

Aleksander SZWED

KRYTERIUM DOBORU GRUBOŚCI WARSTW W DŁUGOWIECZNEJ NAWIERZCHNI DROGOWEJ Z BETONU ASFALTOWEGO

Streszczenie

W pracy zaproponowano dwuetapowy sposób wstępnego wymiarowania nawierzchni długowiecznej. Pierwszym etapem jest oszacowanie całkowitej sztywności na zginanie układu warstw konstrukcyjnych z betonu asfaltowego spoczywających na podbudowie i podłożu gruntowym. W tym celu stosuje się model półprzestrzeni warstwowej w stanie symetrii osiowej pod obciążeniem kołem pojazdu. Sztywność dobierana jest z warunku ograniczającego pionowe odkształcenia w punkcie na górze podłoża gruntowego w osi zadanego obciążenia. Następnie stosuje się prosty model zginania przekroju płyty warstwowej złożonej z trzech warstw betonu asfaltowego o różnych grubościach i sztywnościach. Stąd wyznaczane są względne grubości i sztywności na podstawie danych zmężeń dotyczących odkształcenia dla materiałów dolnych warstw. Jednocześnie spełniany jest warunek równości wypadkowej sztywności na zginanie warstw w celu uniknięcia przeciążenia podłoża gruntowego. Uzyskane zależności są w postaci zamkniętych wzorów matematycznych.

WSTĘP

Obciążenie pojazdami i wzrastające natężenie ruchu na drogach powoduje zniszczenia konstrukcji nawierzchni różnego typu [9]. Najczęściej spotykanym rodzajem zniszczenia nawierzchni jest pęknięcie zmęczeniowe dolnych lub górnych warstw z betonu asfaltowego, jak również powierzchniowe i konstrukcyjne koleinowanie [1, 4]. W wyniku zaistniałych zniszczeń i towarzyszących im niekorzystnych oddziaływań środowiskowych, w krótkim okresie czasu dochodzi do skrócenia żywotności konstrukcji nawierzchni. Aby zapobiec szybkiej degradacji stosuje się rozwiązanie materiałowo-konstrukcyjne nazywane nawierzchnią długowieczną, czyli taką nawierzchnią, która może być użytkowana przez około 50 lat bez zniszczeń konstrukcyjnych. W czasie jej użytkowania dopuszcza się wymianę warstwy ścieralnej [4, 5, 7, 8, 9].

Do określania odporności zmęczeniowej (i w efekcie żywotności) nawierzchni stosuje się kryteria zmęczeniowe dotyczące odkształcenia lub naprężenia [1, 9, 14]. Do wyznaczenia odkształcenia i naprężenia wykorzystuje się złożone modele obliczeniowe w postaci warstwowej półprzestrzeni sprężystej lub lepkosprężystej [2, 6, 10]. W procesie wymiarowania nawierzchni długowiecznej zostaje poniesiony znaczny nakład pracy, gdyż jest to proces iteracyjny – ciąg kolejnych przybliżeń zmierzających do uzyskania pożądanego układu konstrukcyjnego. Dlatego w tej pracy proponujemy prostsze podejście polegające na dwuetapowym sposobie kształtowania sztywności i grubości warstw nawierzchni.

Zasadniczym tematem pracy jest sformułowanie dwuetapowego sposobu wymiarowania nawierzchni długowiecznej przy zastosowaniu informacji o ekstremalnych odkształceniach. Pierwszym etapem jest oszacowanie całkowitej sztywności układu warstw z betonu asfaltowego spoczywających na podbudowie i podłożu gruntowym. W tym celu stosujemy model półprzestrzeni warstwowej w stanie symetrii osiowej obciążenia. Sztywność wypadkowa warstw konstrukcyjnych dobierana jest na podstawie warunku ograniczającego pionowe odkształcenia albo naprężenia na górze podłoża gruntowego w osi przyłożonego obciążenia [1, 2, 9, 10]. Następnie stosujemy uproszczony model zginania płyty (belki) warstwowej złożonej z trzech lub dwóch warstw betonu asfaltowego o różnych grubościach i sztywnościach materiałów. Zakładamy równość współczynników Poissona w warstwach, a rozważania ograni-

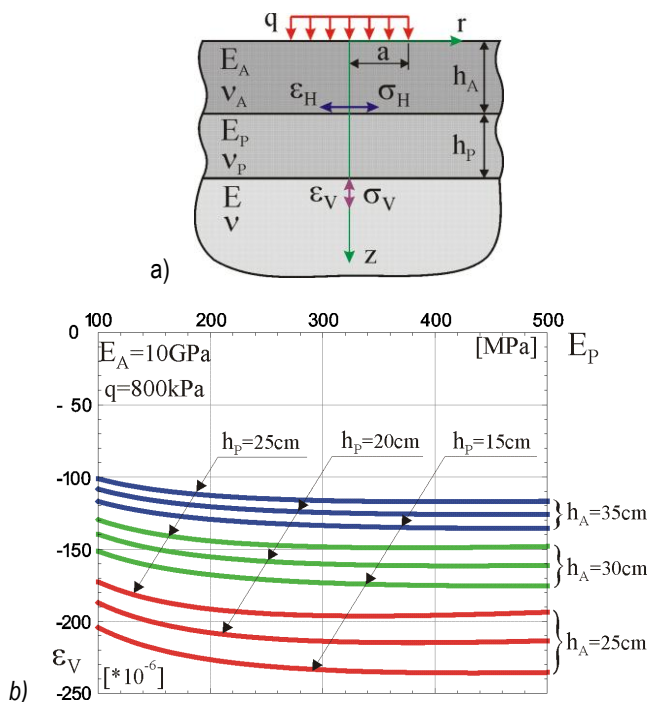
czamy do krytycznych przekrojów na osi symetrii zadania [2, 10, 12]. Takie podejście pozwala na dobranie proporcji grubości warstw i proporcji ich sztywności zapewniając odpowiednią sztywność na zginanie konstrukcji nawierzchni.

