

- 5.3.10. — ośrodki anizotropowe
5.3.14. — techniki doświadczalne
5.17.10. — obciążenia jedno-
i wieloosiowe

L. Dietrich, K. Turski, M. Waniewski
Z. Dziankowski, R. Kiryk

TECHNIKA BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI
MECHANICZNYCH MATERIAŁÓW
W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA

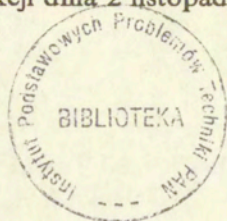
34/1994

P. 269



WARSZAWA 1994

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 2 listopada 1994 r.



56615



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 5,0 Ark. druk. 6,25
Oddano do drukarni w listopadzie 1994 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

Lect Dietrich
Karol Turski
Maciej Waniewski
Zygmunt Dziankowski
Ronuald Kiryk

Zakad Wytrzymałości Materiałów

Technika badań właściwości mechanicznych materiałów w złożonym stanie naprężenia

Streszczenie

W pracy przedstawiono technikę badań doświadczalnych przydatną do określania własności mechanicznych materiałów w złożonym stanie naprężenia. Badania te prowadzono w taki sposób aby możliwe było wyznaczenie cech sprężystych określonych dwiema stałymi sprężystości, cech plastycznego płynięcia określonych krzywą umocnienia, cech anizotropii właściwości mechanicznych określonych postacią i wartościami anizotropowych stałych materiałowych oraz ewolucji tych właściwości pod wpływem deformacji. Realizacja tak szerokiego programu w warunkach złożonego stanu naprężenia wymaga zapewnienia dużej dokładności pomiarowej, precyzyjnego i automatycznego sterowania przebiegiem obciążania próbki oraz organizacji gromadzenia i przetwarzania dużej ilości cyfrowych danych pomiarowych. Niezbędne jest więc odpowiednie oprzyrządowanie badań i przygotowanie programów komputerowych do sterowania maszyną wytrzymałościową w warunkach złożonego stanu naprężenia jak i programów komputerowych do przetwarzania zebranych wyników pomiarów i graficznego ich odwzorowania w żądanej postaci. Są to bardzo istotne elementy całej pracy, które razem z tradycyjną częścią mechaniczną takich badań, obejmującą przygotowanie próbki, jej zamocowania i obciążenia oraz sposobu pomiaru składowych naprężenia i odkształcenia, decydują o jakości badań i wartości uzyskanych wyników. Praca ta ujmuje te wszystkie aspekty badań w złożonych stanach naprężenia w warunkach płaskiego stanu naprężenia, a jej poszczególne części obejmują omówienie literatury z tego zakresu, przyjętego sposobu wykonywania badań w złożonym stanie naprężenia, programu komputerowego sterowania maszyną wytrzymałościową, programu wtórnego komputerowego przetwarzania wyników pomiarów oraz uzyskanych wyników dla kilku serii badań doświadczalnych wykonanych na próbkach rurkowych ze stopu aluminium PA6 i stali 18G2.

Lech Dietrich
Karol Turski
Maciej Waniewski
Zygmunt Dziańkowski
Romuald Kiryk

Technika badań właściwości mechanicznych materiałów w złożonym stanie naprężenia

1. Wstęp

1.1 Uwagi ogólne.

Badania właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych są prowadzone od dawna w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Prezentowane też były wielokrotnie zestawienia i przeglądy uzyskanych wyników, przy czym w co najmniej trzech takich opracowaniach dokonano bardzo szczegółowej oceny i porównania różnych prac [1, 2, 3]. Wspólnym elementem charakterystycznym dla omawianych tam prac i całego szeregu prac przeprowadzonych w ostatnich latach w warunkach złożonego stanu naprężenia jest ich ukierunkowanie na badania plastyczności metali i przedstawienie wyników doświadczeń w postaci przekrojów powierzchni plastyczności płaszczyznami związanymi ze stanem naprężenia w próbce. Badania takie są często ściśle związane z określonym opisem teoretycznym tak, że uzyskane wyniki stanowią podstawę weryfikacji teorii, ale dostarczają ograniczonych informacji o właściwościach mechanicznych metali. Uwzględniając, że wyznaczenie granicy plastyczności rzeczywistego materiału zależy od dokładności pomiarów i różnie przyjmowanej definicji uplastycznienia uzyskuje się w rezultacie wyniki nieporównywalne ze sobą i to nie tylko pod względem ilościowym, ale również jakościowym, np. pod względem kształtu i położenia rozpatrywanego przekroju powierzchni plastyczności.

Celem podjętych badań doświadczalnych jest ocena właściwości mechanicznych metali w warunkach złożonego stanu naprężenia. Badania te prowadzono w taki sposób aby możliwe było wyznaczenie cech sprężystych określonych dwiema stałymi sprężystości, cech plastycznego płynięcia określonych krzywą umocnienia, cech anizotropii właściwości mechanicznych określonych postacią i wartościami anizotropowych stałych materiałowych oraz ewolucji tych właściwości pod wpływem deformacji. Realizacja tak szerokiego programu w warunkach złożonego stanu naprężenia wymaga zapewnienia dużej dokładności pomiarowej, precyzyjnego i automatycznego sterowania przebiegiem obciążania próbki oraz organizacji gromadzenia i przetwarzania dużej ilości cyfrowych danych pomiarowych. Niezbędne jest więc odpowiednie oprzyrządowanie badań i przygotowanie programów komputerowych do sterowania maszyną wytrzymałościową w warunkach złożonego stanu naprężenia jak i programów komputerowych do przetwarzania zebranych wyników pomiarów i graficznego ich odwzorowania w żądanej postaci. Są to bardzo istotne elementy całej pracy, które razem z tradycyjną częścią mechaniczną takich badań, obejmującą przygotowanie próbki, jej zamocowania i obciążenia oraz sposobu pomiaru składowych naprężenia i odkształcenia, decydują o jakości badań i wartości uzyskanych wyników. Praca ta ujmuje te wszystkie aspekty badań w złożonych stanach naprężenia w warunkach płaskiego stanu naprężenia, a jej poszczególne części obejmują omówienie literatury z tego zakresu, przyjętego sposobu wykonywania badań w złożonym stanie naprężenia, programu komputerowego sterowania maszyną wytrzymałościową, programu wtórego komputerowego przetwarzania wyników pomiarów oraz uzyskanych wyników dla kilku serii badań doświadczalnych wykonanych na próbkach rurkowych ze stopu aluminium PA6 i stali 18G2.

1.2 Wyniki dotychczasowych badań w warunkach złożonego stanu naprężenia

1.2.1 Wprowadzenie.

Niedostateczna znajomość plastycznego zachowania materiałów ogranicza przydatność komputerowej analizy naprężeń. W większości analiz stosowano tylko najprostsze dane materiałowe oparte na klasycznej kontynuualnej teorii plastyczności i małej ilości danych doświadczalnych albo w ogóle bez doświadczeń. Mimo rozwoju pewnych zaawansowanych teorii plastycznych deformacji (dyslokacyjnych, poślizgowych, termodynamicznych), fenomenologiczna teoria plastyczności pozostaje jedynym teoretycznym sformułowaniem problemu, szeroko używanym w analizie naprężeń. Teoria ta stanowiła też podstawę badań eksperymentalnych w zakresie jej czterech założeń podstawowych:

- stałej objętości materiału w czasie plastycznego płynięcia,
- istnienia powierzchni plastyczności określającej początek płynięcia materiału przy różnych stanach naprężenia,
- reguły wzmocnienia określającej zmiany powierzchni plastyczności przy plastycznych odkształceniach,
- stowarzyszonego prawa płynięcia wiążącego naprężenia z przyrostem odkształceń plastycznych w czasie płynięcia materiału.

Badania w tak dużym zakresie zagadnień najczęściej wykonywane są na próbkach rurkowych obciążanych osiowo, skręcanych i poddawanych działaniu ciśnienia zewnętrznego i wewnętrznego. Z tych badań otrzymuje się dane o przebiegu $\sigma(\varepsilon)$ bardziej wiarygodne niż z innych badań w złożonym stanie naprężenia przede wszystkim ze względu na spełnienie warunku jednorodności stanu naprężenia w całej, pomiarowej części próbki.

1.2.2 Granica plastyczności materiału.

Wielkość plastycznej deformacji przyjmowana do określenia początku płynięcia sięga od zera do 0,2%. Wielu autorów prac wskazywało, że plastyczne zachowanie materiału jest bardzo wrażliwe nawet na małą wielkość plastycznego

odkształcenia i dlatego dowolność tej definicji może bardzo wpływać na osiągnięte rezultaty [4]. Ogólnie wszyscy są zgodni, że anizotropia rośnie ze zmniejszaniem się odkształcenia uplastyczniającego, natomiast przy $\varepsilon = 0,2\%$ własności plastyczne są niemal izotropowe.

Z fizycznego punktu widzenia tylko początek plastycznego płynięcia wydaje się uzasadniony jako granica plastyczności, ale ta wielkość jest trudna do zmierzenia. Wiele materiałów po odkształceniu plastycznym wykazuje niesprężyste zachowanie widoczne w postaci pętli histerezy, które utrudnia pomiar granicy proporcjonalności. Dlatego do wyznaczania umownej granicy plastyczności często stosowano małe odkształcenie trwałe ($1 \div 10 \cdot 10^{-6}$) mierzone po odciążeniu, aby przekonać się, że jest to rzeczywiście odkształcenie plastyczne [5].

Definicja granicy plastyczności jako wartości naprężenia odpowiadającego odkształceniu plastycznemu równemu $0,2\%$, jak to zalecają normy w wielu krajach, wymaga stosowania jednej próbki na punkt ponieważ odkształcenie trwałe może wpływać na następne próby. Nie potwierdziły tego prace [6, 7] dla offsetu $0,02\%$ oraz $0,05\%$. Jeżeli materiał jest początkowo anizotropowy, taka definicja uplastycznienia stwarza kłopoty ze względu na definicję efektywnego odkształcenia plastycznego, dla określenia której trzeba znać sam charakter anizotropii [8].

1.2.3. Początkowe obciążanie i odciążanie

Początkowe obciążanie i odciążanie przyjmuje się w teorii jako liniowe do granicy plastyczności. W rzeczywistości te procesy mogą przebiegać krzywoliniowo, tworząc pętlę histerezy, a odkształcenie plastyczne powiększa ten efekt. Pierwsze odchylenie od linii prostej nie powoduje trwałego odkształcenia ale jest odwracalne albo niesprężyste. Należy wspomnieć, że histereza zmienia się zauważalnie, jeżeli kierunek obciążania odchyła się od kierunku wstępnego naprężenia.

Odciążanie po deformacji plastycznej może być początkowo nieliniowe [9,7,8] lub sprężyste [8,10,11]. W dwu wczesnych pracach [10,11] pokazano sprężyste obciążanie i odciążanie.

1.2.4 Klasyfikacja badań na próbkach rurkowych.

Istnieje kilka artykułów przeglądowych [1,2,3,12,13,28], które ujmują całość problemów pojawiających się przy badaniach w złożonym stanie naprężenia oraz wyliczają chronologicznie publikacje i streszczają ich osiągnięcia. Przy takim ujęciu niewidoczne są prace niezwykle ważne bo pokazujące możliwość matematycznego opisanie wyników doświadczeń, w których badanie powierzchni plastyczności wzdłuż wielu dróg obciążenia odgrywa decydującą rolę. Wybrane prace zajmujące się badaniami doświadczalnymi powierzchni plastyczności pokazano w tabeli I.

Tabela I

Nr lit.	rok	$\epsilon_p \cdot 10^{-6}$	pomiar odkształceń	naprężenia	wykresy $\sigma(\epsilon)$	stero-wanie	kształt próbki	materiał próbki	ilość próbek
14	1958	5	ekstens. lusterkowy	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	brak	$\dot{\sigma}$	rurki	nikiel	7
10	1958	5 do 360	ekstens. indukcyjny	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	dużo	$\dot{\epsilon}$	rurki	24S-T-4	25
11	1961	0	ekstens. lusterkowy	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	dużo	$\dot{\sigma}$	rurki	24S-T-4 218M 226M 18S	9
15	1962	10 do 15	dwie rozety	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	dużo	$\dot{\sigma}$	rurki	6061-T-6	1
16	1963	100 do 5000	ekstens. mechaniczny	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	dużo	$\dot{\sigma}$	plaskie rozciągane	stop Al	7
17	1965	0 do 5000	tensometry 2+2	σ_z, σ_θ	brak	$\dot{\sigma}$	rurki	mosiądz	7
18	1968	200	dwie rozety	σ_x, σ_y	dużo	$\dot{\sigma}$	próbki krzyżowe	mosiądz	
19	1970	20 do 200	rozeta	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	brak	$\dot{\sigma}$	rurki	1100-F	6
9	1972	3	dwie rozety	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	mało	$\dot{\sigma}$	rurki	1100-0	1
21	1973	0 do 5000	tensometry 2 do ϵ_z	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	dużo	$\dot{\sigma}$	plaskie rozciągane	PA3	7
6	1974	200	dwie rozety	$\sigma_z, \pm \sigma_z, \sigma_{z\theta}$	mało	$\dot{\sigma}$	rurki	mosiądz	1
22	1975	10 do 50	ekstens. indukcyjny	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	mało	$\dot{\sigma}, \dot{\epsilon}$	rurki	SAE-1017	1
12	1975	10	dwie rozety	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	mało	$\dot{\sigma}$	rurki	stal 304	1
23	1988	50	dwie rozety	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	mało	$\dot{\epsilon}$	rurki	stal 304	1
7	1992	500	ekstens. indukcyjny	$\sigma_z, \sigma_{z\theta}$	mało	$\dot{\sigma}$	rurki	18G2A	1

Kolejne kolumny zawierają:

1. numer wg spisu literatury,
2. rok opublikowania artykułu,
3. wielkość odkształcenia plastycznego przyjmowanego dla określenia granicy plastyczności,
4. rodzaj czujnika używanego do pomiaru odkształceń,
5. składowe naprężeń występujących w próbce,
6. informacja o wykresach $\sigma(\epsilon)$: dużo-kilka wyraźnych wykresów, mało-wykresy nieprzejrzyste,
7. parametr sterujący przebiegiem obciążenia,
8. kształt próbki,
9. materiał próbki,
10. ilość próbek użyta do badania jednej powierzchni plastyczności.

W tabeli I zamieszczono tylko prace wyróżniające się pełnym opisaniem wyników doświadczeń albo tym, że były to prace nowatorskie w tej dziedzinie. Aby wykonać to zadanie, podjęto próbę klasyfikacji prac wybierając je według wielkości offsetu i pokazania ewolucji całego przekroju powierzchni plastyczności przy prostych i złożonych drogach obciążania na płaszczyźnie naprężeń.

Do drugiej grupy należą prace pokazujące fragmentarycznie zachowanie części powierzchni, na przykład w jednej ćwiartce płaszczyzny naprężeń ale udowadniające ważny efekt fizyczny. W trzeciej grupie znajdują się publikacje pokazujące fragmentarycznie ewolucję powierzchni plastyczności, ponieważ stanowią dane niepowtarzalne i niekompletne, są z reguły nie cytowane w niniejszej pracy. Opisanie plastyczności metali wymaga poznania ich zachowania w złożonym stanie naprężenia, a więc przede wszystkim początkowej powierzchni plastyczności oraz kolejnych powierzchni po odkształceniach wzdłuż proporcjonalnych i nieproporcjonalnych dróg naprężenia. Ten problem od momentu pojawienia się podejmowany jest wciąż w wielu pracach. Tym niemniej jednak brak jest jednolitych, ogólnie akceptowanych zasad wyznaczania powierzchni plastyczności ze względu

na różne materiały poddawane badaniom, różną stosowaną aparaturę i jej niejednakową dokładność.

Badane jest również stowarzyszone prawo płynięcia, a wyniki z reguły pokazują prostopadłość wektora prędkości odkształcenia do powierzchni plastyczności. Można stąd wysnuć wniosek, że stowarzyszone prawo płynięcia jest niewrażliwe na stan materiału i jego rodzaj, natomiast powierzchnia plastyczności i jej reguła wzmocnienia muszą być badane dla każdego materiału i specyficznych dróg obciążania. Intensywne badania powierzchni plastyczności obejmują okres ostatnich czterdziestu lat. W tym czasie pojawiły się tylko trzy prace dające podstawę do stworzenia opisu ewolucji powierzchni plastyczności przy proporcjonalnych i nieproporcjonalnych drogach naprężenia:

- [9] Phillips, Tang, rok 1972 (USA),
- [6] Shiratori, Ikegami, Kaneko, rok 1974 (Japonia),
- [14] Ishikawa, Sasaki, rok 1988 (Japonia).

Wymienione trzy prace mają jedną wspólną cechę: cały cykl doświadczenia przebiegał na jednej próbce. Praca Phillipsa i Tanga wykonana była na czystym aluminium, materiale bardzo miękkim. Dopuszczano odkształcenie trwale $3 \cdot 10^{-6}$ przy każdym pomiarze granicy plastyczności, najmniejszą wartość spośród stosowanych we wszystkich tego typu badań, dlatego mimo miękkiego materiału, można było wykonać te pomiary przy użyciu jednej próbki.

Dwie następne prace wykonane na mosiądzu dla umownej granicy plastyczności odpowiadającej odkształceniu trwałemu $\epsilon = 200 \cdot 10^{-6}$ oraz stali nierdzewnej dla umownej granicy plastyczności odpowiadającej odkształceniu trwałemu ($\epsilon = 50 \cdot 10^{-6}$) oparte są na założeniu, że dla tak dużego odkształcenia plastycznego staje się mało widoczny wpływ pomiaru położenia poprzednich punktów. Ten efekt może być związany ze zjawiskiem zapominania anizotropii plastycznej dla wystarczająco dużego offsetu. Wzrost wartości offsetu powinien prowadzić do izotropowej powierzchni plastyczności. Taki efekt wystąpił dla

$\varepsilon = 50 \cdot 10^{-6}$ [14], ale nie było go dla większych odkształceń: $200 \cdot 10^{-6}$ [6] oraz $500 \cdot 10^{-6}$ [7].

1.2.5 Chronologiczny opis doświadczeń.

Prace [10,14] wymienione w tabeli I na pierwszych pozycjach świadczyły o ponownym zainteresowaniu badaniami powierzchni plastyczności po plastycznym odkształceniu. Prace [10,11,15] wyróżniały się tym, że podano wyraźnie narysowane przykłady wykresów $\sigma(\varepsilon)$ pozwalające ocenić początek płynięcia, a ponadto praca [15] była pierwszą, w której wykonano duży cykl badań na jednej próbce.

Opracowano [16] nową zasadę badań powierzchni plastyczności blach i wykonano doświadczenia przez rozciąganie próbek wyciętych z blachy pod różnymi kątami. Była to ostatnia praca z cyklu artykułów podających wiele wykresów $\sigma(\varepsilon)$ otrzymanych z badań, a zatem umożliwiającą czytelnikowi ocenę wyznaczenia powierzchni plastyczności. Po raz pierwszy porównano [17] powierzchnie plastyczności przy proporcjonalnych i łamanych drogach naprężenia kończących się w tym samym punkcie. Prace [10,11,14,15,17] pokazywały powierzchnie plastyczności tylko w jednej ćwiartce płaszczyzny naprężeń. Praca [16] pokazywała przecięcie powierzchni plastyczności dla płaskiego stanu naprężenia przez powierzchnię stożkową dla dodatnich wartości σ_x, σ_y i jednego kierunku σ_{z0} .

Doświadczenia na płaskich próbkach krzyżowych [18] obciążanych przy prostych i łamanych drogach obciążania pokazały, że wyraźne naroże pojawia się tylko po plastycznej deformacji przy proporcjonalnym obciążaniu w złożonym stanie naprężenia. Pierwsze pełne powierzchnie plastyczności pokazano w pracach [19,20] ale znów na kilku próbkach. Prace [17,19,20] już nie zawierają wykresów $\sigma(\varepsilon)$ w zakresie sprężystym tylko kilka kolejnych powierzchni dla różnych wielkości ε_p .

Po raz pierwszy całe powierzchnie dla proporcjonalnych i nieproporcjonalnych dróg naprężenia pokazano w pracy [9], którą wykonano na jednej próbce, co było cechą pozostałych prac doświadczalnych na rurkach pokazanych w tabeli I.

Praca [21] pokazuje warunki wystąpienia efektu zapominania wstępnej deformacji plastycznej na płaskich próbkach wycinanych z blachy.

Największy zakres dodatnich i ujemnych obciążeń osiowych, obwodowych i skręcających zastosowano do badania mosiądzu [6]. Uogólniono wyniki i opracowano opis matematyczny ewolucji powierzchni plastyczności.

Praca [23] jest pierwszą, w której pokazano możliwość znalezienia eliptycznej powierzchni plastyczności o niezmiennych wymiarach, która może się obracać i przemieszczać w przestrzeni naprężeń. Podano hipotezę wzmocnienia.

W pracy [7] wykonano badania na jednej próbce i pokazano zgodność uzyskanych wyników z wynikami dla wielu próbek, co dotychczas było tylko czasem wzmiankowane. Zwraca uwagę duża wartość offsetu ($500 \cdot 10^{-6}$) mogąca być przyczyną zapominania wpływu odkształcenia plastycznego użytego do pomiaru poprzedniego punktu [21].

1.2.6. Wnioski.

- Początkowo wiele uwagi poświęcano badaniom powierzchni plastyczności metali kolorowych i ich stopów wykonując doświadczenia na wielu próbkach. W większości wykonywano badania na jednej próbce obciążanej kolejno różnymi stanami naprężenia, ale oceniano zwykle bez szczegółowego porównania wyników, że jest to mniej dokładne od badań na wielu próbkach.
- Obecnie rozwój badań poszedł w kierunku długich programów obciążeń złożonych wykonywanych na jednej próbce rurkowej. Znaczna część takich badań wykonywana jest na toczonych próbkach stalowych. Możliwość prowadzenia badania na jednej próbce została ostatnio udokumentowana tylko dla dużej wielkości odkształcenia trwałego przyjętego do określenia granicy plastyczności stali. Mimo rosnącej dokładności pomiarów zaczyna się stosować duże offsety zaniedbując wczesne drobiazgowo analizy zakresu sprężystego. Zwraca uwagę dbałość o przestrzeganie stałej prędkości odkształcenia, której sterowanie zastąpiło powszechnie używane skokowe obciążanie.

Doświadczenia na próbkach płaskich oraz obciążanie rurek przez siłę osiową i ciśnienie wewnętrzne nie pokazują całego obwodu powierzchni plastyczności, który widać przy badaniach na próbkach skręcanych i naprężanych osiowo. Dlatego ten schemat obciążania znalazł najszersze zastosowanie i dostarczył najwięcej precyzyjnych informacji o zachowaniu powierzchni plastyczności.

2. Automatyzacja badań właściwości wytrzymałościowych materiałów konstrukcyjnych

2.1 Wprowadzenie.

Rozwój współczesnych badań wytrzymałościowych związany jest głównie z doskonaleniem mikroprocesorowego sterowania wieloparametrowych, nieliniowych przebiegów doświadczalnych i ciągłym podnoszeniem dokładności pomiarów dynamicznych niezbędnych do sterowania on-line, w układzie pętli sprzężenia zwrotnego jak i do dalszego przetwarzania wyników pomiarów.

