

ANALIZA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ
W PODŁOŻU SPRĘŻYSTYM (GRUNCIE)
METODĄ ELASTOOPTYCZNĄ

Stanisław Pietruszewski, Andrzej Zdanowicz

Instytut Mechanizacji Rolnictwa AR w Lublinie
Dyrektor: prof. dr hab. Tomasz Otmianowski

WSTĘP

Zagadnienia związane z badaniem odkształceń (ugniatania) gleby, spowodowanych wielokrotnym przejazdem maszyn i ciągników rolniczych po roli, są od dawna problemem niezwykle ważnym z punktu widzenia agrotechniki. Sprężyste i trwałe odkształcenia gleby, spowodowane przez elementy jezdne pojazdów rolniczych, wpływają bowiem na zmianę własności fizyko-mechanicznych gleby i mają niemały wpływ na wegetację roślin. Podczas ruchu pojazdów rolniczych spotykamy się nie tylko z dużymi naprężeniami w podłożu, wywołanymi naciskiem (szczególnie przez koła jezdne), ale również i ze zniszczeniem struktury gleby, związanym z ich poślizgiem.

Problemy te spowodowały wzrost zainteresowania badaniami nad układem maszyna rolnicza—gleba. Badania te, prowadzone przy użyciu różnych metod, mają na celu określenie sposobów zmniejszenia szkodliwych skutków, wywołanych ruchem pojazdów po podłożu gruntowym (glebie).

METODA ELASTOOPTYCZNEJ ANALIZY NAPRĘŻEŃ

Metoda ta polega na prześwietlaniu badanego modelu podłoża, wykonanego z przezroczystego materiału optycznie czynnego, wiązką spolaryzowanych promieni świetlnych. W obciążonym modelu występuje stan naprężeń oraz tzw. zjawisko dwójłomności wymuszonej. Otrzymane w ten sposób dwa spolaryzowane promienie świetlne interferują ze sobą, dając na ekranie lub na kliszy aparatu fotograficznego układ prążków interferencyjnych. Badając rozkład tych prążków otrzymujemy informację

o wartości różnicy naprężeń głównych ($\sigma_1 - \sigma_2$), tzn. linie izochrom, lub o wartości kąta α , jaki tworzą kierunki naprężeń głównych (σ_1) i (σ_2) ze skrzyżowanymi osiami polaryzatora i analizatora (linie izoklin). W oparciu o metodę obliczeniową, opracowaną przez Frochta [1], można określić rozkład naprężeń ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) wzdłuż dowolnie wybranego przekroju modelu oraz wykreślić trajektorie naprężeń głównych.

Metody elastooptyczne, używane do badania rozkładu naprężeń np. w elementach i konstrukcjach metalowych, nie znajdują dotąd większego zastosowania w mechanice gruntów [2]. W niewielkim stopniu używa się ich w badaniach związanych z budownictwem lądowym. W tym przypadku elastooptyka służy przede wszystkim dla doświadczalnego sprawdzenia pewnych zagadnień teoretycznych, związanych z osiadaniem fundamentów. Jest to spowodowane tym, że metody obliczeniowe Frochta są słuszne jedynie w przypadku, kiedy materiał modelu jest poddany obciążeniom zawartym w zakresie prawa Hooke'a.

W przypadku stosowania „miękkiego” materiału modelowego, ulegającego nie tylko odkształceniom sprężystym, lecz (podobnie jak ośrodek gruntowy) wykazującego cechy reologiczne, można badaniami elastooptycznymi otrzymać jedynie informacje jakościowe (o rozmieszczeniu i koncentracji naprężeń), nie pozwalają one jednak na określenie ich wartości.

BADANIA PODŁOŻA SPRĘŻYSTEGO

Badania elastooptyczne, prowadzone w Zakładzie Mechaniki i Fizyki Technicznej AR w Lublinie, oparte były o następujące założenia:

1) wstępne badania jakościowe na modelu ośrodka gruntowego, wykonanego z miękkiego materiału modelowego (żelu żelatynowo-glicerynowego);

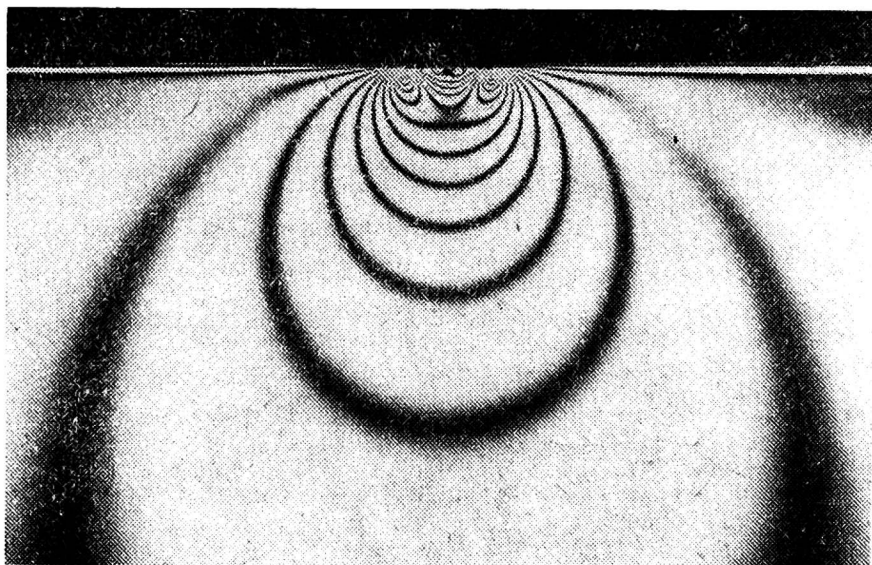
2) badanie rozkładu naprężeń w modelu ośrodka gruntowego, wykonanego z twardego materiału modelowego (przypadek podłoża sprężystego);