1. OGRANICZENIE ODKSZTAŁCENIA PIONOWEGO W PODŁOŻU GRUNTOWYM

Rozpatrujemy układ konstrukcyjny nawierzchni drogowej złożony z górnej warstwy wykonanej z betonu asfaltowego (h_A, E_A, ν_A) spoczywającej na warstwie podbudowy (h_P, E_P, ν_P), która z kolei spoczywa na półprzestrzeni (E, ν), zgodnie z rysunkiem 1a. Warstwy i półprzestrzeń są wykonane z izotropowego materiału sprężystego. Górna warstwa jest obciążona równomiernie (w kierunku prostopadłym do brzegu) obciążeniem o intensywności q na obszarze koła o promieniu a . Warstwy i półprzestrzeń są ze sobą połączone w taki sposób, że wyklucza to możliwość poślizgu czy rozwarstwienia [2]. Jest to zadanie symetrii osiowej stanu przestrzennego teorii sprężystości, które rozwiązuje się np. metodą funkcji naprężeń. Na płaszczyznach styku warstw i półprzestrzeni przyjmuje się w tym modelu warunki pełnego zespolenia, tj. równość obu składowych przemieszczenia oraz pionowych i stycznych składowych stanu naprężenia. W typowych nawierzchniach drogowych z betonu asfaltowego takie założenie właściwie odzwierciedla pracę tej konstrukcji zespolonej. Rozwiązaniami zadania są pola przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia pozwalające na znalezienie wartości krytycznych (ekstremalnych) potrzebnych do wymiarowania [1, 2, 12].

W wymiarowaniu nawierzchni drogowej ze względu na kryterium zmęczenia materiału warstw konstrukcyjnych, będących w stanie rozciągania, stosuje się wartości odkształcenia poziomego ε_H lub naprężenia poziomego σ_H w dolnych włóknach warstwy asfaltowej [1, 3, 5, 7, 11], jak pokazano na **Rys. 1a**. Natomiast w celu uniknięcia koleinowania strukturalnego (wynikającego głównie z nadmiernego osiadania podłoża gruntowego) za miarodajne uznaje się pionowe odkształcenie ε_V lub naprężenie σ_V w górnych włóknach półprzestrzeni w osi symetrii zadania [1, 2, 3, 9].

Na **Rys. 1b** pokazano wykresy odkształcenia pionowego $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_V$ w punkcie na górze półprzestrzeni przy założeniu różnych grubości warstwy asfaltowej i podbudowy oraz w funkcji sztywności podbudowy. W obliczeniach przyjęto $\nu_A = \nu_P = \nu = 0.3$ oraz obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni koła o promieniu $a = 15.0$ cm i o wartości $q = 0.8$ MPa, co odpowiada obciążeniu osią pojazdu, tj. siłą około 115 kN. Z zamieszczonych wykresów widać, że decydującymi parametrami wymiarowania są grubości i sztywności warstwy asfaltowej oraz grubość podbudowy, a w mniejszym stopniu sztywność podbudowy.



Rys. 1. Zagadnienie brzegowe układu dwóch warstw sprężystych spoczywających na półprzestrzeni (a) oraz wykresy odkształcenia pionowego na górze półprzestrzeni dla różnych grubości warstwy asfaltowej i podbudowy w funkcji sztywności podbudowy (b)

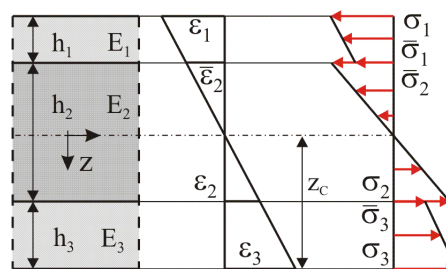
Wartości odkształcenia poziomego $\varepsilon_H = \varepsilon_{rr} = \varepsilon_{\phi\phi}$ (radialnego i obwodowego we współrzędnych walcowych, **Rys. 1a**) i naprężenia poziomego $\sigma_H = \sigma_{rr} = \sigma_{\phi\phi}$ w osi symetrii zadania $r = 0$ w na dole warstw asfaltowych decydują o wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni. W przypadku warstwy asfaltowej rozkład odkształcenia jest zbliżony do liniowego z zerem w okolicach środka grubości tej warstwy [2, 12, 13]. Podobny charakter rozkładu naprężeń poziomych występuje w osi symetrii, przy czym zachodzi przesunięcie w kierunku wartości ujemnych na górze warstwy. Jest to spowodowane pionowym naprężeniem σ_{zz} wywołanym obciążeniem zewnętrznym, a efekt ten jest w przybliżeniu proporcjonalny do wartości współczynnika Poissona materiału. Dla dolnych włókien warstwy asfaltowej efekt docisku jest pomijalny, gdyż tam naprężenia pionowe są znacząco zredukowane (około 40-krotnie) w stosunku do obciążenia kontaktowego koła [2].

