

JERZY TADEUSZ PINDERA

O ZASTOSOWANIU METODY KRUCHYCH POKRYĆ  
DO WYZNACZANIA CHARAKTERU I OBSZARÓW  
ODKSZTAŁCEN PLASTYCZNYCH METALI

ROZPRAWY  
INŻYNIERSKIE  
LXII

## SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wstęp	35
2. Opis metody	35
3. Porównanie metod	36
4. Ilustracja wyników	37
5. Porównanie wyników doświadczalnych z wynikami rozwiązań teore- tycznych	45
6. Wnioski	45

1. **Wstęp.** Praca częściowo opiera się na wynikach badań nad pokryciami kruchymi, prowadzonymi przez autora wraz z A. Krych w 1953 roku<sup>1</sup>. W czasie badań nad przydatnością różnego typu żywic do wyznaczania trajektorii naprężeń głównych oraz do wyznaczania miejsc największych wydłużeń względnych obserwowano powtarzające się zjawisko utraty spójności pomiędzy kruchym pokryciem i podłożem przy występowaniu w nim odkształceń plastycznych. Jako pokrycia kruche stosowano żywice.

Opisywana metoda uwidocznienia odkształceń plastycznych na modelach jest prosta, tania i wymaga stosunkowo krótkich badań. Nadaje się ona zarówno do badań laboratoryjnych, jak i do obserwacji przeprowadzanych wprost na konstrukcjach. Żywice nowolakowe typu iditol dostarczane były przez Instytut Tworzyw Sztucznych. Żywice, których głównym składnikiem jest kalafonia, przygotowane zostały przez Alicję Krych według metody, którą podali S. Kohn, V. Karwoitsky i S. Taquet w pracy [1].

2. **Opis metody.** Technika nanoszenia i suszenia kruchego pokrycia w celu uwidocznienia odkształceń plastycznych jest taka sama, jak przy metodzie kruchych pokryć. Jednak w naszej metodzie materiał kruchego pokrycia może posiadać znacznie większą wartość wydłużenia krytycznego (tj. wydłużenia, przy którym następuje utrata spójności pokrycia).

Ze względu na przejrzystość otrzymanego obrazu jest nawet rzeczą pożądaną w wielu przypadkach, aby obraz linii poślizgów oraz obraz odkształceń poprzecznych nie były zaciemnione układem trajektorii naprężeń głównych. Dlatego też dla uwidaczniania odkształceń plastycznych można stosować materiały mało kruche.

Po mechanicznym oczyszczeniu a następnie odtłuszczeniu badanej powierzchni przedmiotu można nanosić warstwę kruchego pokrycia pędzlem albo rozpylaczem. Stosowano dwa typy żywicy: żywicę nowolakową typu iditol, rozpuszczoną w acetonie oraz żywicę otrzymaną z kalafonii, rozpuszczoną w acetonie, dwusiarczku węgla i chloroformie. Grubość warstwy wahała się pomiędzy kilku setnymi a kilku dziesiętymi milimetra. Kruche pokrycie na elemencie badanym suszone było w piecyku

<sup>1</sup> Przy badaniach współpracowali z autorem A. Borusiewicz i J. Janowski. Zdjęcia fotograficzne wykonał S. Łuczyński.

w temperaturach 70-120°C zależnie od rodzaju pokrycia lub przy użyciu promienników podczerwieni. Dla uniknięcia pęknięć spontanicznych spadek temperatury był powolny.

Wyżej wspomnieliśmy, że przy powstaniu odkształceń następuje utrata spójności pomiędzy pokryciem kruchym i podłożem. Uzewnętrznia się to przez bardzo drobne spękanie i skruszenie się pokrycia, co powoduje zmiany jego barwy, pojaśnienie oraz osypywanie się albo samorzutne, albo też wywołane mechanicznie np. przez pocieranie pędzelkiem. Przy typach żywic mniej kruchych nie występuje kruszenie się pokrycia, a tylko wyraźna utrata spójności z podłożem bez utraty spójności pokrycia. Utratę spójności z podłożem w tym przypadku sygnalizuje wyraźna zmiana ilości odbitego światła; partie takie wydają się ciemniejsze. Dla obserwacji lub w celu wykonania fotograficznych zdjęć odkształceń plastycznych podobnie jak w przypadku obserwacji trajektorii naprężeń głównych należy oświetlać pole widzenia silnym, skośnym strumieniem światła. Jeśli materiał przedmiotu badanego jest nieprzeźroczysty, należy obserwować go od strony źródła światła.