3) badanie rozkładu naprężeń w modelu ośrodka gruntowego, wykonanego z miękkiego materiału modelowego (z żywic epoksydowych).

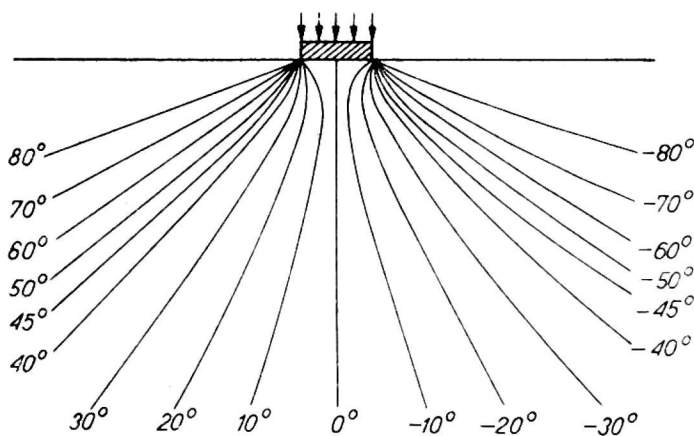
Wstępne badania jakościowe prowadzone były na modelu ośrodka gruntowego, obciążonego: siłą skupioną, sztywnym kołem i sztywnym stemplem [3, 4, 5, 6], w celu porównania rozkładu naprężeń w modelu przy różnym sposobie obciążenia. Służyły one również do opracowania stanowiska badawczego i opanowania techniki pomiarowej.

Następny etap polegał na badaniu rozkładu naprężeń w podłożu sprężystym przy użyciu twardego materiału modelowego. Elementem obciążającym był sztywny stempel i układ dwu stempli. Przy doborze ele-

mentu obciążającego (w postaci stempla) kierowano się upraszczającym założeniem, że badania prowadzone są dla płaskiego stanu naprężeń, a obciążenie modelu stemplem może być rozpatrywane jako obciążenie podłoża sprężystego sztywnym kołem (w płaszczyźnie równoległej do osi koła i przechodzącej przez tę oś).



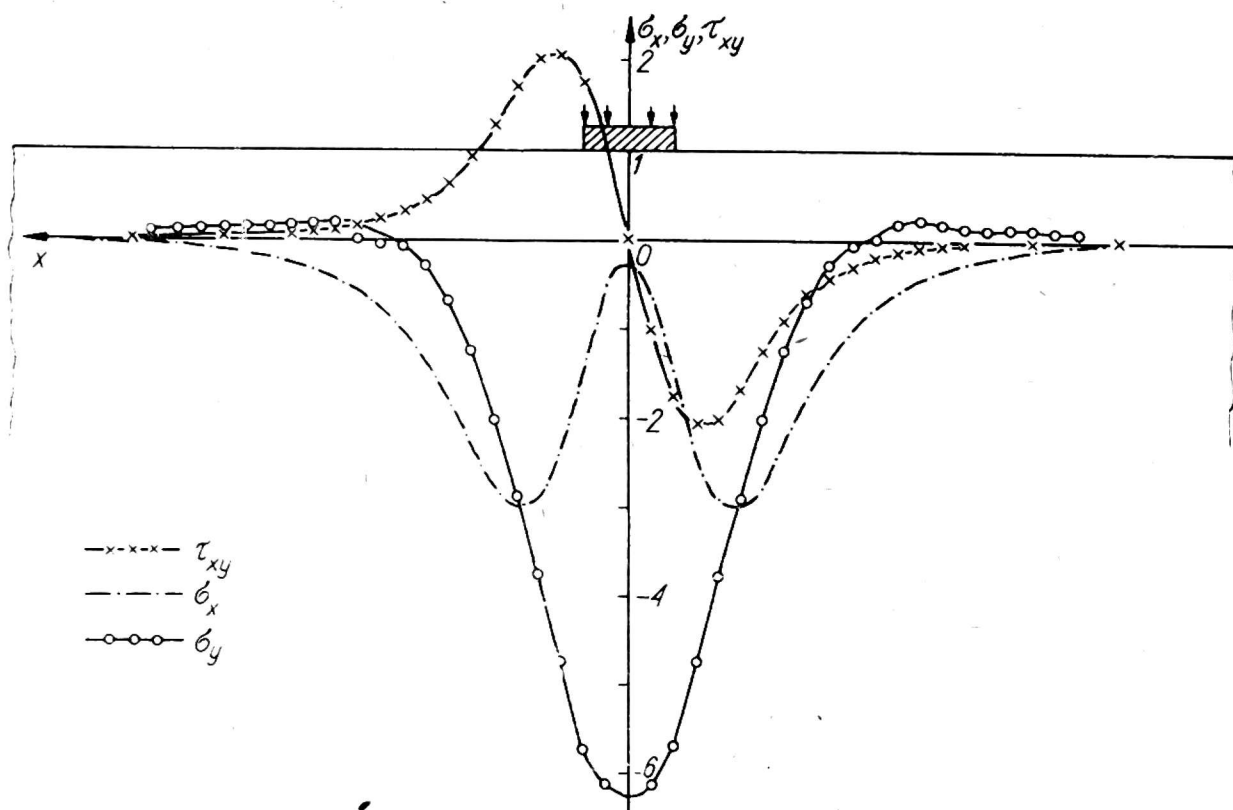
Rys. 1. Rozkład izochrom pod sztywnym stemplem
Fig. 1. Isochromatic pattern under the rigid stamp



