ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: BUDOWNICTWO z. 63 Nr kol. 858

Dr inż. Kazimierz KŁOSEK, absolwent Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej specjalności "budownictwo komunikacyjne" doktor Politechniki Warszawskiej (1979). Pracownik PRInż-PW w Katowicach (1972-74), obecnie adiunkt w Zakładzie Budowy Dróg Żelaznych Wydz. Bud. Pol. Śl. Specjalista z zakresu budowy i utrzymania dróg kolejowych oraz geotechniki terenów górniczych. Członek Senatu Politechniki Śląskiej oraz Komisji KILiW PAN z zakresu inżynierii komunikacyjnej i ochrony terenów górniczych.

Kazimierz KŁOSEK

REDYSTRYBUCJA SKŁADOWYCH STANU NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W PODŁOŻU RUSZTU TOROWEGO NA TERENACH GÓRNICZYCH

Streszczenie. Wykorzystując badania modelowe na ośrodku analogowym oraz wyniki rozważań teoretycznych, dotyczących redystrybucji składowych stanu naprężenia w podtorzu na terenach górniczych, wskazano na główne źródła zagrożeń dla współpracy rusztu torowego z jego bezpośrednim podłożem oraz podtorzem gruntowym.

1. WSTĘP

Współdziałanie nawierzchni kolejowej z podtorzem na terenach objętych wpływami podziemnej eksploatacji górniczej to problem zasadniczo odmienny różniący się od spotykanych dotąd i dość dobrze na ogół już rozpoznanych aspektów tego zagadnienia [10]. Źródłem wspomnianej odrębności są tu charakterystyczne deformacje przypowierzchniowej strefy gruntu (podtorza), opisywane grupą wskaźników, stanowiących pochodne przemieszczeń poziomych jak i pionowych powierzchni analizowanej warstwy [7]. W świetle dotychczasowych analiz, koncentrujących się na próbach oceny stanu naprężenia w przypowierzchniowej strefie gruntu, szczególnego znaczenia nabierają poziome deformacje ośrodka gruntowego mogące przybierać charakter odkształceń rozluźniających ε_r względnie zagęszczających ε_z. Wpływ pozostałych wskaźników deformacji powierzchni na ocenę zmian stanu naprężenia w podtorzu można uznać baz wątpienia za pomijalnie mały.

We wcześniejszych publikacjach, dotyczących modyfikacji całokształtu warunków współpracy drogi kolejowej z podtorzem górniczym, wskazywano z reguły na główne źródła zagrożeń tego współdziałania, tkwiące zarówno w samej nawierzchni [3, 8, 12], jak i znacznie głębiej, w podtorzu [4, 11]. Rozważania stanowiące treść niniejszej pracy koncentrują się przede wszystkim na górnej - aktywnej strefie podtorza, uczestniczącej bezpośrednio

w przejmowaniu naprężeń z rusztu torowego na podłoże oraz warstwy zalegające poniżej. Rozważania te poszerzono o analizę kinematyczną podłoża rusztu torowego, podejmując ponadto próbę analitycznego opisu zjawisk tam zachodzących. Otrzymane tą drogą rezultaty potwierdzają tezę o zasadniczej odrębności procesu współdziałania nawierzchni z podtorzem na terenach górniczych, w stosunku do obszarów nie narażonych na tego rodzaju oddziaływania. Charakter zachodzących zmian pozwala sprecyzować główne źródła zagrożeń dla prawidłowej pracy podtorza (a w konsekwencji i nawierzchni), którego awaryjność na terenach górniczych swą intensywnością wielokrotnie przewyższa inne rejony kraju [1].