2. ROZKŁAD SZTYWNOŚCI W UKŁADZIE TRZECH WARSTW NAWIERZCHNI

Mając dobraną wypadkową sztywność nawierzchni z betonu asfaltowego ze względu na nacisk na warstwę gruntową można zająć się projektowaniem rozkładu sztywności w nawierzchni. Za-

stosowany w tej pracy model będący uogólnieniem metody opisanej w [13] pozwala na uzyskanie zamkniętych wzorów matematycznych, co jest nieosiągalne w innych stosowanych metodach [2, 6, 10].

Rozpatrujemy przekrój poprzeczny płyty trójwarstwowej o niesymetrycznym układzie warstw, jak to pokazano na **Rys. 2**. Zakładamy, że współczynniki Poissona są takie same dla każdej z warstw, natomiast warstwy zewnętrzne są wykonane z materiałów o mniejszym module Younga niż warstwa wewnętrzna. Przyjmujemy całkowite zespolenie warstw, co umożliwia zastosowanie hipotezy o płaskich przekrojach. Równość współczynników Poissona i ograniczenie analizy do osi symetrii zadania ($r = 0$) pozwala na zastosowanie modelu warstwowej belki zespolonej, gdyż interesują nas jedynie dystrybucja sztywności i grubości warstw w tym układzie konstrukcyjnym.



Rys. 2. Wykresy odkształcenia i naprężenia po grubości nawierzchni w asymetrycznym układzie trzech warstw

W jednokierunkowym zginaniu płyty (belki) krzywizna κ jest związana z odkształceniem zależnością kinematyczną $\varepsilon = z\kappa$, wynikającą z hipotezy Bernoulliego-Kirchhoffa o płaskich przekrojach. Przy założonej krzywiznie odkształcenia w charakterystycznych punktach przekroju warstwowego (**Rys. 2**) wynoszą odpowiednio:

$$\varepsilon_1 = (h_1 + h_2 + h_3 - z_c)\kappa, \quad \bar{\varepsilon}_2 = (h_1 + h_2 - z_c)\kappa, \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = (z_c - h_3)\kappa, \quad \varepsilon_3 = z_c\kappa.$$

Definiujemy stosunek ekstremalnych (maksymalnych) odkształceń w dolnych włóknach warstw płyty poddanych rozciąganiu:

$$\eta \equiv \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} = \frac{z_c}{z_c - h_3}, \quad \text{czyli} \quad z_c = \frac{\eta h_3}{\eta - 1}. \quad (2)$$

Parametr materiałowy $\eta = \varepsilon_{3zm} / \varepsilon_{2zm}$ nazwiemy współczynnikiem efektywności odkształceniowej materiału warstwy o zwiększonej odporności zmęczeniowej, którego wartość wynika z własności zmęczeniowych materiałów zastosowanych w odpowiednich warstwach. Współczynnik ten ustala się na podstawie badań zmęczeniowych [3, 11]. Materiały pierwszej i trzeciej warstwy zwykle zawierają więcej asfaltu lub są z dodatkiem polimerów, co czyni je bardziej podatnymi (odkształcalnymi) [7, 8, 9, 11, 14]. Większa zawartość asfaltu implikuje obniżoną sztywność (modułu Younga) materiału. Pożądaną cechą zachowania konstrukcji układu warstwowego jest zrównoważone wyczerpanie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów w dolnych włóknach każdej z warstw. Nie rozpatrujemy tutaj relacji odkształceń w górnych włóknach pierwszej i drugiej warstwy (choć model może być uogólniony), gdyż materiały poddane cyklicznemu ścisnaniu wykazują większą wytrzymałość zmęczeniową [1, 11] niż w strefach rozciągania.

Naprężenia w charakterystycznych punktach przekroju warstwowego (**Rys. 2**), obliczone przy wykorzystaniu jednowymiarowego prawa Hooke'a i (1), wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \varepsilon_1, & \bar{\sigma}_1 &= E_1 \bar{\varepsilon}_2, & \bar{\sigma}_2 &= E_2 \bar{\varepsilon}_2, \\ \sigma_2 &= E_2 \varepsilon_2, & \bar{\sigma}_3 &= E_3 \varepsilon_2, & \sigma_3 &= E_3 \varepsilon_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Wprowadzamy bezwymiarowe współczynniki będące stosunkami modułów sztywności materiałów, z których wykonane są warstwy,

$$E_1 = \alpha E_2, \quad E_3 = \beta E_2 \quad (4)$$

i wtedy zależności między naprężeniami w charakterystycznych punktach będą o postaci:

$$\bar{\sigma}_1 = \alpha \bar{\sigma}_2, \quad \bar{\sigma}_3 = \beta \sigma_2, \quad \sigma_3 = \beta \eta \sigma_2, \quad (5)$$

gdzie skorzystano z (2), tj. $\varepsilon_3 = \eta \varepsilon_2$. Wartości współczynnika β typowo mieszczą się w przedziale od 0.5 do 1.0, natomiast wartości parametru η są większe od jedności.