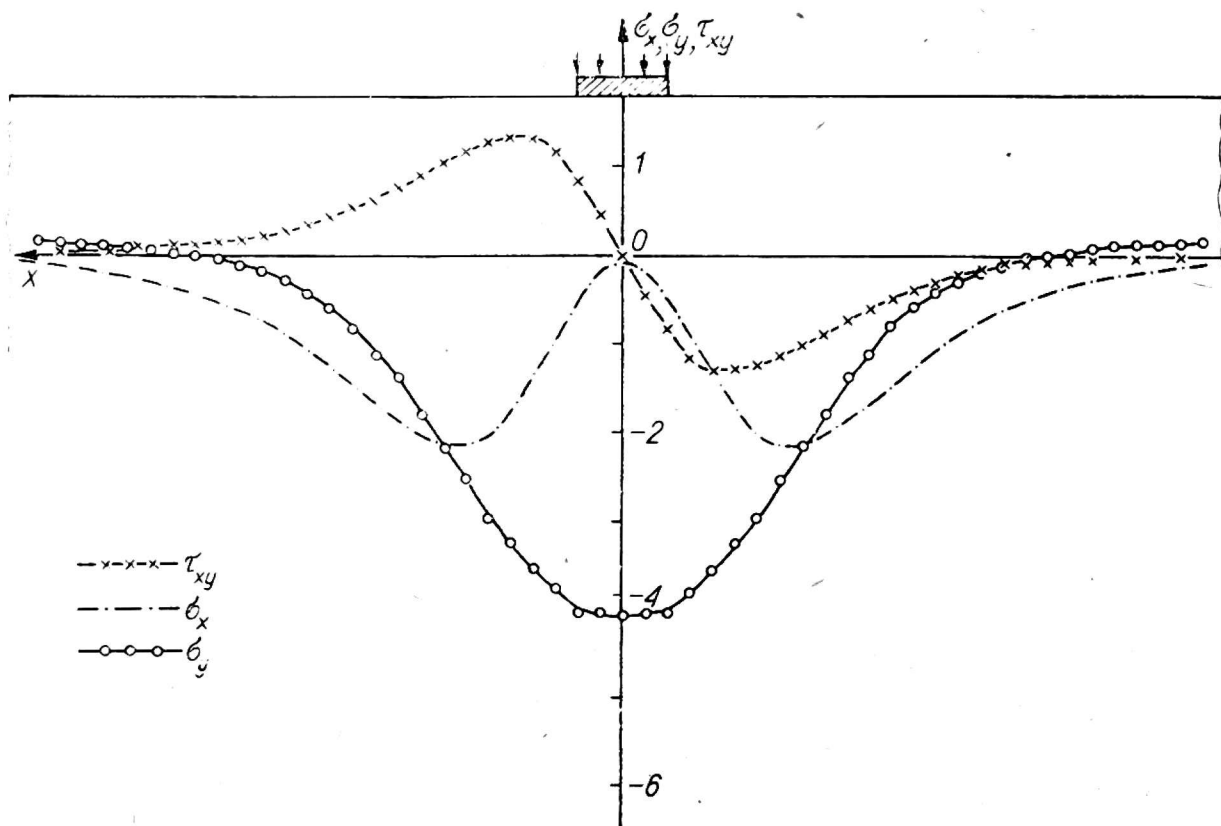
Rys. 2. Rozkład izoklin pod sztywnym stemplem
Fig. 2. Isoclinics under the rigid stamp

Z otrzymanych izochrom (rys. 1) i izoklin (rys. 2) obliczono rozkład naprężeń (σ_x , σ_y , τ_{xy}) w dwóch przekrojach równoległych do powierzchni podłoża (rys. 3 i 4). Otrzymane tą drogą dane były następnie porównywane z wynikami wyliczonymi w oparciu o teorię sprężystości [7] i wykazały zgodność obu metod obliczeniowych.

