

Krzysztof CHLIPALSKI

WSPÓLDZIAŁANIE NAWIERZCHNI DROGOWEJ Z DEFORMUJĄCYM SIĘ POZIOMO PODŁOŻEM GÓRNICZYM

Streszczenie. Praktyka projektowa nie uwzględnia faktu dodatkowego obciążenia nawierzchni wywołanego wpływami deformacji górniczej powierzchni terenu. Aby przejść do wymiarowania konstrukcji nawierzchni, określono wielkość tych wpływów.

INTERACTION OF ROAD SURFACE WITH A MINING SUBSOIL UNDERGOING HORIZONTAL DISTORTION

Summary. Design practice does not take into account the additional surface loading due to the effect of mining-related deformation on that surface. To allow the dimensioning of surface construction the magnitude of these effects has been examined.

COOPÉRATION DE LA CHAUSSÉE AVEC SPOUS-SOL MINIER QUI SE DÉFORME HORIZONTALEMENT

Resumé. La pratique de projet ne prend pas en considération la charge supplémentaire de la chaussée qui est provoquée par les influence de la déformation minière de surface du terrain. Pour passer a la détermination de construction de la chaussée on a précisé la grandeur de ces influences.

1. ISTOTA PROBLEMU

Spotykamy się na co dzień jadąc samochodem, jako użytkownicy, z dotkliwym oddziaływaniem na pojazd uszkodzonej nawierzchni drogowej, w tym uszkodzeń wywołanych również podziemną eksploatacją kopalin. Przykładem typowych uszkodzeń nawierzchni od wpływów górniczych mogą być spękania lub skrajna ich forma w postaci rozerwania,

rozerwanie nawierzchni z pionowym przemieszczeniem lub wypiętrzenie. Spękania warstw konstrukcyjnych podatnych nawierzchni drogowych (bitumicznych), a nawet mikrospeknięcia, inicjują proces niszczenia nawierzchni, decydując o trwałości i niezawodności eksploatacyjnej całej konstrukcji. Spękania mogą być wywoływane również ruchami podłoża spowodowanymi zmianami wilgotności, ruchami termicznymi, starzeniem się lepiszcza, zmęczeniem materiału, ruchem drogowym od wpływów hamowania lub przyspieszania itp.

Aby móc, w pewnym zakresie, przeciwdziałać zjawisku spekań, konieczne jest poznanie wielkości i rozkładu dodatkowych naprężeń rozciągających w nawierzchni od wpływów górniczych. Chcąc uzyskać pełny obraz ww. zjawiska wykonano:

- analizę teoretyczną zagadnienia, w której rozważa się proces współdziałania nawierzchni z poziomo deformującym się podłożem zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych pracy nawierzchni,
- badania doświadczalne laboratoryjne, w celu określenia, dla potrzeb analizy teoretycznej, wartości parametrów podłoża, w odniesieniu do różnych gruntów i różnych rodzajów nawierzchni drogowych,
- pomiary przemieszczeń poziomych nawierzchni w terenie. Na ich podstawie określono wartości parametrów modelu współdziałania układu nawierzchnia-podłoże, dla konkretnych warunków górniczych i eksploatacyjnych drogi.

W niniejszym artykule przedstawiono teorię współdziałania nawierzchni z przemieszczającym się poziomo podłożem górniczym.