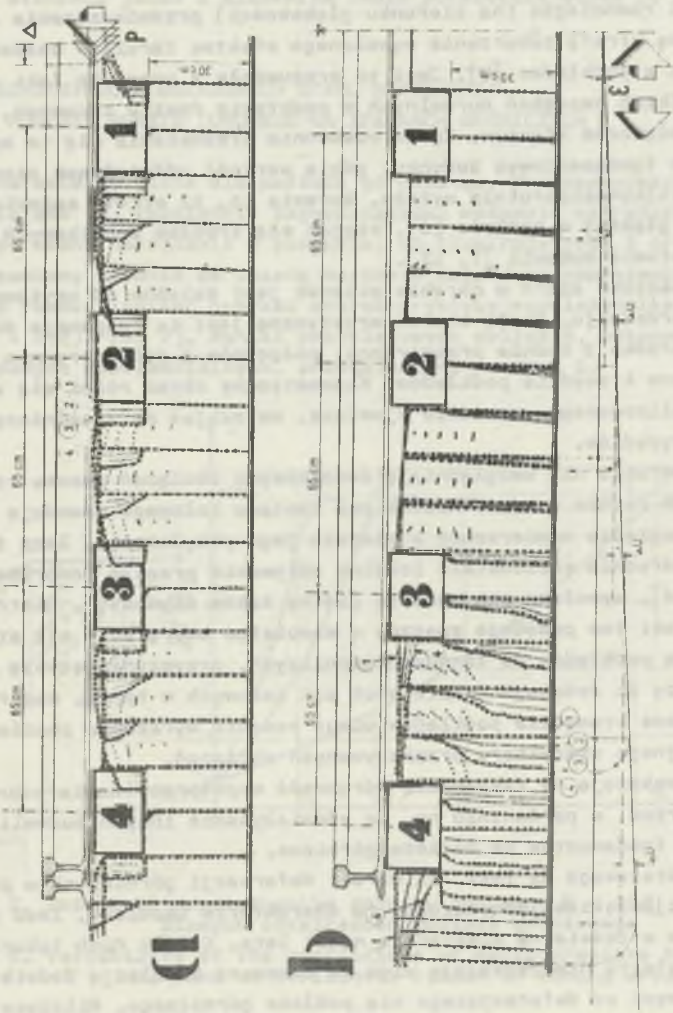
Przewidywana w najbliższych latach dalsza intensyfikacja wydobycia kopalin z filarów ochronnych, w tym również i spod linii kolejowych, stanie się niewątpliwie powodem przyspieszonej degradacji stanu technicznego urządzeń i obiektów budownictwa kolejowego. Możliwie szybkie, a zarazem dogłębne rozpoznania związanych z tym problemów natury technicznej, eksploatacyjnej itp. może przyczynić się o ile nie do zahamowania, to przynajmniej do znaczącej redukcji strat natury gospodarczej, jak i ogólnospołecznej ponoszonych z tego tytułu przez kolej [1].

2. DOŚWIADCZALNA ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ W PODŁOŻU RUSZTU TOROWEGO NA TERENACH GÓRNICZYCH

Rejestracja deformacji podłoża górniczego w obrębie górnych warstw podtorza posiada z reguły charakter oględzin ich zewnętrznych skutków i przejawów. Na tej podstawie próbuje się wysnuwać pewne przypuszczenia co do rzeczywistego przebiegu zjawisk. Ich interpretacja musi mieć jednak siłę faktu charakter hipotetyczny. Do bardzo nielicznych można zaliczyć próby zgłębienia tego zagadnienia drogą bezpośrednich badań terenowych [3,8,9]. Z tego też powodu celowe wydaje się być uzupełnienie wspomnianych prób o właściwie zaprogramowane badania eksperymentalne. Szczególnie dogodnym środkiem do osiągnięcia tego celu okazała się technika badań modelowych polegających na wykorzystaniu ośrodka analogowego typu Taylora-Schneebelliego [5].

Wyniki reprezentatywnych prób, polegających na symulowaniu poziomych przemieszczeń wzdłużnych "Δ" rusztu torowego względem pasywnego podłoża, jak i poziomych odkształceń rozluźniających ε_r, przedstawiono na rys. 1. Pole przemieszczeń ziarn ośrodka rejestrowano metodami fotogrametrii dynamicznej.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje w sposób jednoznaczny na zasadniczą odrębność obu przypadków. W sytuacji podłoża niegórniczego przemieszczenie rusztu powoduje charakterystyczne deformacje głównie w obrębie tzw. okienek między podkładami, będąc podstawowym źródłem oporu podłużnego toru. Tarcie podstaw podkładów o podłoże powoduje zaburzenie w wąskiej stre-



Rys. 1. Redystrybucja składowych stanu odkształcenia w podtorzu a) przy podłużnym przesuwie rusztu torowego względem pasywnego podłoża, b) w warunkach odkształceń rozluźniających podłoża

Fig. 1. Redistribution of the state components in subgrade a) in longitudinal railway tape feed condition relatively by the passive subsoil, b) during revelling strain of railway subgrade

fie poślizgowej bezpośredniego podłoża rusztu torowego, nie przenosząc się praktycznie na niżej leżące warstwy. Wielkość tego oporu jest wprost proporcjonalna do naprężenia normalnego w podstawie podkładu, podczas gdy wartość oporu podłużnego, jak i bocznego podkładów jest od niego niezależna.

