

## NOWA METODA BADANIA CIENKICH BLACH PRZY ŚCISKANIU

LECH DIETRICH I KAROL TURSKI (WARSZAWA)

Praca zawiera opis konstrukcji nowego przyrządu do badania krzywej umocnienia przy ściskaniu płaskich próbek. Przyrząd składa się z szeregu płytek połączonych suwliwie, dzięki czemu długość przyrządu zmienia się odpowiednio do długości deformowanej próbki. Podano przykładowo dla stopu aluminium krzywą umocnienia uzyskaną przy zastosowaniu omawianego przyrządu.

### 1. WSTĘP

Rozpowszechnienie cienkościennych konstrukcji blachownicowych stworzyło konieczność wyznaczania krzywej umocnienia przy ściskaniu cienkich próbek wyciętych z arkusza blachy. Przeprowadzenie obliczeń elementu konstrukcji blachownicowej na wyboczenie wymaga znajomości modułu stycznego i siecznego jako funkcji odkształcenia rozpatrywanego materiału. Narzuca to z kolei wysokie wymagania na dokładność wyznaczania krzywej umocnienia. Uwzględnienie anizotropowych własności blachy zmusza do określenia krzywej naprężenie-odkształcenie przy obciążeniach ściskających, co stwarza dodatkowe trudności przy realizacji doświadczenia ze względu na konieczność zabezpieczenia próbki przed wyboczeniem.

W latach czterdziestych ukazało się szereg prac opisujących sposoby określania charakterystyki materiałowej przy obciążeniach ściskających dla próbek wyciętych z blachy. Przedstawiono w nich metodę przeprowadzania badań i oryginalne przyrządy zabezpieczające próbkę przed wyboczeniem.

Najwcześniejszą metodą badania krzywej umocnienia przy ściskaniu próbek wyciętych z blachy była metoda pakietowa [1], w której kilka lub kilkanaście próbek o identycznych wymiarach było ściskanych jednocześnie. Cały pakiet próbek podparty był z dwóch stron kilkoma rzędami szpilek. Rozwiązanie to umożliwia osiągnięcie dość znacznych odkształceń, ale jego wadą jest konieczność przygotowania kilkunastu próbek do wyznaczenia jednej krzywej umocnienia. Z tego powodu metoda pakietowa stosowana była głównie jako metoda wzorcowa do oceny dokładności innych, bardziej prostych sposobów podparcia próbki [3, 4, 5 i 6].

Modyfikacją tej metody była propozycja [2] sklejanie kilku próbek w jeden pakiet. Sposób ten umożliwia badanie cienkich próbek o grubości rzędu 0,5 mm, wykonanych z materiałów o umownej granicy plastyczności  $R_{0,2} \approx 150 \text{ kG/mm}^2$ . W przypadku próbek o większej grubości ich sklejenie umożliwia zmniejszenie niezbędnej ilości próbek w pakiecie.

Spośród przyrządów umożliwiających wyznaczenie krzywej umocnienia przy ściskaniu pojedynczej próbki jednym z pierwszych było urządzenie Montgomery'ego-Templina [4], w którym próbka umieszczona była między dwoma rzędami stalowych rolek dociskanych do próbki sprężynami. Była to jednak konstrukcja skomplikowana, wymagająca doboru średnicy rolek i ich rozstawienia w zależności od badanego materiału. Zauważono również [4 i 6], że rolki powodują lokalne wgłębienie na powierzchni próbki co niewątpliwie powoduje zniekształcenie krzywej umocnienia.

W najbardziej rozpowszechnionej grupie przyrządów podparcie próbki stanowią dwa sztywne, gładkie bloki. Opisane w literaturze [3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 i 14] wersje tej grupy przyrządów różniły się między sobą stosowanymi wymiarami próbek, materiałami i wielkością bloków podpierających, sposobem wywierania poprzecznego nacisku na próbkę i doбором jego wartości, rodzajem smaru używanego do zmniejszenia tarcia między powierzchniami próbki i bloków podpierających, sposobem umocowania ekstensometru i przyłożenia siły ściskającej do próbki. W większości tych przyrządów próbki umieszczone były między stalowymi blokami, których docisk do powierzchni próbki był regulowany za pomocą śrub. Grubość warstwy smaru i jego rodzaj oraz wielkość siły docisku bloków są ściśle ze sobą związane i były dobierane drogą doświadczeń [3, 5, 10 i 14]. Stwierdzono, że duże błędy powodują twarde, obce cząsteczki, które mogą dostać się między powierzchnie bloku i próbki w czasie jej smarowania. Przy właściwie dobranym docisku płyt prowadzących do powierzchni próbki wpływ tarcia jest niewielki, nawet jeśli powierzchnia próbki nie jest smarowana [5 i 13].