2. MODEL WSPÓLDZIAŁANIA NAWIERZCHNI DROGOWEJ Z „RUCHOMYM” PODŁOŻEM

Rozważmy na wstępie zagadnienie wpływu poziomych przemieszczeń podłoża gruntowego, występujących na stacjonarnym zboczu niecki górniczej ukształtowanej nad długą krawędzią wyrobiska, na pracę statyczną budowli liniowej nieskończenie długiej. Za taką budowlę uważa się podatne nawierzchnie drogowe, powszechnie stosowane na terenach górniczych. Rozpatrywana nawierzchnia, o stałym przekroju poprzecznym A i prostej osi geometrycznej, kontaktuje częścią swej powierzchni z podłożem, które doznaje poziomych przemieszczeń, wymuszonych ruchami pionowymi i poziomymi górotworu. Następnie

uwzględnia się ogólny przypadek, gdy nawierzchnia jest usytuowana ukośnie pod kątem α_0 , do bocznej krawędzi wyrobiska górniczego. Podłoże analizowanej budowli liniowej, przyjęte jako jednorodne, typu Winklera, charakteryzuje się sztywnością pionową i poziomą. Zakłada się, że współczynnik poziomej sztywności sprężystej k_1 ma stałą wartość wzdłuż osi podłużnej obiektu.

Przemieszczenia podłoża wymuszające przemieszczenia poziome przekrojów nawierzchni (rys.1) opisano w przybliżeniu funkcją:

$$u_1 = \frac{u_{1\max}}{2}(1 + \cos\pi\xi), \quad (1)$$

gdzie: $u_{1\max} = u_{\max}\sin\alpha_0$,

$$\xi = \frac{x_1}{r_1},$$

$$r_1 = \frac{r}{\sin\alpha_0},$$

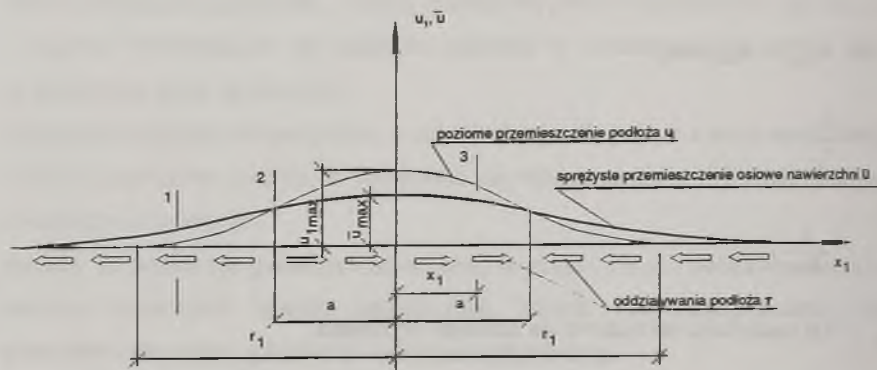
α_0 - kąt nachylenia osi budowli do krawędzi wyrobiska.

Postać przyjętej funkcji u_1 wynika z przybliżonego opisu matematycznego parametrów deformacji zbocza niecki podanego w [1]. Pomija się wpływ przemieszczeń pionowych w , traktując podłoże w stanie wyjściowym jako płaskie.

Wskutek odkształceń postaciowych warstwy podłoża bezpośrednio przylegającej do nawierzchni (odkształcenia spodu nawierzchni są skrępowane więzami przez działające siły tarcia i przyczepności) pojawiają się, wzdłuż powierzchni styku obiektu z „podłożem ruchomym” (za takie uważa się podłoże górnicze), poziome oddziaływania styczne τ , które stanowią obciążenie zewnętrzne w stosunku do nawierzchni, wywołują w niej dodatkowe naprężenia wewnętrzne rozciągające i ściskające σ , równoległe do osi podłużnej budowli, oraz sprężyste przemieszczenia osiowe \bar{u} przekrojów nawierzchni (w niskich temperaturach beton asfaltowy pracuje w stanie sprężysto-kruchym). Przemieszczenia te są zgodne co do kierunku i zwrotu z przemieszczeniami górniczymi podłoża. Wykres wymuszonych

przemieszczeń \bar{u} , odwzorowujący w przybliżeniu rzeczywisty ich rozkład wzdłuż osi nawierzchni od wpływu jednej krawędzi wyrobiska, przedstawiono schematycznie na rys.1.