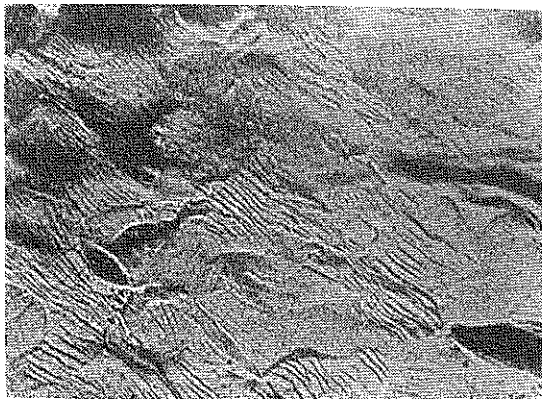
**3. Porównanie metod.** Utrata spójności pomiędzy jakimkolwiek pokryciem kruchym i podłożem metalowym przy powstawaniu w pokryciu odkształceń plastycznych jest zjawiskiem typowym, wielokrotnie obserwowanym i wykorzystywanym do obserwowania odkształceń plastycznych. Zjawisko to można zauważyć również przy innych podłożach (np. autor obserwował identyczne odkruszanie się kruchego pokrycia przy plastycznych odkształceniach pewnych tworzyw sztucznych). Utrata spójności pomiędzy elementem badanym i pokryciem związana jest z tym, że przy odkształceniach plastycznych metali odkształcenia powierzchni tracą charakter regularny, jaki miały w obszarze odkształceń sprężystych — występują poślizgi w kryształitach, pomiędzy kryształitami oraz pomiędzy partiami materiału na znacznej przestrzeni, powierzchnia partii odkształconej plastycznie deformuje się, wskutek czego warstewka kruchego pokrycia rozkrusza się i traci spójność z podłożem. Charakter oraz stopień odkształcenia uprzednio wypolerowanej powierzchni próbki ilustruje rys. 1.

Najpopularniejsza metoda obserwacji odkształceń plastycznych opiera się na obserwacji linii Lüdersa. Jest ona jednak mało wygodna, gdyż wymaga uprzedniego szlifowania i polerowania powierzchni badanego przedmiotu oraz często wymaga stosowania metody «Schlieren» w celu otrzymania dobrego zdjęcia.

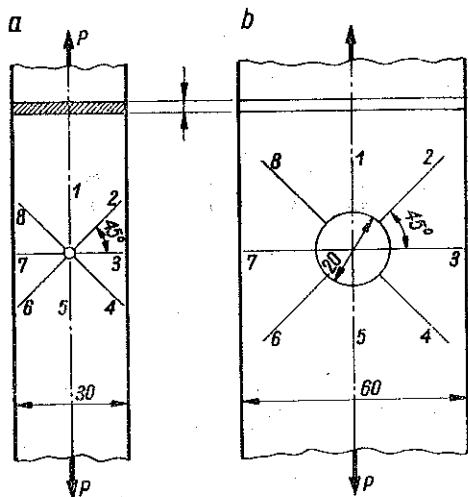
Przy plastycznych odkształceniach ciała pokrytego warstewką kruchych tlenków, np. przedmiotu stalowego pokrytego rdzą lub zendrą, obszary odkształceń plastycznych uwidaczniają się wskutek kruszenia się i odpadania warstewki tlenków w tych obszarach. Metoda ta jest jednak

mało wygodna, gdyż rzeczą konieczną jest pokrycie badanego przedmiotu zwartą warstwą tlenków, co bywa na ogół kłopotliwe i często pociąga za sobą zmianę własności wytrzymałościowych materiału z powodu konieczności wygrzewania w wysokiej temperaturze. Sposób ten podaje W. Mason, [2], przytacza ją również A. Ná dai, [5], W. Szap osz nikow, [3], i inni.

Rozwinięciem powyższej metody jest pokrywanie warstwy tlenków warstwą mleka wapiennego (tlenku wapnia) w celu lepszego uwi docznienia pęknięć w warstewce tlenków, lub pokrywanie mleczkiem cementowym (roztwór białego cementu portlandzkiego w wodzie), [4]. Metody te są również niewygodne, gdyż wymagają uprzedniego utworzenia warstewki tlenków.