Prowadzone w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN badania właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w warunkach złożonego stanu naprężenia wymagające zapewnienia żądanej korelacji pomiędzy składowymi stanu naprężenia bądź odkształcenia przy silnie nieliniowej odpowiedzi materiału i wynikającej często konieczności sterowania przebiegiem plastycznych części składowych odkształceń stanowią przykład automatyzacji przebiegu doświadczalnego, która nie tylko wprowadza ulepszenie sposobu prowadzenia badań, ale w ogóle umożliwia ich wykonanie. Urządzenie wykonawcze, którym w tym przypadku jest wieloosiowa maszyna wytrzymałościowa *Instron 1343*, jak pokazano na załączonym schemacie (rys.1), jest połączone za pośrednictwem mikroprocesorowego sprzęgu z komputerem zapewniającym akwizycję wielkości sterowanych, ich obróbkę on-line w zakresie wymaganym do sterowania i sterowanie według wprowadzonego wcześniej programu. Z urządzeniem wykonawczym sprzęgniety jest dodatkowy układ biernej akwizycji innych istotnych wielkości, które

nie są wykorzystywane do sterowania. System ten jest sprzęgniety za pośrednictwem sieci komputerowej z zespołem stacji roboczej i minikomputerów PC wykorzystywanych do przetwarzania danych doświadczalnych po zakończeniu badań.

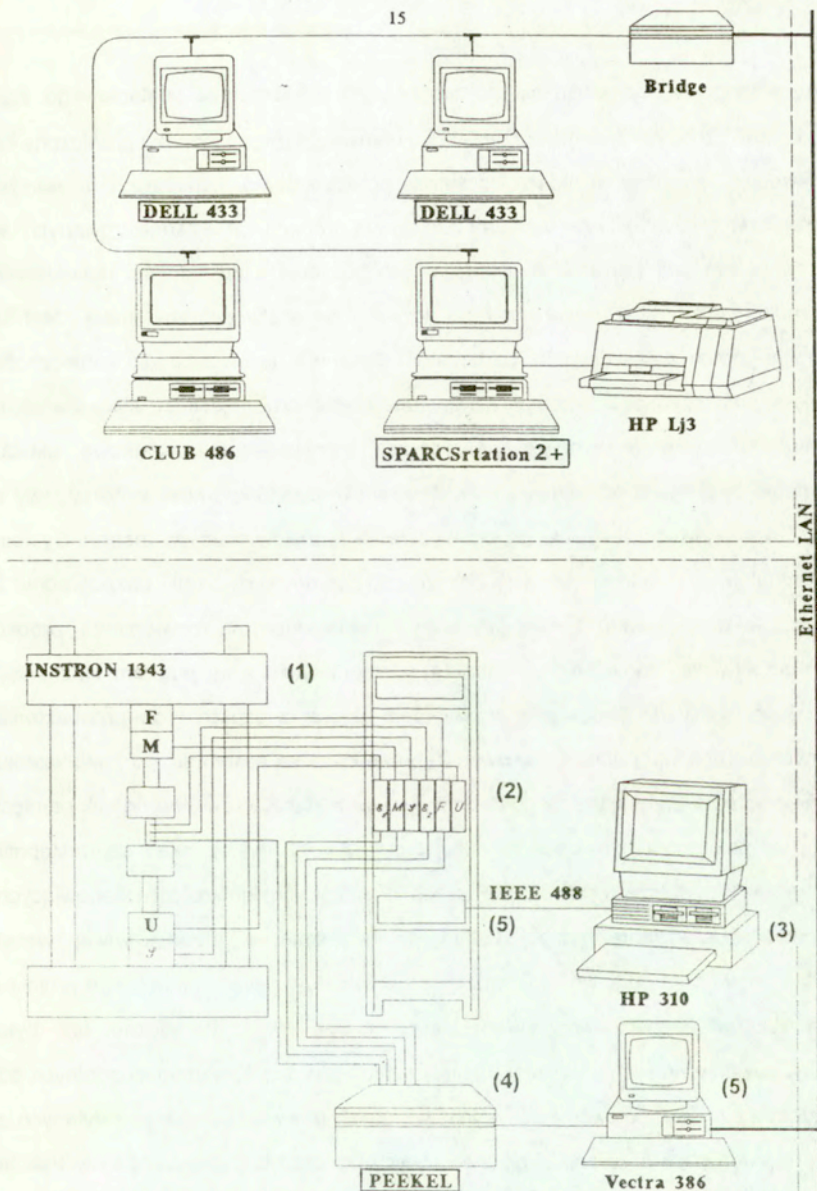
Jakość wykonywanych badań zależy od trzech wzajemnie połączonych, głównych czynników:

- wyposażenia sprzętowego w zakresie pomiarowym, wykonawczym i komputerowym,
- oprogramowania sterującego,
- oprogramowania przetwarzającego wyniki doświadczalne,

a ograniczenia lub wady jednego z tych czynników stanowią ograniczenie całego systemu.

2.2 Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej *Instron 1343* umożliwiającej obciążanie próbek jednocześnie działającą siłą osiową i momentem skręcającym. Pełny schemat stanowiska badawczego obejmującego maszynę wytrzymałościową, komputerowy układ sterowania, komputerowy układ akwizycji danych i stanowiska przetwarzania wyników doświadczeń przedstawiono na rys.1. Podstawowym elementem całego stanowiska jest maszyna wytrzymałościowa *Instron 1343 (1)* przystosowana do obciążania próbek rurkowych rozciągającą lub ściskającą siłą osiową F i momentem skręcającym M działającym w dwóch przeciwnych kierunkach wywołujących w próbce odpowiednio dodatnie lub ujemne naprężenia ścinające. Te dwa niezależne siłowniki hydrauliczne odpowiednio do ściskania lub rozciągania próbki i do jej dwukierunkowego skręcania są sterowane przy pomocy automatycznego układu sterowania wyposażonego w komputer *Hewlett-Packard 310 (3)*. Komputer *HP310 (3)* służy do sterowania przebiegiem doświadczenia i do zbierania wyników pomiarów z określoną częstotliwością próbkowania dla czterech zmiennych: siły osiowej F , momentu



rys.1. Schemat stanowiska do badań charakterystyk materiałowych w warunkach złożonego stanu naprężenia obejmujący układ wykonawczy, układ sterowania komputerowego, układ akwizycji danych pomiarowych i układ ich wtórnego przetwarzania.

skręcającego M , odkształcenia osiowego ϵ_{zz} i odkształcenia postaciowego $\epsilon_{z\theta}$. Pojemność buforów pamięci sprzęgu komputerowego (5) jest jednak ograniczona co powoduje ograniczenie ilości odczytów poszczególnych zmiennych i stanowi ograniczenie szybkości obciążania i odciążania próbki. Liczba zarejestrowanych w technice cyfrowej punktów doświadczalnych decyduje o dokładności odtworzenia charakterystyki materiałowej i z tego względu nie może być zbyt mała. Jest to sprawa istotna zwłaszcza przy badaniach cyklicznych, gdzie zachodzi konieczność zwiększenia szybkości przebiegu cyklu obciążania oraz rejestracji kilkudziesięciu cykli. Problem ten rozwiązano poprzez zainstalowanie dodatkowe układu komputerowej rejestracji danych firmy *Peekel* (4), do którego kierowano sygnały z wyjść analogowych zespołów (2) przetwarzania sygnałów maszyny *Instron*. System ten umożliwiał również rejestrację odkształceń obwodowych próbki bezpośrednio z półmostkowego układu tensometrycznego naklejonego na powierzchni próbki. System akwizycji danych firmy *Peekel* (4) sprzęgnięty jest z komputerem *Vectra 386* (5), który służy do sterowania przebiegiem zbierania danych i do gromadzenia danych na nośniku pamięci masowej. Zebrane dane są następnie, po zakończeniu doświadczenia przesyłane za pośrednictwem sieci komputerowej na nośnik pamięci o dużej pojemności do stacji roboczej typu *Sparc 2* (rys.1), skąd są następnie pobierane do dalszej obróbki na trzech dodatkowych terminalach stanowiących wspólne odgałęzienie sieci komputerowej. Układ w przedstawowej wersji rozbudowywano stopniowo, a urządzenia zakupione w ramach niniejszego projektu badawczego zaznaczono czterema ramkami na rys.1. Konieczne też było zainstalowanie nowych nośników pamięci masowej o dużej pojemności zdolnych do przechowywania źródłowej wersji wyników danych doświadczalnych przesyłanych z laboratorium jak i kilku wersji przetworzonych dla różnych, ulepszonych w trakcie prowadzenia prac programów obróbki danych doświadczalnych. Zestaw taki umożliwia niezależną pracę urządzeń przeznaczonych do sterowania i rejestracji danych doświadczalnych oraz do wtórego przetwarzania tych danych po zakończeniu doświadczenia na kilku terminalach, które mają dostęp do wspólnych

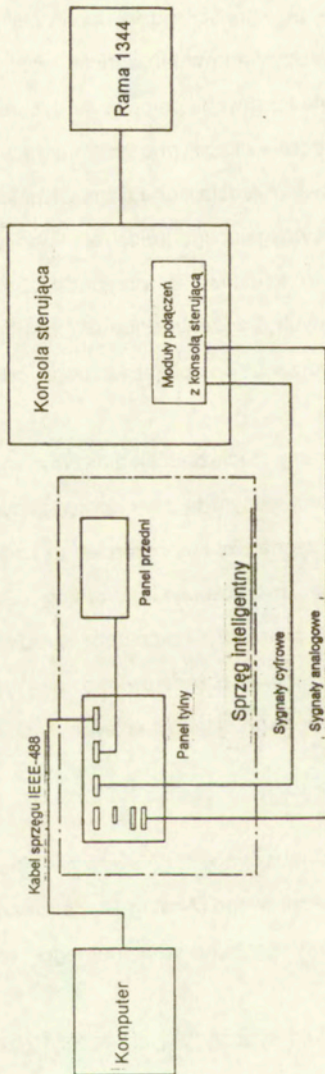
nośników pamięci masowej o dużej pojemności, gdzie uprzednio przesłano wyniki danej serii badań doświadczalnych. Uzyskana w ten sposób możliwość równoległej obróbki różnych serii wyników doświadczalnych kompensuje dysproporcje pomiędzy czasem trwania doświadczenia i znacznie dłuższym czasem przetwarzania wyników doświadczeń. Wyposażenie sprzętowe przedstawione na rys.1 umożliwiło realizację zaplanowanego programu badań wymagającego rejestracji danych pomiarowych jednocześnie dla co najmniej pięciu kanałów. W przypadku badań cyklicznych źródłowy zbiór danych doświadczalnych dla jednego kanału zawierał około 20 tys. liczb, co zapewniło możliwość odtworzenia przebiegu każdego cyklu z wymaganą dokładnością.

Komputer sterujący pracą ramy obciążającej maszyny wytrzymałościowej połączony jest kartą *IEEE 488* z inteligentnym łączem sprzęgającym (5). Łącze to stanowi przejście między cyfrowymi sygnałami komputerowego kodu sterującego a wykonawczymi, analogowymi sygnałami układów płyt kontrolerów. Schemat blokowy połączeń ramy obciążającej, konsoli sterującej, komputera sterującego i sprzęgu inteligentnego maszyny wytrzymałościowej przedstawiono na rys.2. Łącze (5) stanowi najistotniejszą część komputerowego układu sterowania i składa się z trzech zasadniczych elementów:

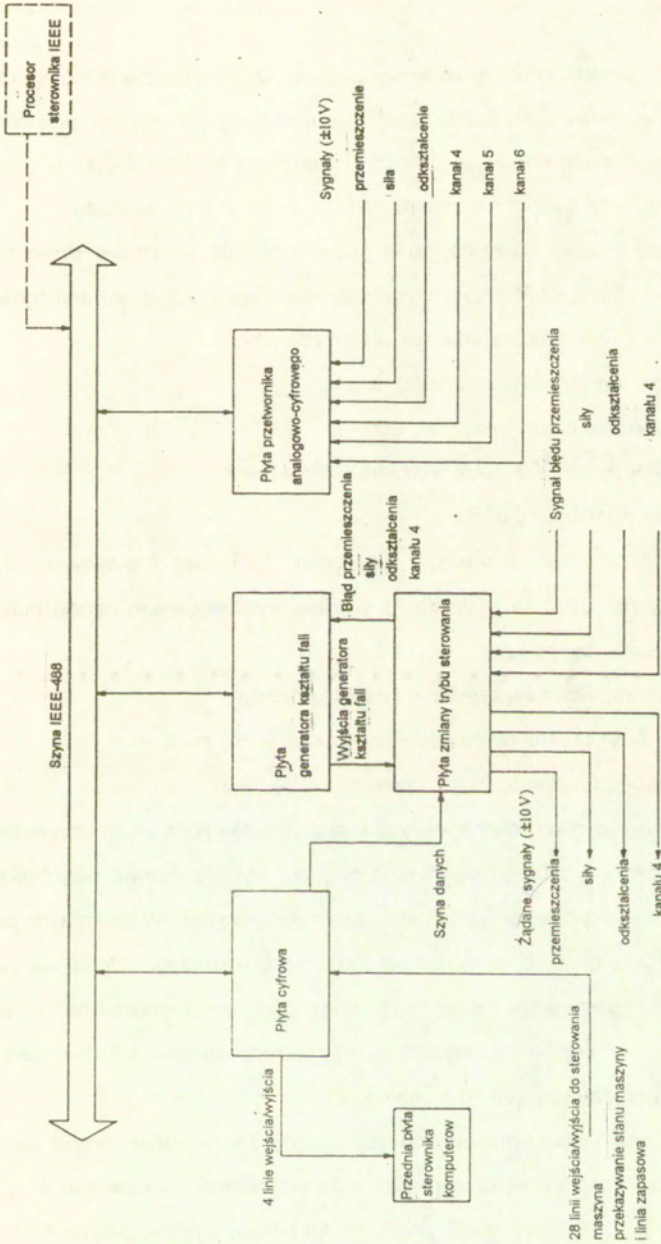
- - płyty cyfrowej (Digital Board)
- - płyty generatorów sygnałów wymuszających (Waveform Generator Board)
- - płyty przetwornika analogowo-cyfrowego (Analog-Digital Board)

Uproszczony schemat blokowy sprzęgu inteligentnego wraz z układem połączeń przedstawiono na rys. (3).

Płyta cyfrowa ogólnie kontroluje sygnały wyjściowe płyt generatorów oraz bierze udział w przetwarzaniu i przesyłaniu sygnałów między poszczególnymi elementami układu sprzęgającego. Posiada 32 linie wejścia oraz 32 linie wyjścia łączące środowisko zewnętrznych łącz, głównie konsoli sterowniczej maszyny.



rys.2. Schemat blokowy połączeń układu wykonawczego maszyny *Instron1343* z układem sterującym połączonym za pośrednictwem mikroprocesorowego sprzęgu z komputerem.



rys3. Schemat blokowy sprzęgu mikroprocesorowego maszyny wytrzymałościowej *Instron 1343*.

Płyta generatorów sygnałów wymuszających (niezależne przebiegi dla dwu osi tj. rozciągania i skręcania) definiuje przebiegi: trójkątne, prostokątne i sinusoidalne. Przedstawione są one jako skończona liczba 1/4 cykli o określonej częstotliwości, amplitudzie, średnim poziomie cyklu oraz punkcie startu.

Średni poziom oraz amplitudę sygnału określa 16 bitowe słowo co daje rozdzielczość równą 65536 dyskretnych stanów ciągłego sygnału analogowego z zakresu ± 10 V. Zakres częstotliwości dla przebiegów:

- trójkątnych min 10^{-9} Hz, max. 200 Hz
- prostokątnych min. 10^{-9} Hz, max. 200 Hz
- sinusoidalnych min. 10^{-5} Hz, max. 1000 Hz

z ustaloną dokładnością 0,015%.

Minimalny czas przebiegu 1/4 cyklu 1,25 ms, maksymalny $2,5 \cdot 10^6$ (zdefiniowany na 1/2 cyklu) Przebieg sygnału wymuszającego ustalić można na cztery różne sposoby, podając:

- średni poziom, kierunek, prędkość i punkt końcowy
- punkt startowy, częstotliwość, punkt końcowy i liczbę cykli
- średni poziom, amplitudę, częstotliwość i liczbę cykli
- tzw. przebieg losowy, zdefiniowany jako ciąg punktów końcowych i częstotliwości

W trakcie przebiegu dowolnego sygnału płyta umożliwia natychmiastową zmianę średniego poziomu, amplitudy oraz częstotliwości. W dowolnym punkcie możliwe jest zatrzymanie a następnie wznowienie przebiegu. Przebiegi na obu generatorach (rozciągania, skręcania) mogą być synchronizowane w czasie. Wykorzystując istniejące na płycie bufory pamięci można składać całe bloki pojedynczych przebiegów (do 20 przebiegów).

Płyta analogowo-cyfrowa pozwala na jednoczesne monitorowanie sygnałów z kanałów z możliwością przesunięcia zera oraz skalowaniem dla zakresu $4x$, $16x$, $64x$. Rozdzielczość 12 bitowego przetwornika określa cyfrowy zakres $47 \div 4047$ rozpięty na ciągłym analogowym sygnale ± 10 V. Przesunięcie zera możliwe jest w całym zakresie cyfrowym tj. $47 \div 4047$.

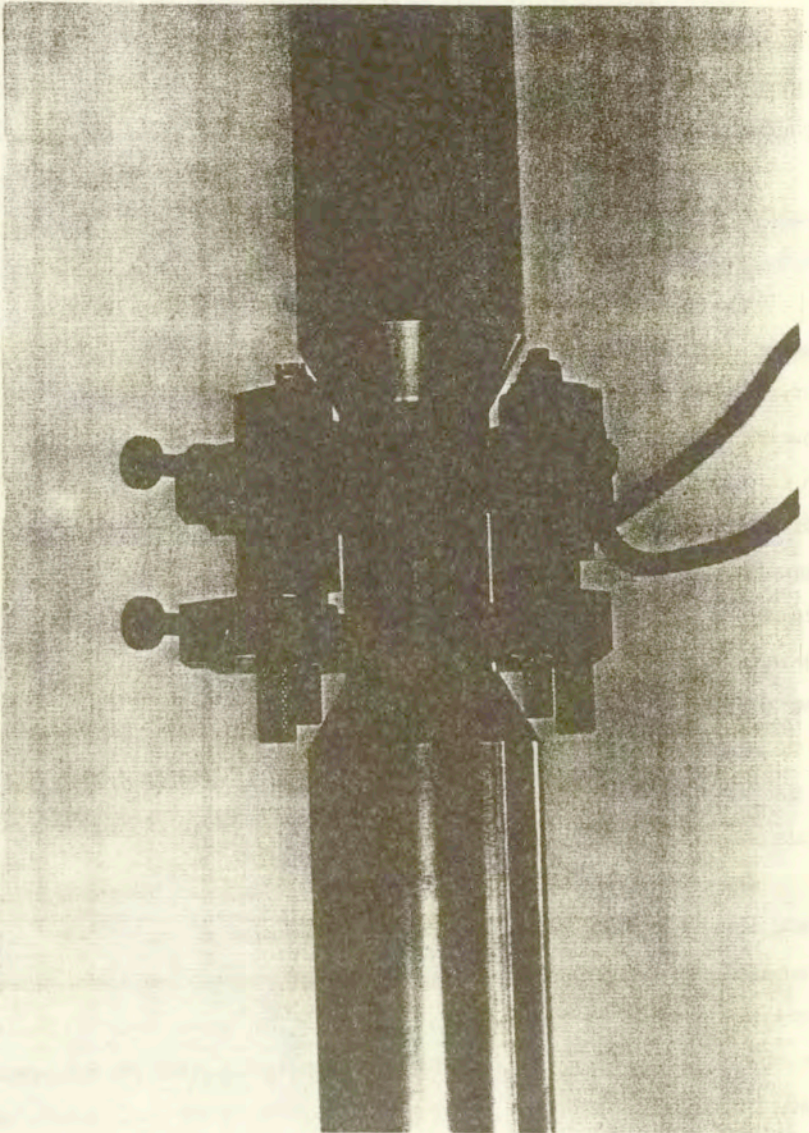
Możliwe jest jednoczesne próbkowanie sygnałów 6 kanałów z minimalnym czasem 1 ms; dodatkowo możliwy jest dynamiczny tryb pracy z zapisywaniem wyników z częstością 0,05 ms na jeden kanał (x ilość aktywnie czytanych kanałów).

Na płycie zapisać można 8000 punktów pomiarowych w 2 buforach po 4000 każdy. Przy komputerowym sterowaniu możliwy jest natychmiastowy odczyt każdego z 6-ciu kanałów w minimalnym czasie 0,004 ms (uśredniony wynik 8 konwersji a/c).

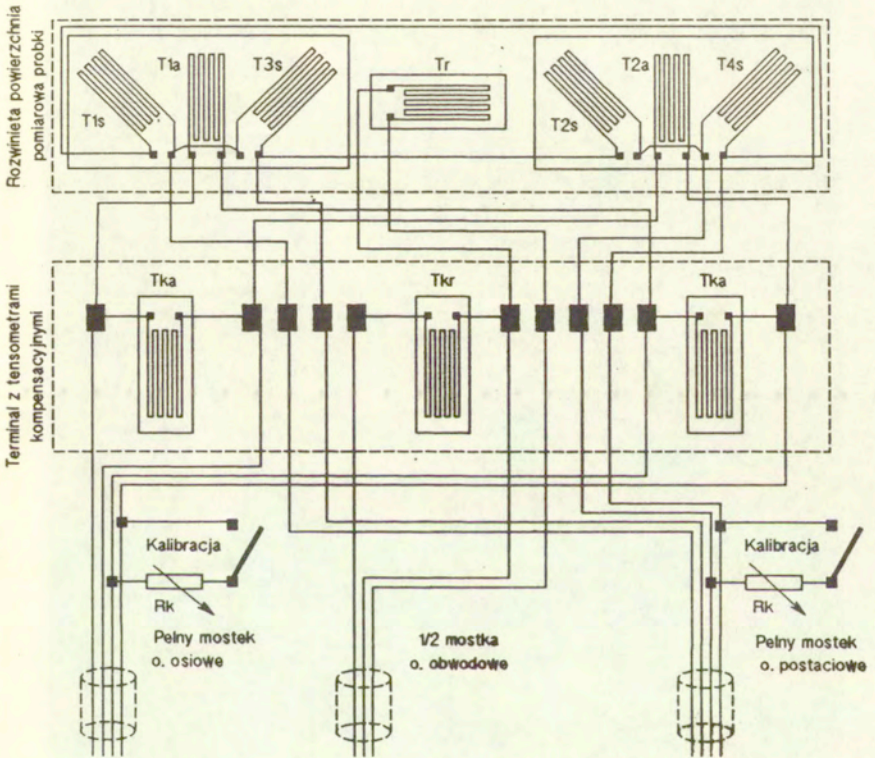
Oprócz opisanej powyżej rozdzielczości wynikającej z charakterystyki samego inteligentnego łącza sprzęgającego, na dokładność sterowania a tym samym uzyskiwanych wyników ma bezpośredni wpływ sposób pomiaru. Dotyczy to głównie rodzaju przetworników użytych do aktywnego sterowania maszyną. Wpływ ten jest szczególnie widoczny przy sterowaniu odkształceniem. Proces sterowania maszyną odbywa się w pętli sprzężenia zwrotnego tj. do zadawanego przebiegu sygnału wymuszającego porównywany jest mierzony sygnał odpowiedzi. Wynikająca różnica obu sygnałów powoduje korekcję w ustawieniu serwozaworów tak, by wspomniana różnica, czyli błąd, był minimalny, mieszczący się w ustalonych granicach. Dla obu osi możliwe są trzy różne sposoby sterowania:

- sterowanie przemieszczeniem liniowym (kątem skręcenia)
- sterowanie siłą (momentem)
- sterowanie odkształceniem.