Wielkość poziomych oddziaływań stycznych τ zależy wprost od wartości przemieszczeń podłoża i nawierzchni oraz od właściwości fizyczno-mechanicznych gruntu i nie może przekroczyć pewnej wartości granicznej τ_r , którą oblicza się z warunku wytrzymałości gruntu na ścinanie. W przedziale $|x_1| < a$ (rys.1) oddziaływania τ są skierowane zgodnie z kierunkiem przemieszczeń górniczych podłoża, natomiast w przedziale $|x_1| > a$ zwrot oddziaływań stycznych τ jest przeciwny do tego kierunku.



Rys.1. Stan poziomych przemieszczeń u_1 podłoża i sprężystych przemieszczeń osiowych \bar{u} przekrojów nawierzchni

Fig.1. The state of horizontal translocations u_1 of the subsoil and elastic axial translocations \bar{u} of surface sections

Dla odciętych $x_1 = \pm a$ przemieszczenia poziome u_1 podłoża są równe przemieszczeniom osiowym \bar{u} przekrojów poprzecznych nawierzchni. Są to więc przekroje charakterystyczne, gdyż ze względu na równość przemieszczeń u_1 i \bar{u} oddziaływania podłoża τ pod nimi są równe zero, a zwroty τ na odcinkach położonych po obu stronach każdego z tych przekrojów są przeciwnie skierowane. Wypadkowa oddziaływań poziomych τ wzdłuż osi podłużnej nawierzchni musi być w tym przypadku równa zero (warunek równowagi), co zapisujemy równaniem

$$\int_l \tau dx_1 = 0 \quad (2)$$

gdzie l - długość strefy oddziaływań podłoża.

Układ oddziaływań τ jest więc układem samorzównoważonym. Z warunku (2) można wyznaczyć wartość odciętej $x_1 = \pm a$ pokazanej na rys.1.

Zgodnie z założeniem Winklera wartość sprężystego oddziaływania podłoża τ określa się ze wzoru

$$\tau = k_1(u_1 - \bar{u}) \quad , \quad (3)$$

gdzie: u_1 - przemieszczenie podłoża wg (1),

\bar{u} - przemieszczenie punktu styku nawierzchni z podłożem równe co do wartości sprężystemu przemieszczeniu jej przekroju (por. rys.1).

Zależność (3) jest ograniczona warunkiem

$$u_1 - \bar{u} \leq u_g \quad ,$$

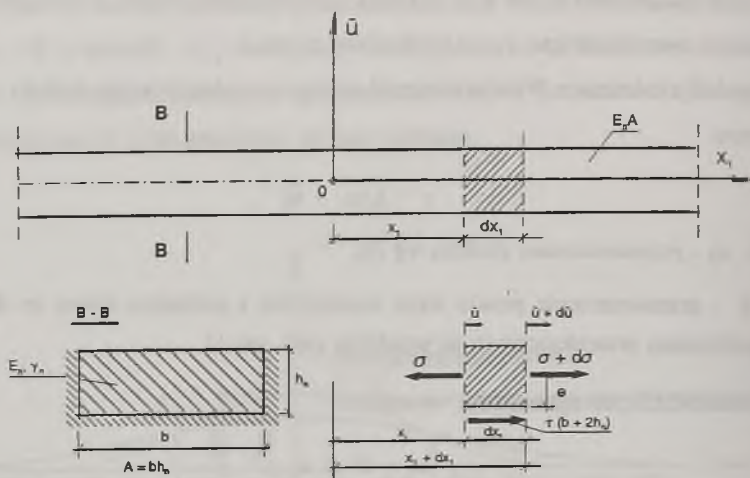
gdzie: u_g - oznacza umowną wartość względnego przemieszczenia plastycznego, sygnalizującą stan graniczny pracy podłoża. Stan ten wynika z ograniczonego zakresu stosowalności prawa Hooke'a w odniesieniu do ośrodka gruntowego. Przez stan graniczny rozumie się tu pokonanie sił tarcia i przyczepności, co prowadzi do ścięcia odkształconej postaciowo warstwy gruntu podłoża na powierzchni jego styku z nawierzchnią. Odpowiadające takiemu przypadkowi oddziaływanie podłoża przyjmuje wówczas stałą wartość graniczną τ_g , która nie ulega zmianie mimo nadal rosnących przemieszczeń u_1 podłoża, co zapisujemy równaniem:

$$\tau = \tau_g \quad , \quad \text{dla} \quad u_1 - \bar{u} \geq u_g \quad . \quad (4)$$

Wartości parametrów k_1 i u_g , charakteryzujące sprężysto-plastyczne właściwości gruntu podłoża, zależą przede wszystkim od rodzaju i stopnia zagęszczenia gruntu. W miarę zagęszczenia gruntu rośnie jego wytrzymałość na ścinanie. Tłumaczyć to można zaklinowaniem się poszczególnych ziaren przy zwiększaniu jego gęstości oraz powstawaniem wiązań adhezyjnych w miejscach styku ziaren. Wspomniane wiązania ulegają niszczeniu wraz

z rozwojem odkształceń ścinających. Wzrost stopnia zagęszczenia gruntu powoduje ponadto zwiększenie wartości parametru k_t oraz jednocześnie zmniejszenie wartości u_p .

W pracy [1] określono nieznanne rozkłady oddziaływań stycznych τ i normalnych naprężeń wewnętrznych w nawierzchni σ .



Rys.2. Schemat obliczeniowy
Fig.2. The computing scheme

Naprężenia wewnętrzne σ można wyrazić w zależności od poziomego odkształcenia nawierzchni (prawo Hooke'a) w postaci

$$\sigma = \varepsilon E_n, \quad (5)$$

dla przyjętego $E_n = const$, określonego dla temperatur ujemnych.

Uwzględniając założenie obliczeniowe odnośnie do małych odkształceń nawierzchni, z warunku geometrycznego (rys.2) otrzymujemy

$$\varepsilon = \frac{\bar{u} + d\bar{u} - \bar{u}}{dx_1} = \frac{d\bar{u}}{dx_1}. \quad (6)$$

Różniczkując zależność (5) względem x_1 , przy uwzględnieniu m in. związku (6) otrzymujemy podstawowe równanie różniczkowe sprężystego przemieszczenia osiowego \bar{u} przekroju nawierzchni w postaci

$$\frac{d^2\bar{u}}{dx_1^2} = -\frac{\tau}{E_n\lambda} \quad (7)$$

gdzie:

dla oddziaływań sprężystych wielkość oddziaływań podłoża τ określa związek (3),

dla oddziaływań granicznych związek (4).

Równanie różniczkowe (7), opisujące mechanizm współdziałania nawierzchni drogowej z poziomo deformującym się podłożem na zboczu niecki górniczej, tylko w sposób przybliżony odwzorowuje rzeczywisty przebieg zjawisk. W toku analizy korzystamy z zastępczych, liniowych charakterystyk, a nie rzeczywistych, nieliniowych charakterystyk podłoża. Rozwiązanie równania (7) zależy od przyjętej postaci wyrażenia na τ . Uwzględniając zależność (3) w równaniu (7) otrzymujemy dla stadium sprężystej pracy podłoża nową postać równania

$$\frac{d^2\bar{u}}{d\xi^2} - \kappa^2\bar{u} = -\kappa^2u_1 \quad (8)$$

gdzie: u_1 - określa wyrażenie (1),

$$\xi = \frac{x_1}{r_1} \quad , \quad r_1 = \frac{r}{\sin\alpha_0} \quad (\text{por. rys.1}),$$

natomiast

$$\kappa = r_1 \sqrt{\frac{k_1}{E_n\lambda}} \quad ,$$

przy czym: $r = \frac{H}{\rho g \beta}$ oznacza promień zasięgu wpływów głównych.