Ponieważ układ warstw jest geometrycznie i materiałowo asymetryczny, to oś obojętną zginania wyznaczmy z warunku czystego zginania. Położenie osi zginania z_C znajdziemy z warunku zerowania się siły podłużnej (**Rys. 2**),

$$N = \frac{1}{2} [\sigma_3 z_C + (\sigma_2 - \bar{\sigma}_3)(z_C - h_3) - (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1)(h_2 + h_3 - z_C) - \sigma_1(h_1 + h_2 + h_3 - z_C)] = 0. \quad (6)$$

Stosując oznaczenia (4) oraz wyniki (5) otrzymujemy współrzędną osi zginania:

$$z_C = \frac{\alpha h_1^2 + h_2^2 + \beta h_3^2 + 2(\alpha h_1 h_2 + h_2 h_3 + \alpha h_1 h_3)}{2(\alpha h_1 + h_2 + \beta h_3)}. \quad (7)$$

Porównując wyniki na z_C wg (2) i (7) otrzymamy równanie:

$$\frac{\eta h_3}{\eta - 1} = \frac{\alpha \chi^2 h_2^2 + h_2^2 + \beta h_3^2 + 2(\alpha \chi h_2^2 + h_2 h_3 + \alpha \chi h_2 h_3)}{2(\alpha \chi h_2 + h_2 + \beta h_3)}. \quad (8)$$

w którym został wprowadzony dodatkowy współczynnik bezwymiarowy:

$$h_1 = \chi h_2. \quad (9)$$

Z równania (8) uzyskujemy równanie kwadratowe, którego dodatni pierwiastek będzie następujący:

$$\frac{h_2}{h_3} = \frac{\sqrt{(1 + \alpha \chi)^2 + \beta(\eta^2 - 1)[1 + \alpha \chi(2 + \chi)]} + 1 + \alpha \chi}{(\eta - 1)[1 + \alpha \chi(2 + \chi)]}. \quad (10)$$

Moment zginający obliczamy na podstawie rozkładu naprężenia pokazanego na **Rys. 2**:

$$M = \frac{1}{3} [\sigma_3 z_C^2 + (\sigma_2 - \bar{\sigma}_3)(z_C - h_3)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1)(h_2 + h_3 - z_C)^2 + \sigma_1(h_1 + h_2 + h_3 - z_C)^2]. \quad (11)$$

Stosując wzory na naprężenia (3), a następnie oznaczenia wg (4) i wyniki (5) otrzymujemy:

$$M = \frac{E_2 \kappa h_3^3}{3} \left[\frac{\beta \eta^3}{(\eta - 1)^3} + \frac{1 - \beta}{(\eta - 1)^3} + (1 - \alpha) \left(\frac{h_2}{h_3} - \frac{1}{\eta - 1} \right)^3 + \alpha \left(\frac{h_1}{h_3} + \frac{h_2}{h_3} - \frac{1}{\eta - 1} \right)^3 \right]. \quad (12)$$

Podstawiając stosunek grubości warstw (10) oraz relację (9) moment (12) przybiera postać:

$$M = \frac{E_2 \kappa h_3^3}{3(\eta - 1)^3} \left\{ \alpha \left[\frac{(1 + \chi)P + \chi(1 - \alpha)}{1 + \alpha \chi(2 + \chi)} \right]^3 + (1 - \alpha) \left[\frac{P - \alpha \chi(1 + \chi)}{1 + \alpha \chi(2 + \chi)} \right]^3 + 1 - \beta + \beta \eta^3 \right\} = S_w \kappa, \quad (13)$$

gdzie wprowadzono pomocnicze oznaczenie:

$$P = \sqrt{(1 + \alpha \chi)^2 + \beta(\eta^2 - 1)[1 + \alpha \chi(2 + \chi)]}. \quad (14)$$

W celu zapewnienia odpowiedniej sztywności układu na zginanie rozpatrzmy płytę jednorodną o grubości $H = h_A$. Sztywność układu warstw konstrukcyjnych ma najistotniejszy wpływ na redukcję odkształcenia pionowego działającego w górnych warstwach podłoża gruntowego. W przypadku belki (płyty) jednorodnej (o tym samym współczynniku Poissona jak w układzie warstwowym) mamy odpowiednio:

$$z_C = \frac{1}{2} H, \quad E = E_2, \quad M = \frac{EH^3}{12} \kappa = S_J \kappa. \quad (15)$$

Przyjęto tutaj, że sztywność warstwy jednorodnej jest taka sama jak najsztywniejszej warstwy środkowej w układzie trójwarstwowym. Takie utożsamienie jest wygodne w dalszej analizie i interpretacji wyników. Można oczywiście przyjąć za sztywność odniesienia E_3 i w tej sytuacji skorzystać z (4) do modyfikacji wyników.

Przez porównanie sztywności układu warstwowego wg (13) ze sztywnością struktury jednorodnej (15), tj. $S_J = S_w$, uzyskujemy dodatkowy związek między parametrami materiałowymi i geometrycznymi:

$$\frac{E_2 H^3}{12} = \frac{E_2 \kappa h_3^3}{3(\eta - 1)^3} \left\{ \alpha \left[\frac{(1 - \chi)P + \chi(1 - \alpha)}{1 + \alpha \chi(2 + \chi)} \right]^3 + (1 - \alpha) \left[\frac{P - \alpha \chi(1 + \chi)}{1 + \alpha \chi(2 + \chi)} \right]^3 + 1 - \beta + \beta \eta^3 \right\}. \quad (16)$$

Rozwiązując (16) względem h_3 uzyskamy formułę na grubość dolnej warstwy układu:

$$h_3 = \frac{H(\eta - 1)[1 + \alpha \chi(2 + \chi)]}{\sqrt[3]{4D}}, \quad (17)$$

w której

$$D = (1 - \beta + \beta \eta^3)[1 + \alpha \chi(2 + \chi)]^3 + (1 - \alpha)[P - \alpha \chi(1 + \chi)]^3 + \alpha[(1 - \chi)P + \chi(1 - \alpha)]^3. \quad (18)$$