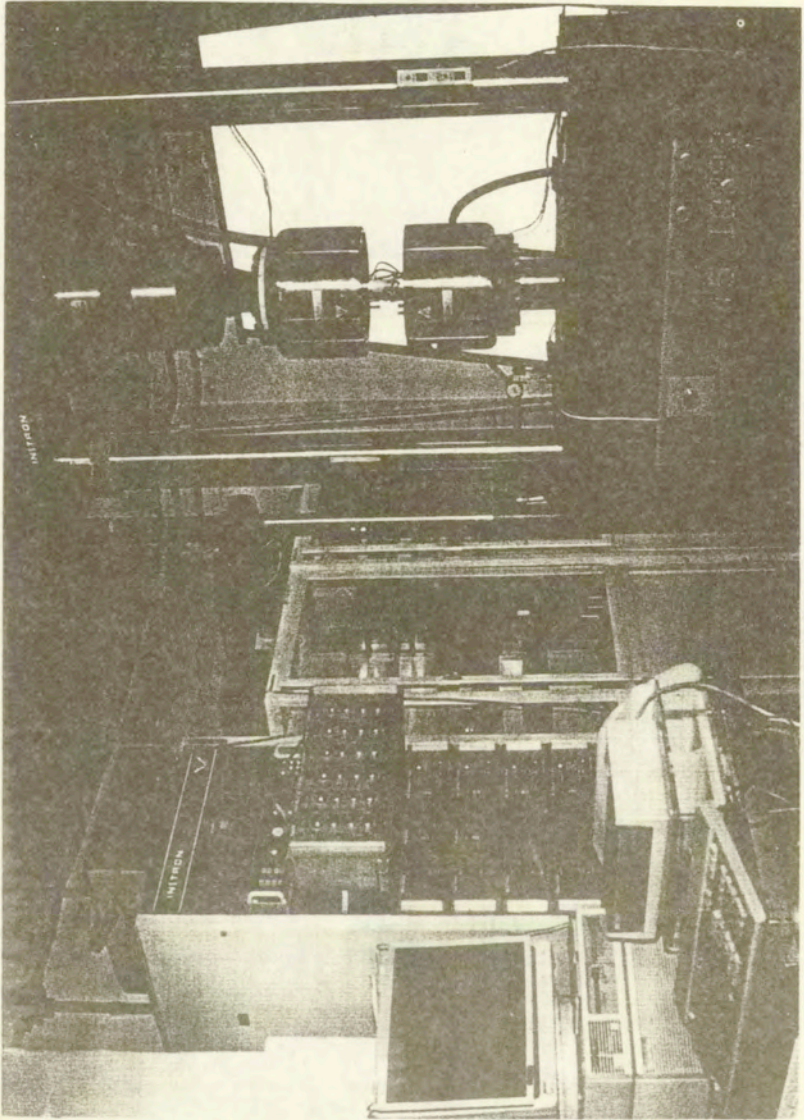
Zakres pomiarowy układu przemieszczenia wynika z cech konstrukcyjnych układu kinematycznego i wynosi ± 50 mm dla wydłużenia oraz $\pm 45^\circ$ dla przemieszczenia skrętnego. W badaniach wykorzystywano wyłącznie komputerowe sterowanie maszyną co powoduje, że na dokładności analogowych sygnałów pomiarowych wpływa wspomniana rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego układu sprzęgającego. Dla powyższych zakresów aktywne sterowanie przemieszczeniem można prowadzić z rozdzielczością 0,025 mm dla wydłużenia oraz odpowiednio $0,0225^\circ$ dla skręcania.



rys.4. Ekstensometr firmy Instron do pomiaru dwóch składowych odkształceń założony na próbkę rurkową.



rys.5. Schemat rozmieszczenia tensometrów elektrooporowych na powierzchni próbki rurkowej do pomiaru trzech składowych odkształceń.



rys.6. Widok układu wykonawczego i sterującego maszyny wytrzymałościowej Instron 1343 z zamontowaną próbką rurkową

Układ pomiarowy obciążeń działających na próbkę realizowany jest przy pomocy dynamometrów tensometrycznych o zakresach:

- statyczny pomiar siły osiowej 200 kN , momentu 2000 Nm
- dynamiczny pomiar siły osiowej 100 kN , momentu 1000 Nm .

Rozdzielczość podczas aktywnego sterowania siłą bądź momentem wynosi odpowiednio 100 N i 1 Nm w zakresie statycznym oraz 50 N i $0,5\text{ Nm}$ w zakresie dynamicznym. Pomiar odkształceń może odbywać się przy wykorzystaniu dwuosowego ekstensometru firmy *Instron* widocznego na zdjęciu (rys. 4) w stanie zamocowania na średnicy pomiarowej próbki lub bezpośrednio z tensometrów elektrooporowych naklejonych na powierzchni próbki. Zakres pomiarowy ekstensometru wynosi $\pm 1,25\text{ mm}$ dla wydłużenia oraz $\pm 4^\circ$ dla skręcania. Baza pomiarowa ekstensometru wynosi 25 mm . Przeliczona rozdzielczość aktywnego sterowania odkształceniem przy pomocy ekstensometru wynosi $2,5 \cdot 10^{-5}$ dla wydłużenia oraz $8,3 \cdot 10^{-6}$ dla skręcania. Przy stosowaniu tensometrów naklejonych bezpośrednio na próbkę rozdzielczość zależy od zakresu pomiarowego użytych tensometrów. Schemat tensometrycznych układów do pomiaru trzech składowych odkształcenia i rozmieszczenie poszczególnych tensometrów pokazano na rozwiniętej powierzchni pomiarowej próbki na rys. (5). Cztery tensometry naklejone w dwóch kierunkach pod kątami 45° do osi próbki stanowiły pełnomostkowy układ do pomiaru odkształceń postaciowych $\varepsilon_{\tau\theta}$. Odkształcenia osiowe ε_{zz} mierzono przy pomocy pełnomostkowego układu czterech tensometrów, z których dwa naklejone po przeciwnych stronach próbki były tensometrami czynnymi, a dwa kompensujące zmiany temperatury naklejono na tulei o takiej samej grubości ścianki jak próbka. Te dwa pełnomostkowe układy tensometryczne do pomiaru odkształceń ε_{zz} i $\varepsilon_{\tau\theta}$ włączone były do systemu pomiarowego maszyny *Instron* i kalibrowano je przy pomocy dodatkowego precyzyjnego mostka tensometrycznego firmy *Hottinger* tak, aby maksymalnemu sygnałowi sterowania o wartości 10 V odpowiadało odkształcenie równe $5 \cdot 10^{-3}$. Uwzględniając rozdzielczość układu pomiarowego maszyny *Instron* równą $0,001\text{ V}$, rozdzielczość pomiaru odkształceń ε_{zz} i $\varepsilon_{\tau\theta}$

wynosiła $5 \cdot 10^{-7}$. Pomiar odkształceń obwodowych $\varepsilon_{\theta\theta}$ realizowano przy pomocy półmostkowego układu tensometrycznego składającego się z dwóch tensometrów, z których jeden naklejony był w środkowej części na powierzchni próbki, a tensometr kompensacyjny naklejono na wspomnianej wyżej tulei.

Widok wykonawczej części stanowiska badawczego obejmującego:

- ramę maszyny *Instron* z próbką rurkową z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi do pomiaru odkształceń,
 - konsolę sterującą maszyny wytrzymałościowej,
 - komputer *HP-310* sterujący pracą maszyny wytrzymałościowej,
- pokazano na zdjęciu (rys.6).

Natomiast na zdjęciu następnym (rys.7) uwidocznił ekran komputera *Vectra* sprzęgniętego z systemem akwizycji danych pomiarowych *Peekel*, na którym zobrazowano, jako funkcję czasu przebiegi pięciu zmiennych mierzonych w trakcie jednego cyklu obciążania i odciążania próbki.

2.3 Opis programu komputerowego sterowania maszyną wytrzymałościową

Sterowanie realizacją doświadczenia odbywa się programem sterującym *YIELD-SURF* opracowanym specjalnie do wyznaczania powierzchni plastyczności na próbkach rurkowych, na podstawie procedur kodu sterowania sprzęgu mikroprocesorowego, którego schemat blokowy przedstawia rys.3. Kod źródłowy tego programu napisano w języku BASIC 4; komputerem sterującym jest komputer *HP 310*. Dokładny opis działania oraz obsługi programu *YIELD-SURF* zawiera załączona instrukcja obsługi. Generalnie program składa się z trzech części:

- Kalibracji i zerowania sygnałów przetworników. Po ustaleniu zakresów pomiarowych na poszczególnych kanałach, a następnie zamocowaniu w maszynie próbki pojawiają się niewielkie siły (momenty). Zależą one głównie od sztywności samej próbki, nastawionego ciśnienia w układzie mocowania oraz od wymiarów i dokładności wykonania próbki. Procedury automatycznego zerowania

siły i momentu pozwalają na „bezuderzeniowe”, płynne zerowanie powyższych wielkości, a następnie zerowanie pozostałych sygnałów odkształcenia.

W drugiej części programu próbka zostaje wstępnie rozciągnięta w celu dokładnego wyznaczenia modułu sztywności w zakresie sprężystym. Moduł Young'a wyznaczony jest metodą najmniejszych kwadratów z punktów pomiarowych z zadanego przedziału efektywnego naprężenia σ_e wg. wzoru

$$E = \frac{\sigma_e}{\epsilon_e}$$

gdzie: σ_e oblicza się z zależności:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + 3 \cdot \tau_{z\theta}^2}$$

Natomiast efektywne odkształcenie oblicza się ze znanego związku:

$$\epsilon_e = \sqrt{\epsilon_{zz}^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2} \cdot \epsilon_{z\theta}^2}$$

gdzie przez ϵ_{zz} i $\epsilon_{z\theta}$ oznaczono odpowiednie składowe odkształceń osiowych i postaciowych.

Współczynnik Poissona ν wyznaczano na podstawie dodatkowego pomiaru składowej odkształceń obwodowych $\epsilon_{\theta\theta}$ mierzonej za pomocą opisanego wcześniej układu akwizycji danych firmy *Peekel*. Wartość współczynnika ν określano na podstawie wcześniej przeprowadzonych testów i obliczano w zakresie sprężystym jako:

$$\nu = \frac{\epsilon_{\theta\theta}}{\epsilon_{zz}}$$

Wartość ν była wprowadzana w zestawie danych początkowych w trakcie uruchamiania programu YIELD-SURFACE

- trzecią częścią jest właściwy test - tj. obciążenie próbki zadaną prędkością o szczególnych składowych odkształcenia. Obciążanie kontynuowane jest do momentu osiągnięcia zadanej wartości odkształceń plastycznych. Zachodzi to wówczas, gdy spełniony jest warunek:

$$\sigma_e \leq E \cdot (\epsilon_e - \epsilon_{off})$$

gdzie

- σ_e - rzeczywista (mierzona) wartość intensywności naprężenia obliczana "on line",
- E - wcześniej wyznaczony (w poprzedniej fazie programu) moduł sprężystości,
- ϵ_e - wartość całkowitych odkształceń efektywnych obliczona na podstawie zmierzonych wielkości składowych odkształceń,
- ϵ_{off} - założona wielkość odkształceń plastycznych, tzw. offset definiujący granicę plastyczności,

Po spełnieniu powyższego warunku następuje zmiana sterowania z odkształcenia na sterowanie siłą a następnie całkowite odciążenie próbki. Dla zadanego kierunku (danej proporcji składowych odkształcenia) zgromadzone w pamięci komputera wyniki zostają zapisane na dyskiecie.

Program YIELD-SURF umożliwia wykonanie jednego cyklu obciążanie-odciążanie w określonym kierunku przestrzeni naprężeń $\sigma_{zz} - \tau_{z\theta}$ jak i wielu, kolejnych cykli w określonych kierunkach obciążania. Program ten może być więc wykorzystywany do wyznaczania powierzchni plastyczności na wielu próbkach, gdy w każdym kierunku obciążania wykorzystuje się inną próbkę oraz wyznaczania powierzchni plastyczności na jednej próbce, obciążanej sekwencyjnie w kolejnych kierunkach przestrzeni naprężeń $\sigma_{zz} - \tau_{z\theta}$, przy czym kolejność kierunków obciążania może być dowolnie definiowana. Może to być monotoniczne zwiększanie się kąta kierunku obciążania, co oznaczane jest w dalszej części pracy jako obciążanie sekwencyjne, albo może to być obciążanie w kierunkach przeciwnych

w stosunku do obciążenia poprzedniego i jest to określone jako obciążanie naprzemienne.

Te dwa ostatnie sposoby wyznaczania powierzchni plastyczności przy obciążaniu sekwencyjnym i przemiennym jednej próbki były najczęściej stosowanym dotychczas sposobem wyznaczania powierzchni plastyczności. Stosowano zwykle ograniczenie wartości efektywnych odkształceń plastycznych jakich doznaje próbka na każdym kierunku postulując, że wpływ tej historii deformacji na powierzchnię plastyczności jest wówczas pomijalnie mały. W dotychczasowej literaturze brak było jednak oceny tego wpływu na podstawie porównania powierzchni plastyczności otrzymanej na jednej i na wielu próbkach. Jest to istotna kwestia ze względu na oczywiste zalety stosowania tylko jednej próbki do wyznaczenia powierzchni plastyczności i z tego względu program YIELD-SURF został tak opracowany, aby było możliwe przeprowadzenie porównania tych dwóch sposobów wyznaczania powierzchni plastyczności.

Zasadnicze cechy programu YIELD-SURF są następujące:

- możliwość wykonania cyklu proporcjonalnego obciążania-odciążania w dowolnym kierunku przestrzeni naprężeń $\sigma_{zz} - \tau_{z\theta}$,
- możliwość dowolnego określania kierunków następujących po sobie cykli proporcjonalnego obciążania-odciążania,
- utrzymanie stałej prędkości ekwiwalentnych odkształceń całkowitych w cyklu obciążania,
- utrzymanie stałej prędkości ekwiwalentnych naprężeń w cyklu odciążania,
- automatyczne obliczanie modułu sprężystości,
- śledzenie wartości ekwiwalentnych odkształceń plastycznych,
- zatrzymanie obciążania po osiągnięciu określonej wartości ekwiwalentnych odkształceń plastycznych,
- rejestracja składowych naprężeń i odkształceń przy obciążaniu i odciążaniu próbki,

- możliwość zapobiegania powstawaniu obciążeń w trakcie mocowania próbek przez automatyczne zerowanie sił.

Program ten stanowił podstawę przy opracowywaniu innych wersji programu sterowania maszyną wytrzymałościową, które obejmowały:

- program wyznaczania powierzchni plastyczności przy zachowaniu stałej prędkości ekwiwalentnych naprężeń w trakcie cyklu obciążania,
- program realizacji wstępnej deformacji plastycznej o określonej wartości ekwiwalentnych odkształceń całkowitych w dowolnym kierunku przestrzeni $\sigma_{zz} - \tau_{z\phi}$,
- program realizacji wstępnej cyklicznej deformacji o określonej, stałej wartości amplitudy ekwiwalentnych odkształceń całkowitych w dowolnym kierunku przestrzeni $\sigma_{zz} - \tau_{z\phi}$,
- program realizacji wstępnej cyklicznej deformacji o określonej, zanikającej stopniowo w każdym cyklu wartości amplitudy ekwiwalentnych odkształceń całkowitych w dowolnym kierunku przestrzeni $\sigma_{zz} - \tau_{z\phi}$.

2.4 Opis programów wtórnego przetwarzania wyników badań w złożonym stanie naprężenia.

Wyniki badań w złożonym stanie naprężenia rejestrowano w postaci cyfrowej przy pomocy dwóch niezależnych układów komputerowych. W pierwszym z nich cyfrowe dane dwóch składowych naprężeń σ_{zz} i $\tau_{z\phi}$ i odpowiadających dwóch składowych odkształceń ε_{zz} i $\varepsilon_{z\phi}$ w danej chwili czasowej rejestrowano najpierw w buforach układu sprzęgu inteligentnego, skąd w określonych porcjach były następnie przesyłane do pamięci operacyjnej komputera, a po zakończeniu jednego cyklu obciążania zapisywane były na dyskietce. Jednocześnie sygnały analogowe tych samych czterech wielkości były rejestrowane niezależnie na dodatkowym urządzeniu akwizycji danych firmy *Peekel*, jak to wcześniej przedstawiono przy opisie samego urządzenia. System ten umożliwiał również pomiar odkształceń obwodowych $\varepsilon_{\phi\phi}$.

bezpośrednio z układu tensometrycznego naklejonego na próbce. System Peekel umożliwiał bieżącą wizualizację wszystkich pięciu mierzonych wielkości i stanowił pewien rodzaj zabezpieczenia w przypadku awarii czy nieprzewidzianego zakończenia badania. Zaletą tego systemu jest bieżące zapisywanie kolejnych danych cyfrowych na twardym dysku.

Opracowanie wyników badań doświadczalnych w złożonym stanie naprężenia odbywa się już po zakończeniu doświadczeń i można w nim wyodrębnić dwa zasadnicze etapy. Pierwszy z nich to obróbka krzywych naprężenie-odkształcenie dla danego kierunku obciążania i wyznaczenie modułu sprężystości, umownej granicy plastyczności i aproksymacji zależności naprężeń jako funkcji odkształceń plastycznych. Etap drugi polega na wyznaczeniu postaci i parametrów warunku plastyczności na podstawie punktów doświadczalnych określających granicę plastyczności dla różnych kierunków obciążania w przestrzeni $\sigma_{xx} - \tau_{xy}$.

Pierwszą wersję programu przetwarzania wyników pomiarów dla danego kierunku obciążania opracowano w języku Basic 4.0 na komputer HP-310. Program ten wykorzystywał dane z doświadczeń zapisywane w tym samym systemie operacyjnym Basic 4.0. W programie wykorzystano standardowe procedury graficzne oprogramowania *Instron*. Wykonana wersja oprogramowania obejmowała:

- możliwość przetwarzania wykresów naprężenie-odkształcenie dla poszczególnych składowych i dla wartości ekwiwalentnych,
- możliwość obliczenia modułu sprężystości metodą najmniejszych kwadratów dla wybranego zakresu naprężeń,
- określenie wykresów naprężenie-odkształcenie plastyczne dla poszczególnych składowych i dla wartości ekwiwalentnych,
- wyznaczenie umownej granicy plastyczności odpowiadającej określonej wartości ekwiwalentnych odkształceń plastycznych.

Schemat powyższy przyjmowano również w kilku następnych, wykonanych programów, które różniły się procedurami aproksymacji przebiegu wykresu w zakresie sprężystym i plastycznym. Wersje te opracowano w systemie DOS, tak że

konieczny był program konwersji danych z systemu Basic 4 zapisu danych stosowanych w komputerze HP na system DOS. Wykonany program konwersji nazwano BIAX.

Zasadniczym celem kilku następujących programów było umożliwienie pełnej automatyzacji obliczeń, tak aby obróbka danych dla jednego kierunku obciążania nie wymagała dokonywania wyboru lub potwierdzenia wyboru przez operatora. Istotne trudności sprawiały jednak nieliniowe przebiegi naprężeń jako funkcje odkształceń plastycznych wynikające ze sposobu zamocowania i deformacji próbek rurkowych wykorzystywanych w badaniach. Sprawa ta będzie opisana w dalszej części pracy. Efekty nieliniowej sprężystości wynikające z geometrycznych zmian próbki powodowały wypaczenie rejestrowanych wykresów naprężenie-odkształcenie, które utrudniało określenie modułu sprężystości i przebiegu wykresu naprężenie-odkształcenie plastyczne. Koniecznym więc była eliminacja wpływu nieliniowych odkształceń sprężystych próbki, które powodowały krzywoliniowy przebieg obciążania w zakresie sprężystym przy obciążeniu i odciążaniu. Opracowano więc program dodatkowy, w którym moduł sprężystości określano jako pochodną dla zerowych naprężeń funkcji drugiego stopnia aproksymującej punkty doświadczalne zarejestrowane przy odciążaniu próbki. Obliczony w ten sposób moduł sprężystości wykorzystywano do obliczenia wartości nieliniowych odkształceń sprężystych jako funkcji naprężeń, które następnie odejmowano od zarejestrowanych odkształceń całkowitych. Sposób ten okazał się, spośród różnych innych propozycji aproksymacji zakresu sprężystego, najskuteczniejszym narzędziem eliminacji systematycznych i przypadkowych błędów powodujących nieliniowy przebieg wykresów w zakresie sprężystym. Błędy systematyczne są związane z geometryczną formą deformacji próbki zależną od jej proporcji wymiarowych i sposobu zamocowania, co prowadzi do deformacji typu beczkowatego lub klepsydrowatego, zależnie od kierunku siły osiowej. Natomiast błędy przypadkowe mogą wynikać z błędów wykonania próbki (np. nierównomierna grubość ścianki na obwodzie) lub błędów naklejenia tensometrów. Bezwzględne wartości tych błędów są tym większe im większe są

wartości naprężeń, tak że określanie modułu sprężystości materiału z aproksymacji dla zerowych naprężeń jest uzasadnione.

Następnym etapem przetwarzania danych doświadczalnych jest przygotowanie kompletu danych dla poszczególnych kierunków proporcjonalnego obciążania tworzących zbiór danych określających punkty powierzchni plastyczności. Do przetworzenia całego zbioru obejmującego 16 kierunków obciążeń opracowano modyfikację programu QUATRO PRO, która umożliwiała automatyczne przetwarzanie danych i wyznaczenie umownych granic plastyczności odpowiadających zadany wartościom odkształceń plastycznych. Zbiór tych danych wprowadzono do programu ELIPSA, w którym obliczano współczynniki równania krzywej drugiego stopnia w ogólnej postaci, tak aby zminimalizować sumę kwadratów odległości punktów doświadczalnych od krzywej aproksymującej. Wartości tych pięciu współczynników równania elipsy określają kształt i położenie powierzchni plastyczności i tym samym określają rodzaj anizotropii i wartości liczbowe jej współczynników.

Uzupełnieniem przedstawionego wyżej oprogramowania umożliwiającego automatyczne przetwarzanie wyników doświadczeń było kilka wersji arkuszy kalkulacyjnych oprogramowania DADISP (Data Analysis and Display Software) firmy Development Corporation, które umożliwiały śledzenie przebiegu poszczególnych procedur przetwarzania danych. Oprogramowanie te umożliwia bowiem generowanie na ekranie komputera wielu okienek, w których obrazowany jest wynik kolejnych kroków przeliczeniowych, tak że operator kontroluje cały przebieg obliczeń. Oprogramowanie te wykorzystywano do analizy wstępnych wyników i do testowania procedur numerycznych stosowanych następnie w programie automatycznego przetwarzania.

Wersje źródłowe wszystkich wykonanych programów do sterowania maszyną wytrzymałościową w warunkach złożonego stanu naprężenia jak i do wtórnego przetwarzania wyników badań zapisanych w systemie Basic 4 jak i w systemie DOS są dostępne w Zakładzie Wytrzymałości Materiałów IPPT-PAN.