Rozwiązaniem niejednorodnego równania różniczkowego (8) jest całka ogólna, ważna w przedziale: $-1 \leq \xi \leq 1$, (por. rys.1)

$$\bar{u} = Ae^{\kappa\xi} + \frac{u_g}{2\alpha} \left[1 + \frac{\cos\pi\xi}{1 + \left(\frac{\pi}{k}\right)^2} \right], \quad (9)$$

gdzie: α, κ - bezwymiarowe parametry, $\alpha = u_g/u_{I_{max}}$; $u_{I_{max}}$ - wg rys. 1.

A i B - to stałe całkowania, wyznaczone z odpowiednich warunków brzegowych.

Bezwymiarowy parametr K ma swój sens fizyczny. Uwzględnia on bowiem wpływ na wielkość sprężystego przemieszczenia osiowego \bar{u} przekroju nawierzchni następujących czynników:

- sprężystości podłoża gruntowego (k_1),
- kształtu przekroju poprzecznego nawierzchni i efektywnej części obwodu przekroju kontaktującej się z podłożem (λ),
- wypadkowego modułu sprężystości warstw wykonanych z betonu asfaltowego dla temperatur ujemnych (E_n),
- rodzaju górotworu i głębokości zalegania pokładu złoża wyrażonych promieniem zasięgu wpływów głównych (r),
- kąta α_0 nachylenia osi podłużnej drogi do krawędzi bocznej wyrobiska górniczego.

Dla przedziału $|x_1| > r_1$, (rys. 1), czyli $|\xi| > I$, wobec braku poziomych przemieszczeń podłoża u_1 (w przyjętym do analizy uproszczonym opisie parametrów zbocza niecki), por. (1), rozwiązaniem równania (8) jest tylko całka ogólna równania jednorodnego

$$\bar{u} = Ce^{\kappa\xi} + De^{-\kappa\xi}, \quad (10)$$

gdzie: C, D - stałe całkowania.

W przypadku gdy wraz z przyrostem przemieszczeń u_1 oddziaływania τ na pewnym odcinku nawierzchni osiągną wartość graniczną τ_g , wówczas odpowiadające im na tym odcinku sprężyste przemieszczenia osiowe \bar{u} przekrojów nawierzchni określa całka, będąca rozwiązaniem równania (7), po podstawieniu $\tau = \tau_g$ i uwzględnieniu związku $\tau_g = k_1 u_g$

$$\bar{u} = -\frac{\kappa^2 u_g \xi^2}{2} + Er_1 \xi + F, \quad (11)$$

gdzie: E, F - stałe całkowania.

Po analitycznym określeniu funkcji przemieszczenia \bar{u} nawierzchni naprężenia normalne osiowe σ (rozciągające lub ściskające) oraz styczne oddziaływania poziome τ obliczamy ze wzorów:

$$\sigma = \frac{E_n}{r_1} \frac{d\bar{u}}{d\xi}, \quad \tau = -\frac{E_n \lambda}{r_1^2} \frac{d^2 \bar{u}}{d\xi^2}, \quad (12)$$

(por. (4) i (7)).

Warunki dynamiczne

Analizując warunki dynamiczne pracy nawierzchni na podłożu górnicy, można wyróżnić dwa przypadki:

- 1° - niekorzystny dla pracy nawierzchni, wynika z charakteru odkształceń podłoża górnicy.
- 2° - korzystny dla pracy nawierzchni, wynika z dynamicznych oddziaływań pojazdów na nawierzchnię drogową.