Wykorzystując wynik (17) w (10) i (9) znajdziemy grubości warstwy środkowej i górnej układu trójwarstwowego (**Rys. 2**),

$$h_2 = \frac{P + (1 + \alpha \chi)}{(\eta - 1)[1 + \alpha \chi(2 + \chi)]} h_3, \quad h_1 = \chi h_2. \quad (19)$$

Otrzymaliśmy zamknięte formuły (17) i (19) na obliczanie grubości warstw w asymetrycznym układzie trójwarstwowym nawierzchni długowiecznej. Mając założoną grubość warstwy jednorodnej definiujemy dwa parametry materiałowe β oraz η na podstawie stosunku sztywności obu materiałów (4) i na podstawie stosunku odkształceń (2) w teście zmęczeniowym. Wartości współczynników materiałowych są ustalane na podstawie testów mieszanek mineralno-asfaltowych [3, 14].

Z rozwiązania ogólnego można otrzymać przypadki szczególne: symetryczny układ trzech warstw, gdy $\alpha = \beta$ (taka sama sztywność materiału warstw zewnętrznych) oraz $h_1 = \chi h_2 = h_3$

(taka sama grubość tych warstw) oraz asymetryczny układ dwóch warstw, gdy $\alpha = 0$ i $\chi = 0$ (bez warstwy górnej).

W przypadku symetrycznego układu trzech warstw uzyskujemy następujące bardzo proste wzory na grubości warstw:

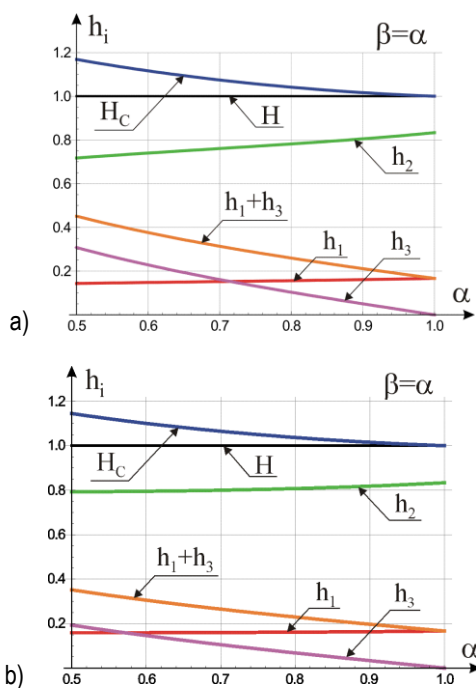
$$h_3 = \frac{H(\eta-1)}{2\sqrt[3]{1-\beta+\beta\eta^3}} = h_1 \quad \text{i} \quad h_2 = \frac{H}{\sqrt[3]{1-\beta+\beta\eta^3}}. \quad (20)$$

Gdy układ jest zbudowany z asymetrycznego układu dwóch warstw to wyniki są postaci:

$$h_3 = \frac{H(\eta-1)}{\sqrt[3]{4\left[1-\beta+\beta\eta^3+\sqrt{(1-\beta+\beta\eta^2)^3}\right]}}, \quad (21)$$

$$h_2 = \frac{\sqrt{1-\beta+\beta\eta^2}+1}{\eta-1} h_3.$$

Uzyskane zależności mają zamkniętą postać matematyczną, co może znacznie ułatwić i przyspieszyć wstępne wymiarowanie nawierzchni drogowej z betonu asfaltowego.

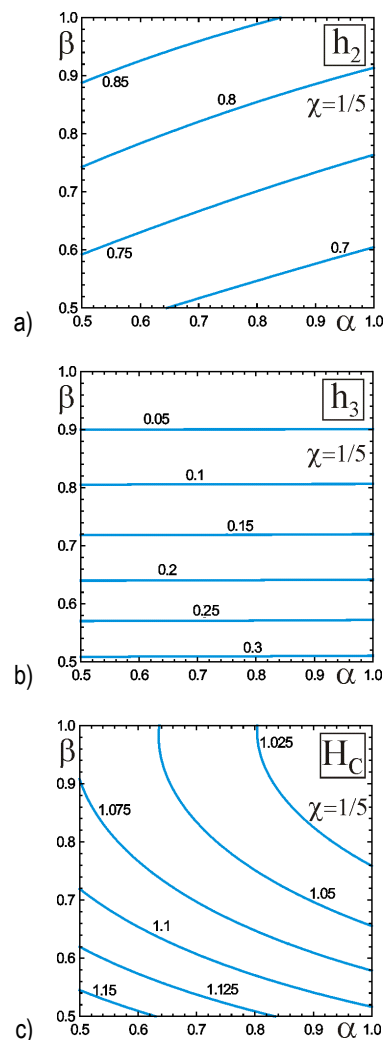


Rys. 3. Wykres grubości warstw i grubość całego układu w funkcji stosunku modułów sztywności materiału α i β , przy $H=1$, $\beta = \alpha$ i $\chi = 0.2$ oraz dla: a) $\eta = 1/\beta$, b) $\eta = 3/(2\beta+1)$