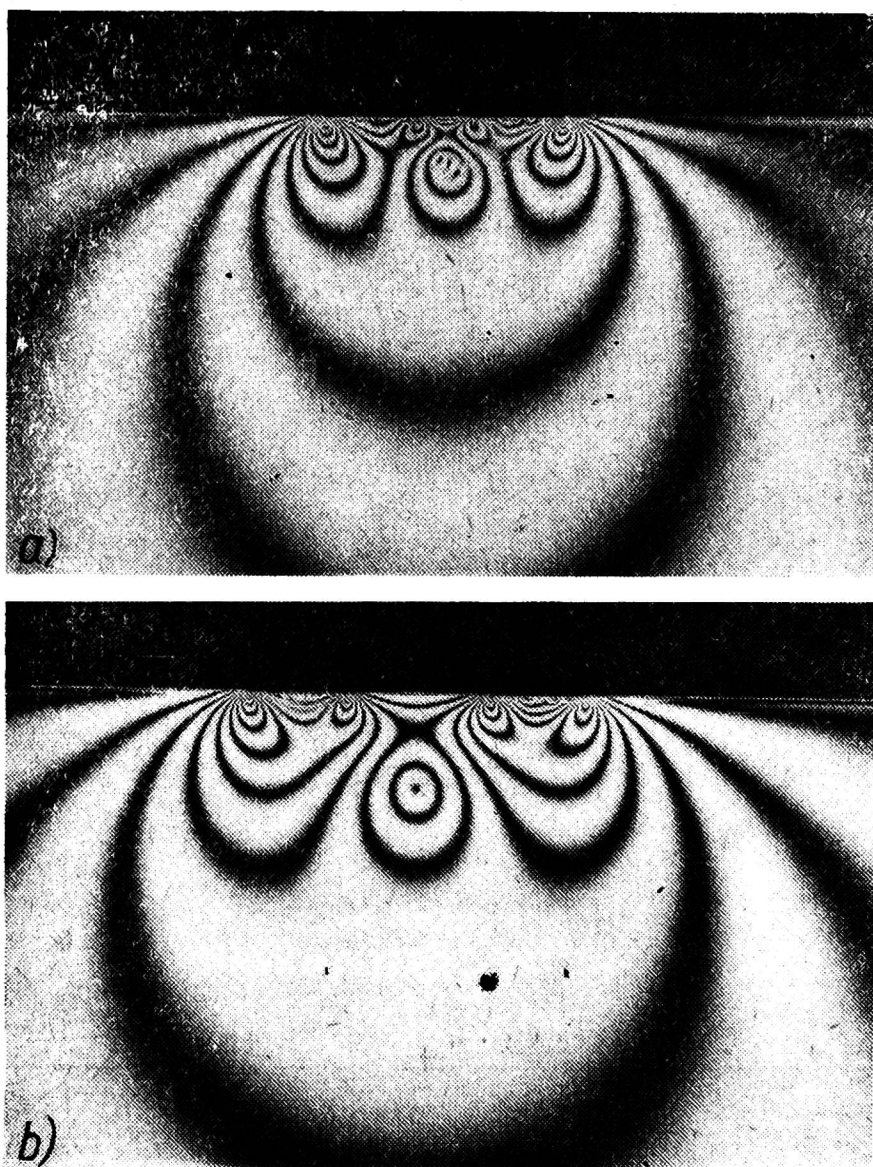
Kolejny etap badań polegał na obciążeniu modelu układem dwu stempli, przy różnych ich rozstawieniach. Otrzymane dla tego przypadku izochromy i izokliny są pokazane na rysunkach: 5a, b oraz 6a, b. Z obrazów izochrom widać wyraźnie występowanie punktu osobliwego, powsta-



Rys. 3. Rozkład naprężeń (σ_x , σ_y , τ_{xy}) pod sztywnym stemplem — w przekroju I
 Fig. 3. Stress distribution (σ_x , σ_y , τ_{xy}) under the rigid stamp in section I



Rys. 4. Rozkład naprężeń (σ_x , σ_y , τ_{xy}) pod sztywnym stemplem — w przekroju II
 Fig. 4. Stress distribution (σ_x , σ_y , τ_{xy}) under the rigid stamp in section II