We wszystkich stosowanych dotychczas konstrukcjach tego typu przyrządów do ściskania próbki wycięte z blachy były dłuższe od bloków podpierających o tyle, aby umożliwić osiągnięcie żądanej wielkości odkształceń. Jednocześnie wystająca część próbki musi być na tyle krótka, aby przy ściskaniu nie wystąpiło jej wybočenje. Te dwa, sprzeczne ze sobą, wymagania stwarzały dodatkowe trudności w przygotowaniu próbki i wykonaniu doświadczenia. W rezultacie przy zastosowaniu tych przyrządów zakres możliwych do osiągnięcia odkształceń był bardzo ograniczony i zależał od grubości próbki.

Przedstawione w niniejszej pracy nowe rozwiązanie konstrukcji przyrządu do badania własności mechanicznych blachy przy ściskaniu wyróżnia się tym, że cała długość próbki zabezpieczona jest przed wybočeniem za pomocą bloków podpierających, które zmieniają swoją długość w miarę skracania próbki. Przyrząd ten w stosunku do wcześniejszych konstrukcji zwiększa zakres możliwych odkształceń, umożliwia badania cieńszych próbek i nie wymaga specjalnego doboru ich długości.

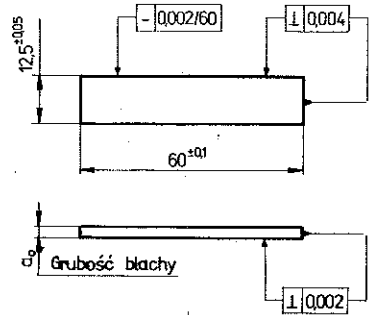
## 2. OPIS PRZYRZĄDU I METODA BADAŃ

Pojedyncze próbki (rys. 1) umieszcza się w objętej złożonej z czterech zespołów płytek 1 (rys. 2). W czasie skracania próbki płytki przesuwają się względem siebie, w rezultacie czego długość objęmy maleje. Zespół płytek osadzony jest na wałku 2, który jest zamocowany w łączniku 3. Drugi koniec płytki ma podłużne wycięcie

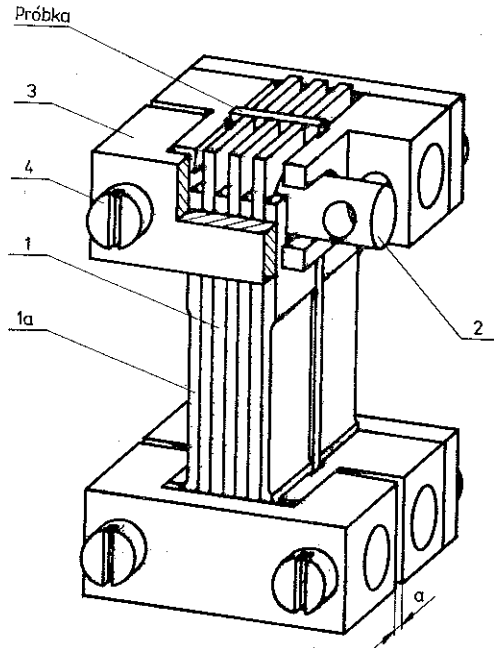
umożliwiający swobodny przesuw po przeciwnym sworzniu. Wszystkie płytki szlifowano razem do jednego wymiaru, więc przez ściśnięcie łączników za pomocą wkrętów M4 (4) można osiągnąć równomierny nacisk na całą próbkę. Przy prawidłowo dokręconych śrubach, próbka nie wybijała się pod obciążeniem oraz nie widać było żadnych śladów tarcia płytek o powierzchnię próbki. W trakcie doświadczeń stwierdzono, że najkorzystniejsze warunki podparcia istnieją, gdy siła potrzebna do skrócenia obejmy przy zamocowanej próbce wynosiła  $T=2$  do 4 kG.

