

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA  
KATEDRA TEORII MASZYN CIEPLNYCH

C3  
Mgr inż. Eugeniusz Kalinowski

DOPUSZCZALNA SZYBKOSC STUDZENIA  
CIAŁ KRUCHYCH NA PRZYKŁADZIE KRUCHEGO  
SZKŁA PRZEZROCZYSTEGO

Praca doktorska

Promotor

Prof. mgr inż. Wiktor Wiśniewski



WROCŁAW

1 9 6 2

Nr 1546



1546

Ako. 9 1 5 / D. 1. 72



S p i s r z e c z y

	str.
I. STRESZCZENIE . . . . .	5
II. WSTEP . . . . .	7
III. ROZWAŻANIA TEORETYCZNE . . . . .	9
A. RÓWNANIE RÓŻNICZKOWE PRZEWODZENIA CIEPŁA . . . . .	9
B. STAN NAPREŻENIA I ODKSZTAŁCENIA . . . . .	11
1. Równania podstawowe . . . . .	11
2. Pole temperaturowe nie wywołujące stanu naprężenia . . . . .	14
3. Autora uogólnienie modelu oblicze- niowego stanu naprężeń termicznych . . . . .	15
C. HIPOTEZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA . . . . .	25
D. OKRESLENIE SZYBKOSCI STUDZENIA . . . . .	26
1. Krytyczna szybkość studzenia . . . . .	26
2. Dopuszczalna szybkość studzenia . . . . .	26
2.1. Stopień bezpieczeństwa . . . . .	26
E. METODA WYKRESLNO-OBLICZENIOWA	
OKRESLANIA NAPREŻEN TERMICZNYCH . . . . .	28
1. Wykreślna metoda określania pola temperaturowego . . . . .	28
2. Autora wykreślno-obliczeniowa metoda wyznaczenia naprężeń termicznych . . . . .	31
IV. BADANIA DOSWIADCZALNE . . . . .	38
A. PRZEDMIOT BADAN . . . . .	38
1. Szkło jako materiał sprężysty i,kruchy . . . . .	38
2. Wzrost naprężeń trwałych w szkłe . . . . .	41

	str.
B. URZĄDZENIE BADAWCZE . . . . .	43
1. Urządzenie badawcze podstawowe . . . . .	43
2. Stoisko do pomiaru doraźnej wytrzy- trzymałości na rozerwanie i wy- dłużalności mechanicznej szkła . . . . .	46
2.1. Stoisko badawcze oparte na rozciąganiu próbki . . . . .	46
2.2. Stoisko badawcze oparte na zginaniu próbki . . . . .	47
3. Urządzenie do pomiaru współ- czynnika wydłużalności linio- wej ciał w zależności od tem- peratury . . . . .	48
C. WYNIKI BADAŃ . . . . .	49
1. Wyniki badań wytrzymałości- owych . . . . .	49
2. Wyniki badań rozszerzalności termicznej szkła . . . . .	50
3. Wyniki badań przebiegu stu- dzenia . . . . .	52
D. OBLICZENIA . . . . .	53
1. Obliczenie naprężenia rozry- wającego $\sigma_r$ oraz niektórych wartości współczynnika sprę- żystości podłużnej $E$ z wyników pomiarów na rozrywance . . . . .	53
2. Obliczenie naprężenia rozry- wającego $\sigma_r$ oraz współczyn- nika sprężystości podłużnej $E$ , z wyników badań na zginarce . . . . .	54
3. Obliczenie współczynnika rozszerzalności liniowej szkła . . . . .	56
4. Obliczenie średniej tempe- ratury próbki przed studze- niem na urządzeniu podstawo- wym i średnich temperatur zimnych końców stosów termopar . . . . .	59



5. Obliczenie gęstości substancjalnej $\rho_t$ Nkg/m <sup>3</sup> . . . . .	65
6. Obliczenie kontrolne pomierzonych przebiegów temperatur na oscylografie pętlicowym . . . . .	66
7. Obliczenie odstępów czasu $\Delta t$ zgodnie z metodą Schmidta-Bindera . . . . .	69
8. Obliczenie spadków temperatur studzonej próbki szkła w okresie podstawowym $\Delta t_p$ °C, oraz całkowitych spadków temperatury $\Delta t_c$ °C w tym okresie . . . . .	71
9. Wykreślne wyznaczenie rozkładów temperatury i naprężeń $\sigma$ w badanej próbce szkła podczas studzenia oraz obliczenie wydłużeń pochodzących od tych naprężeń . . . . .	71
10. Wyznaczenie wykreślno-analityczne momentów gnących pochodzących od sił termicznych, oraz określ. wydłużeń spowodowanych tymi momentami . . . . .	71
11. Określenie krytycznego rozkładu temperatur przez określenie różnicy temperatur na skraju badanej próbki . . . . .	71
<b>E. OBLICZENIE BŁĘDÓW W OKREŚLENIU NIEKTÓRYCH WIELKOŚCI POMIARÓW . . . . .</b>	
1. Obliczenie rozbieżności średniej arytmetycznej wyników pomiarów $\sigma_r$ i $E$ . . . . .	72
2. Obliczenie błędu z jakim określono współczynnik wydłużalności przy rozerwaniu $\epsilon_r$ . . . . .	72
3. Obliczenie błędu $\sigma_{\beta r}$ pomiaru średniego współ.wydłużalności termicznej . . . . .	73
4. Orientacyjna ocena opóźnienia pomiaru stosem dolnym temper. studzonej powierzchni szkła, która wynika z pojemności cieplnej termopary . . . . .	74
5. Orientacyjne określenie błędu pomiaru temperatury stosem górnym . . . . .	76
<b>F. WYNIKI BADAN KONTROLNYCH . . . . .</b>	
<b>V. WNIOSKI KONCOWE . . . . .</b>	
<b>VI. WYKAZ LITERATURY I WAŻNIEJSZYCH WZORÓW . . . . .</b>	
<b>VII. TABELĘ I RYSUNKI (nieumieszczone w tekście) ZAŁĄCZNIK I . . . . .</b>	
<b>VIII. WYNIKI CECHOWANIA PRZYRZĄDÓW (ZAŁĄCZNIK II) . . . . .</b>	



## I. STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy jest określenie dopuszczalnej szybkości studzenia ciał kruchych, co ma znaczenie dla wielu procesów technologicznych w przemyśle (np. szklarskim, ceramicznym, hutniczym).

Dopuszczalną szybkość studzenia określano jako taką, która nie doprowadza do dekohezji cząstek materiału.

Wprowadzono pojęcie przestrzennego modelu obliczeniowego dla naprężeń termicznych,<sup>x)</sup> który charakteryzuje się tym, że naprężenia wyliczone dla tego modelu nie będą mniejsze od rzeczywiście występujących, a w niektórych wypadkach ściśle im odpowiadają.

Jako hipotezę wytrzymałościową przyjęto hipotezę de Saint Venanta jako tę, która jest w pełni do przyjęcia w przypadku ciał kruchych.

Wprowadzono pojęcia stopnia bezpieczeństwa i współczynnika bezpieczeństwa dla naprężeń termicznych i podano sposób ich obliczenia lub przyjęcia.

Do określenia naprężeń termicznych w przypadku jednoosiowego nieustalonego przewodzenia ciepła, oraz dla niektórych innych przypadków wykorzystano w celu wytworzenia rozkładu temperatur wykreślną metodę Schmidta.

Celem sprawdzenia wyników rozważań przeprowadzono badania doświadczalne na szkle, w czasie których przekraczano dopuszczalną szybkość studzenia. Objawia się to pęknięciami.

---

<sup>x)</sup> W niniejszej pracy omawia się w zasadzie tylko naprężenia termiczne.



Pęknięcia te fotografowano kamerą filmową, zaś przebieg temperatur wewnątrz studzonego obiektu wykreślano na podstawie temperatur powierzchni zmierzonych w czasie studzenia. Temperaturę powierzchni studzonego szkła badano odpowiednio skonstruowanymi stosami termopar.

Badano także własności mechaniczne i termiczne szkła, a w szczególności doraźną wytrzymałość na rozerwanie i wydłużalność. Otrzymane wyniki badań są podane w formie tabel i wykresów.

Przeprowadzono dyskusję błędów pomiarowych.

Podano wskazówki stosowania otrzymanych wyników w praktyce.

## II. WSTĘP

W zagadnieniach przemysłowych często nie chodzi o wielkość naprężeń termicznych jako takich, lecz o to, czy naprężenia te nie spowodują zniszczenia materiału przez powstałe pęknięcia.

Z zagadnieniami tego typu spotykamy się przy produkcji szkła, studzeniu ścian pieców przemysłowych itp.

Przez naprężenia termiczne rozumie się naprężenia wywołane ceteris paribus zmianami pola temperatury ciała.

W pracy niniejszej omawia się ciała kruche a więc takie, które między innymi charakteryzują się tym, że doraźna wytrzymałość na rozerwanie jest dla nich kilkakrotnie mniejsza niż na jednoosiowe ściskanie. Tak więc studzenie ciała kruchego, jako wywołujące głównie wydłużenia dodatnie jest procesem niebezpieczniejszym niż grzanie. Z tego względu zajmują się w tym opracowaniu "dopuszczalną szybkością studzenia ciał kruchych". Oczywiście w przypadku grzania można użyć tej samej metody badania, trzeba tylko sprawdzić, czy występujące wtedy wydłużenia (ujemne) nie przekraczają dopuszczalnych.

Jako modelu ciała kruchego używa się szkła przezroczystego, produkowanego na bazie krzemianów. Szkła te odznaczają się niemal doskonałą kruchością w temperaturach poniżej  $400^{\circ}\text{C}$ . Przezroczystość ich pozwala na obserwowanie powstających pęknięć w czasie studzenia. Szkło jest kruche tylko przy temperaturach mniejszych od temperatury granicznej ( $T_g$ ), którą przyjmuje się jako odpowiadającą lepkości  $\eta = 10^{13}\text{P}$ .

Podczas produkcji szkło przechodzi w tunelu odpężającym od stanu płynnego do stałego. Dzieje się to w zakresach tempe-



ratur od ok.  $1000^{\circ}\text{C}$  do temp. otoczenia. Chcąc więc wykorzystać uzyskane wyniki przy produkcji szkła można to uczynić dla tej części tunelu, gdzie występują temperatury poniżej  $400^{\circ}\text{C}$ . Przyspieszenia produkcji można dokonać w ten sposób, że stosując największą dopuszczalną szybkość studzenia skróci się w tunelu obszar niskich temperatur, przez co dla temperatur wysokich wygospodaruje się dodatkową długość tunelu. Rejon wysokich temperatur odgrywa ważną rolę w produkcji szkła, gdyż w nim powstają naprężenia trwałe. Przez wydłużenie tej części tunelu uzyskamy to, że przy odpowiednio zwiększonej szybkości posuwu taśmy szklanej, szkło nie będzie miało naprężeń trwałych większych aniżeli przed przyspieszeniem biegu taśmy, a więc jego jakość nie ulegnie pogorszeniu, natomiast ilość produktu na jednostkę czasu wzrośnie.

Zastosowanie dopuszczalnej szybkości studzenia ścian pieców przemysłowych pozwoli na skrócenie czasu postoju tych urządzeń, koniecznego do bieżących napraw i remontów. Na skutek skrócenia czasu postoju można zintensyfikować proces produkcyjny.

### III. ROZWAŻANIA TEORETYCZNE

#### A. Równanie różniczkowe przewodzenia ciepła.

##### 1. Równanie podstawowe.

Z teorii przewodnictwa ciepła można wywieść równanie różniczkowe podające związek między temperaturą w dowolnym punkcie ciała jednorodnego izotropowego w danej chwili, a położeniem tego punktu w układzie prostokątnym o współrzędnych  $x, y, z$ .

Równanie to ma postać:

$$\frac{\partial v^c}{\partial t} = a \nabla^2 v^c + \frac{q_w^*}{c_p \rho} \quad (1) \textcircled{1}$$

i jest znane pod nazwą równania Fouriera-Kirchhoffa, gdzie  $\nabla^2$  jest operatorem różniczkowym Laplace'a

$$\nabla^2 v^c = \frac{\partial^2 v^c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v^c}{\partial z^2} \quad (2)$$

$a$  - współczynnik przewodzenia temperatury, wyrażający się wzorem:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (3)$$

$\lambda$  - współczynnik, przewodzenia ciepła kcal/m<sup>2</sup>h 1°

$c_p$  - ciepło właściwe kcal/Nkg 1°

$\rho$  - gęstość substancjalna Nkg/m<sup>3</sup>

$q_w^*$  - natężenie wydzielania ciepła z wewnętrznych źródeł energii kcal/m<sup>3</sup>h

W przypadku ustalonej wymiany ciepła (tj. jeśli pole temperaturowe jest ustalone) otrzymujemy z (1) równanie różniczkowe Poissona

$$a \nabla^2 v^c + \frac{q_w^*}{\rho c_p} = 0 \quad (4)$$



względnie przy braku wewnętrznych źródeł energii i ustalonym polu temperaturowym, równanie Laplace'a

$$\nabla^2 v^c = 0 \quad (5)$$

## 2. Warunek początkowy i przestrzenne warunki brzegowe

2.1. Rozwiązanie równania (1) prowadzi do znalezienia funkcji

$$v^c = v^c(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

Znacznemu uproszczeniu ulega określenie pola temperaturowego, jeśli temperatura zależy tylko od jednej lub dwu zmiennych niezależnych położenia tj. gdy

$$v^c = v^c(x, \tau) \text{ lub } v^c = v^c(x, y, \tau) \quad (7)$$

Znany jest szereg rozwiązań całkowych równania różniczkowego (1), a o doborze właściwego decydują warunki brzegowe.

2.2. Warunek początkowy określa pole temperaturowe w jakiejś konkretnej chwili początkowej

$$v^c = v^c(x, y, z, \tau_0) \quad (8)$$

2.3. Przestrzenny warunek brzegowy uwzględnia sposób oddziaływania ośrodka na powierzchnię rozpatrywanego ciała w chwili dowolnej  $\tau > \tau_0$ .

Rozróżniamy w zasadzie 3 przestrzenne warunki brzegowe.

2.3.1. Dana jest temperatura powierzchni ciała w każdym miejscu i chwili

$$v^c = v_s^c(x, y, z, \tau) \quad (9)$$

2.3.2. Dane jest ciepło przewodzone przez powierzchnię skrajną S w każdym miejscu i chwili  $\tau > \tau_0$

$$q_{\lambda S}^* = -\lambda \left( \frac{\partial v}{\partial n} \right)_S = q_{\lambda S}^* (x, y, z, \tau) \quad (10)$$

co prowadzi przy  $\lambda = \text{const}$  do równania

$$\left( \frac{\partial v}{\partial n} \right)_S = \text{grad}_n v_S(x, y, z, \tau) \quad (11)$$

czyli podaje zależność gradientu temperaturowego, o kierunku normalnym do powierzchni zewnętrznej, od miejsca i czasu.

2.3.3. Na powierzchni ciała zachodzi wymiana ciepła, przyczym z równości ciepła przewodzonego przez powierzchnię zewnętrzną z ciepłem przejmowanym przez otoczenie wynika warunek

$$\frac{\partial v}{\partial n} = -\frac{\alpha}{\lambda} \Theta \quad (12)$$

gdzie  $\Theta$  wyraża różnicę między temperaturą powierzchni ciała, a temperaturą otoczenia tej powierzchni

$$\Theta = v_S - t_0 \quad (13)$$

a  $\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła  $\text{kcal/m}^2 \text{h } 1^\circ$

Budowę funkcji  $v = v(x, y, z, \tau)$  narzucają w konkretnym przypadku operacje związane ze znalezieniem stałych całkowania. Operacje te są naogół skomplikowane, a często nastroczają trudności matematyczne nie do pokonania.