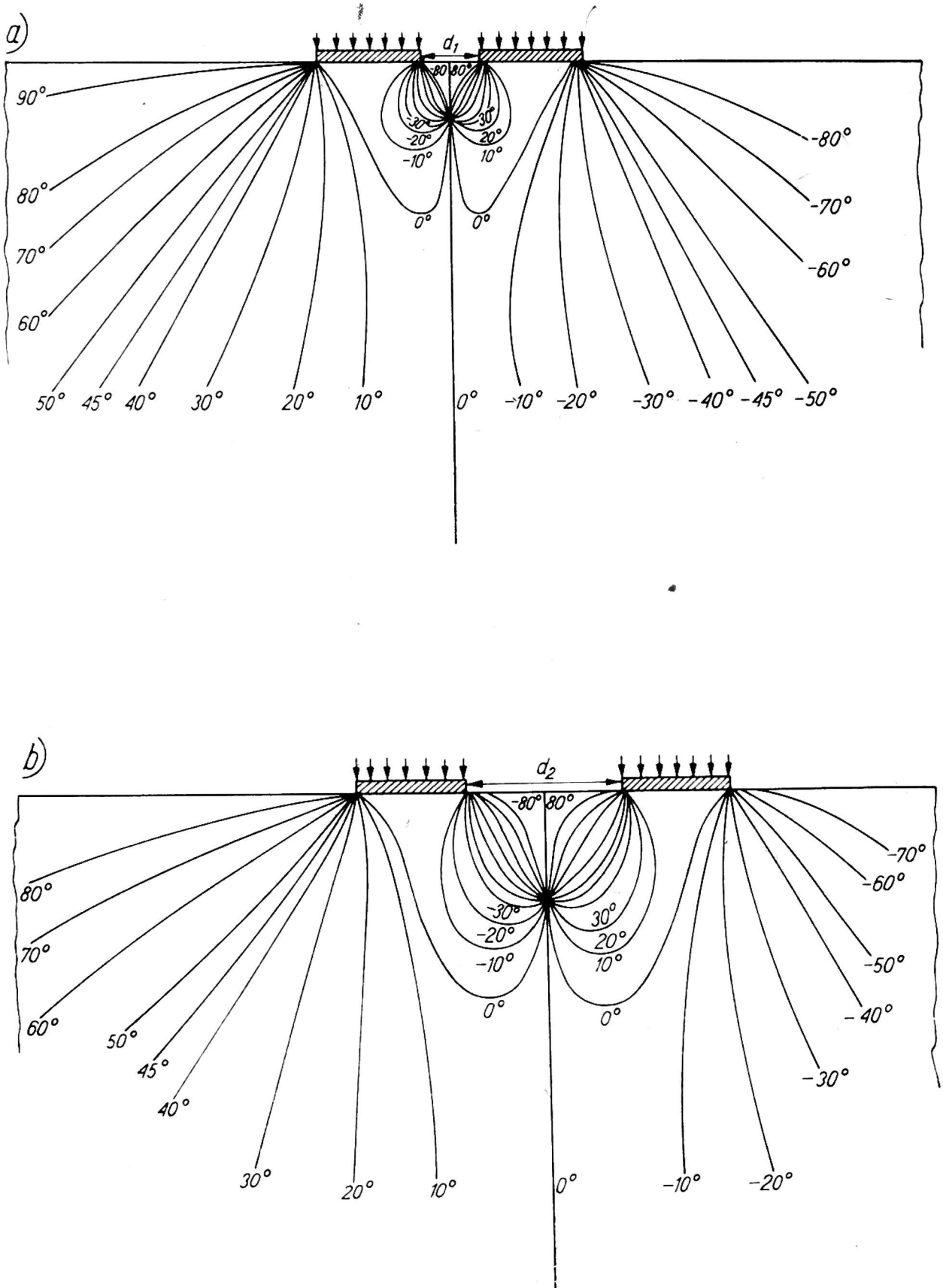
Rys. 5. Rozkład izochrom pod dwoma stemplami: *a* — przy rozstawie d_1 , *b* — przy rozstawie d_2

Fig. 5. Isochromatic pattern under two stamps: *a* — for interval d_1 , *b* — for interval d_2

łego na skutek wzajemnego nałożenia się naprężeń, pochodzących od obu stempli. Wyznaczenie rozkładu naprężeń (σ_x , σ_y , τ_{xy}) przeprowadzono dla przekrojów równoległych do powierzchni podłoża, przechodzących przez punkty osobliwe. Otrzymane rozkłady naprężeń w tych przekrojach są pokazane na rysunkach 7 i 8.

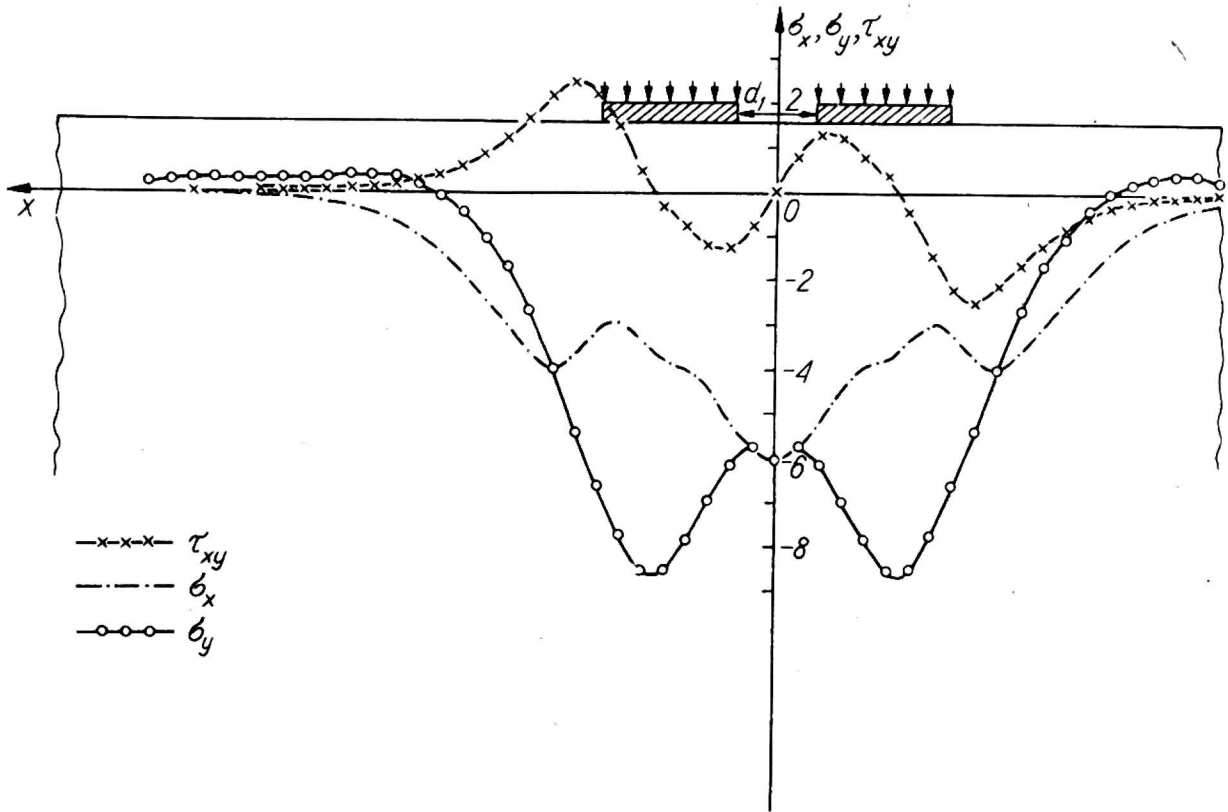
Przy wyborze przekrojów, dla których wyznaczono rozkład naprężeń, kierowano się tym, że z punktu widzenia agrotechniki ważne są: naprężenia podpowierzchniowe (występujące na niewielkiej głębokości), zakres rozprzestrzeniania się tych naprężeń, jak również obszar największej koncentracji naprężeń.