Próbka z obejmą tworzy zespół, który zabezpiecza próbkę przed pofałdowaniem i nie ogranicza jej deformacji w kierunku podłużnym i poprzecznym. Jak łatwo sprawdzić, śruby dociskające obejmę mają wystarczająco małą sztywność i nie stanowią przeszkody przy spęczaniu próbki. Doświadczalnie sprawdzono, że po skróceniu próbki w przybliżeniu o 1% jej przyrost grubości odpowiadał warunkom jednoosiowego stanu naprężenia.

Łączniki 3 są tak wykonane, że odległość  $a$  (rys 2) między nimi jest zawsze równa grubości próbki, co ułatwia osiowe ustawienie całego przyrządu na maszynie wytrzymałościowej.



Rys. 1



Rys. 2

Zewnętrzne cztery płytki 1a mają boczne wcięcia, dzięki czemu próbka wystaje nieco poza objem. Umożliwia to bezpośrednie założenie na próbkę ekstensometru. Drugi sposób pomiaru odkształceń próbki polega na pomiarze przemieszczeń

powierzchni oporowych za pomocą czujników przymocowanych do stempla, wywierającego nacisk. Taki sposób pomiaru jest możliwy ze względu na równomierne (wzdłuż długości) odkształcenie próbki.

W omówionych poprzednio pracach na temat badania plastyczności blach przy ściskaniu wiele uwagi poświęcono eliminowaniu sił tarcia. W niniejszym rozwiązaniu nie stosowano żadnych smarów, a jedynie dokładnie czyszczono wszystkie powierzchnie trące się. Najpierw kontrolowano, czy do płytek obejmą i próbki nie przywarły drobne cząstki i następnie odfluszczano powierzchnie.

Na powodzenie pomiarów poważny wpływ miały tolerancje wykonania próbki, przy czym szczególnie istotna jest prostopadłość powierzchni oporowych do osi próbki. Dla osiągnięcia wymaganej dokładności (rys. 1) próbki docierano, kontrolując wymiary pod mikroskopem. Szczególną uwagę zwracano na usunięcie zanieczyszczeń z krawędzi przy płaszczyznach oporowych. Bezpośrednio przed doświadczeniem dodatkowo czyszczono krawędzie o bardzo drobny papier ścierny. Ma to istotne znaczenie ze względu na dokładność badań, drobne bowiem zanieczyszczenia na powierzchniach oporowych mogą uniemożliwić osiowe przyłożenie obciążeń.

Do badań używano specjalnego urządzenia pomocniczego do maszyny wytrzymałościowej, które ułatwiało ustawienie obejmą z próbką i przyłożenie obciążeń. W urządzeniu tym górny stempel naciskający próbkę był prowadzony w tulei gwarantującej równoległość górnej i dolnej powierzchni naciskającej próbkę.

Próbki mocowano w obejmie ustawiając jej długość nieco większą od wymiaru próbki. Pomiar siły  $T$  potrzebnej do przesunięcia obejmą przeprowadzano ściskając ją na lekkiej zrywarce wyposażonej w rewersor. Obciążanie przerywano, gdy obejmą była jeszcze w przybliżeniu 1 mm dłuższa od próbki. Następnie obejmę ustawiano w przyrządzie na maszynie wytrzymałościowej i lekkimi uderzeniami górnego stempla zsuwano obejmę do długości próbki.

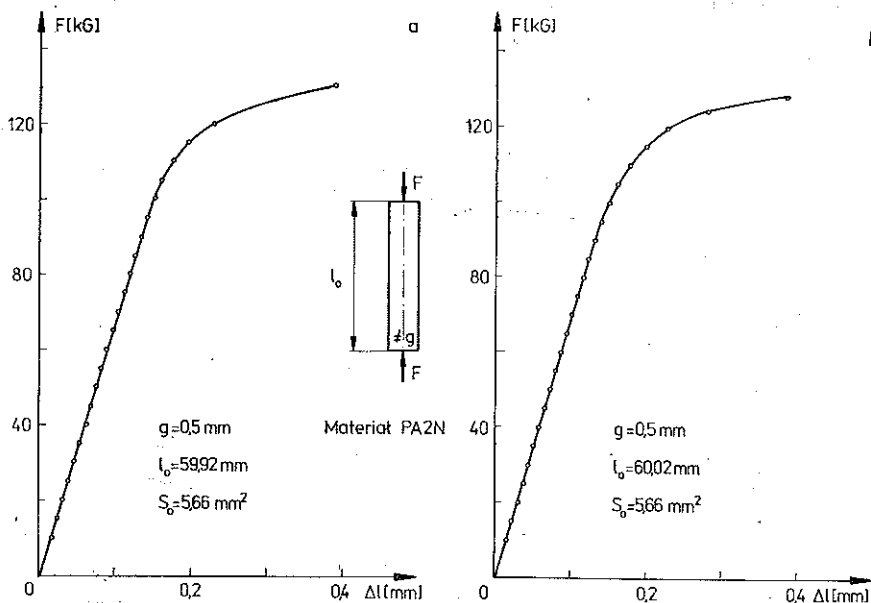
Zasadnicze obciążanie realizowano małymi przyrostami siły i rejestrowano wskazania dwu czujników zegarowych, zamocowanych do górnego stempla w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni próbki. Jeżeli różnice we wskazaniach czujników były większe niż 0,001 mm i systematycznie powiększały się ze wzrostem obciążenia, to próbkę odciążano i powtarzano operację oczyszczenia powierzchni oraz montażu i ustawienia próbki. Odciążanie dokonywano tylko wtedy, gdy nieosiowość deformacji dała się zauważyć przed osiągnięciem naprężeń równych 0,8 granicy proporcjonalności.