Pozioma odkształcenia rozluźniające ε_r implikują przemieszczenia zgoła odmienne od wyżej opisanych. W podstawie podkładów (np. Nr 4) łatwo zauważyć niemal równoległe (na kierunku głębokości) przemieszczenia ziarn podłoża, z pewną strefą zaburzenia wywołanego efektem tarcia w bezpośredniej styczności z podkładem [8]. Jest to zrozumiałe z uwagi na fakt stosunkowo niewielkich naprężań normalnych w podstawie rusztu torowego, wywołanych jego ciężarem własnym. Zgoła odmiennie przedstawia się ta sprawa, np. pod rusztem fundamentowym budynku, gdzie wartość oddziaływań pionowych jest z reguły kilkunastokrotnie wyższa. Sprawia to, iż strefa sczepienia sięga znacznie głębiej w podłoże [6], stając się źródłem dodatkowych sił osiowych w podstawie budowli [7, 12].

Pole przemieszczeń ziarn w obrębie okienek jest zależne od usytuowania analizowanego przekroju. Cechą charakterystyczną jest tu tendencja do "wypływania" ośrodka z tychże przestrzeni, połączona z jednostronnym jego naporem na boczne krawędzie podkładów. Kinematyczny obraz różni się zatem wyraźnie od analizowanego uprzednio zjawiska, wskazując na zasadniczą odrębność obu przypadków.

Modelowane warunki nie uwzględniają dodatkowych obciążeń rusztu torowego, wywołanych ruchem taboru. Nacisk osi zestawu kołowego powoduje bowiem dodatkowe ugięcie nawierzchni w miejscu jego przyłożenia, lecz i zarazem w bezpośrednim sąsiedztwie lokalne odrywanie przęsła (odprężenie) od podłoża [3, 4], wywołane sztywnością giętną toków szynowych. Nietrudno zauważyć, że efekt ten powoduje znaczne - samoistne odprężenie sił stycznych w podstawie podkładów na terenach górniczych, przyczyniając się w sposób zasadniczy do redukcji dodatkowych sił osiowych w torze. Napór tłucznia na boczne krawędzie podkładów ulega ponadto wyraźnemu obniżeniu wskutek pulsacyjnego charakteru przekazywanych obciążeń.

Zjawiska te wskazują na zasadniczą odrębność współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem, w porównaniu np. do oddziaływania innych budowli liniowych czy też fundamentów na podłoże górnicze.

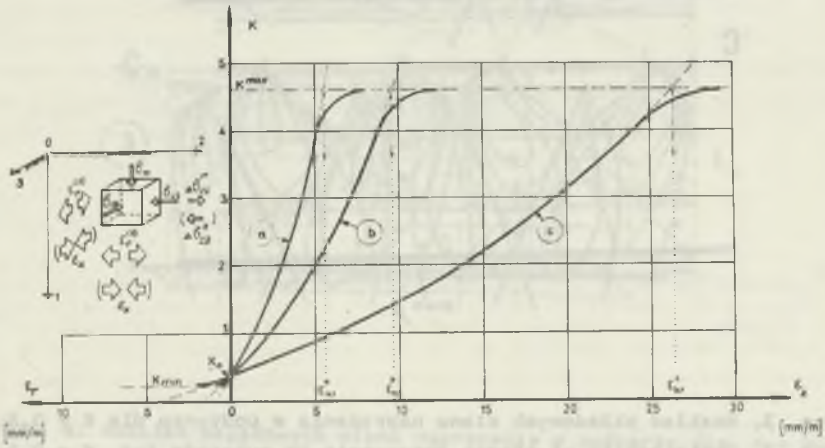
Zwróćmy ponadto uwagę na fakt, iż wzrost deformacji górniczych w podtorzu nie jest zjawiskiem jednorazowym (o charakterze impulsu), lecz procesem rozłożonym w czasie na miesiące a nawet lata. Ciągły ruch taboru i wywoływane nim efekty nie zezwalają więc na znaczącą kumulację dodatkowych sił wzdłużnych od deformującego się podłoża górniczego. Milczące pominięcie tego faktu w próbie interpretacji wyników niektórych badań terenowych sprowadza ich praktyczną przydatność wyłącznie do przypadku linii nieużytkowanych, pod którymi przeszła eksploatacja górnicza, a dopiero następnie wznowiono na nich ruch taboru. Są to przypadki praktycznie nie