Na **Rys. 3** przedstawiono wykresy grubości warstwy górnej, środkowej i dolnej układu trójwarstwowego w funkcji proporcji sztywności tych warstw przy założeniu $\beta = \alpha$ oraz $\eta = 1/\beta$ (**Rys. 3a**) i $\eta = 3/(2\beta+1)$ w przypadku **Rys. 3b**. Wykresy odniesiono do jednostkowej grubości jednorodnej warstwy wykonanej ze sztywniejszego materiału warstwy środkowej. Pokazano całkowitą grubość układu $H_C = h_1 + h_2 + h_3$, która wzrasta przy zmniejszaniu sztywności warstw skrajnych względem sztywności warstwy środkowej. Np. gdy sztywność warstwy górnej i dolnej wynosi 50% sztywności warstwy środkowej, to wzrost całkowitej grubości układu wynosi około 17% grubości płyty jednorodnej, przy zachowaniu tej samej sztywności układu (**Rys. 3a**). Dla $\alpha = \beta = 1/2$ i założeniu proporcji grubości dla warstwy ścieralnej $\chi = h_1/h_2 = 1/5$ uży-

skujemy grubości warstwy dolnej około 26% całej grubości układu trójwarstwowego, por. [12, 13].

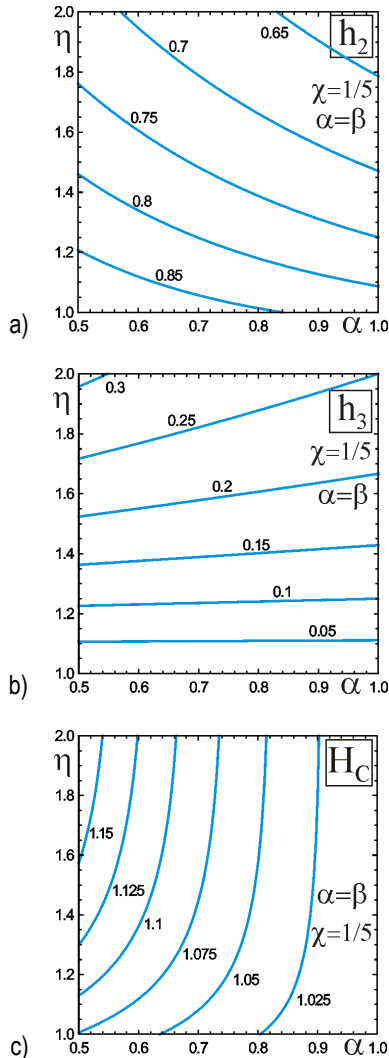
Mając do dyspozycji zamknięte formuły matematyczne do kształtowania grubości warstw w nawierzchni długowiecznej możemy dokonać analiz w celu identyfikacji dominujących parametrów i ich wpływu na wyniki w tym zagadnieniu. Na **Rys. 4** przedstawiono plany warstwowe grubości warstw środkowej i dolnej w funkcji bezwymiarowych parametrów sztywności $\alpha = E_1/E_2$, $\beta = E_3/E_2$ i $\eta = 1/\beta$. Przyjęto jednostkową grubość porównawczą H oraz stałą proporcję grubości $\chi = h_1/h_2 = 1/5$ (typową). W przypadku warstwy środkowej h_2 (sztywniejszej), jej grubość istotnie zależy od redukcji sztywności w warstwie górnej i dolnej (podobnie zależy grubość h_1). Grubość warstwy dolnej h_3 zależy głównie od parametru β , a znikomo od sztywności warstwy górnej. Natomiast całkowita grubość układu warstwowego H_C zależy istotnie od obu sztywności warstw skrajnych, por. [10, 12, 13, 14].



Rys. 4. Grubości warstw w funkcji stosunku modułów sztywności materiału α i β : a) środkowej (drugiej), b) dolnej (trzeciej) oraz c) łącznej układu trójwarstwowego

Na **Rys. 5** przedstawiono plany warstwowe grubości warstw środkowej i dolnej w funkcji parametru sztywności $\alpha = \beta$ i $\eta = 1/\beta$ przy ustalonej wartości χ i jednostkowej grubości H .

W przypadku sztywniejszej warstwy środkowej h_2 , jej grubość istotnie zależy od redukcji sztywności w warstwie górnej i dolnej oraz parametru efektywności (odporności) zmęczeniowej η . Grubość warstwy dolnej h_3 zależy głównie od parametru η i w mniejszym stopniu od sztywności $\alpha = \beta$. Całkowita grubość układu trójwarstwowego zależy istotnie od obu parametrów.



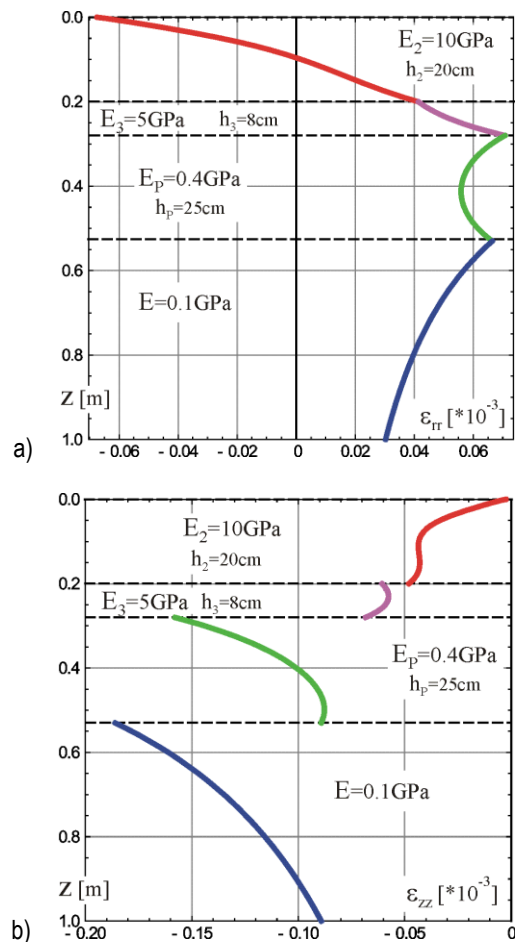
Rys. 5. Grubości warstw w funkcji stosunku modułów sztywności materiału $\alpha = \beta$ oraz parametru odporności zmęczeniowej η : a) środkowej (drugiej), b) dolnej (trzeciej) oraz c) łącznej układu trójwarstwowego