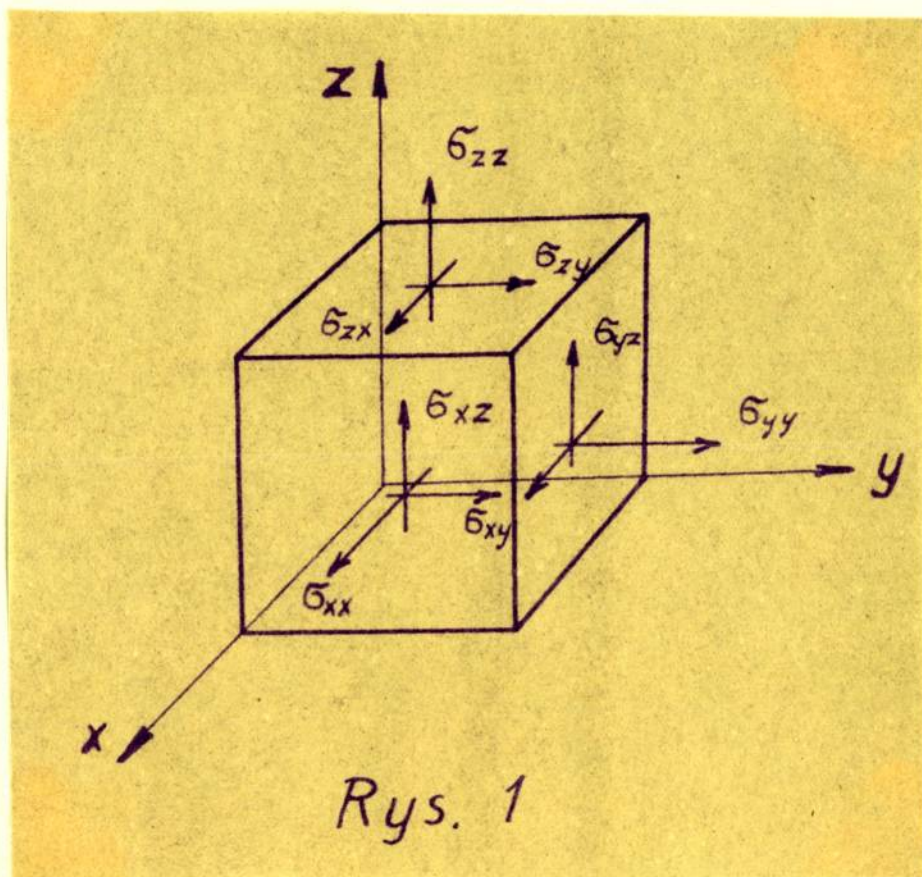
## B. Stan naprężenia i odkształcenia

### 1. Równania podstawowe

Na poniższym schemacie widzimy sposób oznaczenia naprężeń normalnych i stycznych  $\sigma_{ik}$



Składowe odkształcenia oznaczam podobnie przez  $\epsilon_{ik}$



Z warunków równowagi przy zaniechaniu tzw. sił masowych, można napisać równanie

$$\sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial k} = 0 \quad (\text{przy } i, k = x, y, z) \quad (14)$$

(Siły masowe można obliczyć oddzielnie, a więc w przypadku gdy się ich nie pomija, należy dodać je wektorowo do pozostałych sił wewnętrznych).

Dla odkształceń otrzymuje się zależność

$$2 \epsilon_{i,k} = 2 \epsilon_{k,i} = \frac{\partial u_k}{\partial i} + \frac{\partial u_i}{\partial k} \quad (\text{przy } i, k = x, y, z) \quad (15) \textcircled{2}$$

gdzie  $u_i$  - oznacza przesunięcie wzdłuż osi  $i$ .

Składowe odkształcenia są powiązane sześcioma zależnościami różniczkowymi, zwanymi związkami wewnętrznej zwartości, które

można zapisać

$$\frac{\partial \varepsilon_{i,j}}{\partial k \partial l} + \frac{\partial \varepsilon_{k,l}}{\partial i \partial j} - \frac{\partial \varepsilon_{j,l}}{\partial i \partial k} - \frac{\partial \varepsilon_{j,k}}{\partial l \partial i} = 0 \quad (\text{przy } i, k, j, l = x, y, z) \quad (16) \quad \textcircled{2}$$

Składowe odkształcenia są liniowymi funkcjami naprężeń.

Przyjmując składowe odkształcenia początkowe równe zeru, możemy napisać

$$\varepsilon_{i,k} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{i,k} - \frac{\mu}{1+\mu} s \delta_{i,k} \right) \quad (17)$$

gdzie  $s$  jest sumą naprężeń normalnych

$$s = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (18)$$

$\delta_{i,k}$  - jest symbolem Kroneckera

$\mu$  - współczynnikiem Poissona

$G$  - modułem odkształcenia postaciowego

Jeśli temperatura ciała zmieniała się od pewnej temperatury początkowej  $\tau_0$  do temperatury  $\tau$ , to każdy element długości ciała  $dl$  przyjmie nową długość  $dl_1$

$$dl_1 = [1 + \beta(\tau - \tau_0)] dl \quad (19)$$

gdzie  $\beta$  - współczynnik rozszerzalności liniowej, o jednostce  $\frac{1}{1^\circ}$ .

Zakładając temperaturę początkową ciała  $\tau_0 = 0$  otrzymamy, że każdy element długości  $dl$  przyjmie nową długość

$$dl_1 = (1 + \beta \tau) dl \quad (20)$$

Oczywiście temperatura ciała w każdym punkcie może być inna, lecz zakładając malejący przedział  $dl$ , stwierdzamy, że różnice temperatur w tym przedziale dążą do zera, i dla składowych odkształceń wywołanych tylko działaniem temperatury



otrzymamy

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \beta v^2 \quad (21) \textcircled{4}$$

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$$

Wydłużenia termiczne spowodują w ogólnym przypadku powstanie w ciele t.zw. "naprężeń termicznych", zwanych poprawnie "naprężeniami temperaturowymi".

Przez uwzględnienie wydłużeń termicznych (temperaturowych) równania określające stan naprężenia i odkształcenia ulegną pewnym zmianom - przyjmując następującą postać

$$\varepsilon_{i,k} = \frac{1}{2G} \left( \sigma_{i,k} - \frac{\mu}{1+\mu} s \rho_{i,k} \right) + \beta v^2 \rho_{i,k} \quad (22) \textcircled{5}$$

lub

$$\sigma_{i,k} = 2G \left( \varepsilon_{i,k} + \frac{\mu}{1+\mu} \cdot \frac{s}{2G} \rho_{i,k} - \beta v^2 \rho_{i,k} \right) \quad (23)$$

Oznaczając przez  $e$  sumę wydłużeń normalnych

$$e = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (24)$$

można wykazać, że

$$\frac{\mu}{1+\mu} \cdot \frac{s}{2G} = (e - 3\beta v^2) \frac{\mu}{1-2\mu} \quad (25)$$

a po wstawieniu do równania (23), daje

$$\sigma_{i,k} = 2G \left( \varepsilon_{i,k} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \rho_{i,k} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \beta v^2 \rho_{i,k} \right) \quad (26) \textcircled{6}$$

## 2. Pola temperaturowe nie wywołujące stanu naprężeń termicznych.

Przyjmujemy, że odkształcenia są wywołane tylko działaniem temperatury. Wtedy zespół równań (22) da równania (21).

Wykorzystując te zależności do zespołu równań wewnętrznej zwartości (16), przyjmując  $\nu = \text{const}$  otrzymany układ równań:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \nu}{\partial y^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 \nu}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \nu}{\partial z^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 \nu}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \nu}{\partial x \partial y} = 0 \quad \frac{\partial^2 \nu}{\partial y \partial z} = 0 \quad \frac{\partial^2 \nu}{\partial z \partial x} = 0 \end{array} \right\} (27) \textcircled{7}$$

których jedynym rozwiązaniem jest równanie całkowe 1 stopnia o czterech zmiennych:

$$\nu = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z \quad (28) \textcircled{8}$$

Jeżeli na ciało jednorodne i izotropowe nie działają siły zewnętrzne lub wewnętrzne pochodzenia nietermicznego, a rozkład temperatur w ciele jest liniowy (tj. zgodny z równaniem 28), to przy współczynniku rozszerzalności liniowej  $\beta = \text{const}$  ciało jest pozbawione naprężeń.

Oczywiście ciało to ulegnie odkształceniu. Jeżeli pole temperaturowe jest tautotermiczne  $\nu = \nu(x)$ , to ciało po odkształceniu zachowa podobieństwo geometryczne.

### 3. Autora uogólnienie modelu obliczeniowego stanu naprężeń termicznych

#### 3.1. Stan naprężeń trójosiowy (przestrzenny)

Założmy, że na jednorodne izotropowe ciało poddane działaniom termicznym działają poza tym jedynie siły zewnętrzne będące wynikiem reakcji na naprężenia termiczne. Wtedy naprężenia będą zależać m.in. od sposobu utwierdzenia ciała.

Rozważmy ciało sztywnie utwierdzone i poddane działaniu pola temperaturowego, wtedy



$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 0 \quad ; \quad e = \sum_k \varepsilon_{i,k} \delta_{i,k} = 0 \\ \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Wstawiając warunki (29) do równania (26) otrzymamy

$$\bar{\sigma}_{i,k} = -2G \frac{1+\mu}{1-2\mu} \beta \nabla^2 \delta_{i,k} \quad (29)$$

czyli po rozpisaniu

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = \bar{\sigma}_{zz} = -2G \frac{1+\mu}{1-2\mu} \beta \nabla^2 (x,y,z,r) \\ \bar{\sigma}_{xy} = \bar{\sigma}_{xz} = \bar{\sigma}_{zy} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Znak minus akcentuje to, że spadek temperatury wywołuje naprężenia rozciągające, czyli dodatnie.

Założmy, że utwierdzenie ciała zostaje usunięte, wtedy doznaje ono odkształceń wywołanych składowymi sił i momentów pochodzących od naprężeń termicznych wyliczonych w równaniu (30). Składowe siły działające w kierunkach osi  $x, y, z$ , wynoszą

$$P_{xx} = - \iint_{S_{yz}} \bar{\sigma}_{xx} dy dz \quad ; \quad P_{yy} = - \iint_{S_{xz}} \bar{\sigma}_{yy} dx dz \quad ; \quad P_{zz} = - \iint_{S_{xy}} \bar{\sigma}_{zz} dx dy \quad (31)$$

Siły te w pewnym oddaleniu w głąb od powierzchni ciała wywołują równomierne naprężenia normalne

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{P_{xx}}{S_{yz}} \quad \bar{\sigma}_{yy} = \frac{P_{yy}}{S_{xz}} \quad \bar{\sigma}_{zz} = \frac{P_{zz}}{S_{xy}} \quad (32)$$

Po podstawieniu równań (30)(31) do równania (32) otrzymuje się

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{1}{S_{yz}} \iint_{S_{yz}} 2G \frac{1+\mu}{1-2\mu} \beta \nabla^2 (xyz,r) dy dz \quad (33)$$

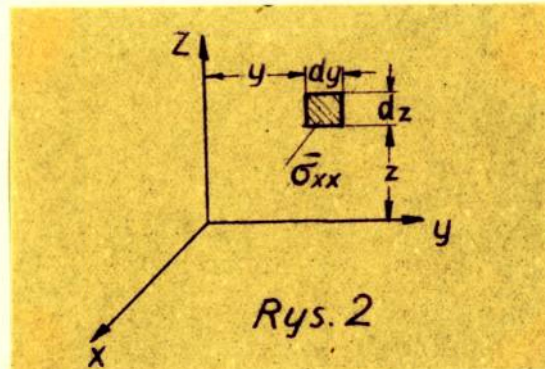
Wykorzystując zależność

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (34)$$

gdzie  $E$  jest modułem sprężystości podłużnej t.zw. modułem Yunga, możemy napisać

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx} &= \frac{1}{S_{yz}} \iint_{S_{yz}} \frac{E\beta}{1-2\mu} \nu(xyz) \, dydz = \frac{E\beta}{S_{yz}(1-2\mu)} \iint_{S_{yz}} \nu(xyz) \, dydz \\ \bar{\sigma}_{yz} &= \frac{E\beta}{S_{xz}(1-2\mu)} \iint_{S_{xz}} \nu(xyz) \, dx dz \\ \bar{\sigma}_{zx} &= \frac{E\beta}{S_{xy}(1-2\mu)} \iint_{S_{xy}} \nu(xyz) \, dx dy \end{aligned} \quad (35)$$

Jeśli pole temperaturowe nie jest symetryczne, to ciało ulegnie ugięciu na skutek działania momentu zginającego sił termicznych.



Moment zginający wywoła składowe naprężeń normalnych w myśl ogólnego wzoru

$$\sigma_{zg} = \frac{M_{zg} \cdot l}{I_1} \quad (36)$$

gdzie  $M_{zg}$  - moment zginający sił

$I$  - moment bezwładności przekroju zginania

$l$  - odcinek określający położenie rozważanego punktu względem warstwy obojętnej zginania. (dodatni lub

ujemny)



Składowe naprężeń normalnych wywołanych momentem gnącym oznaczam przez  $\bar{\sigma}_{xx}$ ,  $\bar{\sigma}_{yy}$ ,  $\bar{\sigma}_{zz}$ ; tak więc

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{xx} &= \frac{z}{I_{zy}} \iint_S z \bar{\sigma}_{xx} dydz - \frac{y}{I_{yz}} \iint_S y \bar{\sigma}_{xx} dydz \\ \bar{\sigma}_{yy} &= -\frac{z}{I_{zx}} \iint_S z \bar{\sigma}_{yy} dzdx - \frac{x}{I_{xz}} \iint_S x \bar{\sigma}_{yy} dx dz \\ \bar{\sigma}_{zz} &= -\frac{x}{I_{xy}} \iint_S x \bar{\sigma}_{zz} dx dy - \frac{y}{I_{yx}} \iint_S y \bar{\sigma}_{zz} dx dy \end{aligned} \right\} (37)$$

Naprężenie całkowite w kierunku poszczególnych osi jest równe sumie naprężeń składowych

$$\sigma_{ii} = \bar{\sigma}_{ii} + \bar{\sigma}_{ii} + \bar{\sigma}_{ii} \quad (i = x, y, z) \quad (38)$$

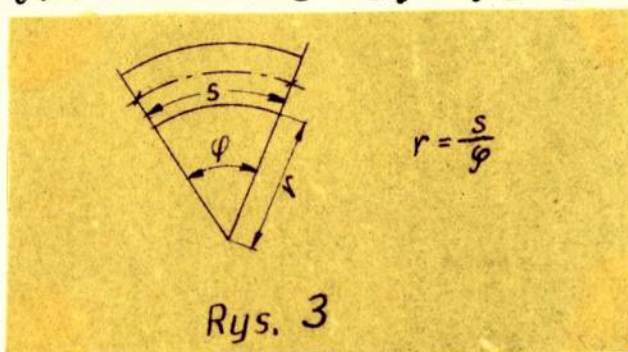
Składowe naprężeń normalnych należy obliczyć z równań (30), (35), (37).

Jak widać z tych równań  $\bar{\sigma}_{ii}$  oraz  $\bar{\sigma}_{ii}$  mają znak przeciwny niż  $\bar{\sigma}_{ii}$ , czyli, że naprężenia wynikłe z odkształceń wywołanych naprężeniami termicznymi  $\bar{\sigma}_{ii}$ , zmniejszają wielkość naprężeń całkowitych  $\sigma_{ii}$ .

Jeżeli ciało poddane jest polu temperaturowemu symetrycznemu znika ostatni człon ( $\bar{\sigma}_{ii}$ ) w równaniu (38). Człon ten znika także jeśli pole temperaturowe nie jest symetryczne, ale z warunków mocowania wynika niemożność ugięcia, mimo działania momentów gnących. (wtedy siły działające na ciało są wynikiem jedynie reakcji mocowania na działanie sił termicznych). Jeśli ciało jest sztywnie utwierdzone znika drugi ( $\bar{\sigma}_{ii}$ ) oraz trzeci ( $\bar{\sigma}_{ii}$ ) człon równania (38). Pozostają tylko naprężenia określone pierwszym członem ( $\bar{\sigma}_{ii}$ ) zgodnie z równaniem (30)

Przeprowadzone rozumowanie jest pewnym uproszczeniem zagadnienia, gdyż zakłada, że

- 1) odkształcenie siłami składowymi  $P_{ii}$  nie powoduje odkształceń powierzchni prostopadłych do  $P_{ii}$ , które nadal pozostają prostopadłe do kierunku naprężeń  $\sigma_{ii}$  (co jest tym słuszniejsze, im głębiej od powierzchni zewnętrznej leży dana płaszczyzna),
- 2) ugięcie momentami sił termicznych jest ugięciem czystym, to znaczy, że włókna uginają się po promieniu  $r$ ,



Rys. 3

przyczym  $s$  jest długością włókna, a  $\varphi$  kątem nachylenia płaszczyzn prostopadłych do włókien.

Przypadek omówiony powyżej (swobodnego odkształcenia wywołanego naprężeniami termicznymi), znajdzie w praktyce (także na powierzchniach skrajnych i leżących blisko powierzchni zewnętrznych) w przypadku liniowego rozkładu temperatur, jak to poniżej okażemy. Wtedy naprężenie całkowite

$$\sigma_{ii} = \bar{\sigma}_{ii} + \bar{\bar{\sigma}}_{ii} + \bar{\bar{\bar{\sigma}}}_{ii} = 0 \quad (40)$$

zgodnie z rozważaniami zawartymi w części B2 o stanie beznaprężeniowym.

Jest jednak rzeczą oczywistą, że dodatkowe ugięcia i odkształcenia występujące oprócz omówionych, a wywołane polem temperaturowym spowodują zmniejszenie naprężeń całkowitych, (wywołają naprężenia przeciwnego znaku, niż naprężenia powo-



dujące ugięcie). Ugięcia te zajdą głównie w pobliżu powierzchni zewnętrznych. Można więc stwierdzić, że naprężenia rzeczywiste będą zawsze mniejsze od wyliczonych dla modelu uproszczonego.