spotykane w praktyce. Zdaniem autora, głównych źródeł dodatkowych oddziaływań (naprężeń) w nawierzchni toru kolejowego na terenach górniczych należy doszukiwać się w zmianach fizykomechanicznych cech gruntów podtorza oraz implikowanych tymi procesami zmian podatności sprężystej podłoża rusztu torowego, co zostało zasyganlizowane m.in. w pracach [3, 4, 6].

Przedstawione powyżej wyniki eksperymentów modelowych, jak i ich analiza stanowią jeden z elementów badań potwierdzających to stwierdzenie.

3. REDYSTRYBUCJA SKŁADOWYCH STANU NAPRĘŻENIA W PODŁOŻU RUSZTU TOROWEGO NA TERENACH GÓRNICZYCH

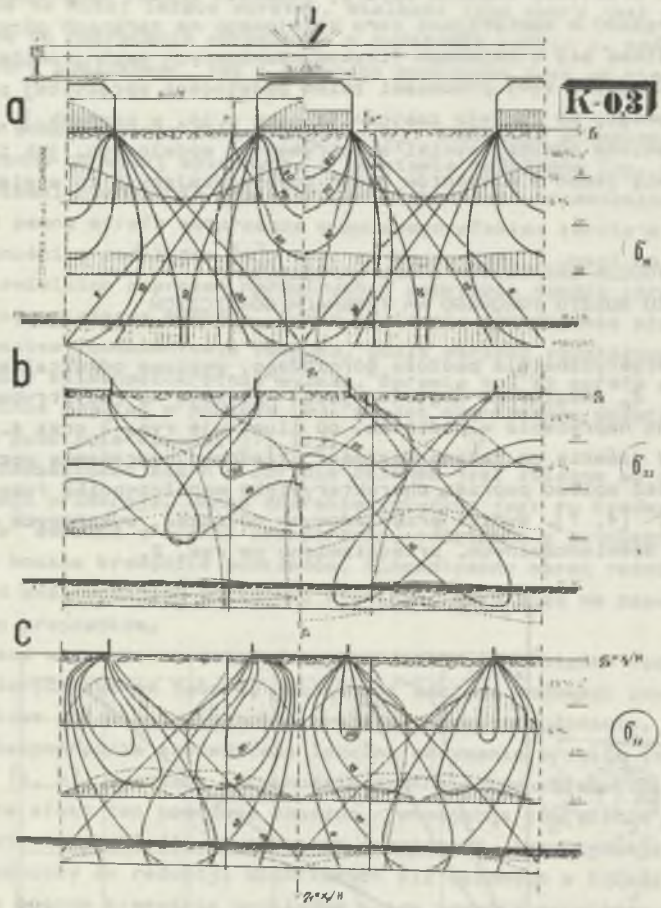
Charakterystyczne dla podłoża górniczego, poziome odkształcenia rozluźniające ε_r (względnie zagęszczające) wpływają na redystrybucję składowych stanu naprężenia w podtorzu, co ilustrują rys. 3 oraz 4. Efekt ten, utożsamiany głównie ze zmianą wartości składowej naprężenia poziomego, można również opisać poprzez charakterystykę współczynnika rozporu bocznego $K = f(\varepsilon)$ [4, 7]. Wyniki przykładowych obliczeń, wykonanych na podstawie danych doświadczalnych, przedstawiono na rys. 2.