3. Omówienie wyników badań wstępnych.

Przed przystąpieniem do zasadniczych badań materiałowych, których celem była identyfikacja anizotropii materiału i jej ewolucji pod wpływem wstępnej deformacji, wykonano szereg wstępnych badań mających za zadanie:

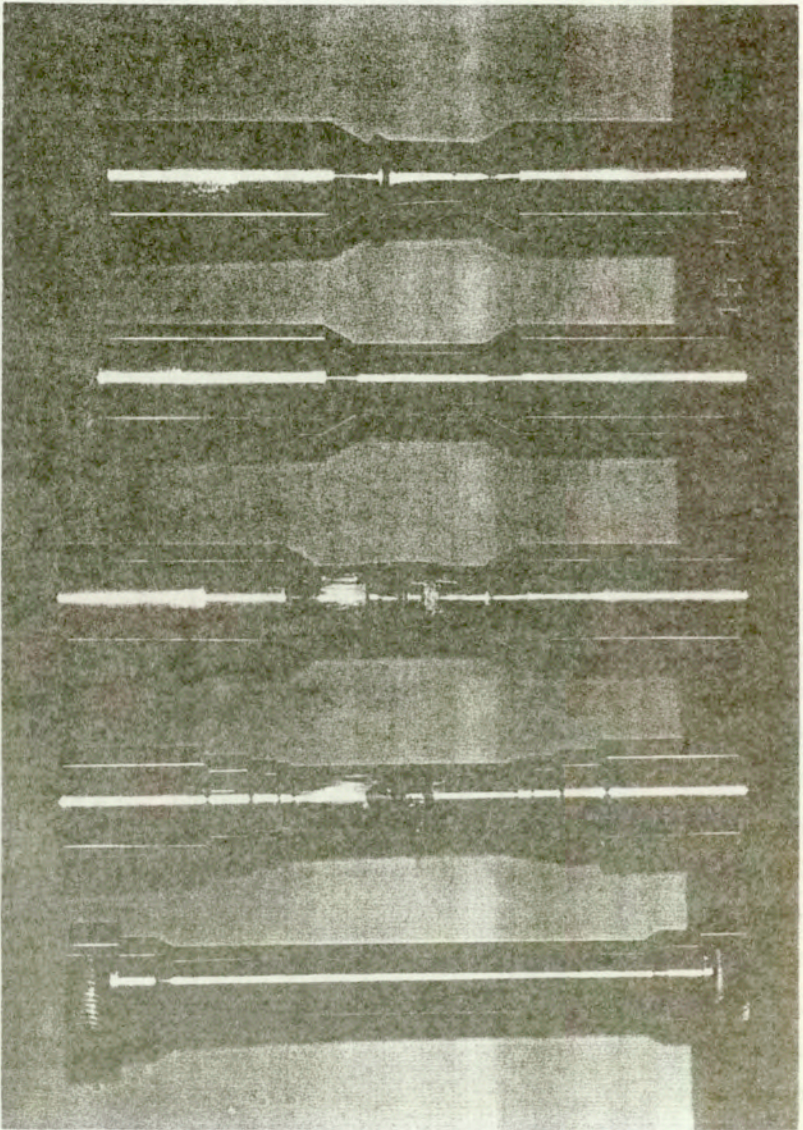
- dobór kształtu i proporcji wymiarów próbki,
- ocena wpływu zamocowania próbki,
- wybór sposobu pomiaru składowych odkształceń,
- ocena błędów pomiarowych.

Poniżej omówione zostaną wnioski wynikające z tych badań.

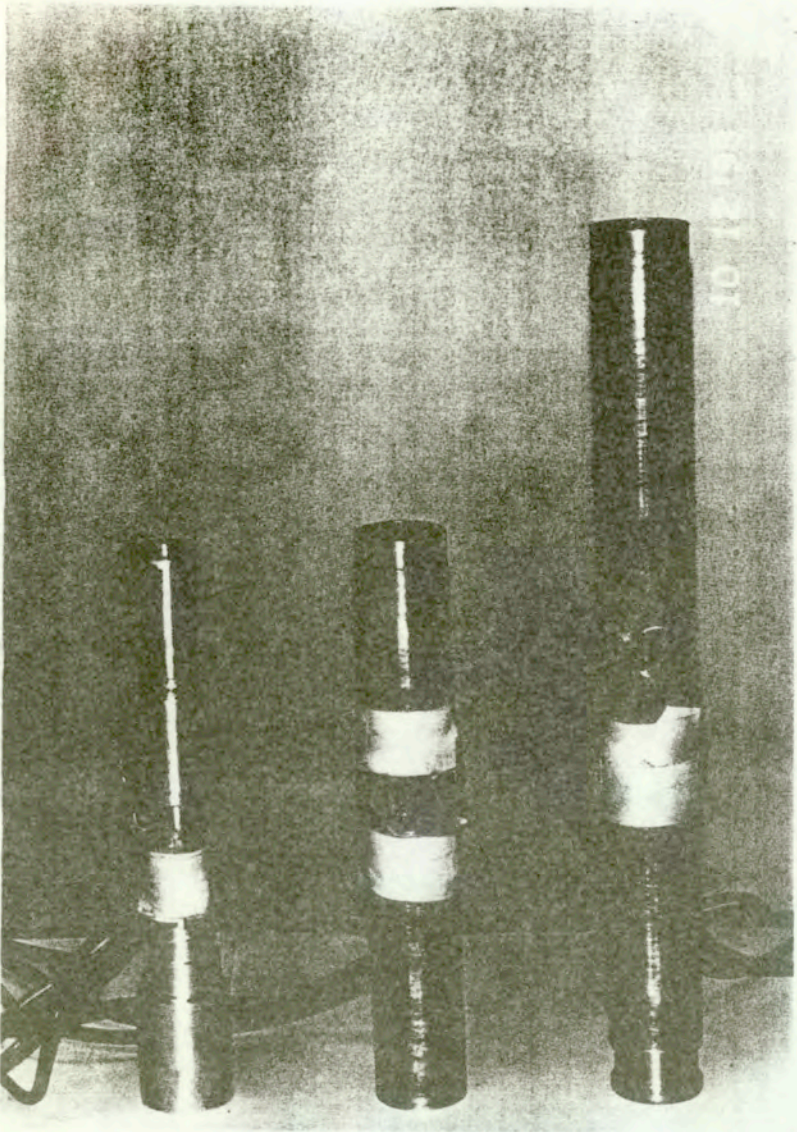
3.1 Próbką do badań w złożonym stanie naprężenia.

Kształt i wymiary próbki uzależnione są od uchwytu mocującego maszyny wytrzymałościowej, od rodzaju półwyrobu i technicznych możliwości jej wykonania. Natomiast podstawowym celem jest zapewnienie jednorodnego pola odkształceń w całej części pomiarowej próbki w trakcie jej obciążania. Warunek ten jest ściśle związany ze stosunkiem długości do średnicy zewnętrznej próbki, który powinien być dostatecznie duży. Wykorzystywana przy realizacji niniejszego programu maszyna wytrzymałościowa wyposażona była w hydrauliczne uchwyty mocujące próbkę w sprężystej tulei zaciskanej w stożkowym uchwycie. Część chwytowa próbki musiała mieć część walcową o średnicy 40 mm i długości co najmniej 70 mm. Natomiast długość całkowita próbki była ograniczona możliwością wykonania otworu wewnętrznego przy pomocy rozwiertaka. Materiałem wyjściowym dla próbek ze stopu aluminium PA6 i stali 18G2 były pełne pręty o średnicy 45 mm.

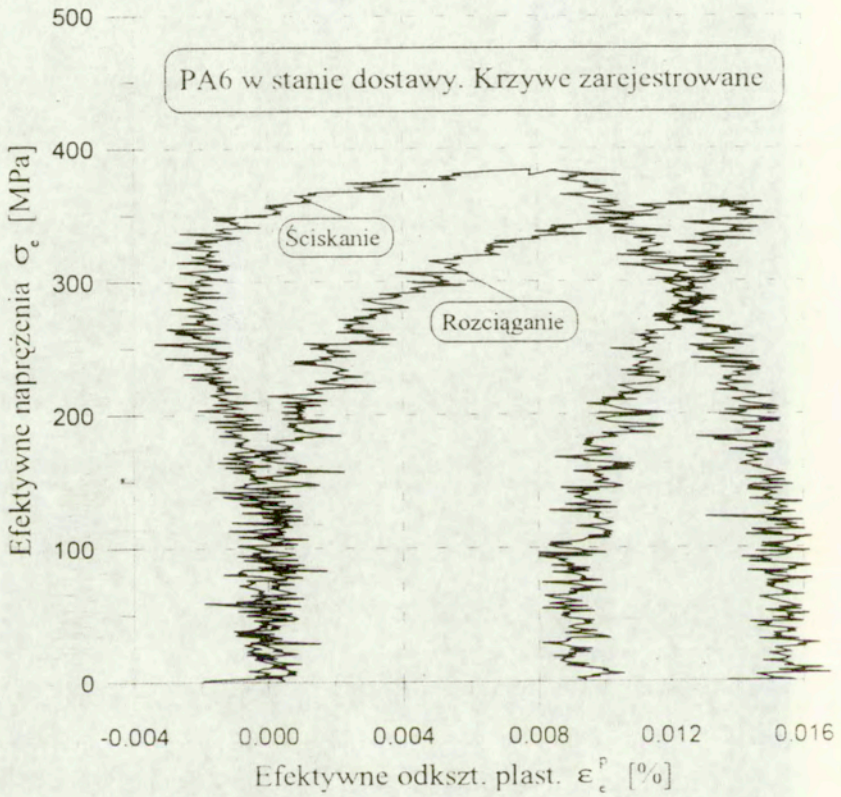
Rodzaje próbek przygotowanych do badań wstępnych uwidoczniło na zdjęciach (rys.8 i 9). Pokazane próbki ze stopu PA6 mają części chwytowe dostosowane do uchwytów maszyny wytrzymałościowej i różnią się długością części pomiarowej i sposobem przejścia od części pomiarowej do części chwytowej.



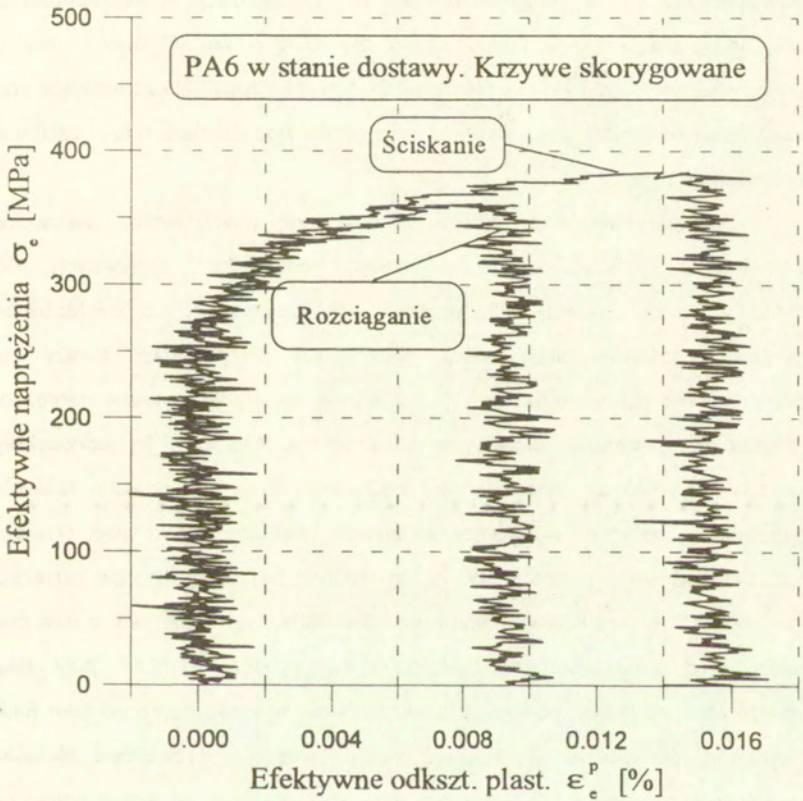
rys. 8 Różne wersje próbek rurkowych przygotowane do badań wstępnych.



rys.9. Próbkę ze stopu PA6 z zamontowanym układem do pomiaru odkształceń i próbki rurowe z mosiądzu M58 o różnych długościach części pomiarowej.



rys. 10 Przebiegi obciążania i odciążania zarejestrowane w trakcie jednoosiowego rozciągania i ściskania próbek rurkowych z PA6



rys.11 Przebiegi obciążania i odciążania dla jednoosiowego rozciągania i ściskania próbek rurkowych z PA6 po uwzględnieniu nieliniowych odkształceń sprężystych.

Natomiast próbka ze stopu PA6 widoczna na drugim zdjęciu (rys.9) pokazana jest wraz z cienkościenną tuleją do naklejania końcówek tensometrów elektrooporowych i do naklejenia tensometrów kompensacji wpływu temperatury. Tuleja ta ogranicza czynną długość części chwytowej próbki. W otwór wewnętrzny po obu stronach próbki wkłada się dwa dopasowane czopy zabezpieczające przed możliwością zmniejszenia się średnicy wewnętrznej pod działaniem tulei zaciskowej przy mocowaniu próbki.

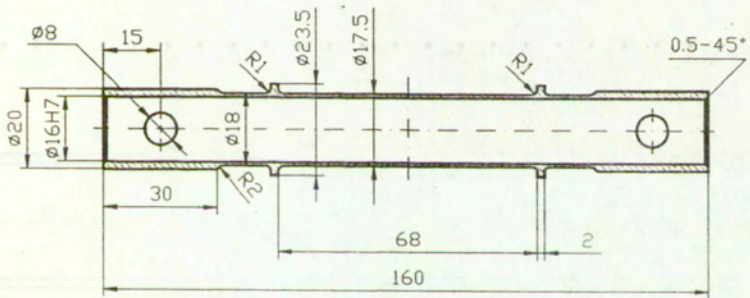
Dla wszystkich tych próbek obserwowano występowanie nieliniowości geometrycznej prowadzącej do nieliniowych odkształceń sprężystych, które nakładały się na całkowite odkształcenie próbki prowadząc do zniekształcenia wykresu naprężenia jako funkcji odkształceń. Przykładowe obrazy tego zniekształcenia pokazano na rys.10 nakładając na siebie wykresy naprężenie-odkształcenie plastyczne otrzymane dla próbki z PA6 przy jej jednoosiowym rozciąganiu i ściskaniu. Wykres ten dobrze ilustruje istotę tego zjawiska. Nieliniowe odkształcenie sprężyste wynikające ze zmiany geometrii próbki mają przeciwne znaki przy ściskaniu i rozciąganiu, a ich wartość jest niewielka, nie przekracza wartości $4 \cdot 10^{-5}$ przy naprężeniach rzędu 350 MPa. Są to wartości o dwa rzędy mniejsze od odkształceń całkowitych, które wynoszą $5 \cdot 10^{-3}$ przy takich naprężeniach, to jednak powodują zniekształcenie wykresu naprężeń jako funkcji odkształceń plastycznych w stopniu uniemożliwiającym prawidłowe określenie granicy plastyczności. Jest to bardzo ważny problem, który był jednak pomijany w dotychczasowych badaniach na próbkach rurkowych prowadząc czasami w skrajnych przypadkach do błędnych wyników jak np. wklęsła powierzchnia plastyczności opublikowana w 1983 roku [25].

Występowanie nieliniowych odkształceń sprężystych uwidoczniło się w postaci nieliniowego przebiegu odciążania. Efekt ten występował w różnym stopniu dla wszystkich rodzajów próbek pokazanych na zdjęciach (rys.8 i 9) i dla jego eliminacji opracowano procedurę korekcji wykresów naprężenie-odkształcenie plastyczne w sposób opisany poprzednio, w którym odkształcenie plastyczne

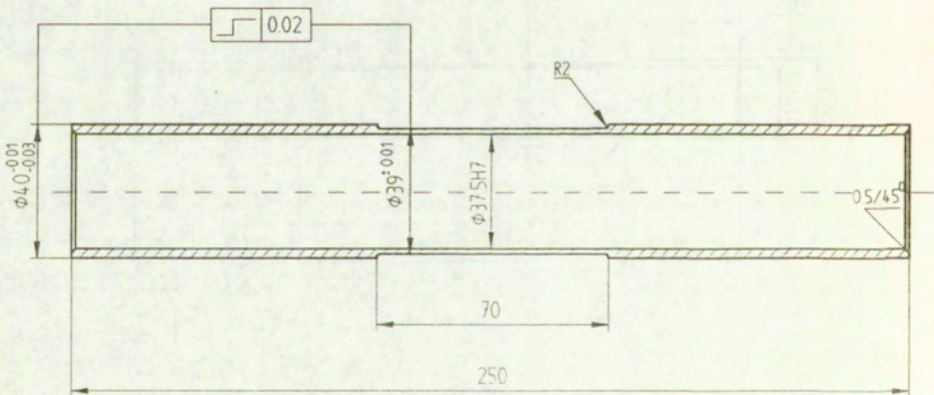
określano jako różnicę odkształceń całkowitych i nieliniowych odkształceń sprężystych. Rezultat takiej operacji dla przypadku jednoosiowego rozciągania i ściskania z rys.10 przedstawiono na rys.11. Uzyskany wynik potwierdza poprawność zastosowanej procedury. Moduły obciążania i odciążania są jednakowe, inne natomiast są odkształcenia plastyczne przy jakich przerwano obciążanie mimo, że w programie sterującym przyjęto taką samą wartość odkształceń trwałych równą 10^{-4} , przy której przerwano obciążanie. Jest to dodatkowy efekt wpływu nieliniowych odkształceń sprężystych, które nie były uwzględnione w programie sterowania maszyną wytrzymałościową, co w rezultacie prowadzi do innych wartości rzeczywistych odkształceń trwałych dla różnych kierunków obciążania w zależności od nieliniowości geometrycznej.

Przyjęte w dalszych badaniach kształt i wymiary próbek wykonywanych z pełnego pręta o średnicy 45 mm przedstawiono na rys.12. Próbkę taką stosowano w przypadku badań dla stopu aluminium PA6 i stali 18G2. O wyborze takiej próbki decydowały możliwości wykonania wewnętrznego otworu, istniejące uchwyty mocujące i wymagania związane z wykonaniem tensometrycznego układu do pomiaru odkształceń.

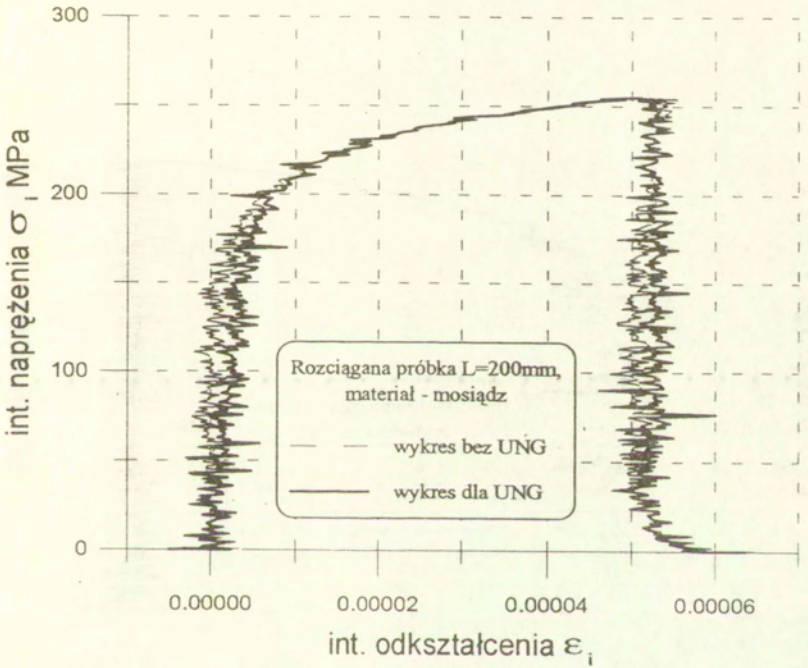
W przypadku badania wpływu pełzania na ewolucję powierzchni plastyczności miedzi kształt i wymiary stosowanych próbek pokazanych na rys.13 dostosowano do uchwytów mocujących w stanowisku do badania pełzania w warunkach złożonego stanu naprężenia. Do wykonania drugiej części badań polegających na wyznaczeniu powierzchni plastyczności materiału poddanego wstępnej deformacji przy pełzaniu wykonano specjalne uchwyty przejściowe umożliwiające zamocowanie próbek z rys.13 w uchwytach maszyny wytrzymałościowej *Instron*.



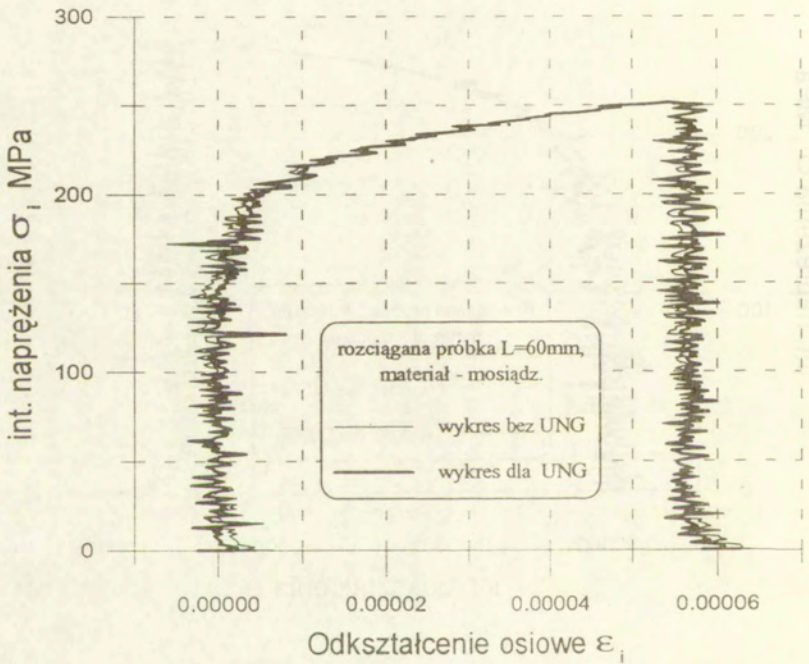
rys. 13. Kształt i wymiary próbek przeznaczonych do badań wpływu pelzania na ewolucję powierzchni plastyczności .



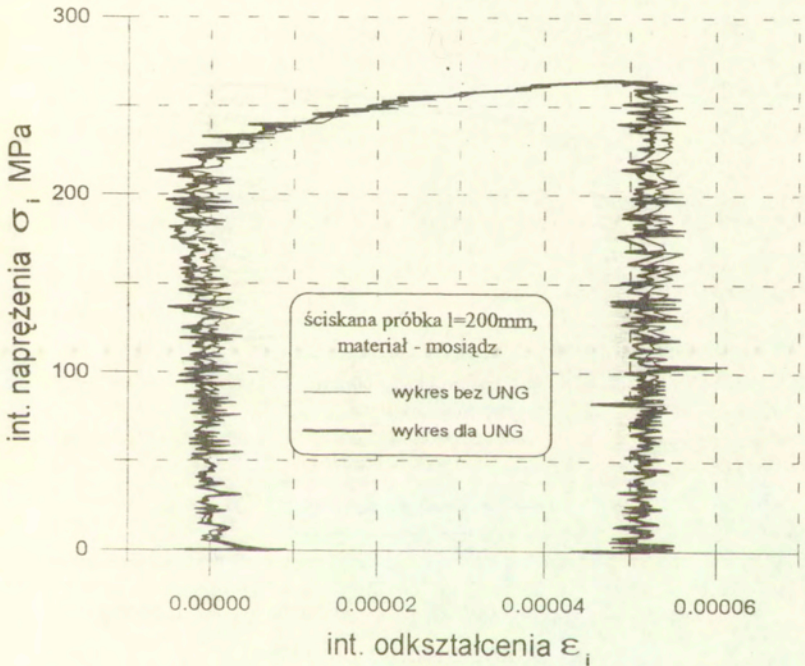
rys. 14 Kształt i wymiary próbek wytoczonych z rur ze stali 15HM.