A oto dowód, że uproszczony model ugięcia swobodnego w ogólnym przypadku odkształceń termicznych przedstawia stan faktyczny zachodzący przy liniowym rozkładzie temperatur (t.zn. nie jest wtedy modelem uproszczonym). Do przeprowadzenia tego dowodu wystarczy dowieść, że suma naprężeń normalnych wyliczonych z równań (30), (35), (37) jest równa zero, (zgodnie z równaniem (40)), gdy rozkład temperatur jest liniowy. Dla uproszczenia obliczeń założymy układ odniesienia  $x, y, z$ , w środku ciężkości rozważanego ciała zgodnie z jego głównymi osiami bezwładności. Rozkład temperatur będzie określony równaniem

$$v^r = c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 z \quad (41)$$

wprowadźmy oznaczenie

$$c' = c_0 + c_1 x \quad (42)$$

Przy całkowaniu podług  $y$  i  $z$  wielkość  $c'$  można traktować jak stałą. Sumowanie naprężeń normalnych musi dać w każdej chwili wartość zero, a więc  $\bar{\sigma}_{xx}$  nie można rozpatrywać jako zależne od czasu  $\tau$ .

$$\bar{\sigma}_{xx} = - \frac{E}{1-2\mu} \beta v^r_{(xyz\tau)} = - \frac{E}{1-2\mu} \beta v^r_{(xyz)} \quad (43)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{E\beta}{S_{yz}(1-2)} \iint_{S_{yz}} v^r_{(xyz)} dydz \quad (44)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{z E \beta}{I_{zy}(1-2\mu)} \iint_{S_{yz}} z \sqrt{(xyz)} dydz + \frac{y E \beta}{I_{yz}(1-2\mu)} \iint_{S_{yz}} y \sqrt{(xyz)} dydz = h_1 + h_2 \quad (45)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{E \beta}{1-2\mu} \frac{\iint_{S_{yz}} (c' + c_2 y + c_3 z) dydz}{\iint_{S_{yz}} dydz} = \frac{E \beta}{1-2\mu} c' \frac{\iint_{S_{yz}} dydz}{\iint_{S_{yz}} dydz} + c_2 \frac{E \beta}{1-2\mu} \frac{\iint_{S_{yz}} y dydz}{\iint_{S_{yz}} dydz} + c_3 \frac{E \beta}{1-2\mu} \frac{\iint_{S_{yz}} z dydz}{\iint_{S_{yz}} dydz} \quad (46)$$

$$\iint_{S_{yz}} y dydz = \int_{a(y)}^{b(y)} z(y) y dy = 0 \quad (\text{Moment statyczny wzgl. } z) \quad (47)$$

$$\iint_{S_{yz}} z dydz = \int_{a(z)}^{b(z)} z y(z) dz = 0 \quad (\text{Moment stat. wzgl. osi } y) \quad (48)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{E \beta}{1-2\mu} \cdot c' \quad (49)$$

$$h_1 = \frac{z E \beta}{I_{zy}(1-2\mu)} \iint_{S_{yz}} z \sqrt{(xyz)} dydz = \frac{E \beta}{I_{zy}(1-2\mu)} z \iint_{S_{yz}} (c' + c_2 y + c_3 z) dydz \quad (50)$$

$$h_1 = \frac{E \beta}{I_{zy}(1-2\mu)} z \left[ \iint_{S_{yz}} z c' dydz + \iint_{S_{yz}} c_2 y z dydz + \iint_{S_{yz}} c_3 z^2 dydz \right] \quad (51)$$

$$\iint_{S_{yz}} z c' dydz = 0 \quad \text{mom. statyczny wzgl. osi } y \quad (52)$$



$$\int_{S_{yz}} c_2 y z \, dy dz = 0 \quad \text{moment zbroczenia wzgl. osi yz} \quad (53)$$

$$h_1 = \frac{E\beta}{1-2\mu} \cdot z \frac{\int_{S_{yz}} c_3 z^2 \, dy dz}{\int_{S_{yz}} z^2 \, dy dz} = c_3 \frac{E\beta}{1-2\mu} z \quad (54)$$

$$h_2 = \frac{E\beta y}{I_{yz}(1-2\mu)} \left[ \int_{S_{yz}} y c' \, dy dz + \int_{S_{yz}} c_2 y^2 \, dy dz + \int_{S_{yz}} c_3 y z \, dy dz \right] \quad (55)$$

$$\int_{S_{yz}} c' y \, dy dz = 0 \quad \text{mom. statyczny wzgl. osi z} \quad (56)$$

$$\int_{S_{yz}} c_3 y z \, dy dz = 0 \quad \text{mom. zbroczenia wzgl. y, z} \quad (57)$$

$$h_2 = \frac{E\beta}{1-2\mu} y \frac{\int_{S_{yz}} c_2 y^2 \, dy dz}{\int_{S_{yz}} y^2 \, dy dz} = c_2 \frac{E\beta}{1-2\mu} y \quad (58)$$

wstawiając równania (43)(45)(49)(58) do (40) otrzymamy

$$\sigma_{xx} = -\frac{E\beta}{1-2\mu} \nu^{\prime}(xyz) + \frac{E\beta}{1-2\mu} c' + c_2 \frac{E\beta}{1-2\mu} y + c_3 \frac{E\beta}{1-2\mu} z =$$

$$= -\frac{E\beta}{1-2\mu} \nu^{\prime}(xyz) + \frac{E\beta}{1-2\mu} (c' + c_2 y + c_3 z) \quad (59)$$

$$c' + c_2 y + c_3 z = \nu^{\prime}(xyz) \quad (60)$$

$$\sigma_{xx} = -\frac{E\beta}{1-2\mu} \nu^{\prime}(xyz) + \frac{E\beta}{1-2\mu} \nu^{\prime}(xyz) = 0 \quad (61)$$

W podobny sposób można wykazać, że  $\sigma_{yy} = 0$  oraz  $\sigma_{zz} = 0$  co było do okazania.

### 3.2. Płaski stan naprężenia

Zakładając  $\bar{\sigma}_{zz} = 0$  można wykazać, że (z równan. 26)

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{1-\mu} [-\mu \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}] + (1 + \mu) \beta v^2 \quad (62)$$

co daje

$$e = \epsilon_{zz} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{1}{1-\mu} [(1 - 2\mu)(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + (1 + \mu) \beta v^2] \quad (63)$$

i po podstawieniu do równania (26) otrzymamy

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{2G}{1-\mu} [\epsilon_{xx} + \mu \epsilon_{yy} - (1 + \mu) \beta v^2 (xyzv)] \quad (64)$$

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{2G}{1-\mu} [\epsilon_{yy} + \mu \epsilon_{xx} - (1 + \mu) \beta v^2 (xyzv)] \quad (65)$$

$$\bar{\sigma}_{xy} = 0 \quad \text{zgodnie z warunkami (21)} \quad (66)$$

Dla sztywnego utwierdzenia ciała w kierunku osi  $x$  i  $y$  otrzymujemy znane rozwiązanie

$$\bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = -2G \frac{1+\mu}{1-\mu} \beta v^2 (xyzv) = -\frac{E}{1-\mu} \beta v^2 (xyzv) \quad (67) \textcircled{9}$$

$$\bar{\sigma}_{xy} = 0 \quad (68)$$

Zakładając, jak przy stanie naprężenia trójosiowym, że utwierdzenie ciała zostaje usunięte i ciało może się swobodnie odkształcić pod wpływem istniejących naprężeń  $\bar{\sigma}_{ii}$ , otrzymuje się naprężenia wywołane odkształceniem  $\bar{\epsilon}_{ii}$  oraz  $\bar{\sigma}_{ii}$ . Ponieważ w praktyce z płaskim stanem naprężenia spotykamy się w tarczach przyjmijmy tarczę o stałej grubości  $c$  i wtedy

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{P_{xx}}{c_y} = \frac{1}{c_y} \int_{a(y)}^{b(y)} \frac{E}{1-\mu} \beta v^2 (xyzv) c \, dy = \frac{E\beta}{y(1-\mu)} \int_{a(y)}^{b(y)} v^2 (xyzv) \, dy \quad (69)$$



$$\sigma_{yy} = \frac{P_{yy}}{cx} = \frac{E\beta}{x(1-\mu)} \int_{a(x)}^{b(x)} \nu(xyz) dx \quad (70)$$

Naprężenia powstałe z ugięcia tarczy, jeśli pole temperaturowe jest niesymetryczne względem płaszczyzny xy, będą miały następujące wartości

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{M_{yz}}{I_{yz}} = \frac{12z E\beta}{c^3(1-\mu)} \int_{-\frac{e}{2}}^{+\frac{e}{2}} \nu(xyz) z dz \quad (71)$$

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{M_{xz}}{I_{xz}} = \frac{12z E\beta}{c^3(1-\mu)} \int_{-\frac{e}{2}}^{+\frac{e}{2}} \nu(xyz) z dz = \bar{\sigma}_{zz} \quad (72)$$

Naprężenie całkowite  $\sigma_{ii}$  jest sumą

$$\sigma_{ii} = \bar{\sigma}_{ii} + \bar{\sigma}_{ii} + \bar{\sigma}_{ii} \quad (73)$$

### 3.3. Liniowy stan naprężenia

Opierając się na rozumowaniu przeprowadzonym dla trójosiowego stanu naprężenia można w przypadku jednoosiowego stanu naprężenia otrzymać znane rozwiązanie;

$$\bar{\sigma}_{xx} = -\beta E \nu(xyz) \quad (74)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{1}{s} \int_{a(y)}^{b(y)} \beta E \nu(xyz) b(y) dy \quad (75)$$

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{y}{I_z} \int_{a(y)}^{b(y)} \beta E \nu(xyz) b(y) y dy \quad (76)$$

czyli

$$\sigma_{xx} = -\beta E \nu(xyz) + \frac{1}{s} \int_{a(y)}^{b(y)} \beta E \nu(xyz) b(y) dy +$$

$$+ \frac{y}{I_z} \int_{a(y)}^{b(y)} \beta E \nu(xyz) b(y) y dy \quad (77) \textcircled{10}$$

### C. HIPOTEZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA

#### 1. Omówienie ogólne

Do określenia wytrzymałości materiału kruchego poddanego działaniu sił używa się wielkości  $\sigma_{red}$  obliczonej na podstawie jakiejś hipotezy wytrzymałościowej, np. hipotezy największego wydłużenia  $\epsilon_{max}$  (de Saint Venant'a).

W przypadku działania na ciało sił pochodzenia termicznego można przyjąć hipotezę de Saint Venant'a z tym, że wydłużenie maksymalne określone doświadczalnie jako funkcję temperatury, a zatem

$$\epsilon_{max} = \epsilon_T(\vartheta),$$

Naprężenia główne będące funkcją temperatury należy wyliczyć ze wzoru (38). Zgodnie z hipotezą największego wydłużenia

$$\sigma_{red} = \epsilon_{max}(\vartheta) \cdot E(\vartheta) \quad (78)$$

#### 1.1. Dla przestrzennego stanu napięcia

$$\epsilon_{max}(\vartheta) = \frac{\sigma_{red}}{E(\vartheta)} = \frac{1}{E(\vartheta)} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (79)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  są naprężeniami głównymi

W przypadku naprężeń termicznych wyliczonych ze wzoru (38) należy przyjąć

$$\sigma_1 = \sigma_{xx} \quad \sigma_2 = \sigma_{yy} \quad \sigma_3 = \sigma_{zz} \quad (80)$$

gdyż

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{zy} = 0$$

Kolejność wskaźników we wzorze (79) należy dobrać tak, by na  $\epsilon_{max}(\vartheta)$  otrzymać wartość największą.

#### 1.2. Dla płaskiego stanu napięcia

$$\sigma_{red} = \sigma_1 - \mu \sigma_2 \quad (81)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{xx} \quad \sigma_2 = \sigma_{yy} \quad \text{wyliczone ze wzoru (73)}$$



kolejność wskaźników należy dobrać tak, by otrzymać wartość maksymalną na  $\sigma_{red}$ .

1.3. Dla jednoosiowego stanu napięcia

$$\sigma_{red} = \sigma_{xx} \quad (82)$$

#### D. OKRESLENIE SZYBKOSCI STUDZENIA

##### 1. Krytyczna szybkość studzenia

Przez krytyczną szybkość studzenia rozumiem szybkość studzenia doprowadzającą do powstania pola temperaturowego, które powoduje dekohezję cząstek materiału przez przekroczenie wydłużenia niebezpiecznego.

Przez wydłużenie niebezpieczne dla materiału kruchego rozumie się wydłużenie na granicy wytrzymałości przy danej temperaturze. W części doświadczalnej niniejszego opracowania podane są wartości zmierzone  $\epsilon_{nieb.} (\sqrt{\quad})$  dla szkła.

##### 2. Dopuszczalna szybkość studzenia

Przez dopuszczalną szybkość studzenia rozumiem szybkość studzenia niedoprowadzającą do powstania pola temperaturowego wywołującego wydłużenia większe od wydłużeń bezpiecznych.

$$\epsilon \leq \epsilon_{bezp} \quad (83)$$

Przez  $\epsilon_{bezp}$  rozumie się wydłużenie

$$\epsilon_{bezp} \leq \frac{1}{n} \epsilon_{nieb} \quad (84)$$

gdzie  $n > 1$  oznacza tzw. "pewność" lub "stopień bezpieczeństwa".

##### 2.1. Stopień bezpieczeństwa

W przypadku studzenia ciała definiuję stopień bezpieczeństwa jako iloczyn pewnych czynników bezpieczeństwa

$$n = n_{\sigma} \cdot n_{\nu} \cdot n_r \quad (85)$$

gdzie:

- $n_{\sigma}$  - jest to czynnik bezpieczeństwa uwzględniający istniejący stan naprężeń wewnętrznych nie pochodzący od danego pola temperaturowego (np. naprężenia trwałe w materiale)
- $n_{\tau}$  - czynnik wywołany nierównomiernością pola temperaturowego
- $n_{\gamma}$  - czynnik rezerwowy uwzględniający nieprzewidziane okoliczności (np. zaproszenie gorącym pyłem lub odłamkami pieca, zaproszenie gorącymi cząstkami paliwa, odkształceniem siłami zewnętrznymi itp.).

### 2.1.1. Czynnik $n_{\sigma}$

Jeżeli materiał kruchy ma naprężenia trwałe, a wielkość maksymalnego naprężenia jest równa  $\sigma_{trw.}$  (określić można badając materiał przezroczysty na polarymetrze), to czynnik bezpieczeństwa

$$n = \frac{\sigma_{nieb}}{\sigma_{nieb} - \sigma_{trw.}} = \frac{E \epsilon_{nieb}}{E \epsilon_{nieb} - \sigma_{trw.}} \quad (86)$$

jeśli  $\sigma_{trw.} = 0$  to  $n_{\sigma} = 1$

jeśli  $\sigma_{trw.} = \sigma_{nieb}$  to  $n = \infty$  (czyli  $\sigma_{bezp} = 0$ )

Naprężenia trwałe (wzgl. stan naprężenia zamrożony w czasie zestalania) powstają w strefie temperatur wyższych, a więc rozpatrując materiał w zakresie kruchości można uważać naprężenia te za niezmiennie. Wystarczy więc badać szkło na polarymetrze po całkowitym zestudzeniu.

### 2.1.2. Czynnik $n_{\tau}$

Czynnik ten wynika stąd, że w żadnym technicznym urządzeniu nie można uzyskać rozkładu temperatury, który przyjmuje się do obliczeń. W pewnym miejscu temperatura odbiega maksymalnie od obliczeniowej i różni się od niej o  $\Delta \tau_{max.}$  (Np. na sze-



rokości tunelu odprężającego szkło winno mieć temperaturę  $\vartheta = \text{idem}$ . W rzeczywistości rozkład ten odbiega w pewnym miejscu szerokości tunelu maksymalnie o  $\vartheta_{\max}^{\circ\text{C}}$ .

Wtedy czynnik bezpieczeństwa

$$n_{\vartheta} = \frac{\varepsilon_{\text{nieb}}}{\varepsilon_{\text{nieb}} - \beta \Delta \vartheta_{\max}^{\circ\text{C}}} \quad (87)$$

$E\beta\Delta\vartheta_{\max}^{\circ\text{C}} = \Delta\sigma_{\max}$  przy jednokierunkowym stanie naprężenia i sztywnym utwierdzeniu (a więc w najniekorzystniejszych warunkach).

Czynnik ten najłatwiej określić drogą eksperymentalną mierząc rozkład temperatur o zadanym przedziale.

### 2.1.3. Czynnik rezerwowy $n_r$

Czynnik ten należy określić indywidualnie zależnie od konstrukcji urządzenia studzącego ciało kruche oraz jego stanu technicznego. Wynika on z możliwości powstania dodatkowych naprężeń wywołanych działaniami zewnętrznymi, np.: nierównomiernością rolek w tunelu odprężającym szkło, możliwości nieprzewidzianych lokalnych przegrzań w skutek porwania płonących cząstek paliwa, zaprószczenia gorącym lub zimnym pyłem, niedokładność obliczeń na skutek przyjęcia liniowości parametrów określających ciało, oraz ewentualnych innych wpływów.