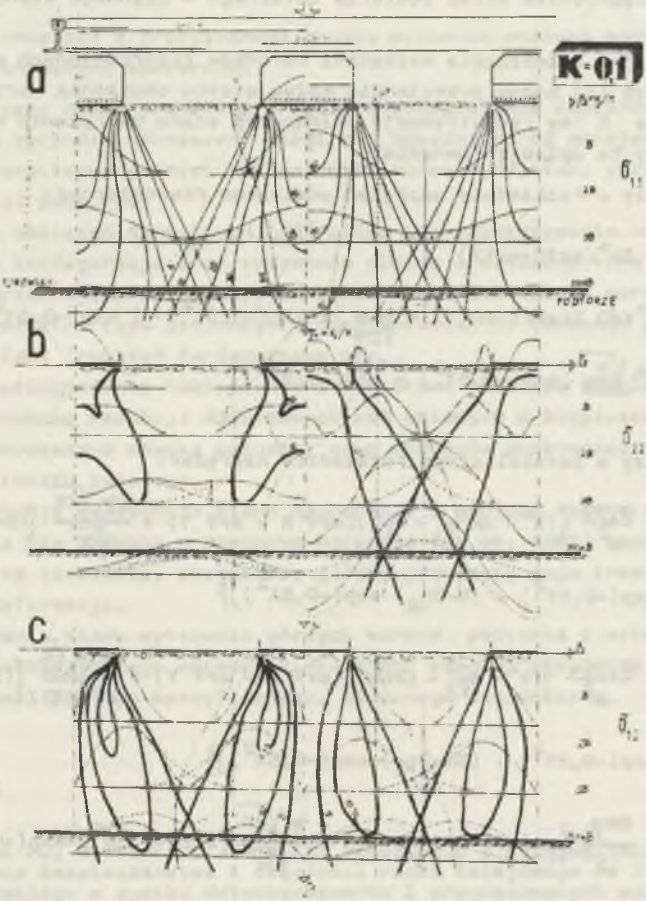
Rys. 2. Zmienność współczynnika rozporu bocznego $K = f(\varepsilon)$ w warunkach poziomych odkształceń podłoża górniczego

Fig. 2. Variability of the coefficient of earth pressure $K = f(\varepsilon)$ in conditions of horizontal strain on mining area

Intensywność wzrostu tego współczynnika w warunkach odkształceń zagęszczających zależy więc, dla ośrodków sypkich, przede wszystkim od wyjściowego stopnia zagęszczenia materiału (podsypki) i może wahać się w granicach od około 5-30 mm/m i więcej. W przypadku odkształceń rozluźniających,



Rys. 3. Rozkład składowych stanu naprężenia w podtorzu dla K = 0,3
Fig. 3. Distribution of stress components in subgrade for K = 0,3



Rys. 4. Rozkład składowych stanu naprężenia w podtorzu dla K = 0,1
Fig. 4. Distribution of stress components in subgrade for K = 0,1

rzędu 2-4 mm/m, współczynnik K osiąga wartość minimalną, co jest równoznaczne z osiągnięciem przez podtorze totalnego - czynnego stanu granicznego.

Wykorzystując rozwiązania mechaniki ośrodków rozdrobnionych w ujęciu stochastycznym [2] można prześledzić wpływ efektu obniżenia wartości współczynnika K na redystrybucję składowych stanu naprężenia w podtorzu. Składowe te opisują równania:

- dla hipotezy o rozkładzie naprężeń odcinkowo równomiernym:

$$\begin{cases} \sigma_{11} = 0{,}5p^*(\mathrm{erf}X-\mathrm{erf}Y) & (1a) \\ \sigma_{22} = p^*K\left\{0{,}5(\mathrm{erf}X-\mathrm{erf}Y) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left[X\exp(-0{,}5X^2) - Y\exp(-0{,}5Y^2)\right]\right\} & (1b) \\ \sigma_{12} = p^*\sqrt{\frac{K}{2\pi}}\left[\exp(-0{,}5Y^2) - \exp(-0{,}5X^2)\right] & (1c) \end{cases}$$