Rys. 1



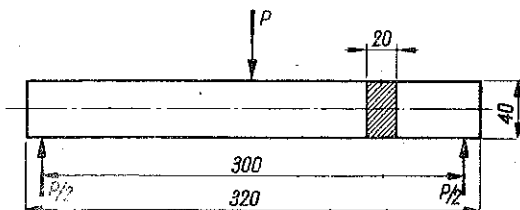
Rys. 2

Stosowana przez nas metoda wyznaczania odkształceń plastycznych przy użyciu kruchych pokryć, otrzymywanych z materiałów krajowych i suszonych za pomocą promienników podczerwieni lub w suszarce w temperaturze poniżej  $100^{\circ}\text{C}$ , pozbawiona jest wad wyżej opisanych metod. Opisywana metoda podobna jest do metod B. P. Haigha, [6], i J. S. Blaira, [7], o których informuje M. Hetenyi, [8]. Autorzy ci, według Hetenyi'ego, stosują ogrzewanie do  $140^{\circ}\text{C}$  (informacja ta nie była autorowi znana).

4. Ilustracja wyników. Załączone zdjęcia ilustrują opisywaną metodę. Zdjęcia wykonane zostały przy stopniowym wzroście obciążenia na próbkach rozciąganych (rys. 2) i próbkach zginanych (rys. 3). Zdjęcia wykonywano w ten sposób, aby na fotografiach otrzymać obrazy obu stron próbki w tej samej chwili. Uzyskano to przez zastosowanie układu optycz-

nego przedstawionego na rys. 4. Próbkę wykonano z blachy stalowej (stal miękka).

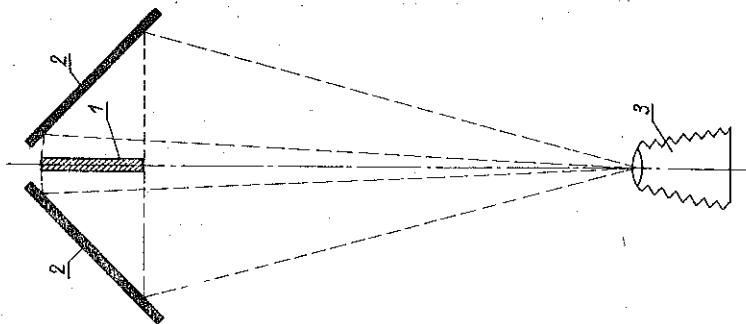
Zdjęcia na rysunkach 5-25 przedstawiają powstawanie odkształceń plastycznych na próbkach rozciąganych. Z geometrycznego punktu widzenia w rozciągającym pasmie wyróżnić można dwie charakterystyczne postacie odkształceń plastycznych: odkształcenia plastyczne poprzeczne,



Rys. 3

przy których obszar plastycznie odkształcony posiada kształt prostego pasma o powiększającej się (od zera) szerokości, przecinającego oś próbki pod kątem prostym, oraz odkształcenia plastyczne skośne. Różnią się one od poprzednich tym, że tworzą z osią pasma kąt różny

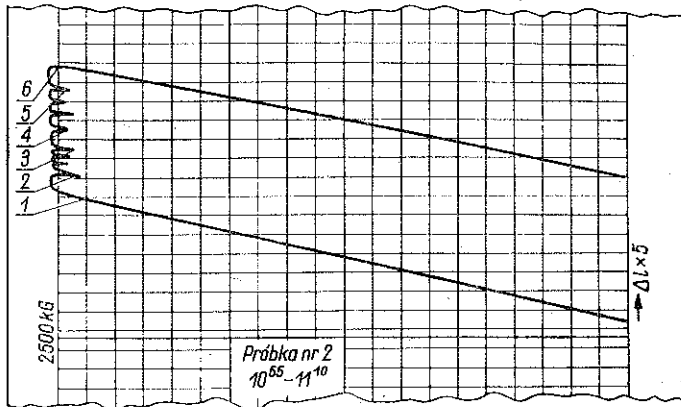
od prostego. Powstające przy wzroście obciążenia obszary odkształceń plastycznych są wyraźnie widoczne, a granice obszarów odkształceń plastycznych są łatwe do określenia. Podobnie wyraźne są zdjęcia próbek zginanych, przedstawionych na rys. 25-27 oraz 28-32.



Rys. 4

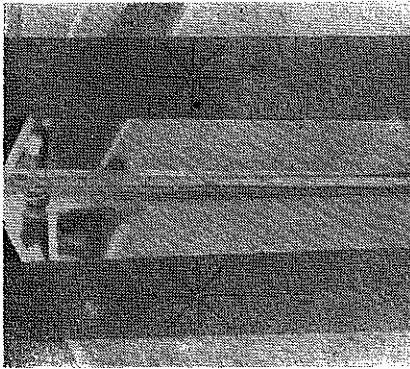
Jak załączone zdjęcia ilustrują, przebieg odkształceń plastycznych w miarę wzrostu odkształceń jest dość zawyły. W obszarach, w których początkowo wystąpiły odkształcenia plastyczne poprzeczne, pojawiają się później odkształcenia plastyczne skośne i odwrotnie. W pewnych obszarach występują wyraźnie dwa układy odkształceń skośnych, przecinające się pod określonymi kątami; tak jest np. na rys. 19, 22 i 23.