## E. METODA WYKREŚLNO-OBLICZENIOWA OKRESLANIA NAPRĘŻEŃ TERMICZNYCH.

### 1. Wykreślna metoda określania pola temperaturowego.

W przypadku przewodzenia jednokierunkowego, gdy dany jest warunek początkowy i przestrzenny warunek brzegowy, można określić pole temperaturowe w danej chwili  $\vartheta$  stosując metodę wykreślną Bindera udoskonaloną przez Schmidta.



Metodę tę można niekiedy stosować do dwukierunkowego przewodzenia, jeśli zmianę temperatury w kierunku drugiej osi da się przedstawić jako funkcję parametru  $\tau$ . (czasu).

Zasadnicze elementy omawianej metody przedstawiają się następująco:

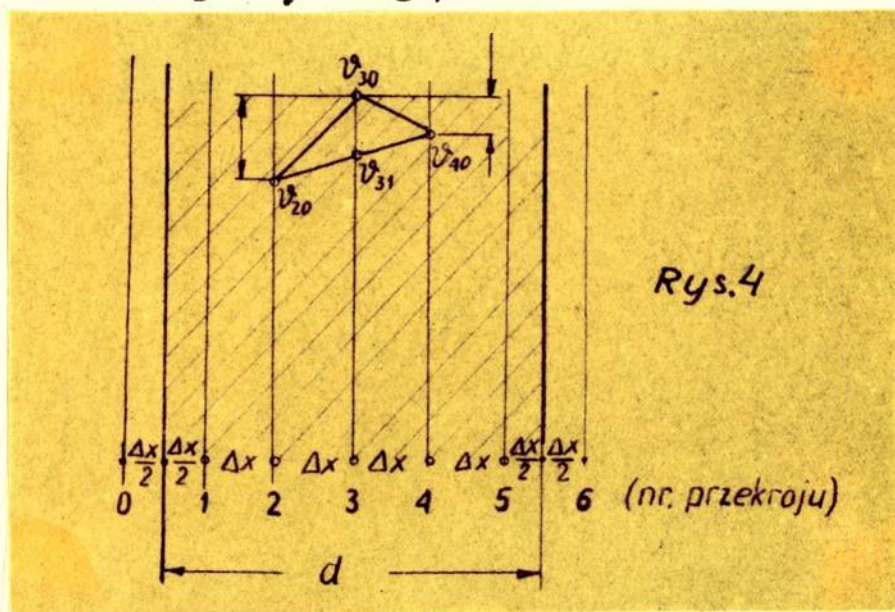
Równanie różniczkowe przewodzenia jednokierunkowego

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (88)$$

zastępuje się równaniem różnicowym

$$\frac{\Delta v}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 v}{\Delta x^2} \quad (89) \textcircled{11}$$

Rozpatrywany przekrój obiektu (np. płyty o grub.  $d$ ) dzieli się na jednakowe warstwy oddalone od siebie o  $\Delta x$ , jak to pokazano na rysunku (4) i wykreśla się początkowy rozkład temperatur (znany z warunku początkowego).



Pierwszy indeks przy temperaturze  $v$  odnosi się do numeru warstwy drugi do czasu. Metoda pozwala na określenie temperatur na pomyślanych powierzchniach podziału (w w przegrodach) jako funkcję odstępów czasu  $\Delta \tau$ . Odstępów czasu nie dopiera się dowolnie, lecz wylicza z zależności

$$\Delta \tau = \frac{\Delta x^2}{2a} \quad (90)$$



Można wykazać, że przy tak przyjętej zależności odstępów czasu od grubości warstw, dojdzie się do zależności:

$$v_{31}^2 = \frac{v_{40}^2 + v_{20}^2}{2} \quad (91)$$

a więc temperatura na trzeciej "przegrodzie" po upływie czasu  $\Delta t$  będzie średnią arytmetyczną z temperatur przegród sąsiednich tj. 2 i 4 przed upływem tego odstępu czasu.

Warunek (90) pozwala na określenie temperatury "przegrody" po upływie  $\Delta t$  jeśli są dane temperatury "przegród" sąsiednich. Taki przypadek nie zachodzi w warstwach skrajnych. Dlatego musimy wykorzystać warunek brzegowy (2.3.3. części III A). Ciepło przewodzone przez warstwę skrajną równa się ciepłu wymienionemu z otoczeniem, co zapisujemy równaniem

$$-\lambda \left( \frac{\partial v^2}{\partial x} \right)_{x=0} dt = \alpha (v_s^2 - t_0) dt \quad (92)$$

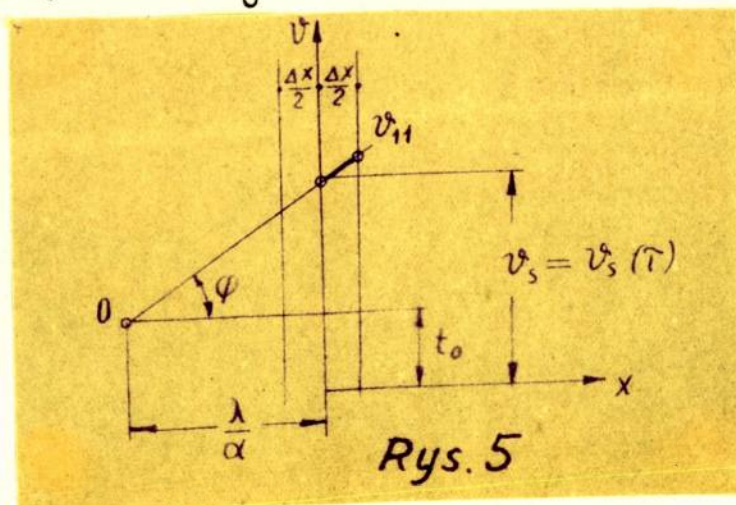
skąd

$$\left( \frac{\partial v^2}{\partial x} \right)_{x=0} = - \frac{\alpha}{\lambda} (v_s^2 - t_0) \quad (93)$$

co przy zapisie różnicowym daje na zewnętrznej ścianie płyty

$$- \frac{\Delta v^2}{\Delta x} = \frac{\alpha}{\lambda} (v_s^2 - t_0) \quad (94)$$

Równanie to (94) pozwala zastosować metodę graficzną dla określenia temperatur skrajnych. Jeśli w kierunku osi x odmierzymy odcinek  $\frac{\lambda}{\alpha}$  na wysokości  $t_0$



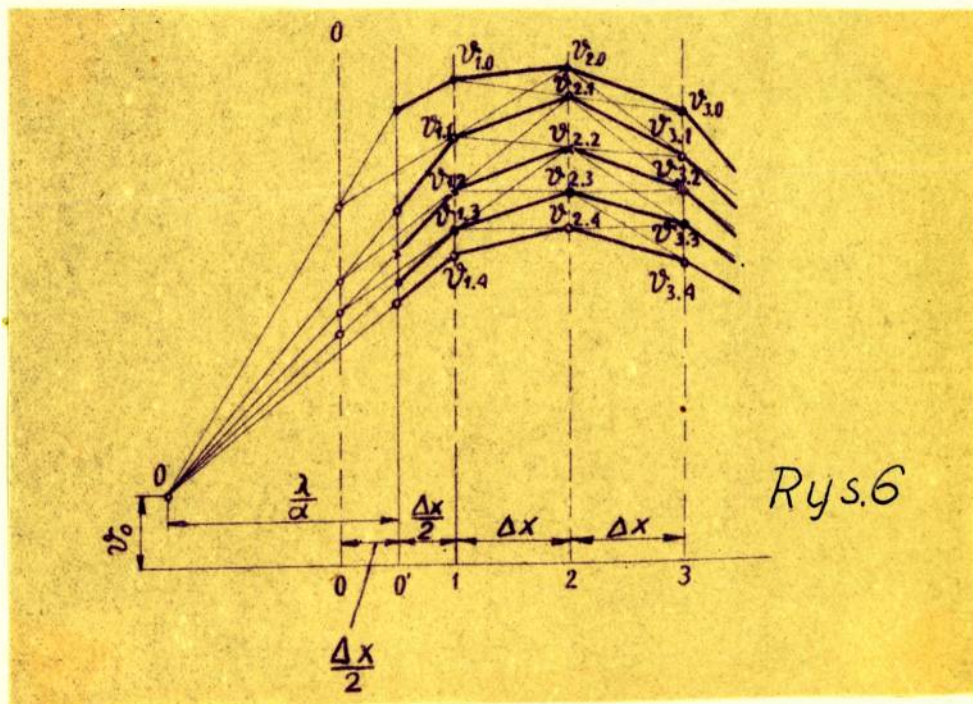


to

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{v_s - t_0}{\frac{\lambda}{\alpha}} = \frac{\alpha}{\lambda} (v_s - t_0) \quad (95)$$

czyli styczna do linii rozkładu temperatur na zewnętrznej ścianie płyty przechodzi przez punkt "O", tzw. biegun. Jeśli  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $t_0$  są wielkościami stałymi, to biegun nie zmienia swego położenia, a stąd wniosek, że wszystkie styczne do linii rozkładu temperatur w różnych chwilach, wykreślone w punktach ich przecięcia się z zewnętrzną ścianą płyty, przecinają się we wspólnym punkcie O.

Wykorzystanie tej właściwości pozwoli na wykreślenie podania pola temperaturowego jako funkcji miejsca i czasu. (rys.6)



## 2. Autora wykreślno-obliczeniowa metoda wyznaczenia naprężeń termicznych

Załóżmy sztywne utwierdzenie ciała, wtedy zgodnie z równaniem (74) można napisać dla jednokierunkowego stanu naprężenia

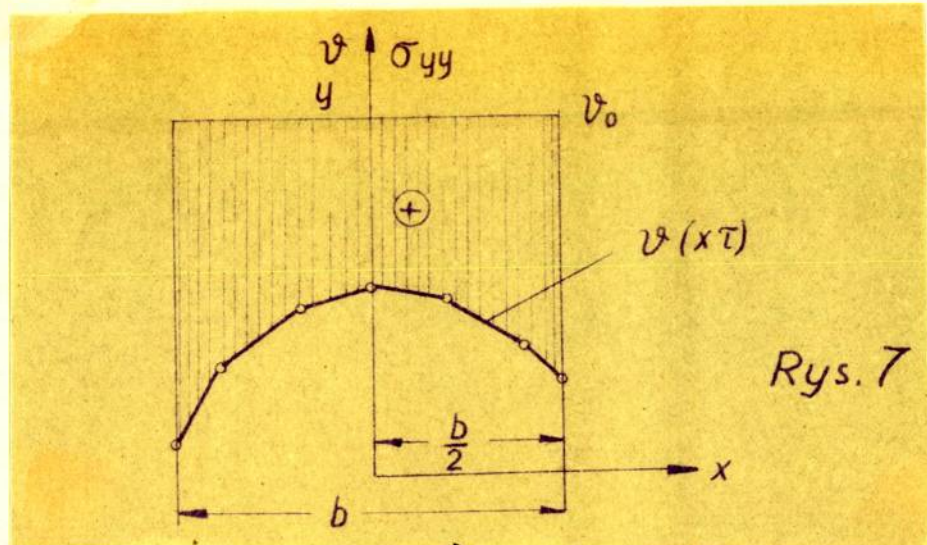
$$\bar{\sigma}_{yy} = -\beta E v^t(x, \tau) \quad (96)$$

Jeśli powstanie naprężeń termicznych spowodowaliśmy nie od stanu termicznie beznapięciowego ( $v^t_{pocz} = 0$ ), lecz od  $v^t_{pocz} = v^t_0$  to równanie (96) przyjmie postać

$$\bar{\sigma}_{yy} = -\beta E [v^t(x, \tau) - v^t_0] \quad (97)$$

Widać więc, że mnożąc wartość temperatury  $v^t(x, \tau)$  lub  $(v^t(x, \tau) - v^t_0)$  przez mnożnik  $-\beta E$  otrzymany z rozkładu temperatur rozkład naprężeń.  $\bar{\sigma}_{yy}$  dla ciała sztywnie utwierdzonego. Wykreślenie wykonujemy to zmieniając skalę na osi temperatur.





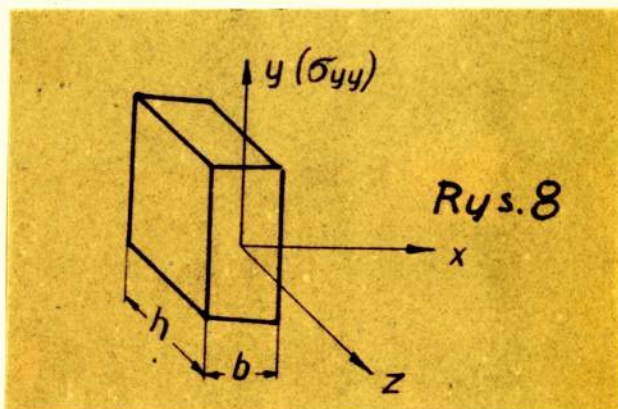
Zwalniając więzy ciała uniemożliwiającej jego odkształcenie pod wpływem naprężeń termicznych wzdłuż osi y (tj. osi  $v$ ), wyzwolimy naprężenia  $\bar{\sigma}_{yy}$  wywołane tym odkształceniem.

$$\bar{\sigma}_{yy} = \frac{P_{yy}}{b h} = - \frac{1}{bh} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} h \bar{\sigma}_{yy} dx \quad (98)$$

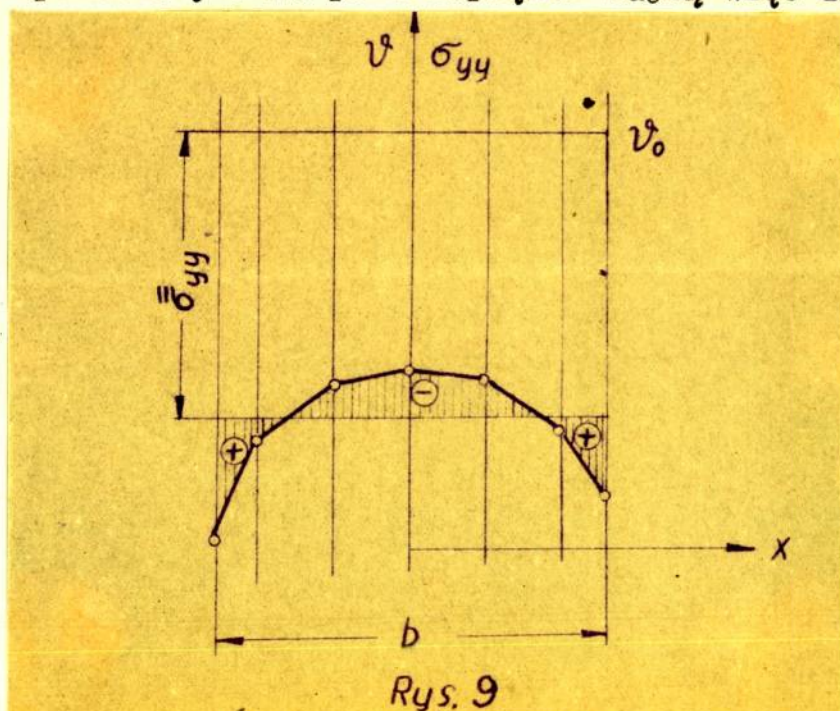
gdzie

h - szerokość płyty w m

b - grubość płyty w m



Interpretując wykreślnie równanie (98) możemy powiedzieć, że  $\bar{\sigma}_{yy}$  jest średnią wysokością pola naprężeń  $\bar{\sigma}_{yy}$ , wziętą ze znakiem przeciwnym. Na polu naprężeń zajdą więc zmiany.





Jeśli pole temperaturowe nie jest symetryczne względem płaszczyzny  $x = 0$ , to (po zdjęciu całkowitym więzów) ciało zostanie ugięte na skutek występowania momentu gnącego sił termicznych.