- dla hipotezy o parabolicznym rozkładzie naprężeń:

$$\begin{cases} \sigma_{11} = p\,\frac{0{,}75}{b^2}\left\{(b^2 - 4K^2\eta_1^2 - 4\eta_2^2)(\mathrm{erf}\,X - \mathrm{erf}\,Y) + \frac{2\eta_1\sqrt{2K}}{\sqrt{\pi}}\left[(b+2\eta_2)\right.\right. \\ \qquad \left.\left.\exp(-0{,}5Y^2) + (b-2\eta_2)\exp(-0{,}5X^2)\right]\right\} & (2a) \\ \sigma_{22} = p\,\frac{0{,}75K}{b^2}\left\{(b^2 - 4\eta_2^2 - 12K\eta_1^2)(\mathrm{erf}\,X - \mathrm{erf}\,Y) + \frac{3K\eta_1\sqrt{K}}{b^2\sqrt{2\pi}}\left[(3b+2\eta_2)\right.\right. \\ \qquad \left.\left.\exp(-0{,}5Y^2) + (3b-2\eta_2)\exp(-0{,}5X^2)\right]\right\} & (2b) \\ \sigma_{12} = p\,\frac{6K\eta_1}{b^2}\left\{\eta_2(\mathrm{erf}\,X - \mathrm{erf}\,Y) + \frac{\eta_1\sqrt{2K}}{\sqrt{\pi}}\left[\exp(-0{,}5X^2) - \exp(-0{,}5Y^2)\right]\right\} & (2c) \end{cases}$$

gdzie:

$X = \frac{\eta_2+0{,}5b}{\eta_1\sqrt{K}}$; $Y = \frac{\eta_2-0{,}5b}{\eta_1\sqrt{K}}$ - współczynniki bezwymiarowe,

$\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^x \exp(-0{,}5t^2)dt$ - normalna całka prawdopodobieństwa zmiennej rzeczywistej.

Pozostałe oznaczenia przyjęto zgodnie z rys. 3 i 4. Można łatwo wykazać, że rozwiązanie teorii sprężystości dla tego zadania jest szczególnym przypadkiem podejścia stochastycznego do modelu fenomenologicznego podtorza, dla $K \cong 0{,}3$.

4. ANALIZA UZYSKANYCH ROZWIĄZAŃ I WNIOSKI KOŃCOWE

Najistotniejsza z praktycznego punktu widzenia wnioski można streścić w formie poniższych stwierdzeń:

- kinematyczny obraz przebiegu procesu współdziałania nawierzchni z podtorzem na terenach górniczych różni się zasadniczo od przejawów tego zjawiska charakterystycznych dla warunków normalnych, tzn. pozbawionych deformacji podtorza,
- wielkość obciążeń normalnych, charakter ich przekazywania na podłoże, odmienna konfiguracja oraz sztywność giętna i wzdłużna toru to główne cechy odróżniające współpracę nawierzchni z podtorzem w porównaniu do innych obiektów typu liniowego zlokalizowanych na terenach górniczych, w tym i ławy (ruszty) fundamentowe itp.,
- model współdziałania nawierzchni z podtorzem powinien uwzględniać wyjściowo znaczną redukcję dodatkowych sił osiowych w eksploatowanym torze, przy równoczesnym spadku nośności oraz wzroście podatności sprężystej podłoża rusztu torowego,
- redystrybucja składowych stanu naprężenia w podłożu rusztu torowego przejawia się głównie w znacznym wzroście (do ok. 100%) naprężeń normalnych na torowisko, stając się główną przyczyną jego trwałych, dodatkowych deformacji,
- odwzorowanie stanu wytężenia górnych warstw podtorza z wykorzystaniem metod stochastycznego ośrodka ziarnistego stanowi przydatny praktycznie sposób analizy tego specyficznego, złożonego zagadnienia.

LITERATURA

[1] Bieniek M., Szumierz W.: Analiza aktualnego i perspektywicznego zagrożenia bezpieczeństwa i ciągłości ruchu kolejowego na liniach Okręgu Śląskiego w wyniku dotychczasowych i prognozowanych wpływów eksploatacji górniczej. Prace COBiRTK nr 3156-16, Katowice 1984.

[2] Kandaurow I.I.: Miechanika ziernistych sried i jego primienienije w stroitielstwie. Leningrad 1966.

[3] Kłosek K., Rosikoń A.: Analiza wpływu deformacji terenu górniczego na nawierzchnię kolejową w warunkach oddziaływań eksploatacyjnych taboru. Kwartalnik - Ochrona Terenów Górniczych nr 64, Katowice, s. 19-25.

[4] Kłosek K.: Model nawierzchni i podtorza drogi kolejowej z uwzględnieniem specyfiki terenów górniczych. Mat. II - Sem. Probl. Res. MNSzWiTRI18 pt.: "Podstawy modelowe kształtowania i utrzymania dróg szynowych", IDIM Pol. Warsz., Warszawa 1984, s. 188-220.