Dość ciekawe jest zachowanie się obu typów odkształceń plastycznych przy zatrzymaniu silnika maszyny wytrzymałościowej: obszary odkształceń plastycznych poprzecznych na ogół tak wzrastają, że trudno jest zarejestrować fotograficznie ich stadium początkowe, natomiast odkształcenia skośne często w postaci linii poślizgów pojawiają się na ogół w skoń-

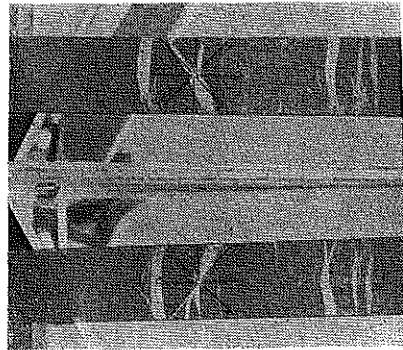


17.06.1955  $t = 18^{\circ}\text{C}$   $w = 64\%$

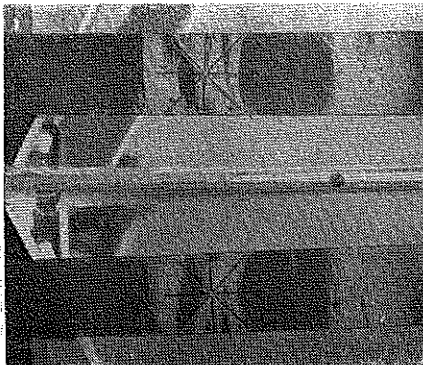
Rys. 5



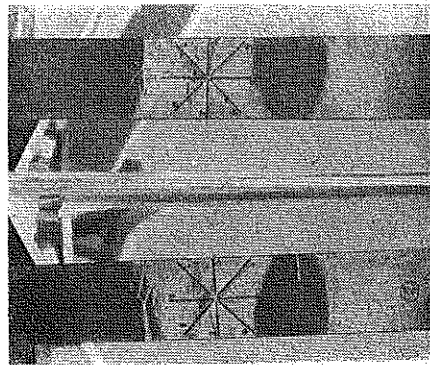
Rys. 6 (punkt 1)



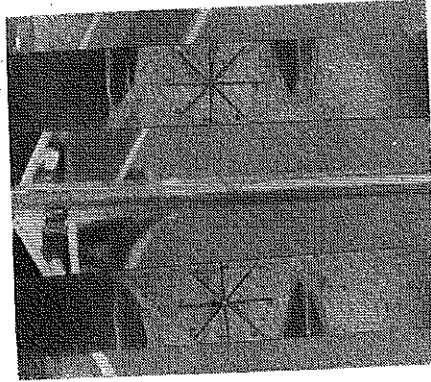
Rys. 7 (punkt 2)



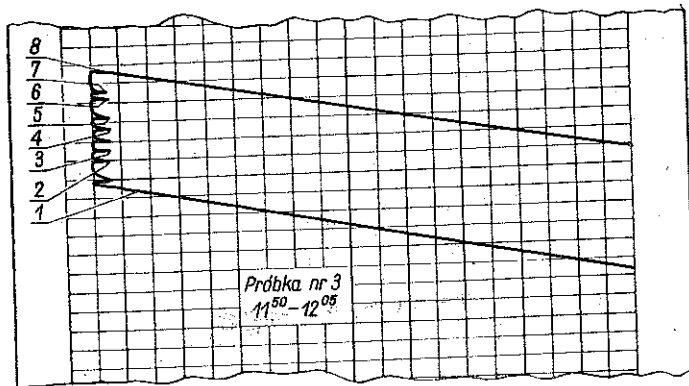
Rys. 8 (punkt 4)



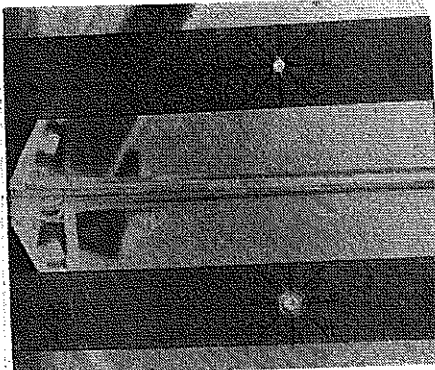
Rys. 9 (punkt 5)