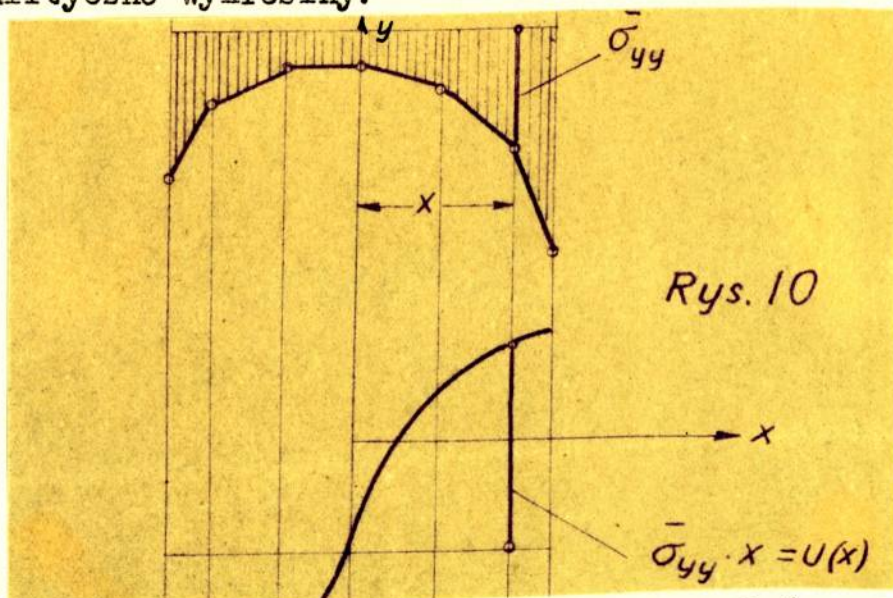
Naprężenia normalne (ściskające lub rozciągające) dadzą moment zginający  $M_{zg}$  względem osi prostopadłej do płaszczyzny ugięcia, a przechodzącej przez oś obojętną zginania (tj. oś, która nie doznaje naprężeń zginających na skutek zginania). Wartość tego momentu nie zależy od tego, czy zginanie powodują naprężenia  $\bar{\sigma}_{yy}$  wynikłe ze sztywnego mocowania, czy  $\bar{\sigma}_{yy} + \bar{\sigma}_{yy}^{\equiv}$  występujące po częściowym zwolnieniu więzów.

$$M_{zg} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \bar{\sigma}_{yy} h x dx \quad (99)$$

oznaczając przez  $u(x) = \bar{\sigma}_{yy} \cdot x$  możemy napisać

$$M_{zg} = h \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} u(x) dx \quad (100)$$

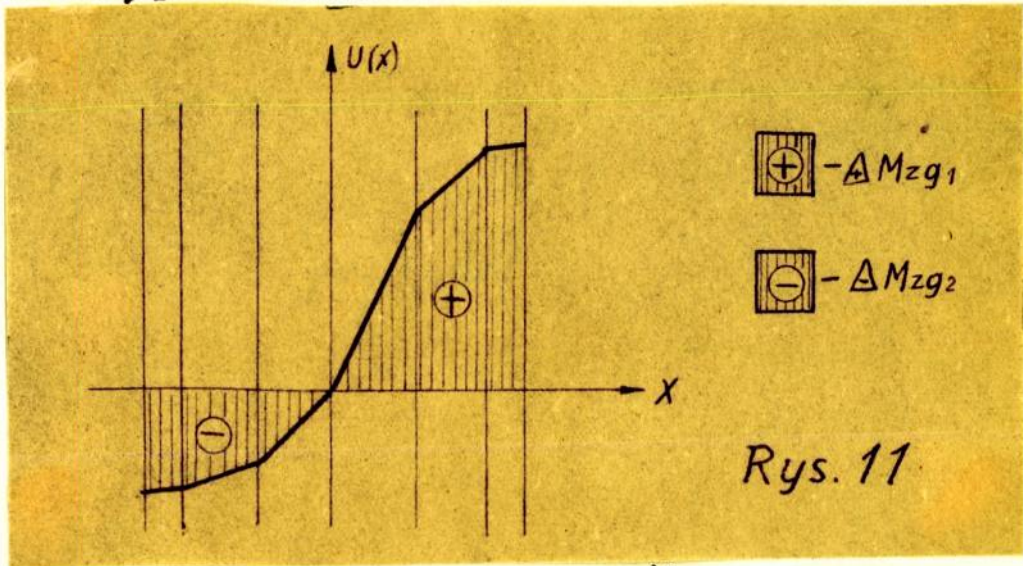
Zależność ta pozwala na znalezienie momentu zginającego w sposób analityczno wykreslny.



Mnożąc analitycznie odczytaną z wykresu naprężeń wartość naprężenia  $\bar{\sigma}_{yy}$  przez przynależną wartość  $x$ , odkładamy wykreslnie wartość  $u(x)$  na rysunku. Nietrudno wykazać, że  $M_{zg}$  (wg równa-



nia 100) jest sumą odpowiednich pól na wykresie  $u(x)$ ;  $x$  pomnożoną przez wartość  $h$ .



$$M_{zg} = h(\Delta M_{zg} + \Delta M_{zg}) = h \sum_{i=1}^{i=2} \Delta M_{zg} \quad (101)$$

Odczytania wartości  $\Delta M_{zgi}$  można dokonać przez planimetrowanie lub stosując jedną z wielu metod matematycznych określania pola ograniczonego daną krzywą (np. stosując wzór trapezowy lub Simpsona).

Naprężenia zginające  $\sigma_{yy}$  liczy się z zależności

$$\sigma_{yy} = \frac{M_{zg} \cdot x}{I_z} \quad (102)$$

gdzie  $I_z$  jest momentem bezwładności

Dla przekroju prostokątnego

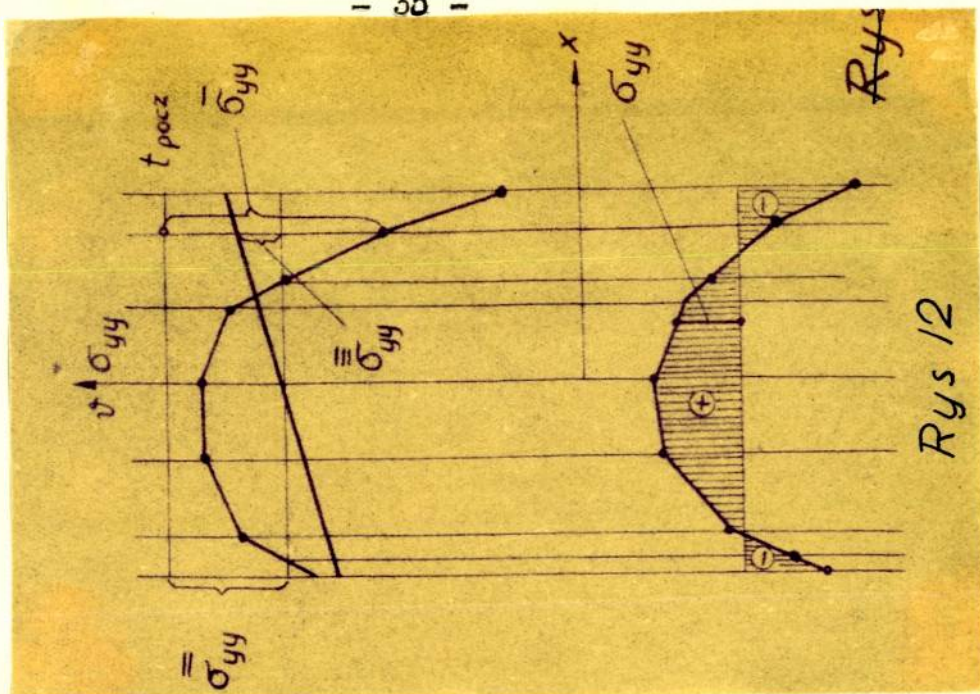
$$I_z = \frac{h(2b)^3}{12} = \frac{2hb^3}{3} \quad (103)$$

czyli

$$\sigma_{yy} = \frac{3h}{2} \frac{x}{hb^3} \sum \Delta M_{zgi} = \frac{3}{2} \frac{\sum \Delta M_{zgi}}{b^3} x = c x \quad (104)$$

Wartość tych naprężeń można nanieść na wykres naprężeń (rys nr 9), i dodając geometrycznie otrzymać wykres naprężeń całkowitych  $\sigma_{yy} = \bar{\sigma}_{yy} + \bar{\sigma}_{yy} + \bar{\sigma}_{yy}$





Dolna część wykresu określa  $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}(x)$ .

Z rysunku 12 odczytujemy maksymalną wartość naprężenia rozciągającego  $\sigma_{yy \max}$ . Dla jednoosiowego stanu naprężenia jest ono równe proporcjonalnie do wydłużenia maksymalnego.

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{yy \max}}{E} \quad (105)$$

Jeśli materiał nie ma być uszkodzony przez istniejący stan odkształcenia to  $\epsilon_{\max} \leq \epsilon_{\text{bezp}}$  co stwierdzimy obliczając  $\epsilon_{\text{bezp}}$  zgodnie z działem D część 2.1. i porównując z  $\epsilon_{\max}$ .

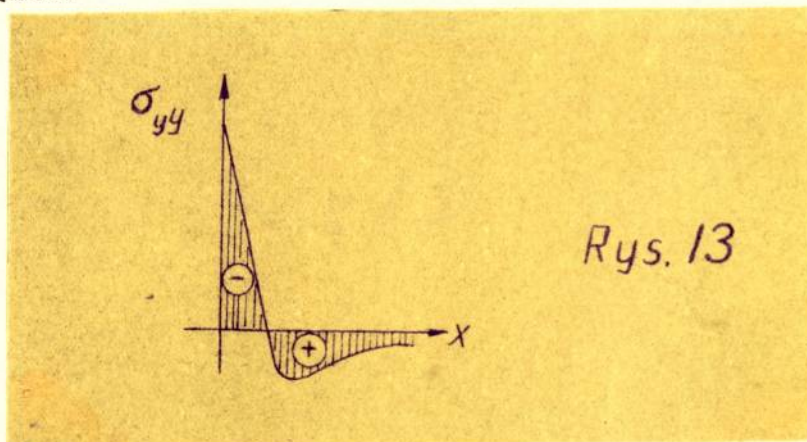
Przeprowadzone rozważania uproszczą się jeśli materiał nie ulega ugięciu. Jest to możliwe przy symetrycznym rozkładzie temperatur, lub wtedy gdy warunki mocowania nie pozwalają na ugięcie. Wtedy  $\sigma_{yy}^{\equiv} = 0$  i odpada część obliczeń analityczno-wykreslnych związanych ze znalezieniem  $\sigma_{yy}^{\equiv}$ .

W przypadku mocowania sztywnego odczytujemy wprost z rozkładu temperatur  $\epsilon = \epsilon_{\max} = -\beta(\vartheta - \vartheta_{0 \max})$ , a wydłużenie to musi być mniejsze od  $\epsilon_{\text{bezp}}$ , jeśli materiał nie ma ulec zniszczeniu.

Omówiony sposób badania wydłużeń pochodzących od naprężeń niszczących materiał odnosi się do naprężeń rozciągających.



Oczywiście w podobny sposób można badać naprężenia ściskające pochodzenia termicznego i stwierdzić czy istniejący stan odkształceń może zniszczyć materiał. Jednak niebezpieczeństwo zniszczenia materiału naprężeniami ściskającymi może zajść tylko przy bardzo specjalnym stanie naprężeń termicznych (np. ogrzewanie ciała sztywnie utwierdzonego), a przy swobodnym ogrzewaniu lub studzeniu ciała zniszczenie zostanie dokonane naprężeniami rozrywającymi. W tym przypadku nawet przy gwałtownym nagrzaniu ciała, naprężeniom ściskającym towarzyszą zawsze naprężenia rozrywające i one zniszczą materiał zanim naprężenia ściskające zdążą się rozwinąć. Wynika to stąd, że wytrzymałość na rozerwanie (mowa o normalnej wytrzymałości materiału badanej jednoosiowym ściskaniem lub rozrywaniem) jest dla ciał kruchych kilka lub kilkanaście razy mniejsza niż ściskanie.

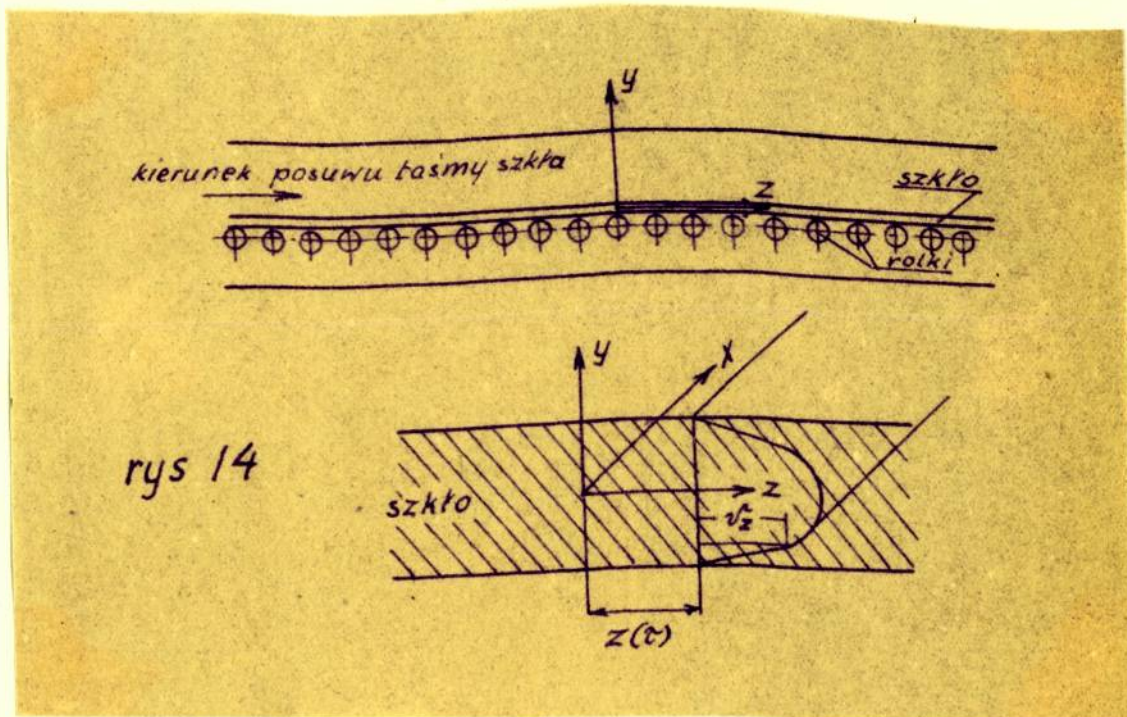


Tak więc dla ciał kruchych stan odkształceń spowodowany naprężeniami rozrywającymi jest zwykle niebezpieczniejszy od naprężeń ściskających. Omówiona metoda wykreślna odnosi się do jednokierunkowej wymiany ciepła. Można ją jednak stosować i w innych przypadkach.

Jeżeli w dwukierunkowej wymianie ciepła uda się uzależnić rozkład temperatury wzdłuż jednej osi jako funkcję tylko czasu (np. studzenie taśmy szklanej w tunelu odprężającym),

wtedy  $z = z(\tau)$ , jeśli zaś  $v = v(y, z)$  to stąd

$$v = v(y, z) \quad (106)$$



rys 14

Rozpatrujemy więc ten przypadek jako jednokierunkową wymianę ciepła, z tym jednak, że w miarę upływu czasu (a więc przy rosnącym  $z$ ) zmienia się temperatura otoczenia badanej płyty. Zmienia się więc położenie bieguna podczas wykreślenia rozkładu temperatur w czasie metodą Schmidta (patrz rys.5)



#### IV. BADANIA DOSWIADCZALNE

##### A. Przedmiot badań

##### 1. Szkło jako materiał sprężysty ikruchy

Jako przedmiot badań doświadczalnych obrano szkło lustrzane produkcji "Wałbrzyskich Zakładów Szkła Lustrzanego" o składzie wagowym

$\text{SiO}_2$	-	69,76 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-	2,42 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	0,08 %
$\text{CaO}$	-	13,46 %
$\text{Na}_2\text{O}$	-	14,28 %

pochodzące z jednego wytopu i obróbki. Zakres temperatur, którym zostało ono poddane w czasie badań wynosił od około 300 do 30°C. Jest to zakres temperatur, dla którego szkło wytworzone na bazie krzemianów spełnia warunek zupełnej prawie zgodności z prawem Hooke'a i doskonałej niemal kruchości.

Stan szklisty jest pewną formą istnienia substancji stanowiącą pomost między tzw. ciałami stałymi, a cieciami. Na to aby ciecz przy krzepnięciu mogła wykrytalizować muszą być spełnione specjalne warunki. Obniżanie temperatury poniżej temperatury topnienia nie zawsze prowadzi do krystalizacji. Znaczna liczba różnych substancji nie daje się krystalizować w żadnych warunkach, ale mimo tego w stanie skrzepniętym mogą one być uważane za całkowicie trwałe. Np. kopalne żywice zachowały postać szklistą (tj. tzw. strukturę bezpostaciową) od czasów eocenu tj. w przeciągu dziesiątków milionów lat (bursztyn). Twierdzenie o niestabilności stanu szklistego wywodzi się stąd, że kryształy mają mniejszą energię swobodną

(Helmholtza) niż szkła, z tego powodu poniżej temperatury topnienia jedynie kryształy znajdują się w stanie trwałej równowagi termodynamicznej podczas gdy szkła <sup>znajdują się</sup> w stanach równowagi nietrwałej (zahamowanej), która jednak może być bardzo (choć nie bezwzględnie) trwała.

W przypadku naprężeń, które przy niezmiennym odkształceniu ciała zmniejszają się wykładniczo z czasem, jako czas relaksacji zaburzeń " $\tau_r$ " określa się czas konieczny do zaniku wartości naprężeń do  $\frac{1}{e}$  wartości początkowej tych naprężeń.