### 3. WYNIKI BADAŃ KONTROLNYCH

Wyniki ściskania dwóch próbek wyciętych z jednego arkusza blachy PA2N o grubości 0,5 mm przedstawiono na rys. 3. Na osi rzędnych odkładano całkowite obciążenie wskazywane przez siłomierz maszyny wytrzymałościowej, na osi odciętych odkładano skrócenie próbki. W obu przypadkach próbki obciążano do 130 kG, otrzymując odkształcenie całkowite równe 0,647% dla próbki a i 0,644% dla próbki b. Różnice w zachowaniu się tych próbek są nieznaczne. Moduły sprężystości obli-

czony z wykresów ściskania wynoszą 7150 i 7350 kG/mm<sup>2</sup> odpowiednio dla próbek a i b (różnica w stosunku do wartości średniej wynosi 2,8%).

Dla wyznaczenia umownych granic plastyczności badanego materiału odpowiadających określonej wartości trwałych odkształceń plastycznych wykorzystano zaproponowany w pracy [15] sposób przedstawienia wyników doświadczeń. Dyspo-

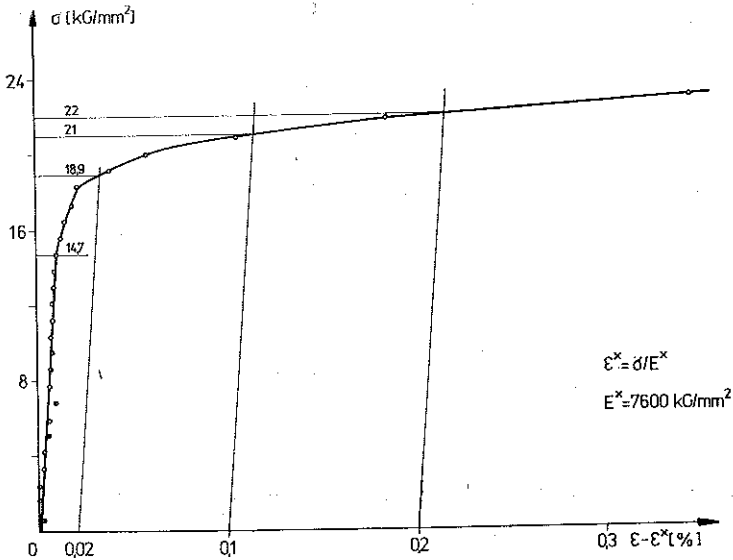


Rys. 3

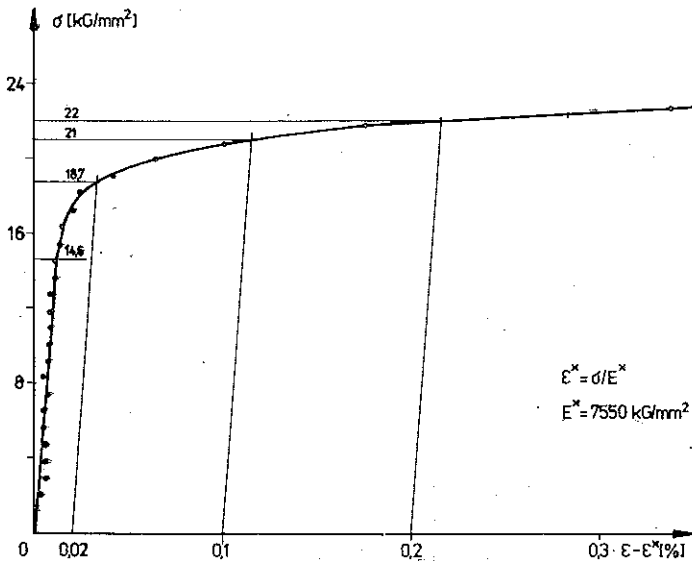
nując dokładnymi odczytami skrócenia próbki odpowiadającymi poszczególnym przyrostom siły obciążającej, możemy zbudować wykres naprężeń jako funkcji różnicy odkształceń całkowitych  $\varepsilon$  i hipotetycznych odkształceń sprężystych określonych za pomocą wzoru  $\varepsilon^* = \sigma/E^*$ . Moduł  $E^*$  przyjmujemy dowolnie jako wielkość nieco większą od spodziewanej wielkości modułu sprężystego badanego materiału. Odjęcie od całkowitych odkształceń pewnej części liniowo zależnej od naprężeń umożliwia rozciągnięcie podziałki i większe uwypuklenie odkształceń plastycznych co zwiększa dokładność odczytu granicy proporcjonalności materiału.