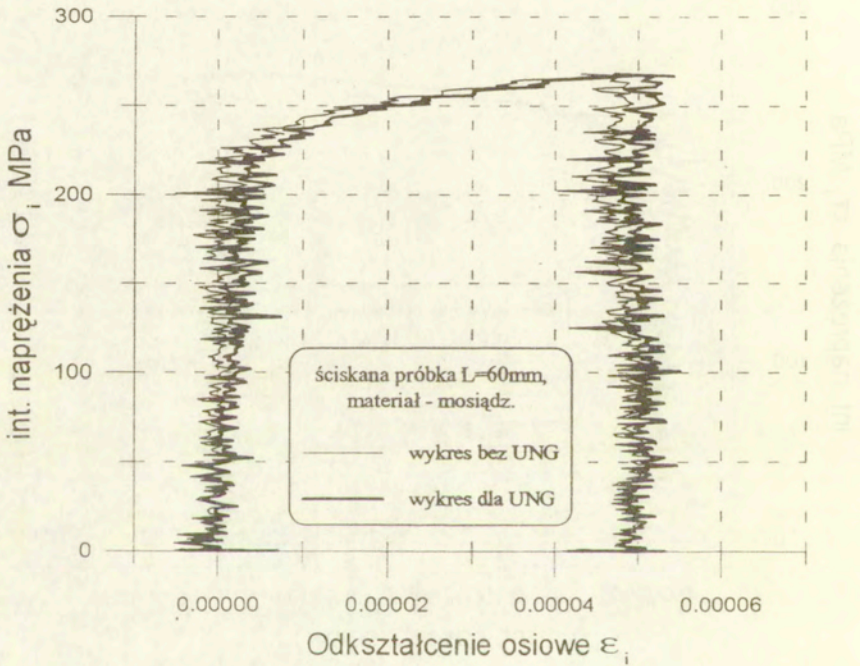
rys. 15. Wykres jednoosiowego rozciągania rurkowej próbki z M58.o długości pomiarowej 200 mm z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości geometrycznych.



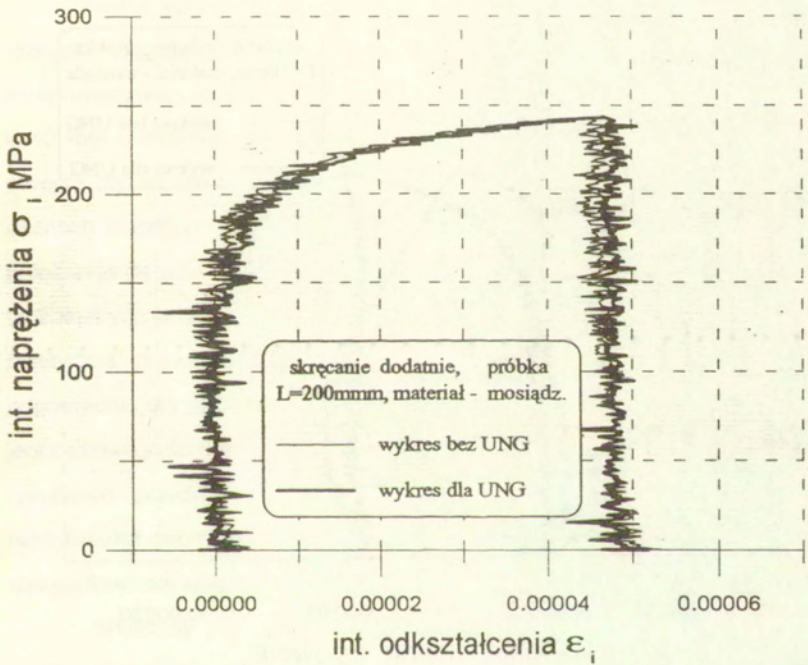
rys.16. Wykres jednoosiowego rozciągania rurkowej próbki z M58 o długości pomiarowej 60 mm z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości geometrycznych.



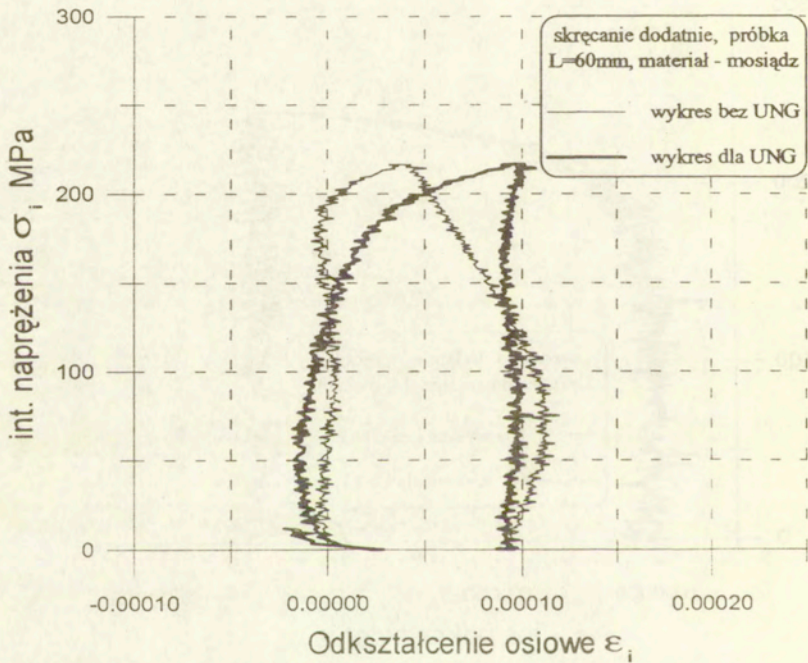
rys.17. Wykres jednoosiowego ściskania rurkowej próbki z M58 o długości pomiarowej 200 mm z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości geometrycznych.



rys.18. Wykres jednoosiowego ściskania rurkowej próbki z M58 o długości pomiarowej 60 mm z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości geometrycznych.



rys.19. Wykres czystego skręcania rurkowej próbki z M58 o długości pomiarowej 200 mm z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości geometrycznych.



rys.20 Wykres czystego skręcania rurkowej próbki z M58 o długości pomiarowej 60 mm z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości geometrycznych.

Trzeci rodzaj próbki przedstawiony na rys.14 stosowano do badań stali kotłowej o symbolu 15HM. W tym przypadku próbki wykonywano z rury o średnicy wewnętrznej $\phi 36$ mm i średnicy zewnętrznej $\phi 44$ mm. Koniecznym było zmniejszenie grubości ścianki w pomiarowej części próbki ze względu na górne ograniczenia nośności maszyny wytrzymałościowej. Całkowita długość próbki była tu również ograniczona technicznymi możliwościami wykonania otworu wewnętrznego.

Ocenę wpływu nieliniowości geometrycznej na uzyskane wyniki przy dwóch różnych długościach pomiarowych próbki, równych 60 mm i 200 mm, przeprowadzono na próbkach wykonanych z rury z mosiądzu o średnicy zewnętrznej $\phi 40$ mm i średnicy wewnętrznej $\phi 35$ mm bez żadnej obróbki mechanicznej w otworze czy na zewnętrznej stronie próbki. Oczywiście w części mocującej, po obu stronach wkładano dopasowane sworznie zabezpieczające przed zmianą średnicy próbki przy jej zamocowaniu. Odształcenia mierzono również przy pomocy układów tensometrycznych. Przykładowe wyniki wykresów naprężenie-odkształcenie plastyczne przedstawiono na rys.15 i rys.16 dla jednoosiowego rozciągania odpowiednio dla próbki o długości pomiarowej $L=200$ i 60 mm, na rys.17 i 18 dla jednoosiowego ściskania i na rys. 19 i 20 dla czystego skręcania. Na wszystkich tych rysunkach przedstawiono cienką linią przebieg bez wyeliminowania wpływu nieliniowości geometrycznej, a linią grubą zaznaczono przebiegi skorygowane z uwzględnieniem wpływu nieliniowości geometrycznej.

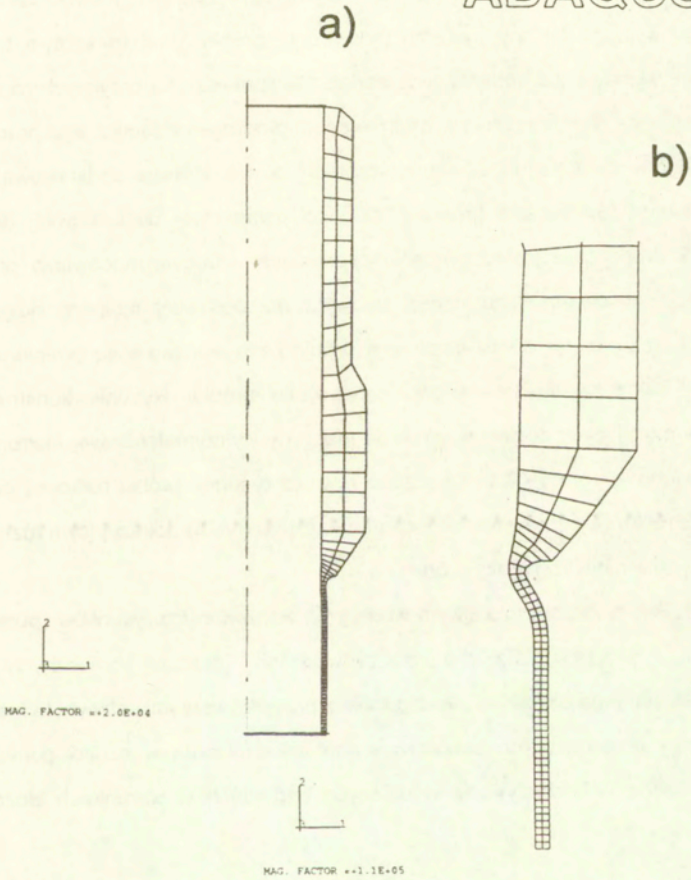
Widoczny jest znacznie mniejszy, pod względem ilościowym wpływ tego efektu przy jednoosiowym ściskaniu lub rozciąganiu próbek rurkowych w porównaniu do próbek o kształcie pokazanym na rys.12. Nieliniowe odkształcenia sprężyste nie przekraczają wartości $5 \cdot 10^{-6}$ nawet dla próbki krótszej (rys.18), a dla próbki dłuższej są jeszcze mniejsze. Natomiast wpływ nieliniowości geometrycznej manifestuje się znacznie wyraźniej przy skręcaniu próbki krótkiej (rys.20), a jest pomijalnie mały przy skręcaniu próbki długiej (rys.19). Zniekształcenie wykresu (rys.20) jest bardzo duże, tak że nawet po korekcy przebieg wykresu w zakresie sprężystym odbiega znacznie od przebiegu liniowego. Należy jednak zwrócić uwagę,

że nawet w tym przypadku przeprowadzenie korekcji umożliwia określenie umownej granicy plastyczności różniącej się tylko o około 10% w stosunku do tej samej wielkości wyznaczonej z wykresu dla próbki dłuższej (rys.19).

3.2 Ocena wpływu sposobu zamocowania próbki.

Rezultaty badań wykonanych na próbkach rurowych bez ukształtowanej części chwytowej wskazują, że ilościowy wpływ nieliniowych odkształceń sprężystych wynikających z geometrycznych zmian próbki przy jej odkształceniu jest silnie związany z zastosowanym sposobem mocowania próbki. Ocenę tego sposobu przeprowadzono na podstawie wyników numerycznej analizy rozkładów naprężeń i odkształceń w próbce zaciskanej w uchwycie maszyny wytrzymałościowej. Do obliczeń wykorzystano pakiet programu Abaqus metody elementów skończonych. Zasadniczy wniosek z tej analizy wskazuje, że pod wpływem promieniowych naprężeń działających na części chwytowej próbki występuje wyraźna zmiana kształtu próbki w części pomiarowej w bezpośrednim sąsiedztwie stożkowego przejścia z częścią chwytową (rys.21). Forma tego kształtu uwidoczniła się na rys.21b gdzie zaobserwowano w powiększonej skali deformację próbki wywołaną jej zamocowaniem w uchwytach hydraulicznych. Powstały rozkład naprężeń po zamocowaniu próbki doprowadza do utworzenia się geometrycznej imperfekcji, która pośredniczy w przekazywaniu obciążeń z części chwytowej na część pomiarową w trakcie ściskania i rozciągania próbki. Powoduje to, że zewnętrzne obrzeża walcowej powłoki stanowiącej część pomiarową próbki są obciążone siłą osiową i momentem zginającym, który dodatkowo uwydatnia nieliniowe odkształcenia sprężyste o przeciwnych znakach przy ściskaniu i rozciąganiu. Powstanie takiej imperfekcji geometrycznej pod wpływem mocowania próbki wpływa niekorzystnie na rozkład odkształceń w części pomiarowej i ogranicza zakres dopuszczalnych odkształceń próbki. Stopniowy rozwój tej imperfekcji w miarę wzrostu siły ściskającej prowadzi w konsekwencji do utraty stateczności i utworzenia się fałdy pokazanej na zdjęciu (rys.8), która powstała przy odkształceniu całkowitym około 0.8%.

ABAQUS



rys.21. Wizualizacja deformacji ścianki osiowo symetrycznej próbki rurkowej w trakcie jej zaciskania w uchwycie maszyny wytrzymałościowej określone na podstawie programu metody elementów skończonych "ABAQUS", a) połowa długości próbki, b) powiększony fragment przejścia pomiędzy częścią pomiarową i chwytową.

Skłonność do tworzenia się imperfekcji geometrycznej przy mocowaniu próbki jest zjawiskiem niekorzystnym, prowadzącym do zniekształcenia krzywych naprężenie-odkształcenie. Zmniejszenie wpływu tego zjawiska i ewentualnie jego eliminacja wymaga zmiany systemu mocowania próbki. Jest to sprawa trudna i kłopotliwa, wymagająca dodatkowych badań dla sprawdzenia przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Tym nie mniej w realizowanym programie badawczym opracowano koncepcję nowego układu mocującego próbki rurkowe, którego podstawową zaletą jest możliwość zwiększenia proporcji długości pomiarowej do całkowitej długości próbki. W proponowanym rozwiązaniu zapewniono śrubowe mocowania próbki z możliwością kasowania luzu części uchwytu przenoszącej moment skrecający. Uchwyty te zapewniają dobre osiowanie próbki i nie wprowadzają promieniowych naprężeń w części chwytowej przy mocowaniu próbki. Rysunki konstrukcyjne uchwytów mocujących dostosowanych do maszyny wytrzymałościowej *Instron 1343* przedstawiono w punkcie 4.1. Załączono również rysunek próbki rurkowej do tego uchwytu. Próbka ta jest również widoczna na zdjęciu (rys.8) pokazującym różne typy stosowanych w niniejszej pracy próbek.

Uchwyt o zacisku śrubowym według przedstawionych rysunków (punkt 4.2) został już wykonany, ale nie przeprowadzono jeszcze koniecznych prób sprawdzających jego działanie. Jeśli zgodnie z przewidywaniami uchwyty te nie będą wprowadzały niekorzystnych zaburzeń stanu odkształcenia w części pomiarowej próbki, to będą wykorzystywane w dalszych badaniach w warunkach złożonego stanu naprężenia.

3.3 Pomiar składowych odkształceń.

Pomiar składowych odkształceń próbki, które są wykorzystywane jako parametry sterujące w trakcie obciążania musi być dokładny i pozbawiony zakłóceń w stopniu, który może powodować reakcję układu sterującego, a w skrajnym przypadku nawet nieprzewidywalne zatrzymanie obciążania.

Pierwszy z zastosowanych sposobów pomiaru dwóch składowych odkształceń wynikających z działania siły osiowej i momentu skręcającego polegał na wykorzystaniu oryginalnego, dwuosiowego ekstensometru firmy *Instron*. Urządzenie to omówiono i pokazano na zdjęciu (rys.4) w punkcie 2.2 dotyczącym stanowiska badawczego. Rozdzielczość tego ekstensometru wynosiła odpowiednio $2,5 \cdot 10^{-5}$ dla odkształceń osiowych i $8,3 \cdot 10^{-6}$ dla odkształceń postaciowych. Są to wprawdzie wartości zbyt duże, zwłaszcza do odkształceń osiowych, jeśli uwzględnić konieczność wyznaczenia granicy plastyczności odpowiadającej na przykład trwałemu odkształceniu o wartości 10^{-5} czy $5 \cdot 10^{-5}$. Jednak ze względu na zasadniczą zaletę ekstensometru związaną z możliwością jego wielokrotnego użycia przeprowadzono serię wstępnych doświadczeń na próbkach rurkowych wykonanych ze stopu aluminium PA2 i PA6 o różnych zakresach granicy plastyczności. Wyniki tych badań pokazały, że poza wspomnianym wyżej ograniczeniem rozdzielczości, powtarzalność wskazań zależy od sposobu zamocowania ekstensometru na próbce. Ekstensometr mocuje się bowiem przy pomocy ostro zakończonych śrubowych wkrętów, a ich równe dokręcenie wymaga dużej wprawy. Dodatkowo jeszcze obserwuje się luzowanie zamocowania ekstensometru przy zmniejszaniu się średnicy próbki i związaną z tym wrażliwość na drgania co w kilku przypadkach doprowadziło do utraty zdolności sterowania, a w konsekwencji do zniszczenia próbki.

Uwzględniając więc powyższe aspekty stosowania ekstensometru zdecydowano się na pomiar składowych odkształceń przy pomocy układów tensometrów elektrooporowych naklejonych na powierzchni próbki. Pomiar taki może mieć znacznie lepszą rozdzielczość, która dla zastosowanego układu i kalibracji wynosiła $5 \cdot 10^{-7}$ (patrz rozdział 2.2). Zaletą układu tensometrycznego jest też jego niewrażliwość na drgania i tym samym poprawia się jakość sygnału sterującego, co zapobiega przed przypadkowym zaburzeniem prowadzącym zwykle do zniszczenia próbki. Schemat zastosowanego układu tensometrycznego przedstawiono na rys.5 (punkt 2.2), a do jego wykonania stosowano tensometry elektrooporowe firmy

Hottinger Baldwin Messtechnik o gwarantowanej liniowości. Cały układ pomiarowy dla jednej próbki składał się z dwóch rozet tensometrycznych RY73, i czterech tensometrów LY13. Układ ten umożliwiał pomiar odkształceń osiowych, obwodowych i postaciowych. Wykorzystanie tensometrów jest wprawdzie rozwiązaniem droгим ale jest to też pomiar znacznie dokładniejszy i pewniejszy w stosunku do pomiarów przy pomocy ekstensometru. Wszystkie dalsze badania na próbkach rurkowych wykonano z wykorzystaniem tensometrycznych układów do pomiaru odkształceń, które wyposażone były w układy kalibracji ustawione przy pomocy precyzyjnego mostka tensometrycznego typu UGR firmy Hottinger. Ustawiona w ten sposób wartość kalibrująca była wykorzystywana do kalibracji kanałów pomiaru odkształceń osiowych i postaciowych maszyny *Instron*.

3.4 Ocena błędów pomiarowych

Cykl badań wstępnych obejmował również analizę wpływu różnych czynników na błędy pomiarowe, przy czym rozpatrywano nie tyle wpływ czynników bezpośrednich, takich jak dokładności stosowanych urządzeń pomiarowych, których wpływ można łatwo ocenić, ale czynników pośrednich, takich jak warunki zamocowania próbki, postać deformacji próbki pod wpływem obciążeń, odchylenie kątowe naklejonych tensometrów w stosunku do geometrycznej osi próbki czy sposób pomiaru współczynnika Poissona.

Wpływ sposobu zamocowania próbki i związany z nim sposób wprowadzenia obciążeń zewnętrznych do części pomiarowej próbki omówiono już wcześniej w częściach 3.1 i 3.2 dotyczących próbki. Przeprowadzona analiza numeryczna stanu naprężenia i odkształcenia w trakcie zaciskania próbki w uchwytach oraz analiza wyników doświadczalnych dla próbek z różnych materiałów i o różnej długości części pomiarowej wskazują, jak już to wcześniej przedstawiona, że warunki zamocowania i proporcje próbki mogą w istotny i niekorzystny sposób wpływać na uzyskiwane wyniki doświadczalne. Doraźnym rozwiązaniem tego problemu jest odpowiednie przetwarzanie wyników, zgodnie z opisaną wcześniej procedurą. Rozwiązaniem

najkorzystniejszym jest zaprojektowanie uchwytów i próbki o takiej konstrukcji, aby wyeliminować wszystkie niekorzystne zjawiska powodujące zaburzenie jednorodności stanu odkształcenia w części pomiarowej próbki. W pracy podjęto taką próbę i wykonano projekt techniczny zamocowania próbki w maszynie wytrzymałościowej *Instron* oraz wykonano w metalu całe urządzenie. Rysunki konstrukcyjne tych nowych uchwytów przedstawiono w części 4.1 niniejszego raportu.

Następnym rozpatrywanym czynnikiem wpływającym w sposób systematyczny dla danej próbki, a w sposób przypadkowy dla serii próbek są odchylenia kątowe naklejonych tensometrów w stosunku do osi próbki, a więc i w stosunku do kierunków obciążania. Powstałe w ten sposób błędy są oczywiste i łatwe do oszacowania. Istota problemu sprowadza się do sposobu uniknięcia błędów tego typu. Te właśnie czynniki zadecydowały o wyborze rodzaju zastosowanych w tych badaniach tensometrów elektrooporowych. Na próbce po obu jej stronach naklejano dwie rozety tensometryczne, na każdej z nich były trzy tensometry o bazie 6 mm , z których dwa pod kątem 90° do siebie były jednocześnie pod kątem 45° do trzeciego tensometru. Te dwa pierwsze tensometry tworzyły dwie gałęzie układu do pomiaru odkształceń postaciowych, a tensometr trzeci o kierunku pokrywającym się z kierunkiem całej rozety stanowił element układu do pomiaru odkształceń osiowych. Kątowe rozstawienie tych trzech tensometrów na jednej rozecie jest ustalone bardzo dokładnie przez wytwórcę, tak że istnieje jedynie możliwość popełnienia błędu przy naklejeniu całej rozety. Możliwy błąd jest jednak znacznie ograniczony ze względu na większe wymiary rozety i odstęp pomiędzy ustalonymi fabrycznie znacznikami, które powinny się pokryć z wytrasowaną linią na powierzchni próbki. W ten sposób zachowanie normalnej staranności przy naklejeniu tensometrów eliminowało możliwość powstania tego typu błędów. Tym niemniej ewentualne błędy wynikające z kątowych odchyżeń tensometrów kontrolowano jeszcze w trakcie doświadczeń za pośrednictwem obserwacji wskazań układu do pomiaru odkształceń osiowych przy obciążaniu próbki jedynie momentem

skręcającym i na odwrót na podstawie wskazań układu do pomiaru odkształceń postaciowych złożonego z czterech tensometrów naklejonych pod kątami $\pm 45^\circ$ do osi próbki przy jej obciążaniu jedynie siłą osiową. Negatywny wynik takiego testu dyskwalifikował wykonany na próbce układ do pomiaru odkształceń i próbka była odrzucana z zestawu danych doświadczalnych danej serii.

Kolejnym ważnym czynnikiem, który wpływa na dokładność uzyskiwanych wyników jest sposób określenia współczynnika Poissona. Jest to wielkość potrzebna do obliczenia efektywnych odkształceń przy założeniu, stosowanym zwykle przy przetwarzaniu wyników tego typu doświadczeń, że odkształcenia po grubości ścianki próbki i odkształcenia obwodowe określone są iloczynem współczynnika Poissona i odkształceń osiowych. Przyjęcie tego założenia wynika z trudności pomiaru zmian grubości ścianki próbki jak również ograniczenia możliwości pomiaru odkształcenia obwodowego ze względu na brak w maszynie wytrzymałościowej dodatkowego toru do pomiaru jeszcze jednej składowej odkształcenia. Maszyna wytrzymałościowa *Instron* ma dwa tory do przetwarzania sygnałów obciążeń osiowych i skrętnych, dwa tory sygnałów przemieszczeń osiowych i skrętnych i dwa tory do przetwarzania dwóch składowych odkształceń, osiowych i postaciowych. Tylko jeden z tych trzech sygnałów, obciążenia, przemieszczenia lub odkształcenia może być wybrany jako sygnał sterujący. Techniczne ograniczenia możliwości pomiaru wszystkich czterech składowych odkształceń występujących przy dwuosiowym obciążaniu cienkościennych próbek rurkowych omawiano już w części dotyczącej aparatury badawczej. Przedstawiono też przyjęty w pracy sposób pomiaru składowych odkształceń obwodowych, który umożliwiał określenie współczynnika Poissona jako funkcji odkształceń osiowych. Dane te wykorzystywano przy wtórnym przetwarzaniu wyników doświadczeń, a określona w ten sposób średnia wartość współczynnika Poissona w danym zakresie odkształceń osiowych była wprowadzana w danych początkowych do programu sterującego pracą maszyny *Instron*. Zgodnie więc z przyjętą, przy realizacji niniejszego programu badawczego procedurą w programie sterującym przebiegiem doświadczenia stosowano stałą, wcześniej wprowadzoną

wartość współczynnika Poissona, natomiast przy wtórnym przetwarzaniu wyników doświadczenia wykorzystywano dane z bezpośredniego pomiaru obwodowej składowej odkształcenia. Sposób ten umożliwiał korekcję ewentualnych błędów związanych z przyjętym współczynnikiem Poissona i co więcej umożliwiał ocenę tego błędu.

