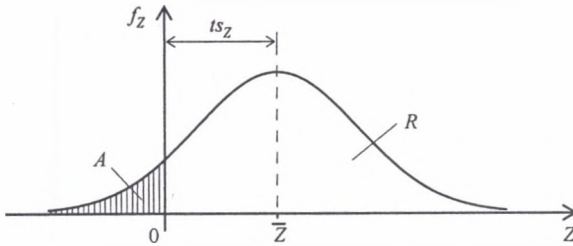
oznacza zawodność konstrukcji. Na rysunku 2 zakreśkowaniem zaznaczono obszar wspólny f_K i f_{K_0} , gdzie odporność obiektu na krzywiznę powierzchni może być mniejsza od jej krzywizny. Miarą zapasu niezawodności konstrukcji jest losowa funkcja

$$Z(\omega) = K_0(\omega) - K(\omega) > 0 \quad (2)$$

o średniej wartości \bar{Z} i odchyleniu standardowym s_z (rys. 3), przy czym

$$\bar{Z} = \bar{K}_0 - \bar{K}$$

$$s_z = \sqrt{s_{K_0}^2 + s_K^2}$$



Rys. 3. Losowy rozkład zapasu niezawodności
Fig. 3. Random distribution of the reliability margin

Dla $Z(\omega) > 0$ konstrukcja jest niezawodna, a dla $Z(\omega) < 0$ konstrukcja jest zawodna. Granicą jest $Z(\omega) = 0$. Jedną z możliwości szacowania niezawodności konstrukcji jest wprowadzenie do rozważań indeksu niezawodności t , związanego z przebiegiem funkcji f_z zależnością [1]

$$\bar{Z} - t s_z = 0$$

wobec czego

$$t = \frac{\bar{Z}}{s_z} = \frac{\bar{K}_0 - \bar{K}}{\sqrt{s_{K_0}^2 + s_K^2}} \quad (3)$$

Wprowadzenie indeksu niezawodności t umożliwia deterministyczną ocenę niezawodności konstrukcji na bazie rozważań probabilistycznych, pod warunkiem jednak znajomości oddziaływań na budynek i odporności budynku w ujęciu probabilistycznym. Wraz ze wzrostem wartości tego indeksu, wzrasta bezpieczeństwo konstrukcji. W tabelicy 1 przedstawiono związek między indeksem niezawodności t a zawodnością konstrukcji A .

Tablica 1
Związek między indeksem t a zawodnością konstrukcji A

t	5,2	4,7	4,2	3,7	3,2	2,3	1,3
A	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}

Stosowanie w praktyce przedstawionego sposobu postępowania wymaga określenia wymaganej wartości indeksu t . Przykładowo podaje się, że przepisy niemieckie przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności, w zależności od następstw zniszczenia konstrukcji,

zalecają przyjmować $t = 4,2 \div 5,2$, natomiast dla stanu granicznego użyteczności, także w zależności od następstw zniszczenia konstrukcji, zalecają przyjmować $t = 2,0 \div 3,0$ [1, 5], co przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 2
Wartości indeks niezawodności t [1,5]

Stan graniczny	Następstwo zniszczenia		
	małe	średnie	duże
nośności	4,2	4,7	5,2
użyteczności	2,0	2,5	3,0

Uwzględniając w dalszym ciągu, że

$$s_{K_0} = M_{K_0} \bar{K}_0, \quad s_K = M_K \bar{K}$$

gdzie:

M_{K_0} – współczynnik zmienności odporności obiektu na krzywiznę powierzchni,

M_K – współczynnik zmienności krzywizny powierzchni,

można zależność (3) przekształcić do postaci

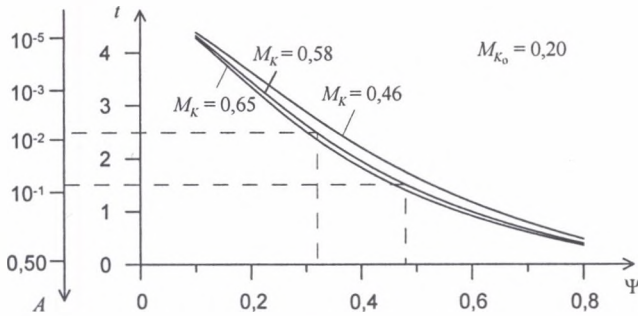
$$t = \frac{1 - \psi}{\sqrt{M_{K_0}^2 + \psi^2 M_K^2}} \quad (4)$$

gdzie wprowadzono oznaczenie $\psi = \frac{\bar{K}}{\bar{K}_0}$. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowo wykresy

współczynnika t według zależności (4) uwzględniając orientacyjnie współczynnik zmienności odporności obiektu na krzywiznę powierzchni $M_{K_0} = 0,20$ oraz współczynniki zmienności krzywizny powierzchni odpowiadające rozproszeniu równemu 1,65 odchyleniu standardowemu ($P = 0,95$, $M_K = 0,65$), rozproszeniu równemu jednemu odchyleniu standardowemu ($P = 0,84$, $M_K = 0,58$) i nieuwzględniające rozproszenia ($P = 0,50$, $M_K = 0,46$).