Zgodnie z prawem Hooke'a dla ciał doskonale sprężystych naprężenia są proporcjonalnie do odkształceń. Wobec tego proponuję uogólniony zapis

$$\sigma_{ik} = K_{ik} \epsilon_{ik} \quad (110)$$

gdzie

$$K_{ii} = E \text{ - moduł sprężystości podłużnej tzw. moduł Vunga} \\ \text{(gdy } i = k)$$

$$K_{ik} = 2G \text{ - gdzie } G \text{ - moduł odkształcenia postaciowego} \\ \text{(gdy } i \neq k)$$

Zależność od  $G$  określa wzór  $2G(1 + \nu) = E$

$$\text{czyli } K_{ik} = \frac{K_{ii}}{1 + \nu_{ik}}$$

Jeżeli ciało jest elastyczne (takim/są ciała bezpostaciowe) naprężenia wywarłe na ciało częściowo rozplywają się, przy czym szybkość relaksacji naprężeń przy zadanym odkształceniu jest proporcjonalna do samego naprężenia; a więc można napisać

$$\frac{d\sigma_{ik}}{dt} = K_{ik} \frac{d\epsilon_{ik}}{dt} - \frac{\sigma_{ik}}{\tau_r} \quad (111) \textcircled{12}$$

co stanowi uogólnienie zapisu [Kobeko (str.84)]

$$\text{przy czym } \eta_{ik} = \sigma_{ik} \frac{dW_k}{dt} = K_{ik} \epsilon_{ik} \frac{dW_k}{dt} = K_{ik} \tau_r \quad (112)$$



Wstawiając otrzymane zależności z równania (112) do równania (111) otrzymamy

$$\frac{d\sigma_{i,k}}{d\tau} = \kappa_{i,k} \left( \frac{d\varepsilon_{i,k}}{d\tau} - \frac{\sigma_{i,k}}{\eta} \right) \quad (113) \textcircled{13}$$

W przypadku odkształcenia niezmiennego w czasie  $\frac{d\varepsilon_{i,k}}{d\tau} = 0$ ,

czyli

$$\frac{d\sigma_{i,k}}{d\tau} = -\kappa_{i,k} \frac{\sigma_{i,k}}{\eta} = -\tau_r \sigma_{i,k} \quad (114)$$

po scałkowaniu otrzymamy

$$\sigma_{i,k} = A e^{-\frac{\tau}{\tau_r}} \quad (115)$$

W chwili początkowej  $\tau = 0$  przyjmuje się warunek początkowy

$$\sigma_{i,k} = \sigma_{i,k}^0 = \kappa_{i,k} \varepsilon_{i,k}, \text{ czyli } A = \kappa_{i,k} \varepsilon_{i,k} = \sigma_{i,k}^0,$$

co daje ostatecznie wzór

$$\sigma_{i,k} = \sigma_{i,k}^0 e^{-\frac{\tau}{\tau_r}} \quad (116) \textcircled{14}$$

Przy  $\tau = \tau_r$  naprężenie  $\sigma_{i,k}$  spada od wartości  $\sigma_{i,k}^0$  do wartości  $\frac{\sigma_{i,k}^0}{e}$ . (Odnosi się to tak do naprężeń normalnych jak do stycznych).

W przypadku dużych lepkości, gdy wyraz  $\frac{\sigma}{\eta}$  jest bardzo mały w porównaniu z  $\frac{d\varepsilon_{i,k}}{d\tau}$ , zachodzą odkształcenia tylko sprężyste.

Z równania (113) wynika, że wykazanie właściwości plastycznych czy sprężystych nie jest uwarunkowane tylko absolutną wartością stosunku  $\frac{\sigma_{i,k}}{\eta}$ , lecz także szybkością odkształcenia  $\frac{d\varepsilon}{d\tau}$ . Tak więc substancje o dużej lepkości zachowują się przy szybkim odkształcaniu jako sprężyste, zaś przy powolnym jako plastyczne.

Jako przedmiot badań wybrano szkło produkowane na bazie krzemianów. W zakresie stosowanych temperatur lepkość szkła  $\eta = 10^{19}$  P. (Wartość ustalono na podstawie interpolacji z rys. II-14 str.46 podręcznika "Podstawy szklarstwa". t I )  
Przy badanych naprężeniach maksymalnych  $\sigma = \sigma_r = 6,8 \text{ kg/mm}^2$  tj. ok.  $6,8 \cdot 10^8 \text{ dyn/cm}^2$  oraz szybkości odkształcenia otrzymanej przy odkształceniu  $\epsilon_{xx} = 9,2 \cdot 10^{-3}$  w czasie maksymalnym 300 sec;  $\frac{\sigma}{\eta} = 0,68 \cdot 10^{-12} \ll \frac{d\epsilon}{dt} = 0,31 \cdot 10^{-5}$ , czyli badane szkło można uważać za prawie doskonale sprężyste.

## 2. Wzrost naprężeń trwałych w szkłe

Mowa jest o wzroście naprężeń trwałych w szkłe na skutek stosowania dopuszczalnej szybkości studzenia w zakresie temperatur od  $300^\circ\text{C}$  w dół.

Z uprzednich rozważań wynika, że szkło w tym zakresie temperatur jest ciałem prawie doskonale sprężystym, a więc przyspieszone studzenie nie powinno powiększyć naprężeń trwałych w szkłe, tj. pogorszyć jego jakości. Na potwierdzenie tego przypuszczenia przeprowadzono następujący eksperyment.

✓ Dwie próbki szkła zbadano na polaryskopie i stwierdzono istniejący stan baznaprężeniowy. Jedną próbkę nagrzano, następnie do temperatury ok.  $300^\circ\text{C}$ , ostudzone w strumieniu powietrza do temperatury  $100^\circ\text{C}$ , a wreszcie zanurzone w wodzie o temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . Po tym zabiegu znów sfotografowano dla porównania stan naprężeń w obu próbkach na polaryskopie.



Wynik badań w formie zdjęcia fotograficznego załączono w dziale VII. pod rys. nr 66.

Jak widać z załączonego zdjęcia, nie daje się zauważyć wzrostu trwałych naprężeń wewnętrznych. Szkło nie pogarsza więc swojej jakości wskutek stosowania wzmożonego studzenia w omawianym zakresie temperatur.

## B. URZĄDZENIA BADAWCZE

### 1. Urządzenie badawcze podstawowe

(Rys.nr 15 + 20 załączono w dziale VII).

Numery ujęte klamrami oznaczają numer elementu na odpowiednim rysunku.

Fotografię stoiska podstawowego umieszczono w dziale VII pod nr rys.67.

#### 1.1. Opis działania wg rysunku nr 15.

Badaną próbkę szkła (4) umieszczamy w odpowiednio wykonanym mocowaniu i nakładamy na nią stos termopar dolny (18). Stos ten jest umocowany w odpowiedniej ramce (patrz rys.17). Następnie nakładamy pokrywę (23) i włączamy grzejniki (11) ogrzewając próbkę do żądanej temperatury. Pokrywa (23) ma zapewnić możliwie równomierne obustronne nagrzanie próbki. W zbiorniku wody chłodzącej (17) nawilża się płytkę dociskową górną (16) po czym (szczegóły patrz rys.16) zbiorniczek odchyła się na odpowiednim przegubie. Po nagrzaniu próbki do żądanej temperatury i ustaleniu się pola temperaturowego włączamy lampy oświetleniowe (37), wzmacniacz (12) oscylograf (1) i kamerę (22). Po zdjęciu pokrywy (24) opuszcza się płytkę dociskową górną na badaną próbkę co powoduje pękanie materiału próbki pod wpływem sił termicznych.

Stos termopar górny i dolny (górny umocowany w płytce dociskowej (16)) mierzą temperaturę górnej powierzchni stu-



dzonej próbki. Przebieg temperatury rejestruje oscylograf pętlicowy po wzmocnieniu bodźca przez wzmacniacz.

Kamera rejestruje przebieg powstawania pęknięć podczas studzenia. Początkowo kamera miała rejestrować jeszcze czas jaki upłynął od momentu zetknięcia się płytki dociskowej z próbką, do chwili powstania pierwszych pęknięć. Czas ten byłby potrzebny do określenia rozkładu temperatur, ~~w momen-~~<sup>przy</sup> ~~cie~~ którym nastąpiła dekohezja cząstek szkła i byłby liczony za pomocą ilości klatek filmu przy znanej szybkości przesuwu taśmy.

Po wykonaniu pierwszych prób okazało się, że okres szybkiego studzenia próbki trwa około 0,16 sekundy, zaś kamera posiadała maksymalną szybkość 48 klatek na sekundę. Przyjmując nawet, że czas upływający od chwili zetknięcia płytki dociskowej z próbką do chwili powstania pierwszych pęknięć stanowi połowę okresu szybkiego zestudzenia szkła, błąd pomiaru tego czasu przy maksymalnej ~~szybkości~~ taśmy filmowej wyniósłby ok. 30 %. Nie mogąc otrzymać kamery o przynajmniej 10-krotnie większej szybkości przesuwu klatek zrezygnowano ze sprawdzenia krytycznego rozkładu temperatur tą metodą.

Drogą licznych eksperymentów prześledzono przebieg studzenia próbki za pomocą płytki dociskowej i drogą obliczeń określono, który z wykreślonych rozkładów temperatur ma być krytyczny. Następnie zmniejszając temperaturę próbki doprowadzono do zaniku pęknięć termicznych, notując równocześnie przebieg temperatury. W ten sposób sprawdzono, czy wyznaczony drogą obliczeń krytyczny rozkład temperatur jest rzeczywiście krytyczny.

Rozkład ten dla stosowanego sposobu studzenia wyznacza się wykreślnie jak to pokazano w części obliczeniowej tej pracy.

## 1.2. Opis urządzeń pomiarowych

### 1.2.1. Pomiar temperatury powierzchni studzonej próbki.

Pomiaru dokonuje się za pomocą dwu stosów termopar Cu-konstantan, z których górny jest umocowany w płytce dociskowej górnej (patrz rys.18), zaś dolny w odpowiedniej ramce (patrz rys.19). Stos górny i dolny został przecechowany i wyniki tego cechowania są podane dalej. Bodziec z termopar wzmacnia się na wzmacniaczu fotoelektrycznym (model WF-70 nr fabr.3014 produkcji Zakładu Optyki i Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Śląskiej) i po wzmocnieniu kieruje się na pętlicę oscylografu pętlicowego. Użyto pętlicy nr 61238 o czułości 10 mA i oscylografu pętlicowego typu OP-8 nr fabr.6014 produkcji Instytutu Elektroenergetyki Politech. Wrocławskiej. Wskazania oscylografu rejestrowano na papierze światłoczułym. Kopie wyników załączono w dziale VII (rys.nr 32 + 51), oryginały umieszczono w archiwum Katedry Teorii Maszyn Ciepłych Polit.Wr.

### 1.2.2. Pomiar temperatury zimnych końców stosów termopar.

Temperaturę zimnych końców stosów termopar mierzono termoparą Cu-konst., odpowiednio długą tak, że temperaturę zimnych końców tej z kolei termopary przyjęto za równą temperaturze otoczenia. Odczytu temperatury dokonano na wskaźniku profilowym nr 2203146 do termopary Fe-konst, którego



charakterystykę zmieniono przystosowując go do termopary Cu-konst. Termoparę i wskaźnik przecechowano, a wyniki cechowania są załączone.

1.2.3. Pomiar temperatury próbki przed studzeniem

Pomiaru dokonano dwiema termoparami Fe-konst przyłączonymi do wskaźnika profilowego nr 2508514, z których jedna była umieszczona pod a druga nad badaną próbką. Temperaturę zimnych końców przyjęto równą temperaturze otoczenia.

1.2.4. Rejestracja przebiegu zjawiska pęknięcia szkła.

Przebieg powstawania pęknięć rejestrowano kamerą na taśmie filmowej, której szybkość posuwu ze względu na oświetlenie wynosiła tylko 18 klatek/sek.

Do filmowania użyto kamery typu "Admira 8" na której obiektywie umieszczono specjalną nasadkę dla skrócenia ogniskowej obiektywu.

Oświetlenia obrazu dokonano za pomocą dwu lamp oświetlających.

1.2.5. Rejestracja czasu na papierze oscylograficznym.

Czas na papierze oscylograficznym rejestrowano za pomocą wahań prądowych prądu zmiennego z sieci miejskiej o częstotliwości 50 herców. Napięcie przetransformowano z 220/6 V i po włączeniu opornicy suwakowej w obwód skierowano bodziec na pętlicę (nr pętlicy 8619 produkcji Zakładu Elektroenergetyki Polit.Wr.) o czułości 50 mA.

2. Stoisko do pomiaru doraźnej wytrzymałości na rozzerwanie i wydłużalności mechanicznej szkła.

2.1. Stoisko badawcze oparte na rozciąganiu próbki

(rys.nr 21 załączono w dziale VII).

Na skutek niemożności osiągnięcia idealnej symetrii wykonanych próbek, we wszystkich badaniach notowano silniejsze lub słabsze gięcie próbki podczas rozciągania. Próbki wykonano z tafli szklanej szlifując je ręcznie wg szablonu.

Z powyższych względów wyniki badania próbki były niepewne, szczególnie pomiar wydłużalności.

Dla tego na podstawie projektu autora wykonano inne stoisko do badania doraźnej wytrzymałości i wydłużalności szkła, oparte na gięciu próbki.

## 2.2. Stoisko badawcze oparte na zginaniu próbki

(rys.nr 22)

### 2.2.1. Opis działania

Badaną próbkę (5) ustawia się na podporach (4) i przez nakładanie obciążników na płytkę (9) wywiera się nacisk na próbkę poprzez szczęki dociskowe (6) o stykach walcowych. Maksymalne ugięcie przy danym obciążeniu wskazuje czujnik zegarowy (nr MNZa 51930) o dokładności 0,01 mm (2).

Temperaturę próbki mierzono termoparą Fe-konstantan przyłączoną do wskaźnika (M128 nr 000747) kl.1. **Charakterystyki** termopary i wskaźnika załączone w dalszej części opracowania.

Odczyty robiono początkowo przy wzroście obciążenia do 5 kG, co 1 kG, a następnie co 0,5 kG. Do 7 kG obciążenie realizowano obciążnikami, a powyżej przez dolewanie wody dla uzyskania ciągłego wzrostu obciążenia. Oczywiście notowano także wskazanie czujnika w chwili pęknięcia próbki. (rys.22 załączono w dz.VII).



3. Urządzenie do pomiaru współczynnika wydłużalności liniowej ciał w zależności od temperatury (rys.23)

Urządzenie to wykonano remontując generalnie uszkodzony dilatometr będący własnością Katedry Ceramiki Politechniki Wrocławskiej.

3.1. Przebieg pomiaru

(odnośniki wg numeracji na rys.23 załączonego w dz.VII)

Badaną próbkę (3) umieszcza się wewnątrz rury kwarcowej (4) i dociska rurą kwarcową wewnętrzną (5). Wydłużenie badanej próbki względem kwarcu jest przenoszone mechanizmem (9) na bęben rejestrujący z mechanizmem zegarowym (11). Próbkę ogrzewa się za pomocą grzejników elektrycznych. Temperaturę próbki mierzono termoparą Fe-konst. przyłączoną do wskaźnika profilowego do termopar nr 000747. Temperaturę zimnych końców termopary umieszczono tuż przy próbce, a włożono ją przez specjalnie wykonany otwór w metalowym zakończeniu drugiego elementu rury kwarcowej wewnętrznej (5). Pomiar przeprowadzono przy wzrastającej i malejącej temperaturze próbki.

Dla kontroli wydłużenia zamontowano dodatkowo czujnik zegarowy (f-my Keilpart) o dokładności 0,001 mm mocując go sztywno z konstrukcją nośną dilatometru.

Nóżkę czujnika wsparto na osi dociskacza próbki (7). Okazało się, że wskazania czujnika były pewniejsze i dokładniejsze niż pisaka (10) obarczonego dodatkowymi błędami przenoszenia wskazań mechanizmu (9). Pomiar właściwe wykonano więc przy użyciu czujnika.

## C. WYNIKI BADAŃ

### 1. Wyniki badań wytrzymałościowych

#### 1.1. Wyniki otrzymane na rozrywarce

Wyniki badań na rozrywarce umieszczono w tabeli 1.

W tabeli tej podano też wartość wyliczonego naprężenia rozrywającego  $\sigma_r$ .

#### 1.2. Wyniki badań na zginarce

##### 1.2.1. Omówienie ogólne

Zginarkę do badań wytrzymałościowych szkła wykonano wg projektu autora. Konstrukcję nośną wykonano w Warsztacie Wydziałowym Wydziału Mechanicznego Politechniki Wr., przyrządowanie i grzejniki wykonano we własnym zakresie. (Patrz rys. 22).

Opis działania zginarki, charakterystykę przyrządów i przebieg pomiaru umieszczono w poprzedniej części opracowania.

Pomiary przeprowadzone na zginarce były pewne i powtarzalne, tzn. jeśli zdjęto obciążenie badanej próbki i pomiar przeprowadzono ponownie, to uzyskano prawie identyczny przebieg ugięć. Odchyłki nie przekraczały 0,02 mm, a więc prawie w dokładności odczytu skali.