[5] Kłosek K.: Wykorzystanie analogu gruntowego typu Taylor-Schneebelli do modelowania wpływów eksploatacji górniczej na obiekty powierzchniowe budownictwa komunikacyjnego. Prace Kom. Nauk. PAN, Oddz. Katowice 1985.

[6] Kłosek K.: Les interactions des fondations de l'ouvrage et du sol d'assises en terrain soumis a l'exploitation miniére. Industrie Minérale-les Techniques, France 1985.

[7] Kwiatek J.: Wybrane problemy geotechniki terenów górniczych. Wyd. PAN, Wrocław 1982.

[8] Malcharek K.: Działania ruchomego podłoża sypkiego na wiotką taśmę równomiernie obciążoną. Praca doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1973.

[9] Rosikoń A., Malcharek K.: Wpływ deformacji górniczej na tor kolejowy w świetle prac badawczych na poligonach doświadczalnych. Kwartalnik - Ochrona Terenów Górniczych nr 20, Katowice 1972.

[10] Siewczyński Ł.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. WUPP, Rozprawy nr 86, Poznań 1974.

[11] Szumierz W.: Stateczność podtorza na terenach eksploatacji górniczej. Drogi Kolejowe nr 7-8, Warszawa 1978.

[12] Szumierz W.: Statyka budowli liniowych poddanych działaniu sił poziomych od pełzania podłoża górniczego. Prace GIG, Seria dodatkowa, Katowice 1980.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В ОСНОВАНИИ РЕЛЬСО-ШПАЛЬНОЙ РЕШЕТКИ

Р е з ю м е

Оценка величины составляющих напряженного состояния и деформации в активной зоне земляного полотна на территории шахтных подработок имеет решающее значение для описания процесса взаимодействия верхнего строения пути с его непосредственным основанием. Сущность и характер происходящих в это время процессов и явлений, заключающиеся в сложном процессе деформации грунтового основания, является основным источником информаций о степени опасности работы земляного полотна и верхнего строения пути. Аварийность этих элементов на территории шахтных подработок многократно превышает аварийность в районах не подвергающихся дополнительным деформациям, активизирующим земляное полотно. Вытекающая отсюда необходимость экспериментальных исследований ограничивается в работе к предложению использования модели сплошной среды Тейлора-Шнебели. Полученные результаты подтвердили тезис о существенном отличии процесса взаимодействия верхнего строения пути с земляным основанием на территории шахтных подработок, по сравнению с районами не подвергающимися такого рода воздействиями. Этим путем получены кроме того убедительные доказательства, указывающие на существенное отличие взаимодействия верхнего строения пути с земляным полотном по сравнению например с воздействием других сооружений линейного типа на основание подвергающееся влиянию горных работ. Попытка описания перераспределения составляющих напряженного состояния в земляном полотне с использованием методов механики зернистой среды в дискретном выражении оказалась здесь ценной и удачной аналитической моделью проблемы. Доказано, что наблюдающийся в этих условиях значительный рост нормальных напряжений в земляном полотне является главной причиной его дополнительных деформаций, а неоднократно - серьезных аварий.

THE REDISTRIBUTION OF THE COMPONENTS OF STRESS AND STRAIN IN THE SUBSOIL OF THE RAILWAY TRACK

S u m m a r y

The evaluation of the stress and strain in the subgrade in mining areas affects considerably the description of the co-operation of the track structure and its subsoil. Both the substance and the character of the processes taking place during the deformation of the subsoil are the fundamental source of information concerning the hazards of the behaviour of the subgrade and the track structure. In mining areas the susceptibility to failure is much greater than in regions where the subgrade is not subjected to additional strains. The demand for experimental investigations was reduced in the paper to the suggestion of applying an analogue centre of the Taylor-Schneebeli type. The obtained results prove the statement that in mining areas the co-operation of the track structure with the subgrade looks quite different than in other regions. In this way also convincing proofs could be obtained indicating an essential difference between the co-operation of the track structure with the subgrade and the effect of other track structures on the subsoil in mining areas.

The redistribution of the components of stresses in the subgrade by means of methods involving the mechanics of granular media proved to give positive results. in the applied model. Thus it has been shown that increased stresses in the subgrade may be the reason of additional strains and often even failures.