Transformując w ten sposób wyniki z rys. 3, otrzymano odpowiednie wykresy  $\sigma = \sigma(\varepsilon - \varepsilon^*)$  dla próbki a (rys. 4) i b (rys. 5). Odłożone na osi odciętych naprężenia obliczano jako stosunek siły obciążającej próbkę (zmniejszonej o wartość siły  $T$ ) do początkowego przekroju  $S_0$ . Niezbędną do przesunięcia względem siebie górnej i dolnej granicy obejmują, siłę  $T$  mierzono dla każdej próbki przed i po obciążeniu. Dla próby, której wyniki pokazano na rys. 3a i 4, wynosiła ona  $T=1,6$  kG, a dla wyników z rys. 3b i 5  $T=3,7$  kG. Granica proporcjonalności objawia się jako wyraźne załamanie wykresu przy naprężeniach 14,7 (próbka c) i 14,6 kG/mm<sup>2</sup> (próbka b). Z wykresów tych odczytano również umowne granice plastyczności odpowiadające trwałym odkształceniom  $\varepsilon=0,02\%$ ,  $0,1\%$ ,  $0,2\%$  otrzymując bardzo dobrą powtarzalność wyników. Odpowiednie wartości liczbowe zaznaczono na wykresach.

Dla dwóch próbek wyciętych z blachy PA2N o grubości 2 mm, zmierzone w czasie ściskania skrócenia jako funkcje siły, przedstawiono na rysunku 6. Obciążanie próbki a kontynuowano do 500 kG, otrzymując całkowite odkształcenie równe 0,89%. Dla drugiej próbki obciążenie przerwano przy wartości 480 kG, otrzymując odkształcenia 0,6%. Moduły sprężystości różniły się nieznacznie i wynosiły 6930 i 6900 kG/mm<sup>2</sup> odpowiednio dla próbki a i b. Wyniki doświadczeń przedstawiono w taki sam sposób, jak poprzednio na wykresach  $\sigma = \sigma(\varepsilon - \varepsilon^*)$ , przy czym jako moduł