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy podano dwuetapowy sposób doboru grubości i sztywności warstw konstrukcyjnych z zastosowaniem do nawierzchni długowiecznej. Wypadkową grubość warstw z betonu asfaltowego proponuje się wyznaczać z nomogramu na bazie wyników z przestrzennego modelu sprężystej półprzestrzeni warstwowej. Natomiast dystrybucję sztywności w obrębie warstw asfaltowych oblicza się ze wzorów o zamkniętej postaci matematycznej, uzyskanych z prostego modelu mechanicznego płyty (belki) warstwowej. Model ten wymaga podania niektórych parametrów materiałowych i geometrycznych, zaś dwie grubości można obliczyć z wyprowadzonych zależności. Zależności te zostały uzyskane na podstawie informacji o odporności zmęczeniowej materiałów dla dolnych włókien warstw rozciąganych. Stosuje się też kryterium równości sztywności na

zginanie układu jednorodnego i warstwowego, aby zapewnić właściwą redukcję obciążeń przekazywanych na grunt.

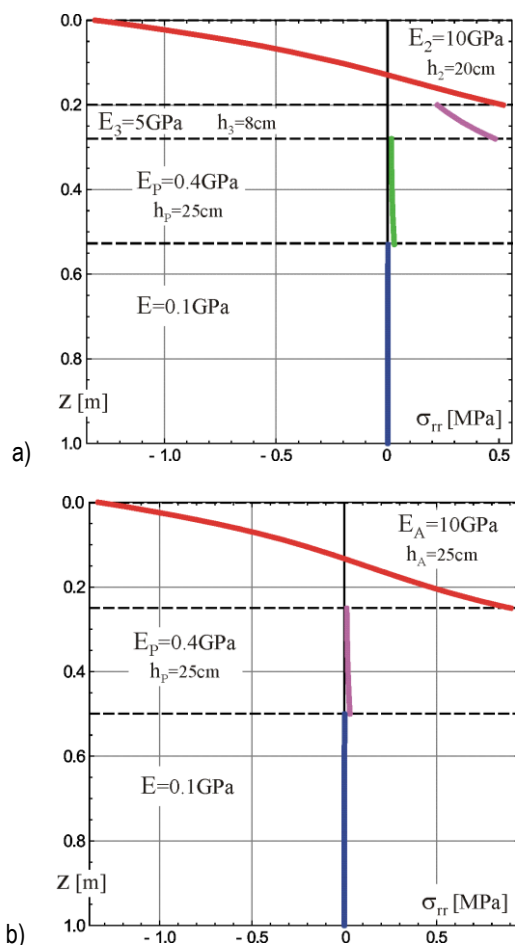
Potencjalne zastosowanie uzyskanych rezultatów pokażemy zakładając następujące hipotetyczne dane: $E = 100 \text{ MPa}$, $E_p = 400 \text{ MPa}$, $E_A = 10 \text{ GPa}$ i $\nu = \nu_p = 0.3$. Na podstawie wyników z **Rys. 1b** mamy $h_A = 25 \text{ cm}$ i $h_p = 25 \text{ cm}$ przy spełnieniu ograniczenia $\varepsilon_v \leq 0.0002$, przyjętego na podstawie [7, 9, 10, 14]. Następnie podstawiamy do (17) i (19) przykładowe proporcje $\chi = 0.2$, $\alpha = \beta = 0.5$, $\eta = 2$ przy $H = h_A$ i otrzymujemy oszacowanie grubości $h_1 = 3.6 \text{ cm}$, $h_2 = 17.9 \text{ cm}$, $h_3 = 7.7 \text{ cm}$ oraz $H_C = 29.2 \text{ cm}$. Wynik ten można zaokrąglić do $h_1 = 4 \text{ cm}$, $h_2 = 18 \text{ cm}$ i $h_3 = 8 \text{ cm}$, co oznacza $H_C = 30 \text{ cm}$. Tak zwymiarowaną nawierzchnię należy zweryfikować zaawansowanym programem komputerowym w celu dokładniejszego określenia żywotności (liczby cykli obciążenia). Gdy przyjmiemy $\eta = 1.5$ (mniejsza odporność zmęczeniowa) przy takich samych pozostałych parametrach, to uzyskamy: $h_1 = 4.0 \text{ cm}$, $h_2 = 19.8 \text{ cm}$, $h_3 = 4.8 \text{ cm}$ oraz $H_C = 28.6 \text{ cm}$. Należy podkreślić, że jest to relatywnie szybkie oszacowanie proporcji warstw konstrukcyjnych nawierzchni.