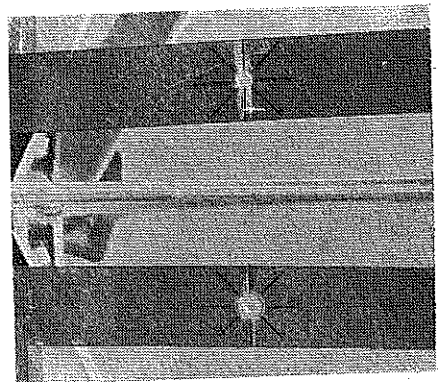
Rys. 10 (punkt 6)



Rys. 11

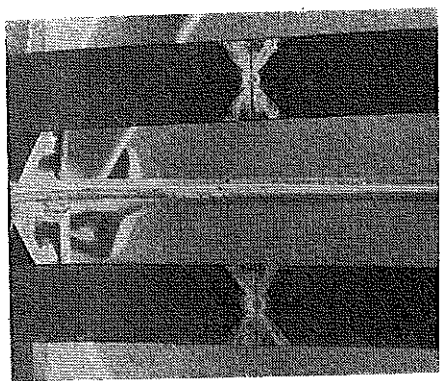


Rys. 12 (punkt 1)

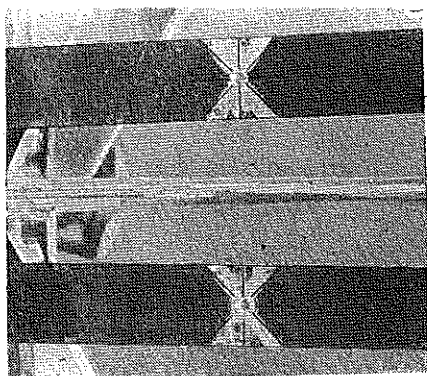


Rys. 13 (punkt 2)

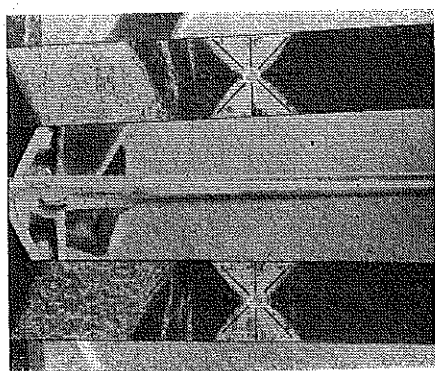




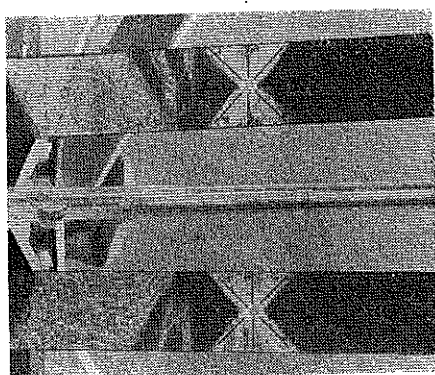
Rys. 14 (punkt 3)



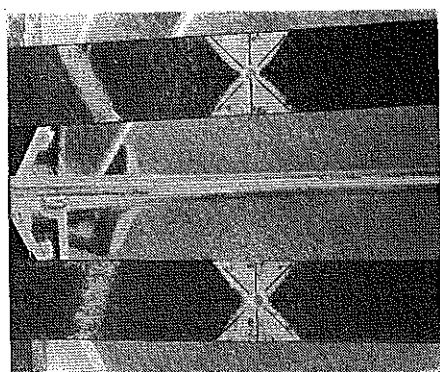
Rys. 15 (punkt 4)



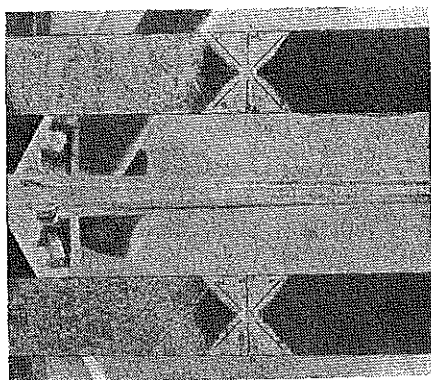
Rys. 16 (punkt 6)