4. Prace konstrukcyjne

Realizacja założonego programu badań wymagała zaprojektowania i wykonania w metalu urządzeń specjalnych do mocowania próbek i do pomiaru odkształceń. Prace te mają charakter pomocniczy, ale wynikające z nich rozwiązania techniczne często wpływają w sposób decydujący na uzyskiwane wyniki. Wykaz takich prac wykonanych w realizowanym projekcie badawczym obejmuje:

1. opracowanie i wykonanie w metalu konstrukcji nowych uchwytów do mocowania próbek rurkowych,
2. opracowanie konstrukcji próbki krzyżowej z blachy i wykonanie kilku sztuk z różnych materiałów,
3. opracowanie i wykonanie uchwytu do obróbki próbki krzyżowej z blachy,
4. opracowanie i wykonanie uchwytów do mocowania próbki krzyżowej z blachy w sposób zapewniający równomierne wprowadzenie obciążeń,
5. opracowanie nowej wersji ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej poddanej dwuosiowemu rozciąganiu oraz wykonanie prototypu tego urządzenia.

W kolejnych punktach przedstawione będą główne cechy zaprojektowanych urządzeń wraz z ich rysunkami wykonawczymi.

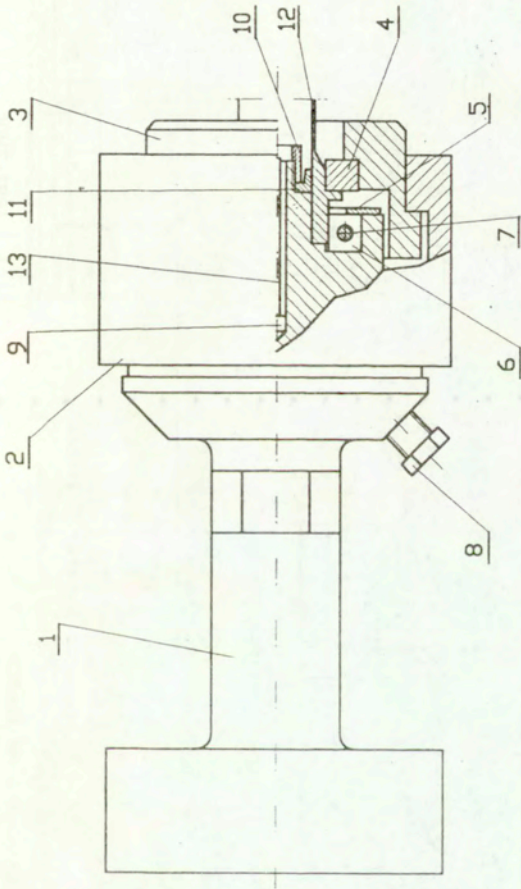
4.1 Uchwyt do mocowania próbek rurkowych

Oryginalny układ maszyny *Instron* do zamocowania próbki w uchwytach hydraulicznych wprowadza, jak to wcześniej przedstawiono, niekorzystny rozkład naprężeń uwypuklający zmiany geometrii próbki w miarę wzrostu obciążenia. Układ

ten wymaga długich części chwytowych po obu stronach próbki, co ogranicza długość części pomiarowej. W celu eliminacji tych niekorzystnych elementów zaprojektowano nowe uchwyty, które będą montowane w miejsce istniejących uchwytów hydraulicznych. Zasadnicze cechy tej nowej konstrukcji obejmują:

- kolnierzowe mocowanie próbki bez wywoływania promieniowych naprężeń obciskających próbkę,
- osiowanie próbki na dopasowanych trzpieniach,
- możliwość obciążania próbki siłą osiową, momentem skręcającym i ciśnieniem wewnętrznym,
- kasowanie luzu układu przenoszącego na próbkę moment skręcający,
- znaczne wydłużenie części pomiarowej w stosunku do całkowitej długości próbki, co uwidoczniło na zdjęciu (rys.8).

Uchwyty te zostały wykonane zgodnie z załączonymi rysunkami konstrukcyjnymi (rys.22-33), a po sprawdzeniu ich działania w całym zakresie obciążeń nominalnych maszyny będą wykorzystywane w dalszych pracach badawczych w warunkach złożonego stanu naprężenia.

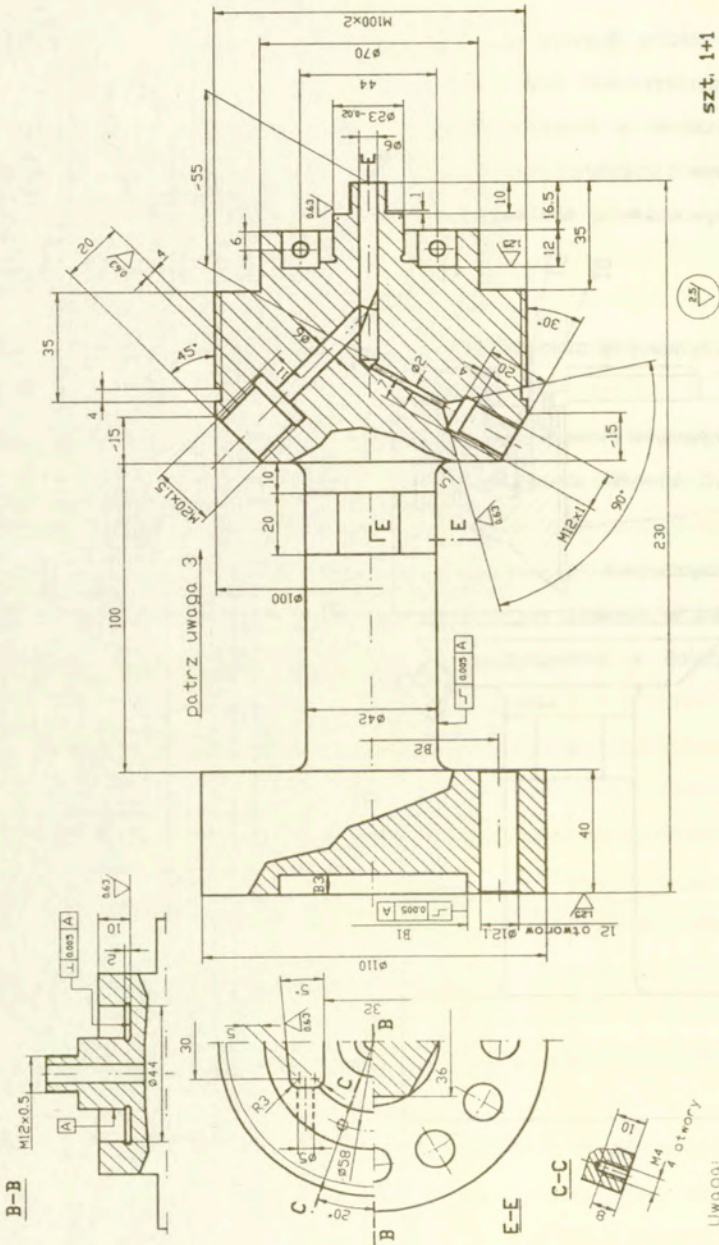


Uwaga:

1. Części 9 i 13 skleić.

13	Wkręt M4	2	4	Pierścien	2		
12	Rurka polietylenowa	1	3	Tuleja	2		
11	Próbka	1	2	Nakrętka	2		
10	Uszczelka	2	1	Uchwyt	1+1		
9	Nakrętka	2	Numer	Nazwa	Części	Ilość szt.	Uwagi
8	Korek	2	Konstr.	określ	określ	określ	Nazwa przedmiotu
7	Zawrtek	2	Rysował	określ	określ	określ	Uchwyt
6	Wkręt	2+2	Sprzedaż	określ	określ	określ	Zost. przez rysow.
5	Klin	4+4	Konopce	określ	określ	określ	Numer rysunku
4	Nabłodka	1+1	Zęta.	określ	określ	określ	Arka
Numer	Nazwa	Części	Ilość	szt.	Uwagi	IPPT-ZMDC IU-0	

rys.22. Rysunek zestawieniowy nowego układu mocowania próbek rurkowych.

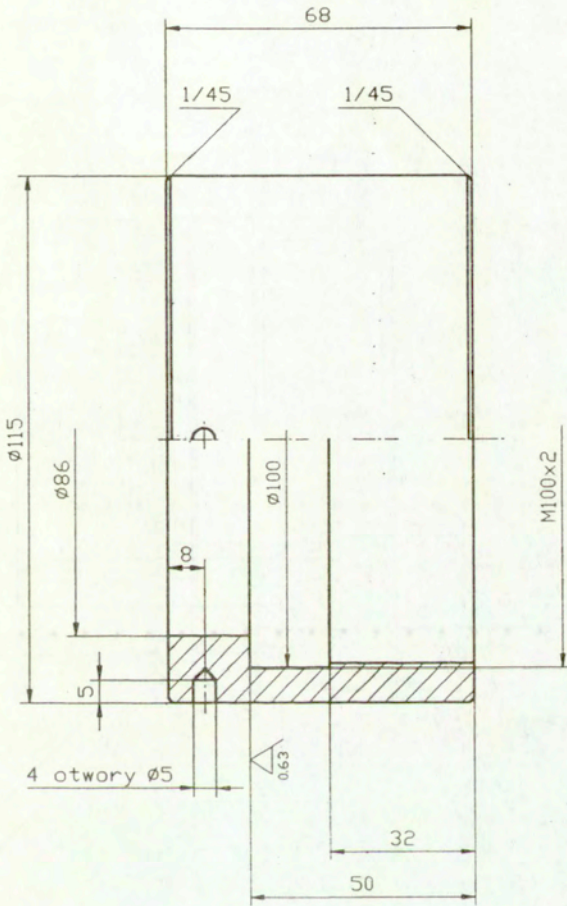


rys.23. Korpus nowego układu mocowania próbek rurkowych.

Konstr.		Podpis		Materiał		Nazwa przedmiotu	
0	0	0	0	30	30	Uchwyt	
Wykonanie		Sprawdzenie		Zastryżenie		Zastryżenie	
Kontrola		Zastryżenie		Zastryżenie		Zastryżenie	
Zastryżenie		Zastryżenie		Zastryżenie		Zastryżenie	
Podziałka		Nazwa przedsiębiorstwa		Znak przedsi.		Numer rysunku	
IPPT-ZMDC		IPPT-ZMDC		IPPT-ZMDC		IU-1	

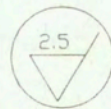
Uwaga:

1. Krowędzie zalamać 0,5/45°.
2. Wymiary B1, B2, B3 zgodnic z wymiarami Instrona.
3. Jedna sztukę wykonac bez otworów M20 i Ø6.
4. Ulepszać cieplnie do 60HRC.



Uwaga!

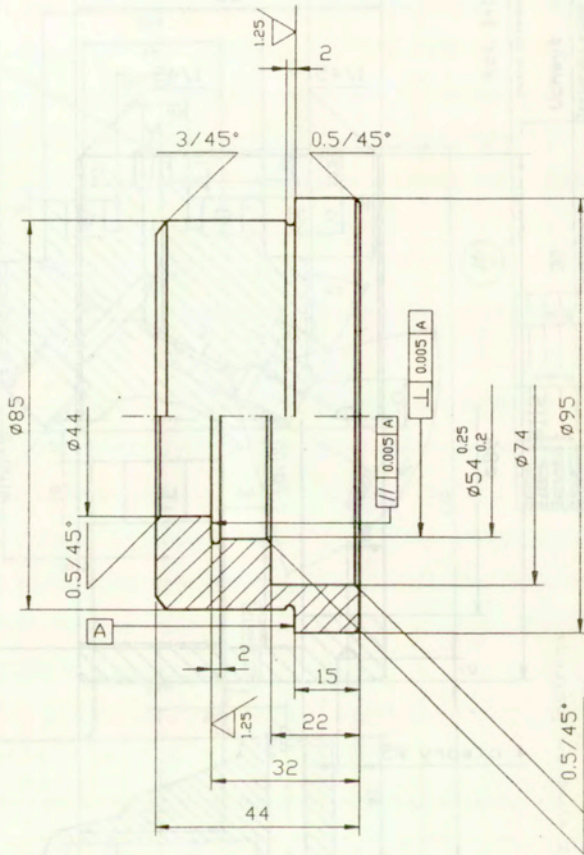
1. Ostre krawędzie stepic.
2. Ulepszać cieplnie do 60HRC.



2 szt.

Konstr.	Nazwisko	Podpis	Data	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował				30	Nakretka
Sprawdził				Zast.rys.nr	Zast.przez rys.nr
Kon.norm.				Podzialka	Nazwa przedsiębiorstwa
Zatw.				Znak przeds.	Numer rysunku
1:1	IPPT-ZMOC				Ark.
					IU-2

rys.24. Tuleja zaciskowa nowego układu mocowania próbek rurkowych.



Uwaga:

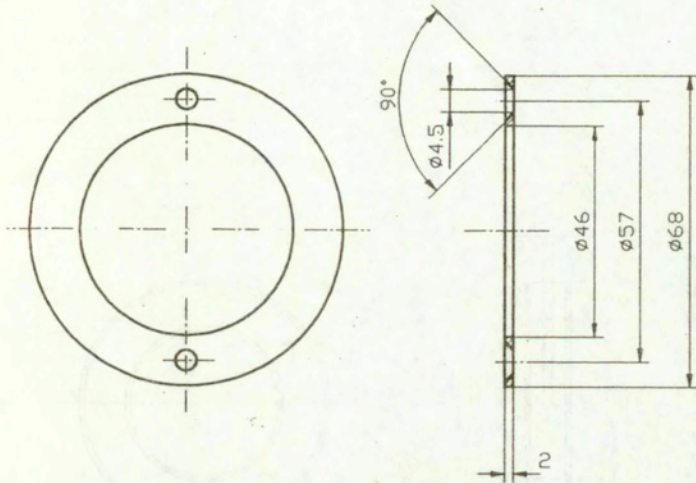
1. Ostre krawędzie stepic.
2. Ulepszać cieplnie do 60HRC.



2 szt.

Konstr.	Nazwisko	Podpis	Data	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował				30	Tuleja
Sprawdził					
Kon.norm.					
Zatw.				Zastrys.nr	Zast.przez rys.nr
Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa	Znak przed.	Numer rysunku	Ark.	
1:1	IPPT-ZMOC		IU-3		

rys.25. Pierścieni pośredni nowego układu mocowania próbek rurkowych.



Uwaga:

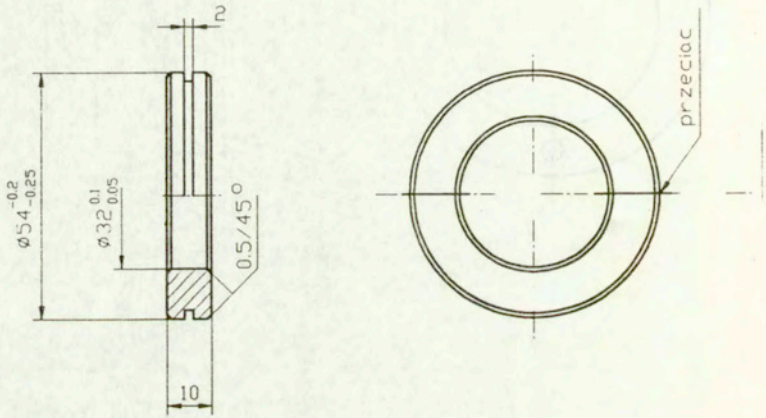
1. Ostre krawędzie stepic.



2 szt.

Konstr.	Nazwisko	Podpis	Data	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował				PA-6	Nakładka
Sprawdził				Zast.rys.nr	Zast.przez rys.nr
Kon.norm.				Podzialka	Nazwa przedsiębiorstwa
Zatw.				Znak przeds.	Numer rysunku
1:1	IPPT-ZMOC				Ark.
				IU-5	

rys.26 Nakładka nowego układu mocowania próbek rurkowych.



Uwaga:

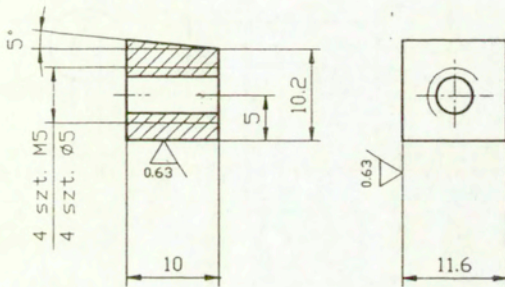
1. Ulepszać cieplnie do 60HRC
2. Ostre krawędzie stepic



2 szt.

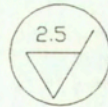
Konstr.	Nazwisko	Podpis	Data	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował				30	Pierścien
Sprawdził					
Kon.norm.					
Zatw.				Zastrys.nr	Zast.przez rys.nr
Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa	Znak przeds.		Numer rysunku	Ark.
1:1	IPPT-ZMOC			IU-4	

rys.27. Pierścien dwudzielny nowego układu mocowania próbek rurkowych.



Uwagi

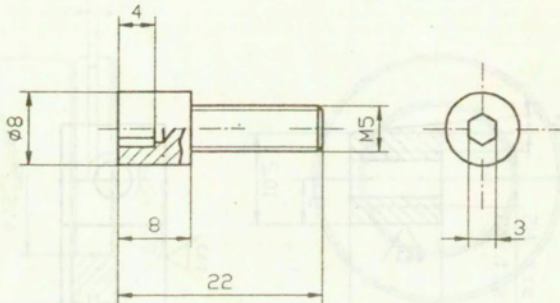
1. Krawędzie stepic $R=1$.
2. Ulepszać cieplnie 60HRC.



4+4 szt.

Konstr.	_____	_____	_____	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował	_____	_____	_____	NC3	Klin
Sprawdził	_____	_____	_____		
Kon.norm.	_____	_____	_____	Zastrys.nr	Zast.przez rys.nr
Zatw.	_____	_____	_____	Podzialka	Ark.
1:1	IPPT-ZMOC			Numer rysunku	
				IU-6	

rys.28. Klin zaciskowy nowego układu mocowania próbek rurkowych.



Uwaga:

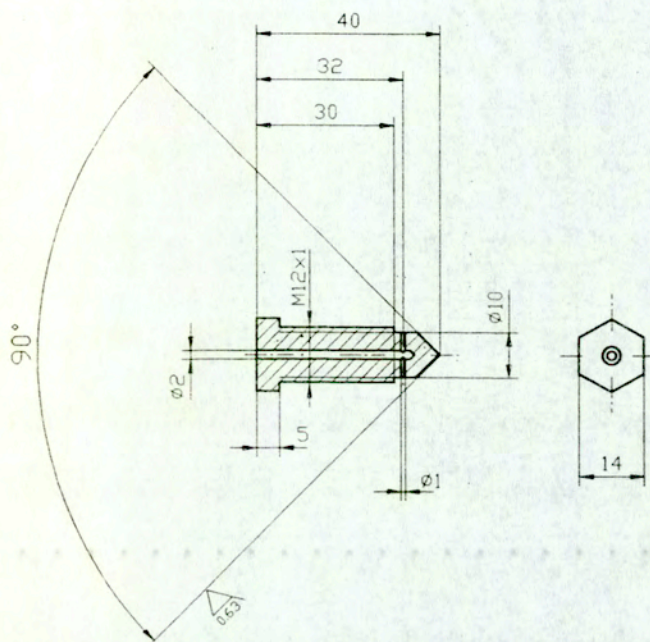
1. Ostre krawędzie stepic.



2+2 szt.

Konstr.					Material	Nazwa przedmiotu
Rysował					M58	Wkret
Sprawdził						
Kon.norm.	Nazwisko	Podpis	Data	Zastrys.nr	Zast.przez rys.nr	
Zatw.	Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa	Znak przeds.	Numer rysunku	Ark.	
	2:1	IPPT-ZMDC		IU-7		

rys.29. Śruba docisku nowego układu mocowania próbek rurkowych.

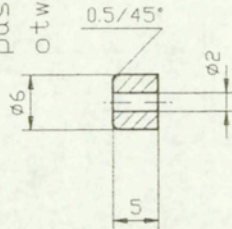


2 szt.

Konstr.	Nazwisko			Material	Nazwa przedmiotu	
Rysował	Podpis			45	Zaworek	
Sprawdził	Data					
Kon.norm.				Zastrys.nr	Zast.przez rys.nr	
Zatw.				Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa	Ark.
1:1	IPPT-ZMOC			Znak przeds.	Numer rysunku	
					IU-8	

rys.30. Śruba odpowietrzająca nowego układu mocowania próbek rurkowych.

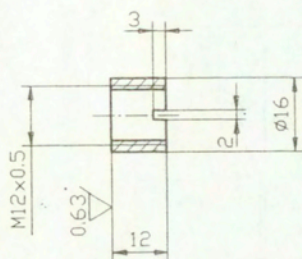
pasowac przylgowo do
otworu $\varnothing 6$ w IU1



2 szt.

Konstr.	Nazwisko	Podpis	Data	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował				Teflon	Korek
Sprawdził				Zastrys.nr	Zast.przez rys.nr
Kon.norm.					
Zatw.					
Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa	Znak przeds.	Numer rysunku	Ark.	
2:1	IPPT-ZMOC		IU-9		

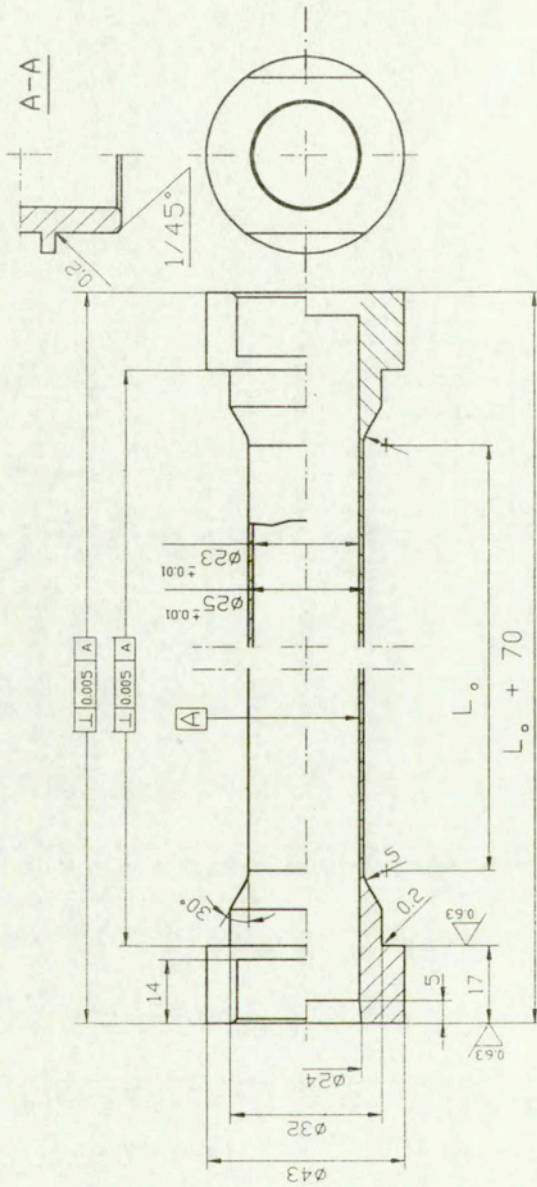
rys.31. Korek nowego układu mocowania próbek rurkowych.