Nietrudno wykazać, że charakter odkształceń podłoża górnicy wpływa również na charakter poziomych oddziaływań tego podłoża na nawierzchnię. Analiza statyczna odpowiadała założeniu, że podłoże deformuje się w sposób powolny i ciągły. W takim przypadku poziome naprężenia kontaktowe τ obciążające nawierzchnię są do niej przyłożone w sposób statyczny, tzn. przyrost ich od zera do wartości τ przebiega bardzo wolno. Zdarzają się jednak przypadki, że w wyniku lokalnego zawału spowodowanego zniszczeniem płytkiej pustki w górotworze dochodzi do powstania naglej deformacji podłoża o dużym przyspieszeniu. Dla rzeczywistych warunków pracy nawierzchni można określić następującą zależność:

$$\sigma_d = \varphi \sigma_s, \quad (13)$$

gdzie współczynnik dynamiczny φ zmienia się w zakresie $1 \leq \varphi \leq 2$.

Dla większości przypadków deformacji podłoża, z jakimi spotykamy się w praktyce, wartość współczynnika φ nie przekracza wartości 1,10.

Przypadek drugi z ww. uwzględnia wpływ wstrząsów i drgań, wywoływanych przez ruch pojazdów samochodowych, na pracę nawierzchni. Dynamiczne oddziaływania pojazdów na

nawierzchnię wywołują drgania w ośrodku gruntowym podłoża, którym towarzyszy pewna redukcja wartości kąta tarcia wewnętrznego i zewnętrznego gruntu, jak i wystąpienie lokalnych poślizgów oraz przemieszczeń cząstek gruntu w podłożu.

W wyniku tego zjawiska dochodzi do częściowego rozładowania napięć kontaktowych między nawierzchnią a przemieszczającym się podłożem na zboczu niecki. Prowadzi to do redukcji stycznych naprężeń kontaktowych i w ich następstwie do zmniejszenia przemieszczeń i naprężeń w nawierzchni. Przedstawione zjawisko, z uwagi na swoją złożoność, trudno jest jednak jednoznacznie analitycznie opisać.

Rzeczywiste warunki pracy nawierzchni drogowej na podłożu górnicy, z uwzględnieniem wpływów od ruchu pojazdów, można opisać określając analityczny związek pomiędzy naprężeniami σ_d i σ_s .

$$\sigma_d = \delta^r \sigma_s^* , \quad (14)$$

gdzie współczynnik δ^r określa stopień redukcji naprężeń.

Wielkość: $\sigma_{dmax} = \delta_{max}^r \sigma_s^*$ stanowi podstawę analizy konstrukcyjnej odporności nawierzchni.

Uwzględniając warunki terenowe pracy nawierzchni na odcinku doświadczalnym (poligon w Przyszowicach), dodatkowa wartość największego naprężenia rozciągającego od wpływu poziomych przemieszczeń podłoża górnicy wyniosła $\sigma_{dmax} = 1,7$ MPa (bez uwzględniania wpływów dynamicznego oddziaływania ruchu pojazdów na nawierzchnię i związane z nią podłożę ww. naprężenia uzyskiwałyby wartość $\sigma_s^* = 2,0$ MPa).

Udział naprężeń od wpływów górnicy w ogólnym bilansie naprężeń wynosi w tym przypadku 33%.

3. WNIOSKI

Rozważania teoretyczne i badania doświadczalne zrealizowane w pracy doprowadziły do sformułowania m.in. następujących wniosków:

1. Przedstawione powyżej analityczne rozwiązanie problemu odzwierciedla, wystarczająco dokładnie na potrzeby praktyki inżynierskiej, rzeczywisty przebieg i skutki procesu współdziałania nawierzchni drogowej z poziomo deformującym się podłożem w obszarze

wpływów deformacji górniczej. Znając cechy mechaniczne i geometryczne nawierzchni drogowej, właściwości fizyczno-mechaniczne jej podłoża, wartości poziomych przemieszczeń górniczych gruntu na zboczu niecki i jej zasięg przestrzenny, jak również - kąt usytuowania osi drogi względem krawędzi pola górniczego, można, na podstawie wyprowadzonych zależności określić: *stan sprężystych przemieszczeń i odkształceń nawierzchni od wpływów górniczych, odpowiadający mu stan dodatkowych naprężeń rozciągających i ściskających w konstrukcyjnych warstwach jezdni oraz rozkład stycznych oddziaływań poziomych występujących na powierzchni kontaktu nawierzchni z „ruchomym” podłożem*, za jakie uważa się podłoże górnicze.