Rys. 6. Wykresy w osi symetrii układu dwóch warstw na podbudowie i półprzestrzeni: (a) odkształcenia radialnego (horyzontalnego), (b) odkształcenia pionowego

W celu weryfikacji przyjmijmy uproszczony przypadek wg zależności (21), czyli proporcji $\chi = 0$ oraz $\beta = 0.5$, $\eta = 2$, $H = 25 \text{ cm}$, co implikuje oszacowanie grubości $h_2 = 20.0 \text{ cm}$, $h_3 = 7.7 \text{ cm}$ oraz $H_C = 27.7 \text{ cm}$, następnie z zaokrągleniem do

$h_2 = 20 \text{ cm}$, $h_3 = 8 \text{ cm}$ i $H_C = 28 \text{ cm}$. Wyniki w postaci wykresu odkształcenia i naprężenia w osi symetrii zadania pokazano na **Rys. 6** (dane zamieszczone na rysunku). Maksymalne odkształcenie horizontalne na dole warstwy asfaltowej wynosi $71 \cdot 10^{-6}$, co jest uznawane za konserwatywną granicę odporności zmęczeniowej [8, 9, 14]. Z wykresu odkształcenia pionowego widać, że mamy wartość $186 \cdot 10^{-6}$ na górze podłoża gruntowego, która jest mniejsza od założonego odkształcenia dopuszczalnego $2 \cdot 10^{-4}$. Zauważmy także redukcję naprężeń w dolnych włóknach warstw asfaltowych (**Rys.7a**) do 0.52 MPa i 0.48 MPa, która to wartość jest znacznie niższa niż wytrzymałość materiału lub przy zastosowaniu warstwy jednorodnej 0.9 MPa, por. **Rys.7b**.



Rys. 7. Wykresy w osi symetrii naprężenia radialnego (horizontalnego): (a) układu dwóch warstw na podbudowie i półprzestrzeni, (b) wyjściowego układu jednorodnego na podbudowie i półprzestrzeni

BIBLIOGRAFIA

1. Brown S.F., *An introduction to the analytical design of bituminous pavements*. University of Nottingham 1980.
2. Jemioło S., Szwed A., *Zagadnienia statyki sprężystych półprzestrzeni warstwowych*. Seria Monografie Zakładu Wytrzymałości Mat., Teorii Sprężystości i Plast., Tom 2, Warszawa 2013.
3. Judycki, J., *Comparison of fatigue criteria for flexible and semi-rigid pavements*. Proceedings of Eighth Intern. Conference on Asphalt Pavements, pp. 921-937, Seattle 1997.
4. Judycki J., Jaskuła P., *Nowoczesne nawierzchnie asfaltowe*. XLVII Techniczne Dni Drogowe, str. 75-94, Szczyrk 2004.

5. *Long-life asphalt pavements: Technical version*. European Asphalt Pavement Association. Brussels 2007.
6. Nagórski R., Błażejowski K., Marczuk K., *Comparative analysis of strains and durability of asphalt pavement of perpetual and standard type*. Roads and Bridges, Vol. 11, pp. 269-280, 2012.
7. Newcomb, D.E., Buncher M., Huddleston I.J., *Concepts of perpetual pavements*. Perpetual Bituminous Pavements. Transportation Research Circular No. 503, pp. 4-11, Washington 2001.
8. Newcomb, D.E., Willis R., Timm D.H., *Perpetual Asphalt Pavements. A Synthesis*. Asphalt Pavement Alliance IM-40, Lanham 2010.
9. Nunn, M.E., Brown A., Weston D., Nicholls J.C., *Design of long-life flexible pavements for heavy traffic*. Report No. 250, Transportation Research Laboratory, Berkshire 1997.
10. Park H., Kim J., Kim Y., Lee H., *Determination of the thickness for long-life asphalt pavements*. Proc. of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, pp. 791-802, 2005.
11. Prowell B.D, et. al., *Validating the fatigue endurance limit for hot mix asphalt*. NCHRP Report 646, Transportation Research Board, Washington 2010.
12. Szwed A., *Wpływ rozkładu sztywności na odkształcenia i naprężenia w trójwarstwowym układzie konstrukcji nawierzchni*. Logistyka 6/2014, str. 10450-10457.
13. Szwed A., *Naprężeniowe kryterium kształtowania grubości warstw w długowiecznej nawierzchni z betonu asfaltowego*. Logistyka 6/2014, str. 10458-10466.
14. Tran N, et. al., *Refined limiting strain criteria and approximate ranges of maximum thicknesses for designing long-life asphalt pavements*. NCAT Report 15-05, Auburn University, Auburn 2015.

A CRITERION FOR PREDICTION OF LAYER THICKNESS IN LONG-LIFE ASPHALT PAVEMENT

Abstract

A two-step procedure for preliminary dimensioning of long-life asphalt pavement is proposed in the paper. In the first step resultant stiffness of the three-layer system supported by a base layer and subgrade is estimated. For this purpose a 3D axially symmetric elastic problem is analysed. Equivalent stiffness of the homogeneous pavement is determined in order to reduce strain in the subgrade under the applied vertical load. Then simple model of the cross-section of three-layer composite slab is used to find proportioning of the layers' thicknesses. Fatigue strain data for bottom layers are used to derive thicknesses of the asphalt concrete layers. As a result closed-form mathematical formulas are obtained.

Autor:

dr inż. **Aleksander Szwed** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, e-mail: a.szwed@il.pw.edu.pl