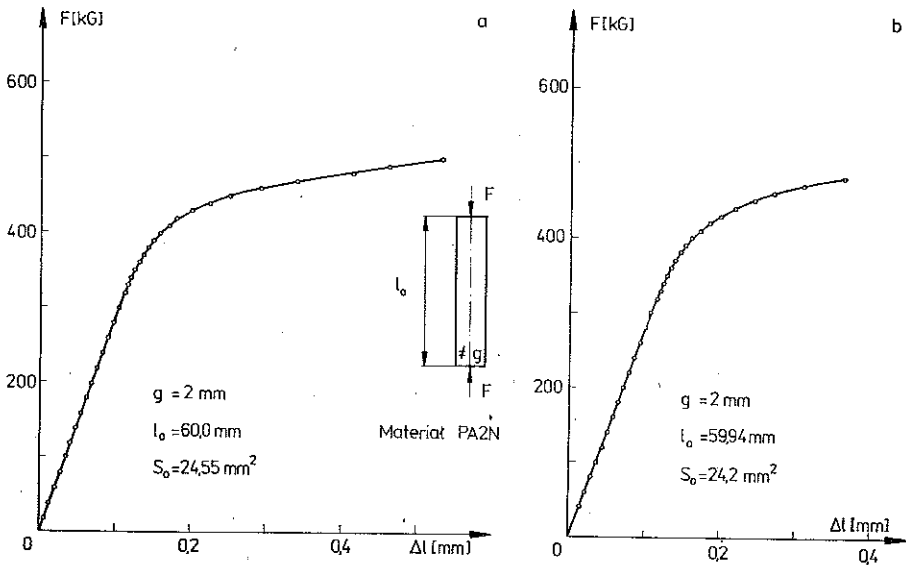
Rys. 4



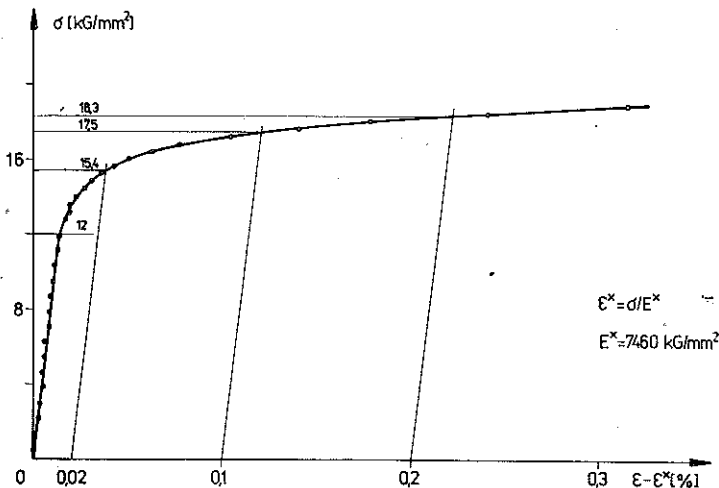
Rys. 5

odniesienia przyjęto  $E^* = 7460$  i  $E^* = 7600$  kG/mm<sup>2</sup>. Zaznaczone na obu rysunkach (7 i 8) granice proporcjonalności i plastyczności przy odkształceniach trwałych równych 0,02; 0,1 i 0,2% różnią się bardzo nieznacznie. Siły  $T$  wynosiły odpowiednio 6 kG dla próbki a i 4 kG dla próbki b (rys. 8).

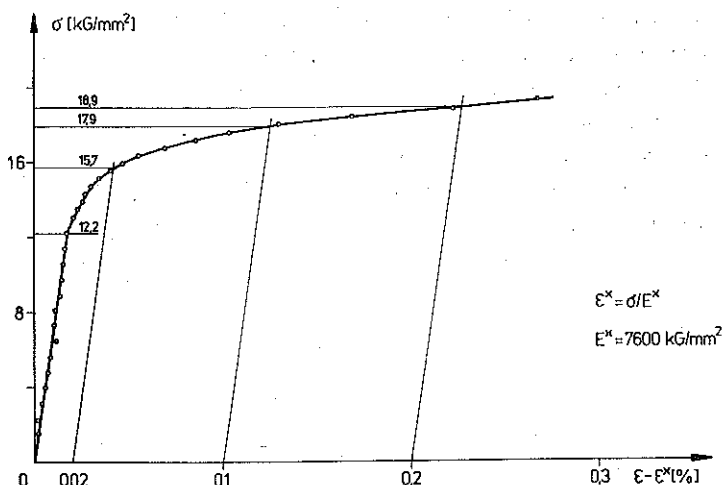
Dla próbek wyciętych z tego samego materiału, ale z arkusza o mniejszej grubości, otrzymano większe moduły sprężystości, granice proporcjonalności i odpowiednie umowne granice plastyczności. Jest to zrozumiałe, ponieważ próbki nie były poddawane dodatkowej obróbce cieplnej, a badano je w stanie dostarczonym przez hutę.



Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8

## 4: WNIOSKI

Przeprowadzone wstępne badania na próbkach o grubości 0,5 i 2 mm potwierdzają poprawność konstrukcji przyrządu zabezpieczającego próbkę przed wyobczeniem. Realizowane w przyrządzie warunki podparcia nie wprowadzają istotnego, ze względu na otrzymane rezultaty, skrępowania próbki, zapewniając jednocześnie osiągnięcie znacznych odkształceń jednorodnych.