Cięte diamentem próbki szkła miały szerokość średnio 20 mm.

Na zginarce były one układane w ten sposób, że krawędź, na której przesuwano diament podlegała ścisłaniu (dla wykluczenia wpływu działania karbu pochodzącego od rysy cięcia). W celu skontrolowania czy obrzeża cięte nie mają wpływu na



wartość naprężeń rozrywających  $\sigma_r$ , wykonano badania kontrolne, tnąc z tej samej tafli szkła próbki o szerokości ok. 10 mm i 30 mm. Próbki te zostały złamane na zginarce i wyniki pomiarów załączono w tabeli 3.

#### 1.2.2. Tabela wyników

Wyniki pomiarów właściwych umieszczono w załączonej tabeli 2. Wyniki pomiarów kontrolnych w tabeli 3.

#### 1.2.3. Wykreślne przedstawienia niektórych wyników badań.

W celu sprawdzenia stałości modułu Yunga dla próbki o danej temperaturze nakreślono przebieg zginania na wykresach. Wykonano po 1 wykresie dla każdej temperatury. (Seria pomiarów dla danej temperatury wynosi ok. 12 pomiarów).

Jak wynika z wykresów, przy danej dokładności pomiaru nie daje się zauważyć wyraźnych zmian modułu wydłużalności podłużnej w czasie zginania, co jest zgodne z przyjęciem szkła jako ciała kruchego.

## 2. Wyniki badań rozszerzalności termicznej szkła

Pomiary wykonano na dilatometrze (patrz rys. 23). Przebieg pomiaru opisano poprzednio w rozdziale B poz. 3.

### 2.1. Wyniki badań

Wyniki pomiarów umieszczono w tabeli 4.

### 2.2. Wyniki pomiarów wykreślne

Z wykresów umieszczonych na rys. 28 + 31 widać, że w początkowej fazie pomiaru temperatura rośnie, a nie ma wzrostu wydłużenia próbki, pod koniec pomiaru, gdy temperatura próbki spada, też nie stwierdza się zmniejszenia wydłużenia.

Przebieg taki wynika ze zjawiska, które można nazwać histerezą termiczną przyrządu.

Jak widać z rysunku (23) długość próbki badanej stanowi ok. 10% długości rur kwarcowych. Podczas nagrzewania rośnie najprzód temperatura rury zewnętrznej, a później temperatura próbki i rury kwarcowej wewnętrznej. Pole temperaturowe nie jest ustalone i istnieje minimalna różnica temperatur między obiema rurami, której na początku pomiaru nie było. W tym czasie mimo wyraźnego wzrostu temperatury próbki przyrząd wydłużenia nie wskazuje, gdyż jest ono skompensowane wydłużeniem dłuższej rury kwarcowej zewnętrznej względem rur kwarcowych wewnętrznych i próbki. Dopiero po ustaleniu się profilu pola temperaturowego w przestrzeni przyrząd zaczyna wskazywać właściwe wydłużenia. Odwrotnie przebiega zjawisko przy studzeniu próbki.

Oprócz omówionej histerezy termicznej przyrządu istnieje także histereza mechaniczna wynikająca z oporów tarcia mechanizmów przenoszących wydłużenie. Jest ona jednak niewielka w porównaniu z omówioną poprzednio. Wielkość histerezy mechanicznej zbadano przez dodatkowy docisk ręką dociskacza próbki. Wielkość jej wynosi kilka tysięcznych milimetra, zaś histereza całkowita odczytana z wykresów (tj. termiczna + mechaniczna) wynosi ok. 0,06 mm. Współczynnik liniowej wydłużalności termicznej szkła wyliczono na podstawie interpolacji liniowej wyników pomiarów na wykresie. Interpolacja wyników daje wyniki praktycznie takie same przy rosnącej i malejącej temperaturze. Dlatego do wyliczenia wartości średnich użyto wyników pomiarów przy rosnącej temperaturze.



### 3. Wyniki badań przebiegu studzenia

- 3.1. Wykresy przebiegu studzenia zdjęte przy użyciu stosu górnego podano na rys. 32 + 41.
- 3.2. Wykresy przebiegu studzenia zdjęte przy użyciu stosu termopar dolnego podano na rys. 42 + 51.
- 3.3. Rejestracja przebiegu powstawania pęknięć. Odbitki z wycinków taśmy filmowej, na której rejestrowano przebieg powstawania pęknięć załączono na rys. nr 70.
- 3.4. Pomiar temperatur na urządzeniu podstawowym. Omawia się tutaj pomiar temperatur z wykluczeniem pomiaru temperatury powierzchni próbki, dokonywanego przy użyciu stosu termopar górnego i dolnego.
  - 3.4.1. Schemat kluczowy połączenia termopar załączony na rysunku nr 52.
  - 3.4.2. Wyniki pomiarów temperatur. Wyniki pomiarów temperatur ~~umieszczono~~ umieszczono w tabeli nr 5. Oznaczenia temperatur wg schematu kluczowego umieszczonego na rys. 52.

#### D. OBLICZENIA

1. Obliczenie naprężenia rozrywającego  $\sigma_r$  oraz niektórych wartości współczynnika sprężystości podłużnej  $E$  z wyników pomiarów na rozrywance.

- 1.1. Obliczenie naprężenia rozrywającego  $\sigma_r$

$$\sigma_r = \frac{P_r}{F} \text{ kg/mm}^2$$

$F = s \cdot x \cdot h \text{ mm}^2$       przekrój poprzeczny próbki rozrywanej

Wyniki obliczeń umieszczono w tabeli 4. Tam też umieszczono wyliczone poniżej niektóre wartości współczynnika sprężystości podłużnej .

- 1.2. Orientacyjne obliczenie współczynnika sprężystości podłużnej .

$$E = \frac{\Delta P \cdot l}{F \cdot \Delta l_{sr}} \text{ kg/mm}^2$$

$\Delta P$       - przyrost obciążenia w kg

$\Delta l_{sr} \text{ mm}$  - średni przyrost wydłużenia odczytany na czujnikach wywołany przyrostem  $P$

$l \text{ mm}$     - długość początkowa próbki

$F \text{ mm}^2$  - przekrój poprzeczny próbki

- 1.2.1. Obliczenie dla pomiaru 15 (z tabeli 4)

$$10^3 \cdot \Delta l_{sr} = \frac{65 + 43}{2} = 54 \text{ mm}$$

$$l = 130 \text{ mm}$$

$$E = \frac{42 \cdot 130}{19,9 \cdot 0,054} = 5080 \text{ kg/mm}^2$$



1.2.2. Obliczenie dla pomiaru 11

$$\Delta l_{\text{śr}} = \frac{78 + 48}{2} \cdot 10^{-3} = 0,063 \text{ mm}$$

$$E = \frac{53 \cdot 130}{24,7 \cdot 0,063} = 4460 \text{ kg/mm}^2$$

1.2.3. Obliczenie dla pomiaru 1

$$\Delta l_{\text{śr}} = \frac{45 + 18}{2} \cdot 10^{-3} = 0,0315 \text{ mm}$$

$$E = \frac{(38,8 - 2) \cdot 130}{21,4 \cdot 0,0315} = 7100 \text{ kg/mm}^2$$

1.2.4. Obliczenie dla pomiaru 2

$$\Delta l_{\text{śr}} = \frac{90 + 10}{2} \cdot 10^{-3} = 0,050 \text{ mm}$$

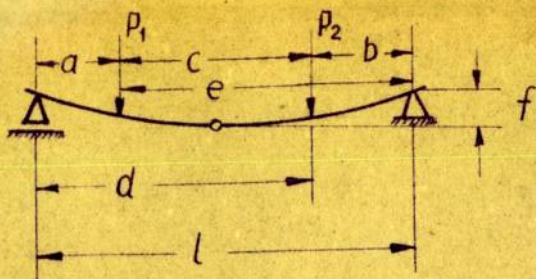
$$E = \frac{(43 - 2) \cdot 130}{22,2 \cdot 0,05} = 4820 \text{ kg/mm}^2$$

Jak widać wartości na  $E$  uzyskane z pomiarów przeprowadzonych na rozrywance są rozstrzelone, a więc pomiary te nie mogą stanowić podstawy do określenia  $E_{\text{śr}}$ .

2. Obliczenie naprężenia rozrywającego  $\sigma$  oraz współczynnika sprężystości podłużnej  $E$  z wyników badań na zginarce.

Do obliczeń przyjęto model ugięcia belki swobodnej obciążonej dwoma siłami  $P_1$  i  $P_2$  z "Poradnika Mechanika" str.

rok wydania



Rys. 53

$$f = \frac{P_1 \cdot a^2 \cdot e^2 + P_2 \cdot b^2 \cdot d^2}{3 E I l}$$

Żeby użyć omawianego modelu do badań na zginarce użytej do pomiarów trzeba przyjąć

$$P_1 = P_2 = \frac{P_r}{2}, \quad a = b, \quad d = e, \quad f = f_r$$

wtedy

$$f_r = \frac{\frac{1}{2}(P_r \cdot a^2 \cdot e^2 + P_r \cdot a^2 \cdot e^2)}{3 E I l} = \frac{1}{3} \frac{a^2 e^2}{l} \frac{P_r}{E} \quad \text{mm}$$

stąd

$$E = \frac{1}{3} \frac{a^2 e^2}{l} \frac{P_r}{I f_r} = \frac{c}{I} \cdot \frac{P_r}{f_r} \quad \text{kg/mm}^2$$

gdzie

$$c = \frac{1}{3} \frac{a^2 e^2}{l} = \frac{1}{3} \frac{70^2 \cdot 130^2}{200} = 138017 \quad \text{mm}^3$$

I - moment bezwładności przekroju względem osi obojętnej zginania  $\text{mm}^4$

2.1. Wyniki obliczeń  $\sigma_r$  i  $E$  (podane na załączonej tabeli 6)

2.1.1. Zestawienie wartości średnich (z tabeli 6)



T a b e l a 7

Lp	t	$E_t$		$\sigma_r$		$10^3 \epsilon_r$	
		kg/mm <sup>2</sup>	% bł.	kg/mm <sup>2</sup>	%bład!	-	%bład
1	20	8014 ± 56	0,70	6,84 ± 0,25	3,65	0,853 ± 0,032	3,75
2	120	7686 ± 55	0,72	6,78 ± 0,21	3,10	0,882 ± 0,028	3,16
3	220	7401 ± 71	0,96	6,63 ± 0,15	2,26	0,895 ± 0,022	2,46
4	320	7205 ± 70	0,97	6,67 ± 0,29	4,35	0,927 ± 0,041	4,42

2.2. Wyniki obliczeń  $\sigma_r$  i  $E$  badań kontrolnych  
(zał.obok w tabeli 8)

2.2.1. Zestawienie wartości średnich <sup>wyników badań</sup> kontrolnych

T a b e l a 9

Lp	t	$\sigma_r$	U w a g i
	°C	kg/mm <sup>2</sup>	
1	24	6,87	próbki szer.śred. 10 mm
2	20	6,78	próbki szer.śred. 30 mm

3. Obliczenie współczynnika rozszerzalności liniowej szkła

Obliczenie przeprowadzono w oparciu o interpolację graficzną wykonaną na wykresach wydłużeń (rys.28 + 31)

### 3.1. Obliczenie wyników pomiaru 1 (rys.28)

Z wykresu odczytano

$$\Delta l = 192 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$t_2 = 359 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{odpowiada } 18 \text{ mV}$$

$$\underline{t_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{odpowiada } 4,4 \text{ mV}}$$

$$\Delta t = 269 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\beta_{1w} = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta t} = \frac{192 \cdot 10^{-3}}{78 \cdot 269} = 9,125 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ}$$

$\beta_{1w}$  - współczynnik rozszerzalności liniowej względem kwarcu

$l$  - długość próbki w mm

$\Delta t$  - różnica temperatur powodująca przyrost długości  $\Delta l$

### 3.2. Obliczenie wyników pomiaru 2 (z rys.29)

Z wykresu odczytano

$$\Delta l = 202 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$t_2 = 359 \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad 17,8 \text{ mV}$$

$$\underline{t_1 = 91 \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad 4,45 \text{ mV}}$$

$$\Delta t = 268 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\beta_{2w} = \frac{202 \cdot 10^{-3}}{78 \cdot 268} = 9,65 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ}$$

### 3.3. Obliczenie wyników pomiaru 3 (z rys.30)

Z wykresu odczytano

$$\Delta l = 193 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$t_2 = 359 \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad 18 \text{ mV}$$

$$\underline{t_1 = 94 \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad 4,6 \text{ mV}}$$

$$\Delta t = 265 \text{ }^\circ\text{C}$$



$$\beta_{3w} = \frac{193 \cdot 10^{-3}}{68,2 \cdot 265} = 9,31 \cdot 10^{-6} \frac{1}{1^{\circ}}$$

3.4. Obliczenie wyników pomiaru 4 (z rys. 31)

Z wykresu odczytano

$$\Delta l = 189 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$t_2 = 359^{\circ} \text{C} \quad - \quad 18 \text{ mV}$$

$$t_1 = 92^{\circ} \text{C} \quad - \quad 4,5 \text{ mV}$$

$$\Delta t = 267^{\circ}$$

$$\beta_{4w} = \frac{189 \cdot 10^{-3}}{78,2 \cdot 267} = 9,05 \cdot 10^{-6} \frac{1}{1^{\circ}}$$

3.5. Obliczenie średniej wartości współczynnika rozszerzalności liniowej względem kwarcu  $\beta_{w(0-270^{\circ})}$

$$\begin{aligned} \beta_w &= \frac{\sum_{i=1}^4 \beta_i}{4} = 10^{-6} \cdot \frac{9,125 + 9,65 + 9,31 + 9,05}{4} = \\ &= 9,284 \cdot 10^{-6} \frac{1}{1^{\circ}} \end{aligned}$$

3.6. Obliczenie współczynnika rozszerzalności liniowej kwarcu (topionego)  $\beta_k$

Na podstawie danych pomiarowych umieszczonych w podręczniku "Termofizyczne Swoistwa Wieszczestw" wyd. 1956 r. str. 327 tablica 14-11 dla kwarcu topionego, zakładając liniową zmianę średniego współczynnika rozszerzalności liniowej, ułożono wzór  $10^6 \cdot \beta_{k_{0-t}} = 0,4955 + 0,000045 t \frac{1}{1^{\circ}}$ .

Dla zakresu pomiarowego średnio  $0 + 270^{\circ} \text{C}$

$$\beta_k = (0,4955 + 0,000045 \cdot 270) \cdot 10^{-6} = 0,516 \cdot 10^{-6} \frac{1}{1^{\circ}}$$

3.7. Obliczenie bezwzględnej wartości średniego współczynnika rozszerzalności liniowej szkła w zakresie  $0 \rightarrow 270$  °C.

$$\beta = \beta_w + \beta_k = (9,284 + 0,516) \cdot 10^{-6} = 9,80 \cdot 10^{-6} \frac{1}{1^\circ}$$

4. Obliczenie średniej temperatury próbki przed studzeniem na urządzeniu podstawowym i średnich temperatur zimnych końców stosów termopar.

Obliczenia dokonano na podstawie danych w tabeli 5.