Znając średnią wartość odporności \bar{K}_0 budynku na krzywiznę powierzchni, można na podstawie przedstawionych zależności, przyjmując prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń budynków A , określić odpowiadający temu prawdopodobieństwu indeks niezawodności t i współczynnik ψ , a następnie wyznaczyć dopuszczalną średnią wartość krzywizny powierzchni \bar{K} , uwarunkowaną przyjętym sposobem i zakresem eksploatacji górniczej. Na ogół jednak w problemach budownictwa wiodącym wskaźnikiem niezawodności jest indeks niezawodności t . Uwzględniając na przykład $M_K = 0,58$ i $M_{K_0} = 0,20$ oraz przyjmując $t = 2,5$, otrzymuje się w przybliżeniu $\Psi = 0,3$ przy

prawdopodobieństwie zawodności około 10^{-2} , a przyjmując $t = 1,5$ otrzymuje się w przybliżeniu $\Psi = 0,5$ przy prawdopodobieństwie zawodności około 10^{-1} , co zaznaczono na rysunku 4 liniami przerywanymi.



Rys. 4. Prawdopodobieństwo zawodności konstrukcji obiektów budowlanych
 Fig. 4. The probability of structural unreliability of building objects

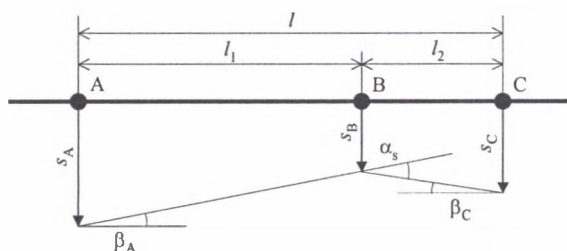
4. Ocena szkodliwości krzywizn powierzchni

Poniżej przedstawiono w ogólnym zarysie sposób określania, w ujęciu probabilistycznym, wartości dopuszczalnych krzywizn powierzchni z uwagi na ochronę budynków na terenach górniczych. Zależą one od średniej wartości odporności \bar{K}_0 budynków na te krzywizny i od możliwego do zaakceptowania prawdopodobieństwa przekroczenia w budynkach stanu uszkodzeń uznanego za niepożądany, co charakteryzują współczynniki zmienności odporności budynków M_{K_0} i krzywizn powierzchni M_K .

Dokładna ocena wpływu zakrzywienia podłoża na obiekty budowlane, a w tym budynki, powinna być przeprowadzana na podstawie analizy współdziałania ze sobą podłoża i konstrukcji obiektów, odwzorowanego odpowiednimi modelami obliczeniowymi. Jest to jednak sposób skomplikowany. Przedstawiony poniżej sposób uproszczony może być wykorzystany do wstępnego oszacowania szkodliwości krzywizn powierzchni na terenach górniczych dla budynków. Jego podstawą jest zaproponowana przez Wiłuna [6] metoda odchylenia kąowego dla oceny dopuszczalnych nierównomiernych osiadań podłoża obiektów budowlanych na terenach niegórnicych. W metodzie Wiłuna rozpatruje się trzy punkty powierzchni A, B i C, odległe od siebie odpowiednio o l_1 i l_2 (rys. 5). Niech punkty te obniżą

się kolejno o s_A , s_B i s_C . Za miarę nierównomierności obniżen przyjmuje się wskaźnik α_s , określony zależnością

$$\alpha_s = \beta_A + \beta_C \approx \frac{s_A - s_B}{l_1} - \frac{s_B - s_C}{l_2} \quad (5)$$



Rys. 5. Odchylenie kątowe obniżen punktów powierzchni
Fig. 5. An angle deviation of surface points falls

Wskaźnik α_s , po przetransponowaniu na dopuszczalne obniżenia podłoża budynków spowodowane krzywiznami powierzchni na terenach górniczych, przybiera postać [2]

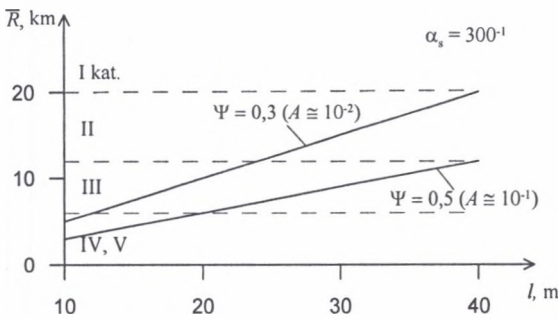
$$\alpha_s = \frac{l}{2\bar{R}_0} \quad (6)$$

gdzie $\bar{R}_0 = \bar{K}_0^{-1}$, natomiast l oznacza długość budynku. Opierając się na danych przedstawionych przez Wiłuna [6] ocenia się, że dla zachowania uciążliwości użytkowania budynków w stopniu małym lub średnim [2] można orientacyjnie przyjąć, że zależnie od poziomu ochrony budynków, dla budynków murowych z wieńcami żelbetowymi w każdym stropie, wskaźnik α_s waha się w granicach od 200^{-1} do 300^{-1} , natomiast dla budynków murowych bez wieńców wskaźnik ten waha się w granicach od 300^{-1} do 500^{-1} . Dla ogólnych rozważań można więc przyjmować średnio $\alpha_s = 300^{-1}$. W przypadku rozważań szczegółowych wartość wskaźnika α_s powinna być określana indywidualnie, przy uwzględnieniu między innymi odkształcalności budynku i stopnia jego ochrony.