Z rozkładu izoklin zostały wykreślone trajektorie naprężeń głównych dla dwóch rozstawów stempli (rys. 9*a*, *b*). Z trajektorii naprężeń głów-



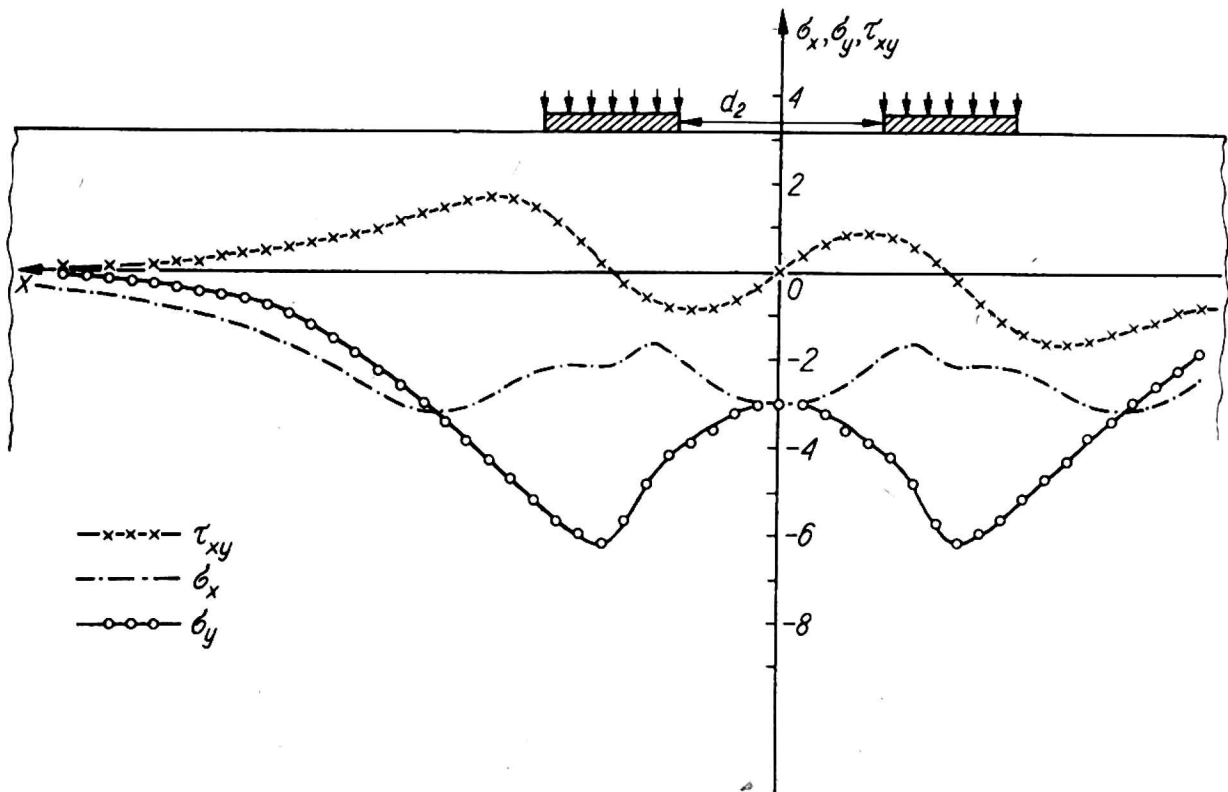
Rys. 6. Rozkład izoklin pod dwoma stemplami: a — przy rozstawie d_1 , b — przy rozstawie d_2