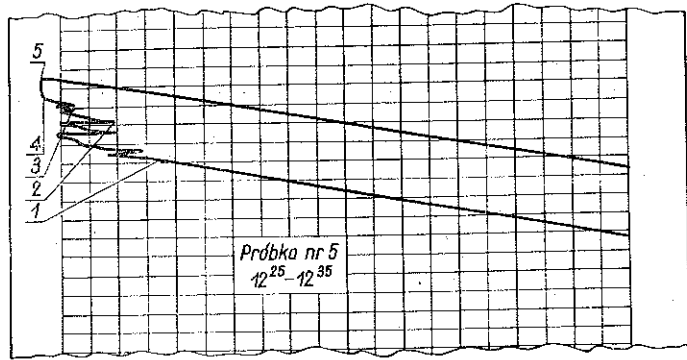
Rys. 17 (punkt 7)



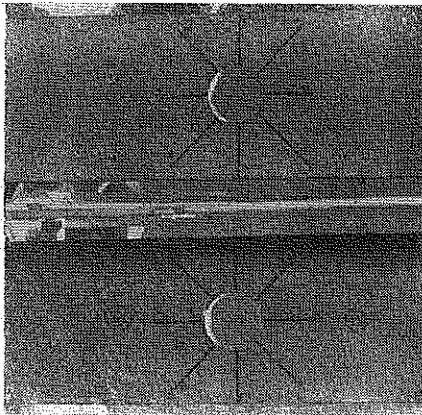
Rys. 18 (punkt 5)



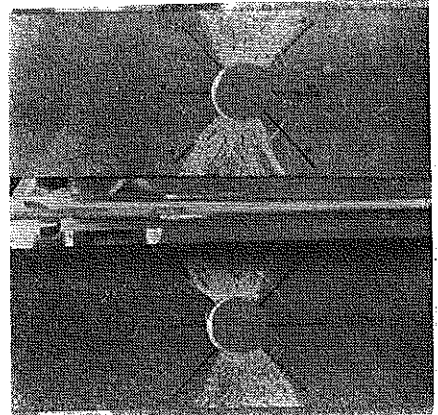
Rys. 19 (punkt 8)



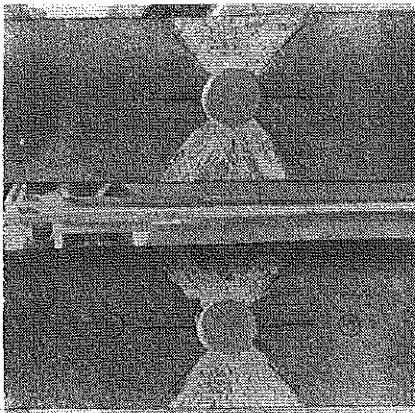
Rys. 20



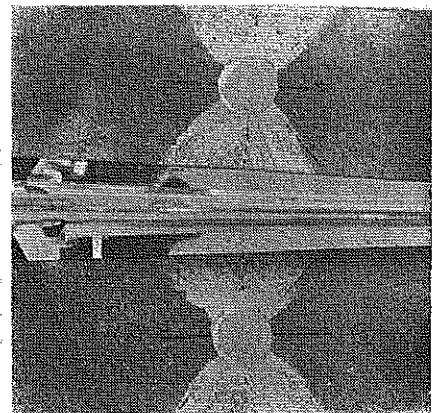
Rys. 21 (punkt 1)



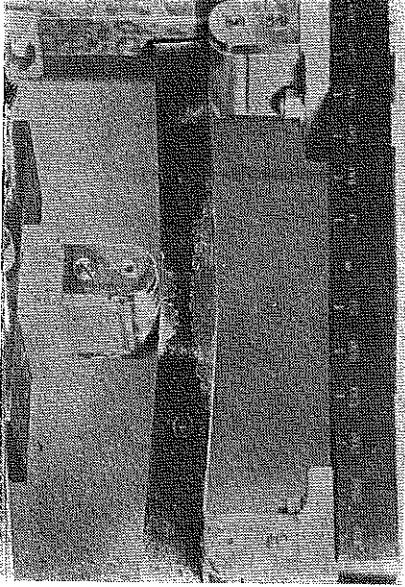
Rys. 22 (punkt 2)



Rys. 23 (punkt 4)



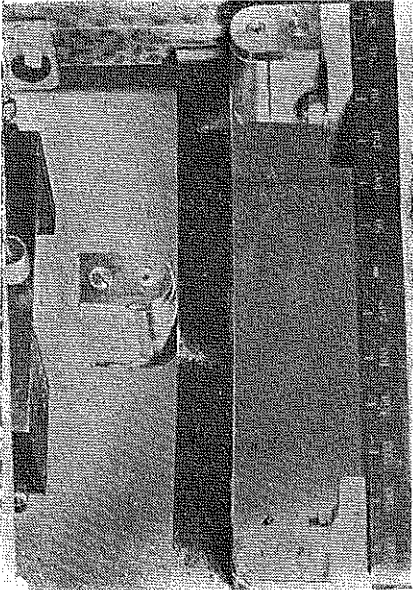
Rys. 24 (punkt 5)