2 szt

Konstr.	Nazwisko	Podpis	Data	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował				M58	Nakretka
Sprawdził					
Kon.norm.				Zast.rys.nr	Zast.przez rys.nr
Zatw					
Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa	Znak przeds.	Numer rysunku	Ark.	
1:1	IPPT-ZMDC		IU-10		

rys.32. Nakrętka nowego układu mocowania próbek rurkowych.



Uwaga!

1. Ostre krawędzie stepic.

Konstr.	Podpis	Material	Nazwa przedmiotu
Rysował	Data	metal	Probka
Sprawdził		Zast. rys. nr	Zast. przez rys. nr
Kon. norm.		Znak przed.	Numer rysunku
Za tw.			
Podziałka	Nazwa przedsiębiorstwa		
11	IPPT-ZMDC		IU-12

rys.33. Kształt i wymiary próbki dostosowanej do nowego układu mocowania próbek rurkowych.

4.2 Prace konstrukcyjne związane z badaniami dwuosiowego rozciągania na próbkach krzyżowych

Badania w warunkach złożonych stanów naprężenia uwarunkowane są postacią badanego półwyrobu. Próbki rurkowe mogą być wykonane z prętów i rur. Odrębną dziedziną o istotnym znaczeniu są badania cienkich blach. Kształt próbki i rodzaj obciążenia muszą być dostosowane do wymiarów półwyrobu. Badania w złożonych stanach naprężeń, których celem jest wyznaczenie postaci warunku plastyczności dla blach mogą być prowadzone na próbkach wyciętych pod różnymi kątami z arkusza blachy według procedury zaproponowanej przez W. Szczepińskiego [16] umożliwiającej wyznaczenie pewnego szczególnego przekroju powierzchni plastyczności, nie tylko po dodatniej stronie osi naprężeń, ale również dla rozciągających i ściskających naprężeń [36] dzięki zastosowaniu specjalnego oprzyrządowania do ściskania próbek z blachy. Drugi sposób przeprowadzania badań w warunkach złożonego stanu naprężenia dla blach polega na zastosowaniu próbek krzyżowych poddanych dwuosiowemu rozciąganiu. Te dwa sposoby uzupełniają się wzajemnie pod względem zakresu informacji o zachowaniu się materiału w warunkach złożonego stanu naprężenia.

Harmonogram badań realizowanego programu badawczego obejmował badania na próbkach krzyżowych, a zakres wykonanych prac dotyczył konstrukcji próbki i sposobu jej wykonania, a także układu do zamocowania próbki oraz układu do pomiaru odkształceń dla ogólnego przypadku, w którym osie główne odkształceń nie pokrywają się z osiami działania obciążeń, jak ma to miejsce dla materiałów anizotropowych.

4.2.1. Próbka krzyżowa wykonana z blachy

Sprawą najistotniejszą przy dwuosiowym rozciąganiu próbek krzyżowych jest zapewnienie jednorodnego stanu naprężenia i odkształcenia w części pomiarowej próbki i osłabienie więzów wynikających z kształtu próbki. Osiaga się to zwykle dzięki konstrukcyjnemu osłabieniu przekroju poprzecznego w środkowej części

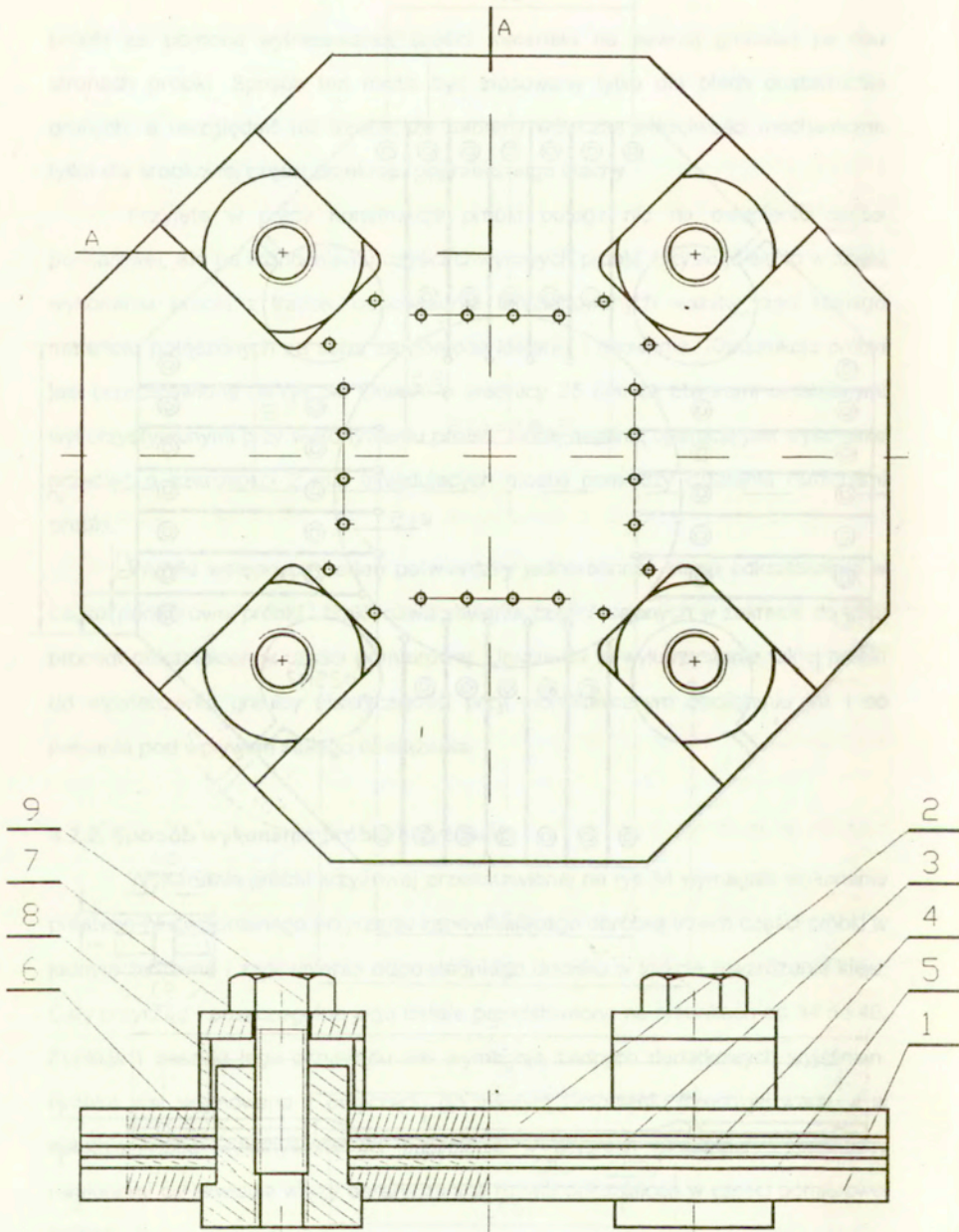
próbki za pomocą wyfrezowania części materiału na pewnej grubości po obu stronach próbki. Sposób ten może być stosowany tylko dla blach dostatecznie grubych, a uwzględnić też trzeba, że badamy wówczas właściwości mechaniczne tylko dla środkowej części przekroju poprzecznego blachy.

Przyjęta w pracy konstrukcja próbki polega nie na osłabieniu części pomiarowej, ale na wzmocnieniu części chwytowych próbki. Uzyskuje się to w dzięki wykonaniu próbki z trzech, odpowiednio ukształtowanych warstw tego samego materiału połączonych ze sobą za pomocą klejenia i nitowania. Konstrukcja próbki jest przedstawiona na rys.34. Otwory o średnicy 25 mm są otworami ustalającymi wykorzystywanymi przy wykonywaniu próbki, której ostatnią operacją jest wykonanie przecięć o szerokości 2 mm likwidujących mostki pomiędzy czterema ramionami próbki.

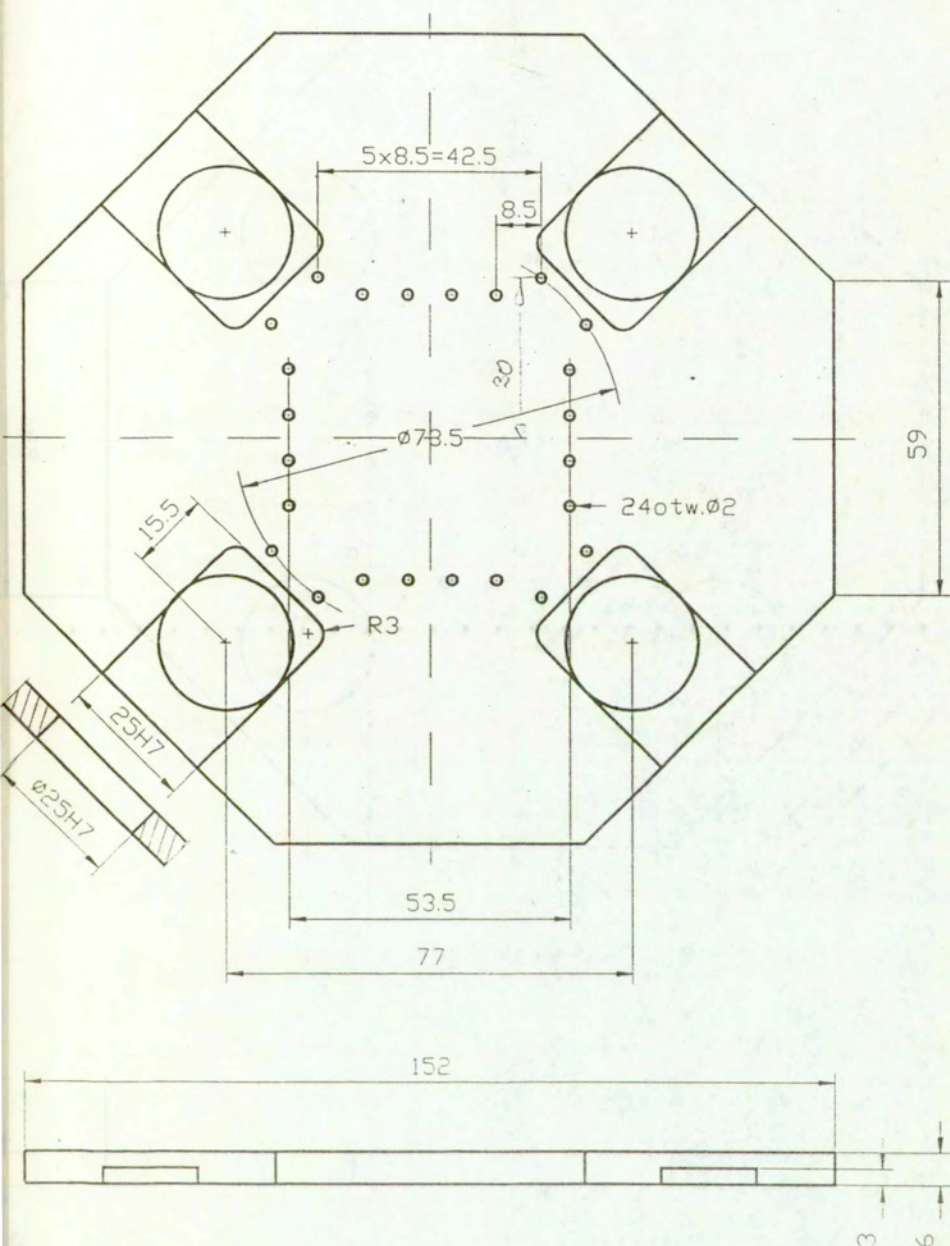
Wyniki wstępnych badań potwierdziły jednorodność stanu odkształcenia w części pomiarowej próbki i brak rozwarstwienia części klejonych w zakresie do kilku procent odkształceń w części pomiarowej. Umożliwia to wykorzystanie takiej próbki do wyznaczenia granicy plastyczności przy monotonicznym obciążaniu jak i do pełzania pod wpływem stałego obciążenia.

4.2.2. Sposób wykonania próbki krzyżowej

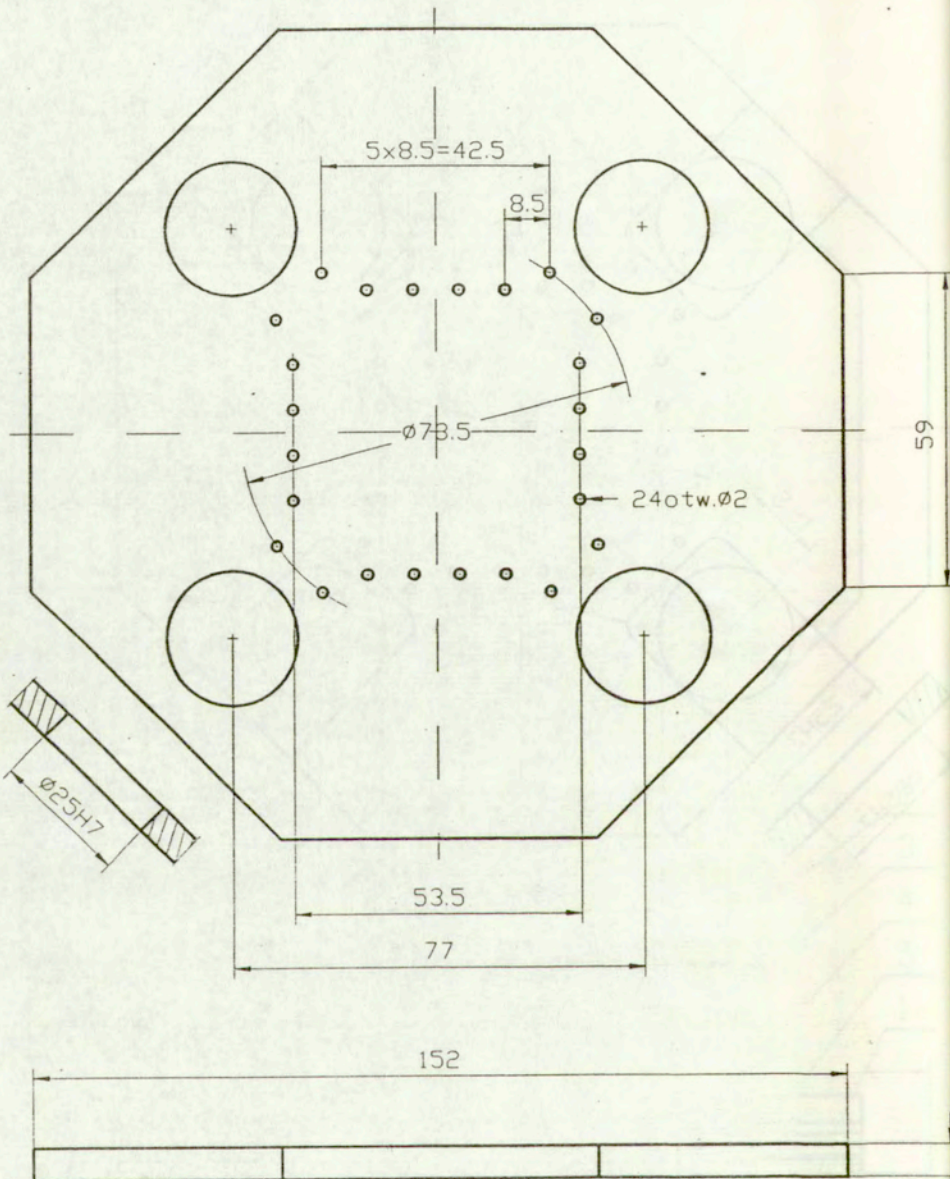
Wykonanie próbki krzyżowej przedstawionej na rys.34 wymagało wykonanie prostego i funkcjonalnego przyrządu zapewniającego obróbkę trzech części próbki w jednym zestawie i zapewnienie odpowiedniego docisku w trakcie utwardzania kleju. Cały przyrząd i poszczególne jego detale przedstawiono na rysunkach od 34 do 40. Funkcja i zasada tego przyrządu nie wymagają żadnych dodatkowych wyjaśnień. Próbką jest wyjmowana z przyrządu po trwałym zespoleniu trzech jej warstw, a w ostatniej fazie wykonywane są przecięcia w czterech ramionach i pomiędzy ramionami co likwiduje więzy ograniczające rozwój odkształceń w części pomiarowej próbki.



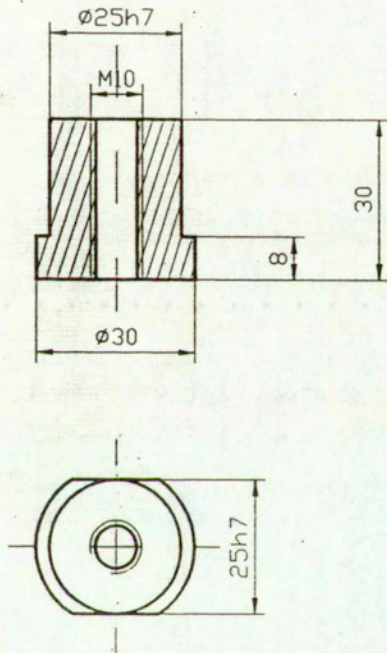
rys.35. Zestawienie przyrządu do obróbki próbki krzyżowej z rys.34.



rys.36. Płyta dolna przyrządu do obróbki z rys.35.

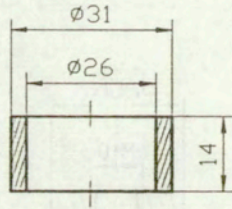


rys.37. Płyta górna przyrządu do obróbki z rys.35.



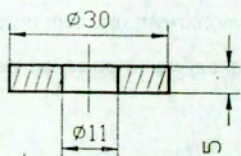
Kolek ustalający cz.6. mat.45 szt.4.

rys.38. Kolek ustalający przyrządu do obróbki z rys.35.



tulejka docis. cz.8 mat.45 szt.4

rys.39. Tuleja dociskowa przyrzadu do obróbki z rys.35.

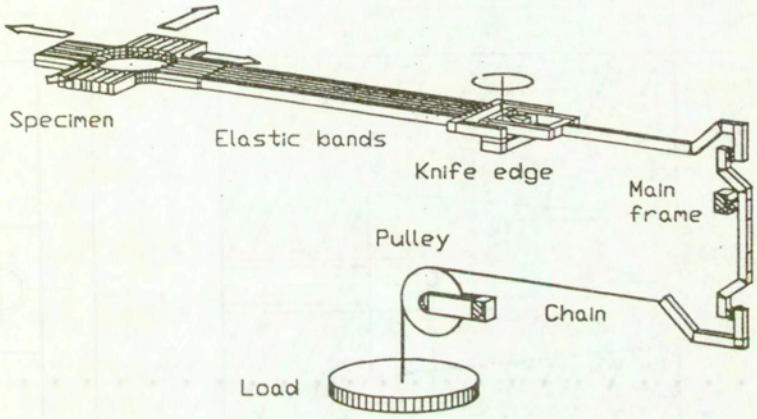


Podkładka specj. cz.9 mat.45 szt.4

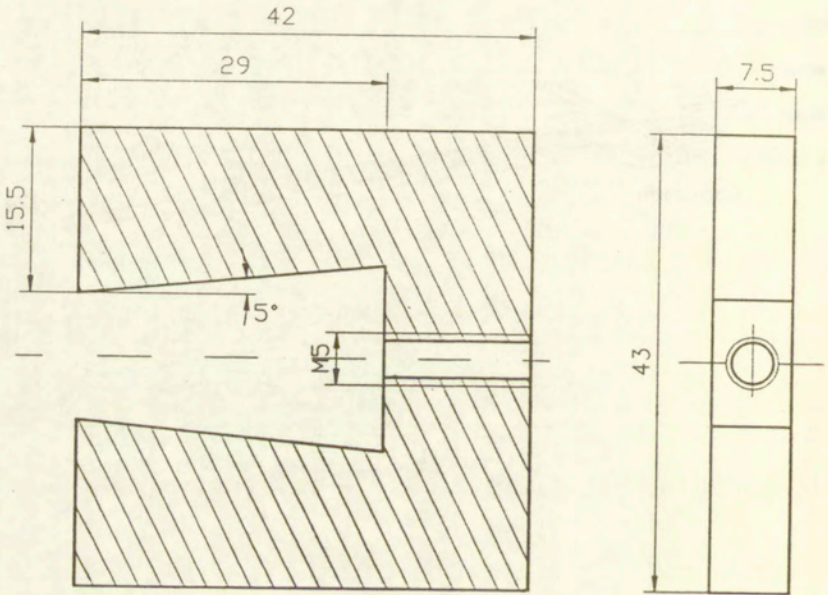
rys.40. Podkładka przyrządu do obróbki z rys.35.

4.2.3. Układ zamocowania próbki krzyżowej

Istotnym elementem zaprojektowanego układu mocowania próbki krzyżowej uwidocznionego schematycznie na rys.41 jest takie wprowadzenie obciążenia do ramion próbki, aby ramiona w jednym kierunku nie ograniczały odkształceń próbki powstałych od obciążenia na ramionach prostopadłych. W tym celu ramiona próbki są poprzecinane na pięć pasów i na każdy pas działa oddzielny uchwyt klinowy połączony długimi cięgnami z dźwigniowym układem przykładania siły rozciągającej. Poszczególne detale układu przekazywania obciążeń na próbkę przedstawiono na kolejnych rysunkach .41 do 49.



rys.41. Schemat łańcucha obciążenia jednego ramienia próbki krzyżowej.

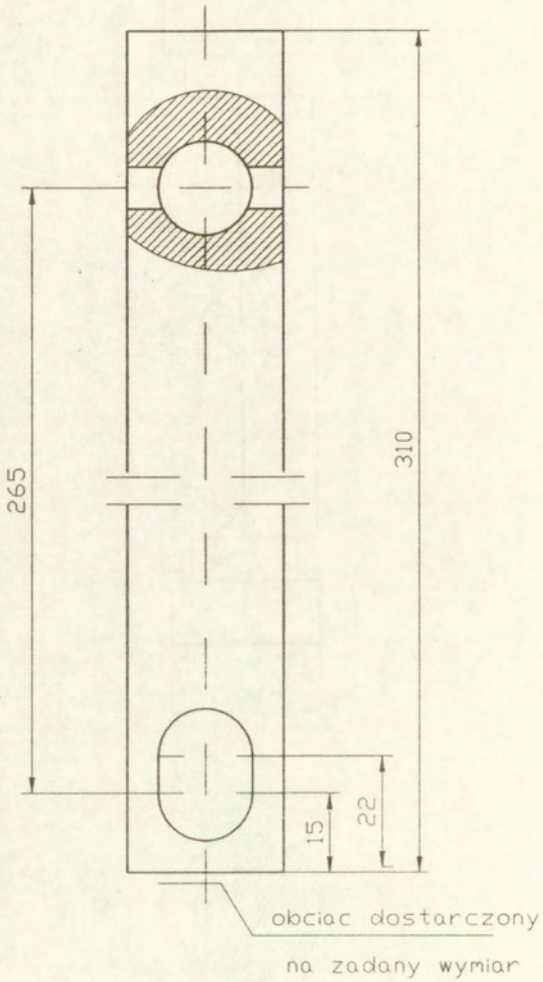


mat: NC10

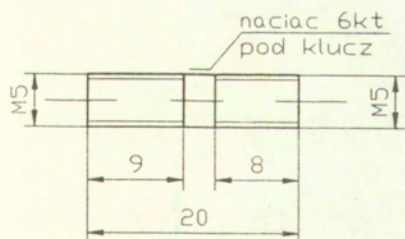
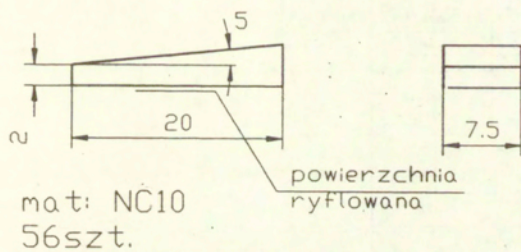
szt. 28

uwaga: ostre krawędzie stepic

rys.42. Zacisk klinowy układu mocowania próbki krzyżowej z rys.34.