2. Wpływ poziomej sprężystej podatności nawierzchni i jej podłoża redukuje obliczeniowe naprężenia rozciągające, wynikające ze współdziałania konstrukcji jezdni drogowej z poziomo przemieszczającym się podłożem na zboczu niecki górniczej.
3. Dynamiczne oddziaływania pojazdów samochodowych wpływają na częściowe rozładowanie napięć kontaktowych, występujących na styku nawierzchni z przemieszczającym się poziomo podłożem górniczym i tym samym na redukcję naprężeń rozciągających od wpływów górniczych.
4. Z ogólnej oceny stanu naprężeń rozciągających w nawierzchni, od łącznych wpływów: górniczych i niegórniczych (skurcz termiczny, hamowanie pojazdów), dla zapewnienia odpowiedniej trwałości i eksploatacyjnej niezawodności jezdni drogowych na terenach górniczych, zwłaszcza w okresach występowania temperatur ujemnych, zachodzi konieczność uodpornienia nawierzchni poprzez wzmocnienie jej warstw konstrukcyjnych w sposób elastyczny, np. geosyntetykami, polimerami. Zagadnienie to ma duże znaczenie praktyczne, m.in. ze względu na zamierzoną budowę autostrad przebiegających również i przez tereny górnicze.
5. Istnieje potrzeba dalszego poszukiwania efektywniejszych niż zaproponowano modeli współdziałania nawierzchni drogowej z jej podłożem, odwzorowujących możliwie najlepiej rzeczywisty przebieg zjawisk, jakie zachodzą na styku konstrukcji nawierzchni z deformującym się górniczo podłożem. W modelach tych należy ponadto uwzględnić wpływy reologiczne zarówno w samej nawierzchni drogowej, jak i w jej podłożu oraz zweryfikować je na drodze badań doświadczalnych.

LITERATURA

- [1] Chlipalski K.: Zagadnienie współdziałania nawierzchni drogowej z poziomo deformującym się podłożem górnictwem. Praca doktorska, Politechnika Śl., Gliwice 1994.
- [2] Chlipalski K., Żak A.: Uszkodzenia dróg na terenach górnictwem. Drogownictwo 8/86.
- [3] Chlipalski K., Żak A.: Współpraca nawierzchni drogowej z deformującym się górnictwem podłożem - badanie tarcia zewnętrznego. Drogownictwo 9/90.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Wiesław Szumierz

Wpłynęło do Redakcji 19.05.1995 r.

Abstract

Design practice does not take into account the additional surface loading due to the effect of mining-related deformation on that surface. To counteract the occurrence of fissures it is necessary to learn the magnitude and distribution of additional tensile stress in the surface caused by effects of mining activity. The article describes a model and a computing scheme that served to determine the above quantities. Knowledge of the mechanical and geometrical features of the road surface, physico-chemical properties of its subgrade, the values of horizontal mining-related ground translocations on the basin slope and its range, as well as the angle of road axis relative to the edge of the mining field permits derivation of formulas allowing determining the state of elastic translocations and mining-related surface distortions, the corresponding state of additional tensile and compressive stress in the construction layers of the road as well as the distribution of tangents of horizontal interactions occurring at the interface between the surface and the "mobile" mining subsoil.

Dynamic work conditions of road surface located on mining subsoil have also been examined. It was concluded that dynamic interactions of automotive vehicles influence the partial discharge of contact tensions existing at the interface of surface and a horizontally-translocating mining subsoil and thus they reduce mining activity-related tensile stress.