Fig. 6. Isoclinics under two stamps: a — for interval d_1 , b — for interval d_2



Rys. 7. Rozkład naprężeń (σ_x , σ_y , τ_{xy}) pod dwoma stemplami (przy rozstawie d_1) dla przekroju przechodzącego przez punkt osiowy

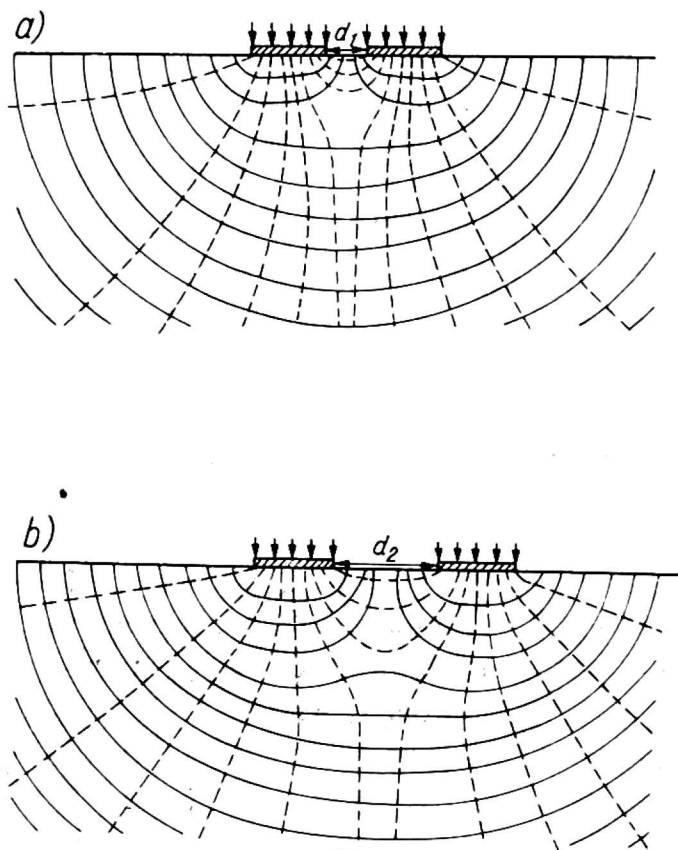
Fig. 7. σ_x , σ_y and τ_{xy} stresses distribution for interval d_1 in the section including isotropic point



Rys. 8. Rozkład naprężeń (σ_x , σ_y , τ_{xy}) pod dwoma stemplami (przy rozstawie d_2) dla przekroju przechodzącego przez punkt osiowy

Fig. 8. σ_x , σ_y and τ_{xy} stresses distribution for interval d_2 in the section including isotropic point

nych widać, że w zależności od szerokości rozstawu występują w warstwie podpowierzchniowej trajektorie, pochodzące od poszczególnych stempli. Trajektorie te łączą się ze sobą w pobliżu punktu osobliwego, tworząc wypadkowe trajektorie, które przyjmują taki kształt, jaki miałyby w przypadku obciążenia jednym stemplem — na długości równej szerokości stempli i odstępu między nimi.



Rys. 9. Trajektorie naprężeń głównych: *a* — przy rozstawie d_1 , *b* — przy rozstawie d_2
 Fig. 9. Stress trajectory: *a* — for interval d_1 , *b* — for interval d_2

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych (jak również z rozważań teoretycznych) wynika, że bezpośrednio poniżej obu stempli — zwłaszcza w pobliżu ich krawędzi — występują obszary spiętrzenia naprężeń. Wartość naprężeń, które powstają w tej strefie, określa stopień osiadania stempli w podłożu, z chwilą przyłożenia do nich obciążenia.

Badania zostały przeprowadzone w polaryskopie o średnicy pola widzenia $\Phi = 30$ cm, przy zastosowaniu światła białego — do rejestracji izoklin i monochromatycznego światła żółtego z lamp sodowych — do rejestracji izochrom. Urządzenie obciążające zostało zaprojektowane i wykonane w Zakładzie Mechaniki i Fizyki Technicznej AR w Lublinie. W celu zapewnienia odpowiednich warunków brzegowych wymiary płyty (modelującej podłoże sprężyste) były znacznie większe niż stempli. Przykładane siły były dobierane tak, aby nie występowały „odbicia” naprężeń od podłoża, na którym spoczywała płyta modelująca. Zostały w ten sposób zachowane warunki dla traktowania płyty modelującej jako nieskończonej półpłaszczyzny.