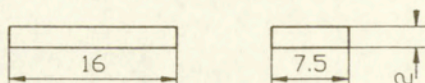


rys.44. Ciężno układu mocowania próbki krzyżowej z rys.34.

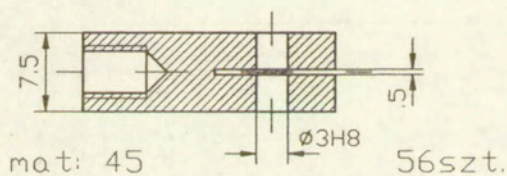
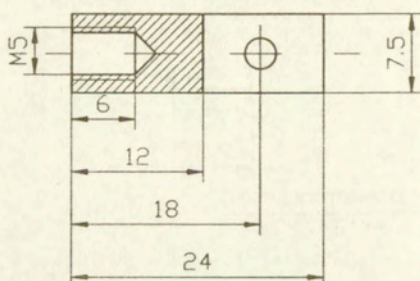


mat: NC10
28szt.

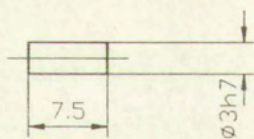
rys.45. Detale układu mocowania próbki krzyżowej z rys.34.



mat: blacha st. = 2 28szt.

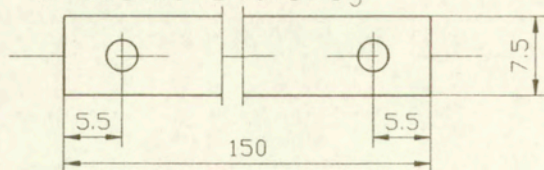


mat: 45 56szt.



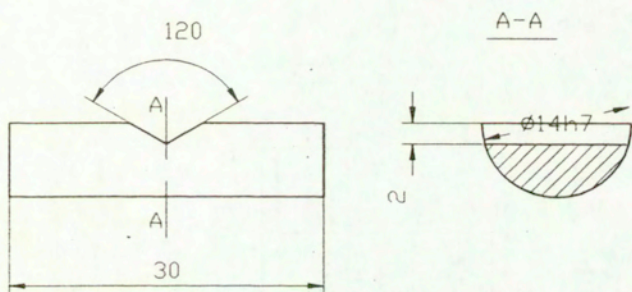
mat: 45 56szt.

wykonanie otworów $\phi 3H8$
w taśmie stalowej



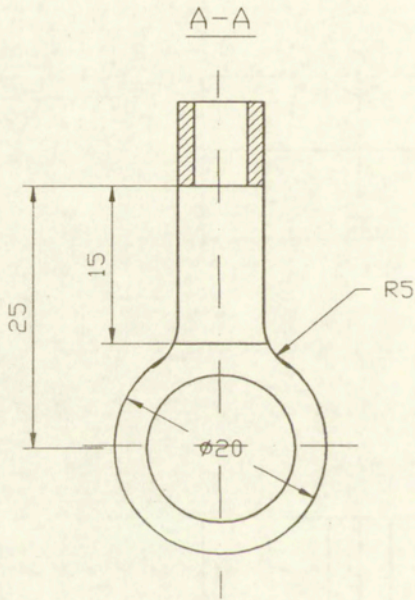
28szt.

rys.46. Detale układu mocowania próbek krzyżowej z rys. 34.

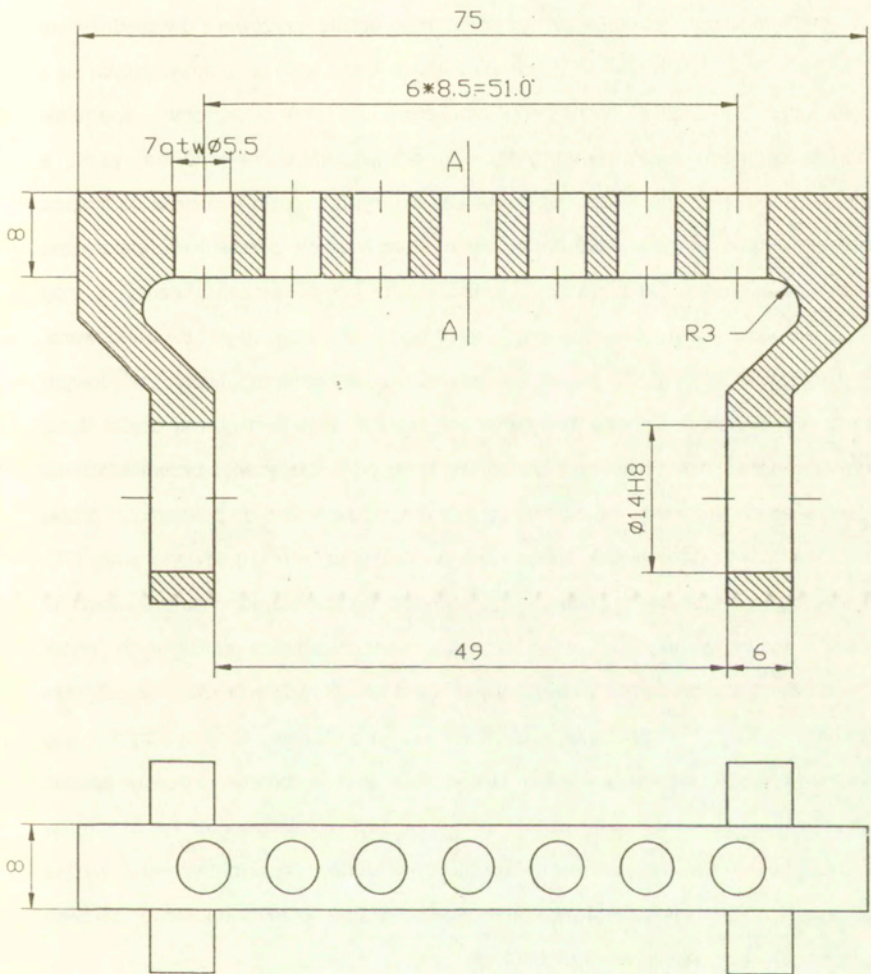


Hartowac
 Promień zaokrąglenia łożyska
 o kacie rozwarcia 120
 wynosi max. $R=0.5\text{mm}$
 mat: NC10 4szt.

rys.47. Gniazdo łożyska nożowego układu mocowania próbki krzyżowej z rys.34.



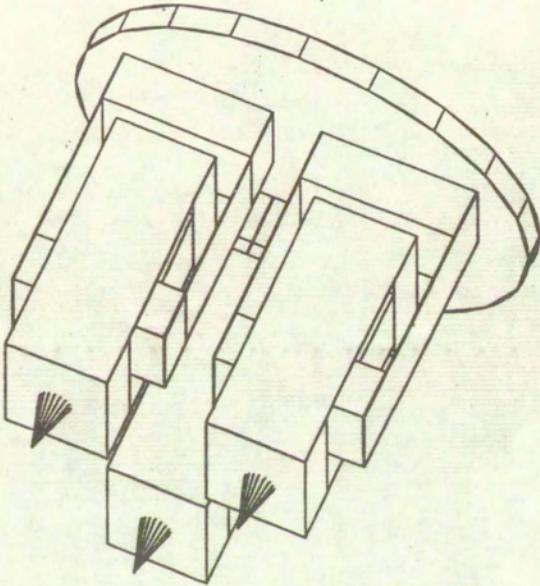
rys.48. Ucho ciągną układu mocowania próbki krzyżowej z rys.34.



rys. 49. Korpus łożyska nożowego układu mocowania próbki krzyżowej z rys. 34.

4.2.4. Układ do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej

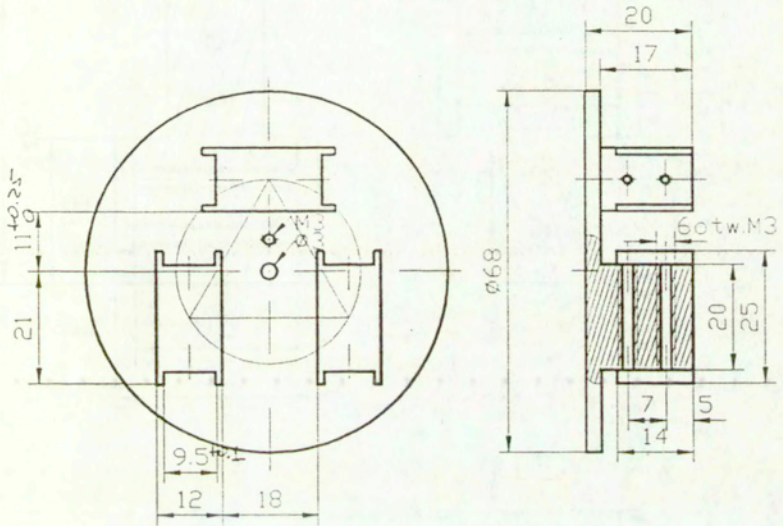
Pomiar odkształceń w części pomiarowej próbki krzyżowej z uwzględnieniem jej anizotropowych właściwości mechanicznych o kierunkach nie pokrywających się z kierunkami działania obciążeń realizowano przy pomocy specjalnie zaprojektowanego ekstensometru, którego schemat przedstawiono na rys.50, a wykonany egzemplarz uwidoczniło na zdjęciu (rys.51) gdzie widoczne są miejsca naklejenia tensometrów elektrooporowych stanowiących przetworniki elektryczne dwóch wzajemnie prostopadłych składowych przemieszczeń każdej z nóg ekstensometru. Każda z trzech jednakowych nóg ekstensometru jest tak zbudowana, że umożliwia niezależny pomiar wzajemnie prostopadłych dwóch składowych przesunięcia ostrza dolnego związanego z próbką względem górnej części danej nogi pomiarowej połączonej na stałe do sztywnej płytki. Znając więc przemieszczenia trzech wierzchołków trójkąta jaki tworzą trzy ostrza dociśnięte do powierzchni próbki można obliczyć składowe odkształceń w sposób opisany w przygotowanej pracy [27]. W wykonanej wersji ekstensometru, którego detale przedstawiono na rysunkach 52 do 57 zastosowano śrubowe połączenia poszczególnych sprężystych płytek pomiarowych z elementami zespalającymi. Jest to wprawdzie proste, ale zwiększa wymiary całego urządzenia. Wykonano cechowanie pojedynczych nóg ekstensometru i całego zestawu. Urządzenie jest w prosty i pewny sposób zamocowane na powierzchni próbki przy pomocy widocznych na rys.51 prętów mocujących, a ze wskazań poszczególnych układów tensometrycznych można obliczyć, za pośrednictwem wykonanego programu przeliczeniowego zarówno wartości jak i kierunki główne odkształceń.



rys.50. Schemat ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.



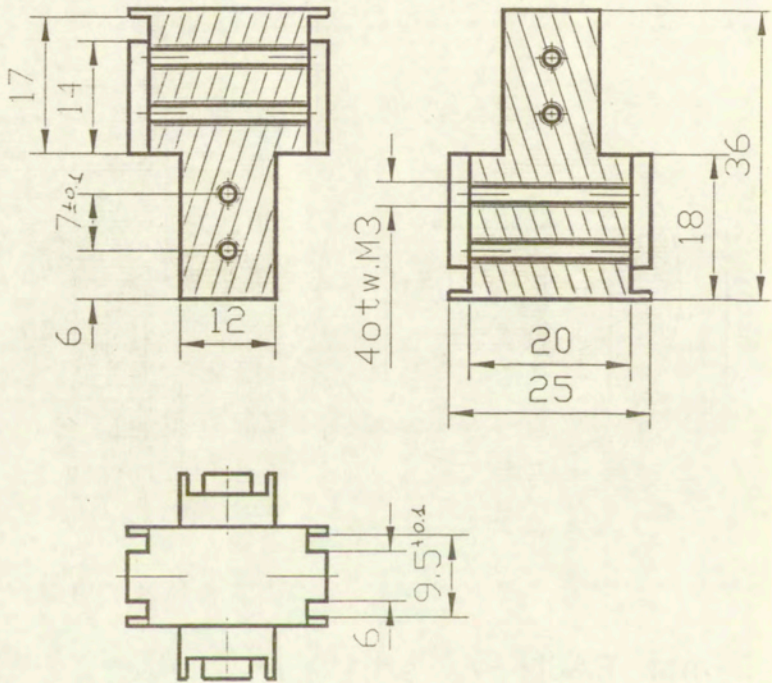
rys 51. Zdjęcie wykonanego ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.



mat.: PA6N

szt.1

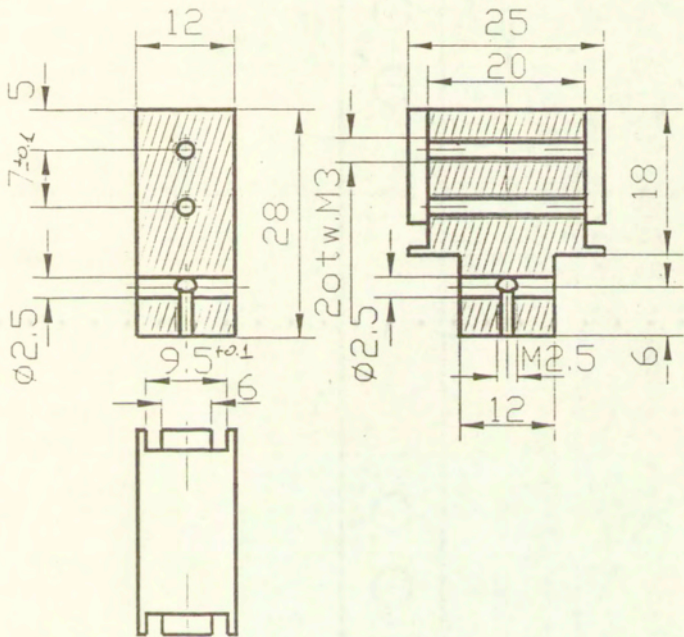
rys. 52 Korpus ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbek krzyżowej.



mat.: PA6N

szt.3

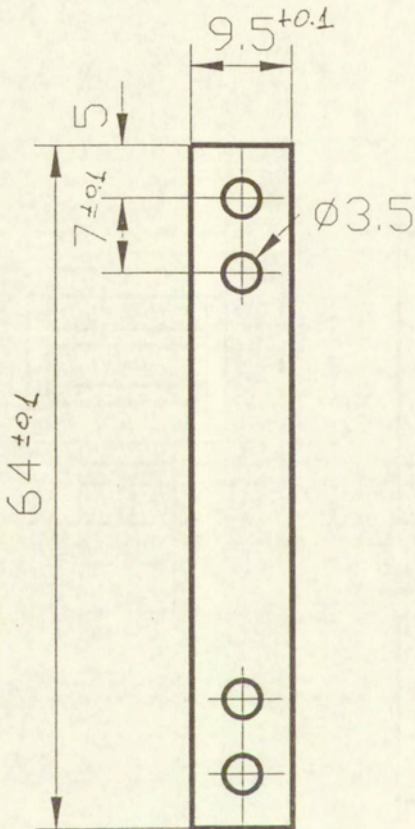
rys.53. Korpus pośredni nogi ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.



mat.: PA6N

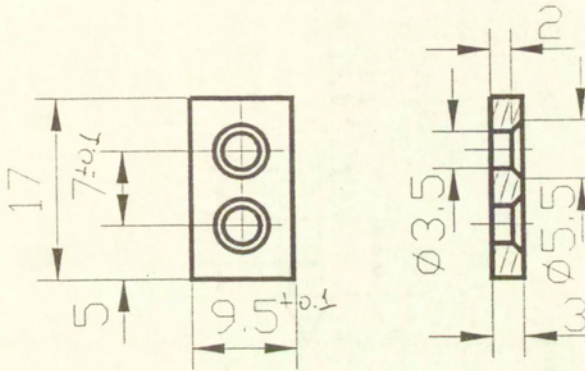
szt.3

rys.54. Korpus dolny nogi ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.



mat.: brąz berylowy #0.1 szt.6

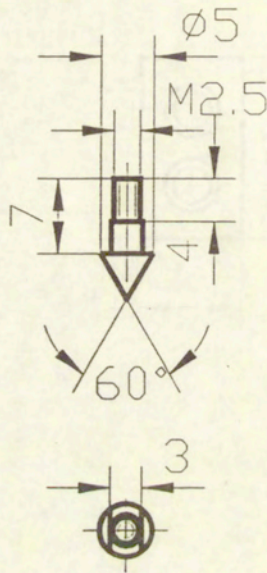
rys.55. Element sprężysty ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.



mat.: PA6N

szt.6

rys.56. Płytką dociskowa ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.



mat. NC10 szt.3
Uwagi: hartowac

rys.57. Bolec ustalający nogi ekstensometru do pomiaru kierunku i wartości odkształceń próbki krzyżowej.

5. Podsumowanie.

1. Badania materiałowe w warunkach złożonego stanu naprężenia dostarczają informacji niezbędnych do opisu zachowania się materiału stanowiących podstawę obliczeń wytrzymałościowych przy pomocy nowoczesnych programów komputerowych. Są to jednak badania wymagające stosowania zaawansowanych technik obciążania próbki i komputerowego przetwarzania wyników.
2. Istniejące w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki stanowisko badawcze rozbudowane w ramach projektu badawczego nr 301549101 umożliwiło prowadzenie takich badań na cienkościennych próbkach rurkowych poddanych różnym kombinacjom siły osiowej i momentu skręcającego z możliwością pełnej automatyzacji przebiegu doświadczenia, rejestracji wyników i następnie ich wtórnego przetwarzania komputerowego.
3. Opracowanie nowej próbki krzyżowej, jej układu zamocowania i oryginalnego ekstensometru umożliwiło prowadzenie badań blach przy dwuosiowym rozciąganiu i określenie ich anizotropowych właściwości wpływających w sposób decydujący na parametry obróbki plastycznego kształtowania różnych wyrobów z blachy.
4. Zestaw wyposażenia sprzętowego i programowego wykorzystywany przy realizacji niniejszego projektu badawczego stanowi przykład komputeryzacji badań doświadczalnych, której celem jest nie tylko ułatwienie badań doświadczalnych i zwiększenie ich dokładności, ale w ogóle umożliwia prowadzenie zaawansowanych badań materiałowych przy złożonych, długotrwałych obciążeniach.

5. Podziękowanie

Autorzy wyrażają podziękowanie Komitetowi Badań Naukowych za finansowanie tej pracy, wykonanej w ramach grantu nr 3 0154 91 01.

6. Literatura

1. Paul B., Fracture: An Advanced Treatise, vol.2 H. Liebovitz, ed., Academic Press, N.Y., 1968, pp. 315-349.
2. Hecker S.S., Experimental studies of yield phenomena in biaxially loaded metals, in: Constitutive Equations in Viscoplasticity: Computational and Engineering Aspects, 5-10 Dec., AMD 20, 1976.
3. Ikegami K., A historical perspective of experimental study on subsequent yield surfaces for metals, J.Soc.Mat.Sci.Japa., nos 261, 263, 1975.
4. Hsu T.C., Definition of the yield point in plasticity and its effect on the shape of the yield locus, J.Strain Anal., 1, 1966,331-338.
5. Hecker S.S., Influence of determination history on the yield locus and wstress-strain behavior of aluminum and copper, Met.Trans., 4, 1973, 985-989.
6. Shiratori E., Ikegami K., Kaneko K., The stress vector and the subsequent yield surface in loading along the strain path with a corner, Bull. of the ISME., 17, 113, 1974, 1405-1412.
7. Trąmpczyński W., The experimental verification of the unloading technique for the yield surface determination, Arch.Mech.Stos.,44, 2, 1992, 171-190.
8. White G.N., Drucker D.C., Effective stress and effective strain in relation to stress theories in plasticity, 1950, 21, 1013-1021.
9. Phillips A., Juh-Ling Tang, The effect of loading path on the yield surface at elevated temperatures, Int.J.Solids Struct., 8, 1972, 463-474.
10. Naghdi P.M., Essenburg F., Koff W., An experimental study of initial and subsequent yield surfaces in plasticity, J.Appl.Mech., ASME, E, 80, 1958, w201-209.
11. Ivey H.J., Plastic stress-strain relations and yield surfaces for aluminum alloys, J.Mech.Eng.Sci., 3, 1, 1961, 15-31.
12. Liu K.C, Greenstreet W.L., Experimental studies to examine elastic-plastic behaviors of metal alloys used in nuclear structures, in: Constitutive equations in viscoplasticity, ed.Stricklin and Saczalski, ASME, wAMD-vol.20,1975, 35-56.

13. Michno M.J., Findley W.N., An historical perspective of yield surface investigations for metals, *Int.J.Non-Linear Mech.*, 11, 1976, 59-82.
14. Jagn J.I., Sziszmariw O.A., Niektoryje rezultaty issledowanija granic uprogogo sostojanija plasticzeski rastjanutych obrazcow nikiela, *DAN SSSR*, T.119, N.1, 46-48.
15. Bertsch P.K., Findley W.N., An experimental study of subsequent yield surfaces: corners, normality, Bauschinger and allied effects, *Proc.4th U.S.nat.Congr.Appl.Mech.*, 1962, pp.893-907.
16. Szczepiński W., On the effect of plastic deformation on yield condition., *Arch.Mech.Stos.*, 15, 2, 1963, 275-296.
17. Miastkowski J., Szczepiński W., Doświadczalne badanie powierzchni plastyczności wstępnie odkształconego mosiądzu, *Mech.Teor.Stos.*, 3, 2, 1965, 55-66.
18. Shiratori E., Ikegami K, Experimental study of the subsequent yield surface by using cross-shaped specimens, *J.Mech.Phys.Solids*, 16, 6, 1968, 373-395.
19. Williams J.F., Svensson N.L., Effect of tensile prestrain on the yield locus of 1100-F aluminum, *J.Strain Anal.*, 5, 2, 1970, 128-139.
20. William J.F., Svensson N.L., Effect of torsional prestrain on the yield locus of 1100-F aluminum, *J.Strain Anal.*, 6, 4, 1971, 263-272.
21. Miastkowski J., Kryteria plastycznego płynięcia i hipotezy wzmocnienia metali w świetle badań doświadczalnych, *Prace IPPT-PAN*, 41, 1973, Warszawa.
22. Michno M.J., Findley W.N., Subsequent yield surfaces for aanealed mild wsteel under servo-controlled strain and load histories: aging, normality, convexity, corners, Bauschinger and cross effects, *J.Eng.Mat.Tech.*, ASME, D.,14, 1975, 25-32.
23. Ishikawa H., Sasaki K., Yield surfaces of SUS304 under cyclic loading, *J.Eng.Mat.Techn.*, 110, 4, 364-371.
24. Roliński Z., Zarys elektrycznej tensometrii oporowej, WNT, Warszawa, 1963.

25. Gupta N.K. Lauert H.A., A study of yield surface upon reversal of loading under biaxial stress, ZAMM 63, 1083, pp.497-504.
26. Szczebiot R., Analiza wzmocnienia stopu aluminium odkształconego plastycznie w warunkach złożonego stanu naprężenia, Prace IPPT-PAN, 21/1991.
27. Dietrich L., Waniewski M., Experimental setup for tests under biaxial tension of anisotropic cruciform specimen, w przygotowaniu do publikacji.
28. Miastkowski J., Metodyka statycznych badań doświadczalnych plastycznego płynięcia metali, Mech.Teor.Stos., 2, 13, 1975, 225-252.