Uwzględniając w zależności (6) współczynnik $\Psi = \frac{\bar{K}}{K_0} = \frac{\bar{R}_0}{R}$, gdzie przez \bar{R} oznaczono średnią wartość promienia krzywizny powierzchni, otrzymuje się

$$\bar{R} = \frac{l}{2\alpha_s \Psi} \quad (7)$$

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowo dopuszczalne średnie wartości promienia \bar{R} krzywizny powierzchni według wzoru (7) w zależności od długości budynków, przyjmując $\alpha_s = 300^{-1}$ oraz $\Psi = 0,3$ (prawdopodobieństwo powstania uszkodzeń około 10^{-2}) i $\Psi = 0,5$ (prawdopodobieństwo powstania uszkodzeń około 10^{-1}). Z rysunku tego wynika, że na przykład dla budynku o długości około 25 m prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń, określonych przyjętą wartością współczynnika $\alpha_s = 300^{-1}$, w przypadku dopuszczenia krzywizn powierzchni odpowiadających II kategorii terenu górniczego wynosi około 0,01, a w przypadku dopuszczenia krzywizn powierzchni odpowiadających III kategorii terenu górniczego prawdopodobieństwo to wynosi około 0,1. Nie oznacza to niemożności dopuszczenia kategorii wyższych terenu górniczego, jednak wówczas prawdopodobieństwo uszkodzeń budynku, a więc także kosztów usuwania powstałych szkód, ulegnie zwiększeniu.



Rys. 6. Promienie szkodliwych krzywizn powierzchni
 Fig. 6. Radii of damaging surface curvatures

4. Wnioski

Duże losowe rozproszenie wskaźników deformacji powierzchni spowodowanej eksploatacją górnictwem, co szczególnie dotyczy krzywizn powierzchni, wskazuje na potrzebę probabilistycznej oceny skutków eksploatacji w obiektach budowlanych. Wykazano, że choć średnie wartości prognozowanych krzywizn powierzchni mogą być w wielu przypadkach uznane za nieszkodliwe dla budynków, to jednak w rzeczywistości, wskutek losowego rozproszenia wskaźników charakteryzujących deformacje powierzchni na terenach górniczych, krzywizny mogą być na tyle duże, aby ich szkodliwość dla budynków była niepomijalna. Na terenach górniczych obserwuje się przypadki uszkodzeń budynków, których

przyczyn należy doszukiwać się właśnie w krzywiznach powierzchni (podłoża). Z przedstawionych wywodów można wysunąć następujące dwa ogólne wnioski:

- wobec dużego losowego rozproszenia wskaźników deformacji powierzchni na terenach górniczych, za miarę szkodliwego ich wpływu na obiekty budowlane, a w szczególności na budynki, należałoby uznać prawdopodobieństwo wystąpienia ich uszkodzeń, przekraczających zakres uznany za możliwy do przyjęcia,
- krzywizny powierzchni powinny być uznawane za istotny wskaźnik wpływu eksploatacji górniczej na obiekty budowlane, a w tym głównie na budynki podlegające szczególnej ochronie.

W budownictwie niezawodność konstrukcji budowlanych ocenia się stosując metody probabilistyczne lub półprobabilistyczne. Metody takie powinny być stosowane także na terenach górniczych, w zakresie oceny bezpieczeństwa związanego z wpływem projektowanej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane. Przemawia za tym zarówno potrzeba zapewnienia tego bezpieczeństwa z dostatecznym i możliwym do określenia prawdopodobieństwem, jak też potrzeba oceny ryzyka związanego z podejmowaniem kolejnych eksploatacji, którego elementem jest prawdopodobieństwo wystąpienia ich niepożądanych skutków.

LITERATURA

1. Biegus A.: Probabilistyczna ocena konstrukcji stalowych. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław 1999.
2. Kwiatek J.: Podstawy budownictwa na terenach górniczych. UWND AGH, Kraków 2004.
3. Popiołek E.: Rozproszenie statystyczne odkształceń poziomych terenu w świetle geodezyjnych obserwacji skutków eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe AGH nr 594, Geodezja z. 44, Kraków 1976.
4. Popiołek E. i inni: Losowość pogórnich deformacji terenu i odporności obiektów powierzchniowych w świetle wyników pomiarów geodezyjnych i obserwacji budowlanych oraz jej wpływ na wiarygodność prognoz szkód górniczych. Projekt badawczy nr 9 60 102 907, AGH, Kraków 1994–1997 (praca niepublikowana).
5. Roik K.: Vorlesungen über Stahlbau. Verlag, Berlin 1978.
6. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. Wydaw. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Zych