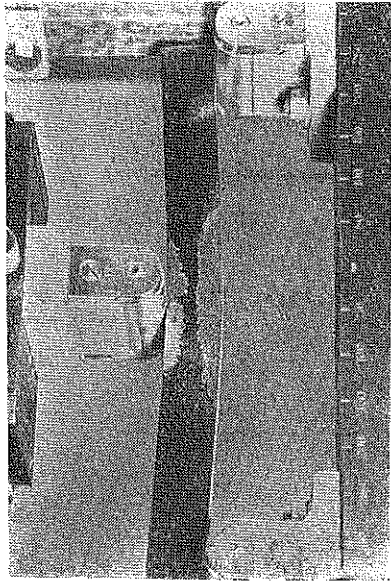
Rys. 26



Rys. 28



Rys. 25



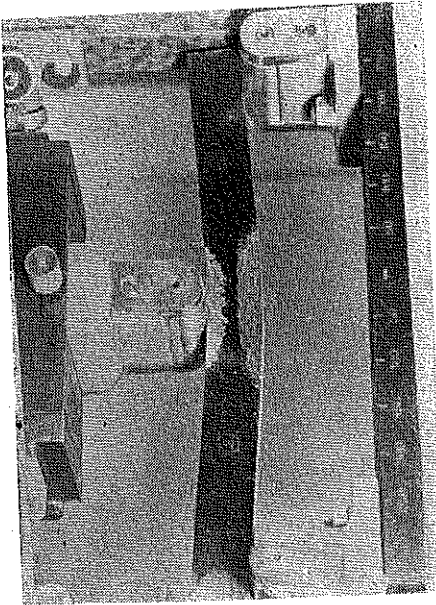
Rys. 27



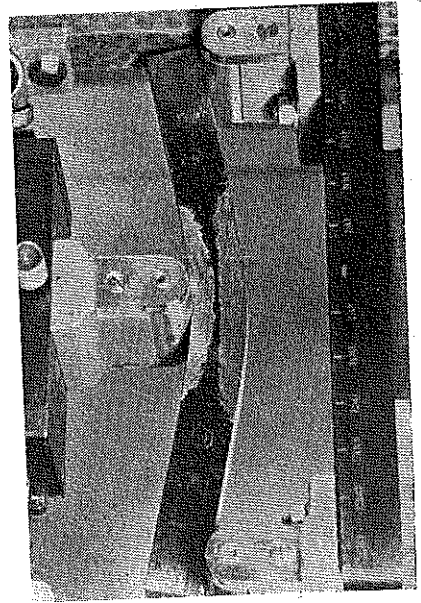
Rys. 30



Rys. 32



Rys. 29



Rys. 31

czonej postaci i zmiana ich wymaga powiększenia siły obciążającej. Zdjęcia wykonywane były przy zatrzymanym silniku zrywarki. Załączone wykresy rozciągania podają, w których punktach krzywych rozciągania wykonane były zdjęcia fotograficzne.

5. Porównanie wyników doświadczalnych z wynikami rozwiązań teoretycznych. W przypadku belki zginanej jak na rys. 25-32 porównanie wyników doświadczalnych z rozwiązaniem teoretycznym dla ciała idealnie plastycznego, podanym przez W. W. Sokołowskiego, [9], daje poważne rozbieżności jakościowe. Obszary odkształceń plastycznych dla belki o przekroju prostokątnym, podpartej na obu końcach i obciążonej w środku siłą skupioną, według W. W. Sokołowskiego ograniczone są odcinkami parabol jak na rys. 33. Krzywe te posiadają całkiem odmienny charakter niż krzywe ograniczające obszary odkształceń plastycznych, przedstawione na zdjęciach belki zginanej (rys. 27 i 31).

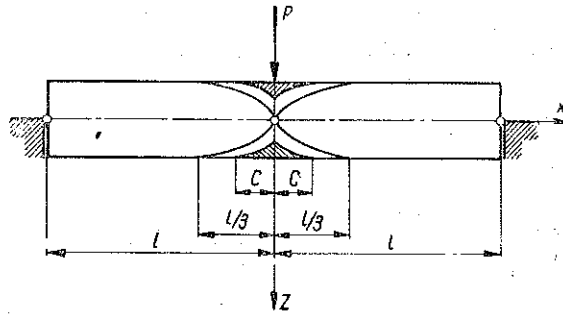
Oczywiście porównanie wyników może być jedynie orientacyjne, zwłaszcza

że «przeszłość» technologiczna materiału, z którego wykonywane zostały próbki, nie była znana. Porównanie wyników dla rozciąganego pasma z okrągłym otworem (rys. 15 i 23) z wynikami otrzymanymi na innej drodze, np. z wynikami R. Hiltschera, [10], wykazuje wyraźne podobieństwo jakościowe.