Proponowana konstrukcja przyrządu umożliwiła badanie próbek o różnej grubości bez konieczności doświadczalnego wyznaczenia dopuszczalnej długości próbki dla danej grubości, jak to ma miejsce przy zastosowaniu przyrządów podpierających o stałej długości.

Występujące przy badaniach opory skrócenia samego przyrządu, wynikające z tarcia między płytkami podpierającymi a próbką, są łatwe do zmierzenia i uwzględnienia w obliczeniach.

Przeprowadzone badania dla większej liczby próbek w różnych warunkach (rodzaj smarowania, wstępny docisk przyrządu, warunki przeprowadzania obciążenia) pokazały, że przy przestrzeganiu opisanego w pracy postępowania uzyskuje się za pomocą tego przyrządu bardzo dobrą powtarzalność wyników.

Ze względu na prostą konstrukcję i łatwość obsługi przyrząd może być polecany do standardowych badań materiałowych przy ściskaniu próbek wyciętych z blachy. Wprawdzie w „Polskich Normach” brak jest odpowiednika normy amerykańskiej [16], zawierającej opis takich badań, ale konieczność ich przeprowadzenia wynika z praktycznych potrzeb.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. C. S. AITCHISON and L. B. TUCKERMAN, *The "pack" method for compressive tests of thin specimens of materials used in thin-wall structures*, NACA 649, 1939.
2. C. S. AITCHISON, *Extension of pack method for compressive tests*, NACA 789, 1940.



3. J. A. MILLER, *A fixture for compressive tests of thin sheet metal between lubricated steel guides*, NACA 1022, 1946.
4. D. A. PAUL, F. M. HOWELL and H. S. GRIESHABER, *Comparison of stress-strain curves obtained by single-thickness and pack methods*, NACA 819, 1941.
5. B. C. MADDEN, *A method of testing thin sheet material in compression*, J. Aero. Sci., July 1946.
6. A. A. MOORE and J. C. McDONALD, *Compression testing of magnesium alloy sheet*, Proc. ASTM, 45, 1945.
7. K. H. JACKMAN, *Improved methods for determining the compression properties of sheet metal*, Auto. Aviat. Indu. 90, 11, 1944.
8. W. RAMBERG, J. A. MILLER, *Determination and presentation of compressive stress-strain data for thin sheet metal*, J. Aero. Sci., November 1946.
9. G. WELTER, *Micro-deformation under tension and compression loads of thin aluminium alloy sheets for aircraft construction*, Proce. ASTM, 44, 1944.
10. LATOUR and S. WOLFORD, *Single-strip compression test for sheet materials*, Proce. ASTM, 45, 1945.
11. N. KOTANCHIK, W. WOODS and R. A. WEINBERGER, *Investigation of methods of supporting single-thickness specimens in a fixture for determination of compressive stress-strain curves*, NACA L5E15, 1945.
12. G. J. HEIMERL, D. E. NILES, *Column and plate compressive strengths of aircraft structural materials*, NACA 1156, 1947.
13. J. A. VAN DEN BROEK, *Evaluation of aeroplane metals*, Enge. J., July 1945.
14. P. E. SANDORFF, R. K. DILLON, *Compressive stress-strain properties of some aircraft materials*, Proce. ASTM, 46, 1946.
15. A. PHILLIPS, C. S. LIN and J. W. JUSTSSON, *An experimental investigation of yield surfaces at elevated temperatures*, Acta Mech., 14, 1972.
16. *Standard methods of compression testing of metallic materials*, ASTM E9-61.

### Резюме

## НОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ ПРИ СЖАТИИ

Работа содержит описание конструкции нового прибора для исследования кривой упрочнения при сжатии плоских образцов. Прибор состоит из ряда пластинок соединенных золотниковым образом, благодаря чему длина прибора изменяется соответственно с длиной деформированного образца. Примерно дается кривая упрочнения для сплава алюминия исследованная при применении обсуждаемого прибора.

### SUMMARY

## NEW METHOD FOR TESTING THIN SHEETS AT COMPRESSION

The paper deals with description of new apparatus for examination of the work-hardening curve at compression of plane samples. The apparatus consists of a series of plates joined movably thanks to what the length of apparatus changes proportionally to the length of deformed specimen. As an example the work-hardening curve for aluminium-alloy pretested on the new apparatus is presented.

POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 28 grudnia 1976 r.