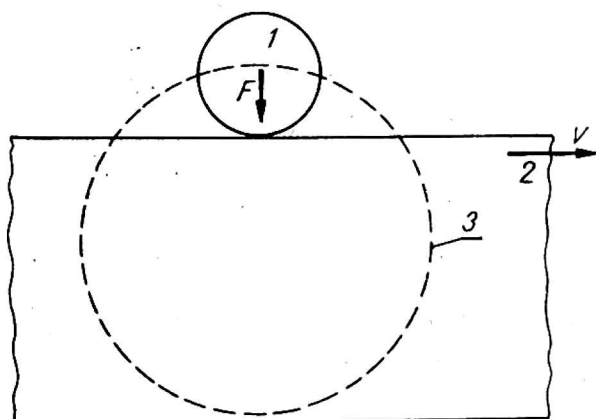
BADANIA NA MIĘKKIM MATERIALE MODELUJĄCYM

Omówione poprzednio badania dotyczyły podłoża sprężystego, co w stosunku do gruntu jest dużym przybliżeniem. Dają one jednak pełny obraz jakościowy i ilościowy występujących w podłożu naprężeń. Dalszy, planowany etap badań przewiduje zastąpienie „twardej” płyty modelującej płytą z miękkiego materiału elastooptycznego. Zostaną na niej (w celach porównawczych) powtórzone przeprowadzone dotychczas badania. Następnie przewiduje się wykonanie badań przy obciążeniu modelu sztywnym kołem i „kombinacji” dwóch kół przy różnych ich rozstawieniach. Zaplanowano również przebadanie przypadku, kiedy do koła zostanie przyłożony moment obrotowy, imitujący jego napęd.

Z punktu widzenia mechaniki układu pojazd—teren ważne jest również otrzymanie rozkładu naprężeń w modelu podłoża gruntowego (przy zastosowaniu miękkich materiałów elastooptycznych) dla przypadku ruchu pojazdu. W oparciu o zasadę względności rachunku można przyjąć, że zagadnienie to może być rozwiązane metodą elastooptyczną (ze względu na stosowaną technikę pomiarową) przy przyjęciu założenia, że koło pojazdu jest nieruchome, a w ruchu znajduje się model ośrodka gruntowego. Wówczas układ optyczny polaryskopu będzie związany z nieruchomym kołem. Podstawową trudność, którą w tym przypadku należy pokonać, stanowi zapewnienie jednostajności ruchu modelu. Jest to konieczne dla uzyskania nie zmieniających się podczas ruchu linii interferencyjnych, które muszą być rejestrowane. Schemat takiego rodzaju pomiarów pokazano na rysunku 10.

Rys. 10. Schemat badania rozkładu naprężeń w modelu gruntu pod toczącym się kołem: 1 — koło nieruchome, 2 — model gruntu poruszający się z prędkością v , 3 — obszar widoczny przez obiektyw aparatu fotograficznego

Fig. 10. An outline of investigation of stress distribution in soil under the moving wheel: 1 — immovable wheel, 2 — soil model with velocity v , 3 — area visible by the camera objective



Stanowisko opracowane do tych badań będzie mogło być również zastosowane do badania zagadnień, związanych z układem narzędzie rolnicze—gleba.

Wydaje się, że otrzymane techniką elastooptyczną wyniki przy porównaniu z wynikami teoretycznymi i doświadczalnymi, uzyskanymi przy pomocy innych (niż elastooptyczne) metod, pozwolą na dokładniejsze poznanie tak bardzo istotnych dla agrotechniki zagadnień. Pozwoli to

również na opracowanie wniosków, będących podstawą dla projektowania elementów jezdnych oraz roboczych maszyn i pojazdów rolniczych.

LITERATURA

1. Frocht M. M.: Photoelasticity. John Wiley, New York t. 1946, t. II-1948.
2. Doroszkiewicz R. S.: Elastooptyka. PWN, Warszawa 1975.
3. Haman J., Gawda H., Pietruszewski St., Zdanowicz A.: The Application of some Measurement Techniques to Study Deformations in Soils. Materiały Konferencji w Gödöllö k. Budapesztu, 1974.
4. Witkowska H., Pietruszewski St., Zdanowicz A.: Spannungsoptische Untersuchungen der Spannungsverteilung im Bodenmedium. Proc. of Int. Conf. „Perspectives of Agricultural Tractor Development”, Warszawa 1973.
5. Pietruszewski St.: Badanie rozkładu naprężeń gruntu pod kołem metodą analizy elastooptycznej. Roczn. Nauk roln. T. 70-C-3, 97-104, 1973.
6. Pietruszewski St.: Investigation of the Stress Distribution of Soil under a Wheel by Photoelastic Analysis Method. CINTE — Foreign Scientific Publications Department, 1975.
7. Timoshenko S., Goodier J. N.: Teoria sprężystości. Arkady, Warszawa 1951.

Станислав Петрушевски, Анджей Зданович

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГОМ ОСНОВАНИИ (ГРУНТА) ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Резюме

В работе приведены исследования распределения напряжений в упругом основании, нагруженном одним и двумя штампами. Из полученных изохром и изоклин были вычерчены распределения напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} . Распределения напряжений для модели, нагруженной двумя штампами, вычерчены для сечения, проходящего через изотроповую точку. Вычерчены тоже траектории главных напряжений. Предварительно было рассмотрен метод исследования распределения напряжений грунта под катящимся колесом.

Stanisław Pietruszewski, Andrzej Zdanowicz

THE ANALYSIS OF STRESS DISTRIBUTION IN ELASTIC BASE (SOIL) BY PHOTOELASTIC METHOD

Summary

In this paper the investigations of stress distribution in elastic base loaded with stamp and two stamps were presented. The stresses σ_x , σ_y and τ_{xy} distribution were drawing from obtained isochromatic pattern and isoclines. The stress distribution for model loaded with two stamps were drawing in the section including isotropic point. Stresses trajectory obtaining in case of loading the model with two stamps were also presented. The preliminary discussion of the method of testing the stress distribution under the moving wheel was covered.