6. Wnioski. Opisana metoda pozwala na uwidocznienie odkształceń plastycznych bezpośrednio na obiektach w sposób łatwy, tani i wyraźny i może zastąpić metody wymagające specjalnego przygotowania powierzchni badanego przedmiotu, jak szlifowanie i polerowanie, wytrawianie, podgrzewanie do wysokiej temperatury i innych zabiegów. Konieczną atoli rzeczą jest oczyszczenie i wygładzenie powierzchni przedmiotu.

Wszystkie materiały stosowane przy opisywanej metodzie są pochodzenia krajowego, łatwo dostępne na rynku albo łatwe do wykonania w przeciętnie wyposażonym laboratorium technicznym wreszcie są stosunkowo tanie.

Możliwość doprowadzenia warstwy kruchego pokrycia do stanu odpowiedniej kruchości przez suszenie przy użyciu ogólnie stosowanych promienników podczerwieni zwiększa jej uniwersalność.



Rys. 33

Prawdopodobnie metodę tę da się zastosować do badań odkształceń plastycznych w materiałach innych niż metale, jeśli tylko można będzie uzyskać odpowiednio gładką powierzchnię.

Oczywiście należy pamiętać o tym, że doświadczenia wykonane za pomocą opisanej metody dostarczają informacji o charakterze odkształceń plastycznych w warstewce zewnętrznej materiału; przy niejednorodności materiału, obecności naprężeń własnych w zewnętrznej warstewce materiału lub przy przestrzennym stanie naprężeń itp. odkształcenia plastyczne powierzchni mogą być inne niż warstw leżących głębiej.

#### Literatura cytowana w tekście

- [1] S. Kohn, V. Karwoitsky, S. Tacquet, *Les émaux et vernis craquelants*, Rech. Aeronaut. 13 (1950).
- [2] W. Mason, *The Lüders' line on Mild Steel*, Proc. Phys. Soc., Londyn. 1910-1911.
- [3] W. Szaposznikow, *Miechaniczeskije ispytanja metallow*, Maszgiz., Moskwa 1949.
- [4] R. S. Johnston, *Compressive Strength of Column Web Plates and Wide Web Columns*, U. S. Bur. Stand. Techn. Pap., 1926.
- [5] A. Nádaí, *Plasticity*, Mc Graw-Hill, New York 1931.
- [6] B. P. Haigh, *Electric Welding as an Integral Part of Structural Design*, Trans. North. East Coast Inst. Eng. Arch., 1939-1940.
- [7] J. S. Blair, *The Resin Method of Indicating Yield*, Eng., 1942.
- [8] M. Hetenyi, *Handbook of Experimental Stress Analysis, Brittle Models and Brittle Coatings*, New York 1954.
- [9] W. W. Sokołowski, *Tieorja plasticznosti*, Moskwa 1950.
- [10] R. Hiltscher, *Theorie und Anwendung der Spannungsoptik im elastischen Gebiet*, VDI-Z 2 (1955).

#### Резюме

#### О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА ХРУПКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА И ОБЛАСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Автор приводит результаты своих исследований над применением метода хрупких покрытий, для определения пластических деформаций металлов, основываясь на явлении потери связности между слоем хрупкого покрытия и металлическим основанием, когда последнее пластически деформируется. Описываемый метод не требует особой обработки поверхности детали, кроме удаления корродированного слоя и сглаживания поверхности. Он легче и дешевле других методов. Пределы пластически деформированных областей отчетливы. Автор сравнивает полученные результаты с теоретическими решениями.

## Summary

### APPLICATION OF THE METHOD OF BRITTLE COATINGS IN THE INVESTIGATION OF DEFORMATION TYPE AND REGIONS

The author presents the results of his investigations concerning the application of the method of brittle coatings for the determination of plastic deformation of metals on the basis of the phenomenon of loss of adhesion as between the layer of brittle coating and the metal, when the body undergoes a plastic deformation. Since the method described requires no special preparation of the surface of the body except the removal of the corroded layer and polishing, it is easier and less expensive than other methods. The boundaries of the regions of plastic deformation are clearly visible. The author compares the results obtained with theoretical solutions.

ZAKŁAD MECHANIKI OSRODKÓW CIĄGLYCH  
IPPT PAN

*Praca została złożona w Redakcji dnia 7 września 1955 r.*