4.1. Obliczenie średniej temperatury powietrza pod i nad badaną próbką szkła ( $t_8$  i  $t_{11}$ )

z tabeli 3  $t_{8 \text{ sr}} = 275,6$  °

temperaturę tę odczytano na wskaźniku profilowym do termopary Fe-ko nr 2508514 do którego przyłączono termoparę Cu-ko, której charakterystyka jest podana na rys.79.

temperaturze odczytanej 275,6°C odpowiada na charakterystyce wskaźnika umieszczonej na rys.78 napięcie 14,8 mV. Napięciu temu z wykresu na rys.79 odpowiada  $\Delta t_8 = 293$  °C, czyli średnia temperatura powietrza po stronie dolnej płytki badanej  $t_8$  °C.

$$t_8 = \Delta t_8 + t_0 = 293 + 21 = 314 \text{ °C}$$

z tabeli 5  $t_{11 \text{ sr}} = 220,5$  °C

temperaturę tę ( $t_{11 \text{ sr}}$ ) odczytano na tym samym wskaźniku przy użyciu termopary Fe-ko o charakterystyce umieszczonej na rys.85. odczytanej temperaturze 220,5 °C odpowiada na rys. 78 napięcie 11,7 mV. Temu napięciu na rys.85 odpowiada różnica temperatur  $\Delta t_{11} = 237$  °C, co przy temperaturze otoczenia równej 21 °C daje

$$t_{11} = \Delta t_{11} + t_0 = 237 + 21 = 258 \text{ °C}$$



#### 4.2. Obliczenie średniej temperatury zimnych końców stosów termopar

Obliczenia dokonano na podstawie pomierzonych danych  
z tabeli 5:

##### 4.2.1. - stosu górnego

$$t_{z,k \text{ } \acute{s}r}^g = \frac{t_5 + t_7}{2} = \frac{73,9 + 77,1}{2} = 75,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Srednią temperaturę zimnych końców stosu górnego obli-  
czono na podstawie pomierzonych średnich wartości  $t_5$  i  $t_7$   
odczytanych na wskaźniku profilowym nr 2203146, do które-  
go przyłączono termoparę Cu-ko

- średniej wartości  $75,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  odpowiada na charaktery-  
styce wskaźnika umieszczonej na rys.77 napięcie  
 $V = 1,05 \text{ mV}$ , a temu napięciu z rys.79 odczytuje się  
przynależny przyrost temperatury  $\Delta t_{z,k}^g = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$   
A więc temperatura zimnych końców stosu termopar

$$t_{z,k}^g = \Delta t_{z,k}^g + t_o = 27 + 21 = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

##### 4.2.2. - stosu dolnego

$$t_{z,k \text{ } \acute{s}r}^d = \frac{t_2 + t_{10}}{2} = \frac{89,2 + 86,8}{2} = 88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- średniej wartości temperatury zimnych końców stosu  
dolnego  $88 \text{ } ^\circ\text{C}$  odpowiada na charakterystyce wskaźnika  
na rys.77 napięcie  $V = 1,45 \text{ mV}$ . Temu napięciu z rys.  
83 odpowiada  $\Delta t_{z,k}^d = 37 \text{ } ^\circ\text{C}$ , czyli

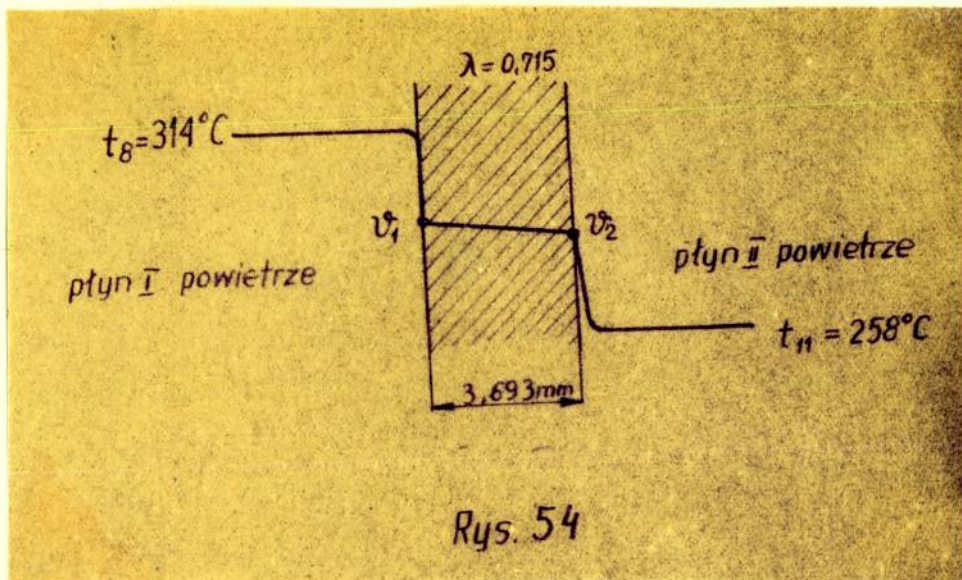
$$t_{z,k}^d = \Delta t_{z,k}^d + t_o = 37 + 21 = \underline{58 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

#### 4.3. Obliczenie średniej temperatury próbki szkła przed studzeniem

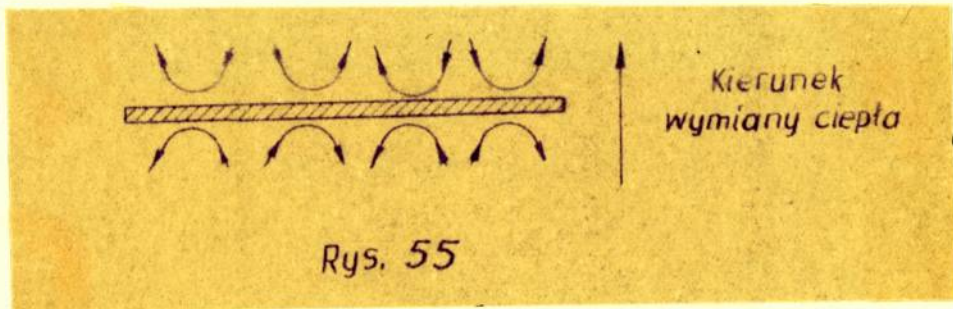
- na podstawie pomierzonych temperatur ustalono niżej



przedstawiony rozkład temperatur



Ze względu na podobny układ prądów konwekcyjnych pod i nad badaną płytką szkła co jest następstwem poziomego położenia płytki i sposobu jej ogrzewania, oraz wobec zbliżonych temperatur warstw granicznych po obu stronach przyjmuje się  $\alpha_1 = \alpha_2$



Na podstawie przybliżonej oceny opisów przejmowania i przewodzenia orientacyjnie przyjmuję

$$v_1 = v_2 = \frac{t_8 + t_{11}}{2} = \frac{314 + 258}{2} = 286 \text{ } ^\circ\text{C}$$

i przeprowadzam obliczenie dla przypadku konwekcji swobodnej bez zmiany fazy.

4.3.1. Określenie wielkości pomocniczej  $X$ , wykł. potęgowego  $i$ , oraz stałej  $c$

$$X = V.P_r \left( \frac{v_2}{h} \right)^{-3} = Gr \cdot Pr$$



h - mniejsza szerokość badanej płytki szkła = 0,096 m  
 dla średniej temperatury warstwy przysciennej (granicznej)  $t_{w.gr}$

$$t_{w.gr} = \frac{t_g + \sqrt{t_l}}{2} = \frac{314 + 286}{2} = 250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

z tabeli 6. na stronie 712 podręcznika "Ruch ciepła i wymienniki" T.Hoblera

$$\begin{aligned} \rho &= 0,653 \text{ Nkg/m}^3 \\ c &= 0,249 \text{ kcal/Nkg } ^\circ\text{l} \\ P &= 3,42 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{l} \\ 10^2 &= 10,06 \text{ Nkg/m h } ^\circ\text{l} \\ P_r &= 0,722 \end{aligned}$$

$$\sqrt[3]{z} = \left( \frac{\rho}{g \rho^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{10,06^2 \cdot 10^{-4}}{9,81 \cdot 3600^2 \cdot 0,653^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,000571 \text{ m}$$

$$V = \beta \Delta t \approx \frac{1}{T_{w.gr}} \cdot \Delta t = \frac{1}{273,2 + 250} (314 - 286) = 0,0535$$

$$X = 0,0535 \cdot 0,722 \left( \frac{0,000571}{0,096} \right)^{-3} = 1,86 \cdot 10^9 > X_{gr} = 10^9$$

Dla danego zakresu wartości pomocniczej X z tabelic 3-18 na str.227 i 3-19 na str.228 dla ściany poziomej

$$\underline{i = \frac{1}{3}} \quad \underline{c = 0,14}$$

### 3.3.2. Obliczenie współczynnika przejmowania ciepła

Do obliczeń wykorzystuję wzór uproszczony dla ściany pionowej (przy  $i = \frac{1}{3}$ ,  $c = 0,135$ ) - Hobler str 231

$$\alpha_k = A \Delta t^{\frac{1}{3}} \text{ kcal/m}^2\text{h} 1^\circ$$

przy czym współczynnik  $A$  oblicza się stosując poprawkę

$$A = A' \cdot \frac{0,14}{0,135}$$

z tablicy 3-22 na str. 231 (Hobler) dla  $t_{w \text{ gr}} = 250^\circ \text{C}$

$$A' = 0,91$$

stąd

$$\alpha_k = 0,91 \cdot \frac{0,14}{0,135} \cdot (286 - 258)^{\frac{1}{3}} = 2,89 \text{ kcal/m}^2\text{h} 1^\circ$$

Przeliczając wartość współczynnika przejmowania ciepła ze wzoru przybliżonego przytoczonego w podręczniku S. Ochęduszek tom III str. 110 wzór L-76 b

$$\alpha_k = 3,35 (v - t_o)^{0,25} = 3,35 \cdot 28^{0,25} = 7,7 \text{ kcal/m}^2\text{h} 1^\circ$$

Sądząc po wykładniku potęgowym  $\frac{1}{3}$  wzór L-76 b odnosi się być może do zakresu  $GrPr = 10^3 \rightarrow 10^9$  (co nie jest zaakcentowane w podręczniku), lecz do dalszych obliczeń przyjąłem

$\alpha_{1k} = \alpha_{2k} = 7,7 \text{ kcal/m}^2\text{h} 1^\circ$ , jako wartość bardziej niekorzystną w omawianym poniżej zagadnieniu, wykazując dalej, że nawet w tym przypadku można zaniedbać spadek temperatury w płytce. Ponieważ płytka szkła jest cienka, a temperatury ścian urządzenia badawczego zbliżone są do temperatury badanej próbki szkła (ściany izolowane), można pominąć wpływ promieniowania na wielkość współczynnika przejmowania ciepła czyli  $\alpha \approx \alpha_k = 7,7 \text{ kcal/m}^2\text{h} 1^\circ$



4.3.3. Obliczenie temperatur ścian  $t_1$ ,  $t_2$  °C

Opory cieplne warstw granicznych i płytki

$$R_{\alpha_1} = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{7,7} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ h l}^\circ / \text{kcal}$$

$$R_{\lambda} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,003693}{0,715} = 0,00517 \text{ m}^2 \text{ h l}^\circ / \text{kcal}$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} = R_{\alpha_1} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ h l}^\circ / \text{kcal}$$

$$R_k = 0,13 + 0,00517 + 0,13 = 0,26517 \text{ m}^2 \text{ h l}^\circ / \text{kcal}$$

$$t_1 = t_8 - \frac{R_{\alpha_1}}{R_k} (t_8 - t_{11}) = 314 - \frac{0,13}{0,26517} (314 - 258) = 286,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = t_1 - \frac{R_{\lambda}}{R_k} (t_8 - t_{11}) = 286,5 - \frac{0,00517}{0,26517} (314 - 258) = 285,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

4.3.4. Przyjęcie temperatury próbki szkła przed

studzeniem  $t_p$  °C

$$t_p = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{286,5 + 285,5}{2} = 286 \text{ }^\circ\text{C}$$

Przyjęto temperaturę badanej próbki szkła na początku studzenia jako wielkość stałą na całej grubości płytki wynoszącą 286 °C

Uzasadnienie:

Przyjmując niekorzystniejsze warunki obliczeniowe dochodzimy do wniosku, że całkowity spadek temperatury na grubości badanej próbki wynosi 1°, a więc w granicach wartości bezwzględnego błędu pomiaru temperatury wynoszącego ok. 1°C. Różnica

temperatur w badanej próbce powodująca pękanie termiczne szkła jest rzędu  $100^{\circ}\text{C}$ , a więc przyjęcie tautotermicznego pola temperatury płytki na początku pomiaru nie spowoduje w określeniu wielkości naprężeń błędu większego niż 0,5 %.

5. Obliczenie gęstości substancjalnej  $\rho_t$  Nkg/m<sup>3</sup>

Pomiaru dokonano ważąc płytkę szkła lustrzanego w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$

Dane zmierzone: waga płytki -  $G = 414,78 \text{ g} = 1 \text{ NG}$

grubość płytki -  $b_1 = 3,39 \text{ mm}$   
w narożach

$b_2 = 3,21 \text{ mm}$

$b_3 = 3,48 \text{ mm}$

$b_4 = 3,57 \text{ mm}$

długość płytki  $l_1 = 222,2 \text{ mm}$

szerokość płytki  $l_2 = 211,2 \text{ mm}$

5.1. Obliczenie objętości płytki

$$b_{\text{sr}} = \frac{\sum b_i}{4} = 3,412 \text{ mm}$$

$$V = 222,2 \cdot 211,2 \cdot 3,412 = 160200 \text{ mm}^3$$

5.2. Obliczenie gęstości substancjalnej  $\rho_{20}$

$$\rho_{20} = \frac{G}{V} = \frac{414,78}{160200} \cdot 10^6 = 2589 \approx 2590 \text{ Nkg/m}^3$$

5.3. Ustalenie zależności gęstości substancjalnej od temperatury  $\rho_t$

- z obliczeń 3,7 współczynnik rozszerzalności liniowej szkła  $\beta = 9,80 \cdot 10^{-6} \frac{1}{1^{\circ}\text{C}}$ , stąd



$$\rho_t = \rho_{20} \frac{1}{1 + 3\beta(t - 20)} = \frac{2590}{1 + 0,000294(t - 20)} \text{ Nkg/m}^3$$

6. Obliczenia kontrolne pomierzonych przebiegów temperatur na oscylografie pętlicowym

6.1. Pomiarzenie całkowitego wychylenia plamki świetlnej na papierze oscylograficznym

T a b e l a 10

Lp	stosu dolnego $\Delta h_c^d$ mm	Nr pomiaru	stosu górnego $\Delta h_c^g$ mm	Nr pomiaru	Uwagi
1	56,0	45	36,0	20	
2	54,0	30	31,5	19	
3	47,5	49	38,0	38	
4	58,5	43	30,5	51	
5	56,5	46	36,0	34	
6	56,0	28	36,5	37	
7	51,0	42	35,0	36	
8	53,5	29	37,0	40	
9	54,0	47	35,5	39	
10	56,0	48	36,0	33	
	54,3		35,2		Wartości średnie

6.2. Obliczenie spadków temperatur odpowiadających pomierzonym wychyleniom średnim plamki świetlnej.

6.2.1. Pomiar stosem górnym

stała pętliczki  $a = 3,9 \text{ mm/mA}$

Średniemu wychyleniu plamki świetlnej  $\Delta h_c^g = 35,2 \text{ mm}$  odpowiada prąd wyjściowy ze wzmacniacza.

$$A = \frac{35,2}{3,9} = 9,03 \text{ mA}$$

Prądowi 9,03 mA na wyjściu ze wzmacniacza odpowiada bodziec na wejściu V mV

$$V = Y \cdot A = 6,12 \cdot 9,03 = 55,2 \text{ mV}$$

$$Y = 6,12 \text{ mV/mA} \quad \text{przełożenie wzmacniacza}$$

Napięcia stosu termopar  $V = 55,2 \text{ mV}$  odpowiada różnica temperatur odczytana z wykresu (rys. nr 84)

$$\Delta t_g = \underline{90,5} \text{ }^\circ\text{C}$$

#### 6.2.2. Pomiar stosem termopar dolnym

Wychylenia blamki  $\Delta h_c^d = 54,3 \text{ mm}$  odpowiada prąd wyjściowy

$$A = \frac{54,3}{3,9} = 13,92 \text{ mA}$$

Prądowi temu odpowiada bodziec na wejściu

$$V = Y \cdot A = 6,12 \cdot 13,92 = 85,2 \text{ mV}$$

Dla napięcia bodźca 85,2 mV odczytuję spadek temperatury z wykresu na rys 82.

$$\Delta t_d = \underline{146,5} \text{ }^\circ\text{C}$$

Spadek ten odczytano z wykresu od przyrostu temperatury na początku pomiaru tj. temperatury początkowej stosu  $286 \text{ }^\circ\text{C}$  pomniejszonej o temperaturę zimnych końców wynoszącą  $58 \text{ }^\circ\text{C}$

6.3. Obliczenie średniego spadku temperatury powierzchni próbki od chwili podniesienia pokrywy osłaniającej do momentu zetknięcia się próbki ze studzącą płytką dociskową górną (tj. w okresie wstępnym)



6.3.1. Pomierzenie z wykresów oscylograficznych spadków temperatur oraz czasów, w których te spadki zachodzą.

T a b e l a 11

Lp	h <sub>0</sub> spadek mm	W czasie τ	szybkość spadku ΔW mm sec	Nr pomiaru	Uwagi
1	2,0	0,24	8,33	49	
2	6,5	0,62	10,50	42	
3	11,0	0,84	13,10	29	
4	8,0	0,76	10,50	45	
5	8,0	0,76	10,50	30	
6	8,0	1,20	6,66	47	
7	8,5	0,98	8,68	48	
8	7,5	1,00	7,50	46	
9	10,0	1,12	8,93	28	
10	7,0	1,02	6,86	43	
	7,65	0,854	9,16		wartości średnie

6.3.2. Obliczenie spadku temperatury powierzchni w okresie wstępnym.

- średniej wartości szybkości spadku wychylenia płamki świetlnej odpowiada szybkość spadku natężenia prądu

$$\Delta A' = \frac{\Delta W}{a} = \frac{9,16}{3,9} = 2,35 \text{ mA/sec}$$

to z kolei odpowiada szybkości spadku napięcia o  $\Delta V'$

$$\Delta V' = \Delta A \cdot r = 2,35 \cdot 6,12 = 14,39 \text{ mV/sec}$$

ten spadek napięcia odpowiada szybkości spadku temperatury odczytanemu z wykresu na rysunku nr 82

$$\Delta t' = 24,5 \text{ }^\circ\text{C/sec}$$

Sredni czas upływający od chwili podniesienia pokrywy do chwili zetknięcia próbki szkła z płytką dociskową górną wynosi

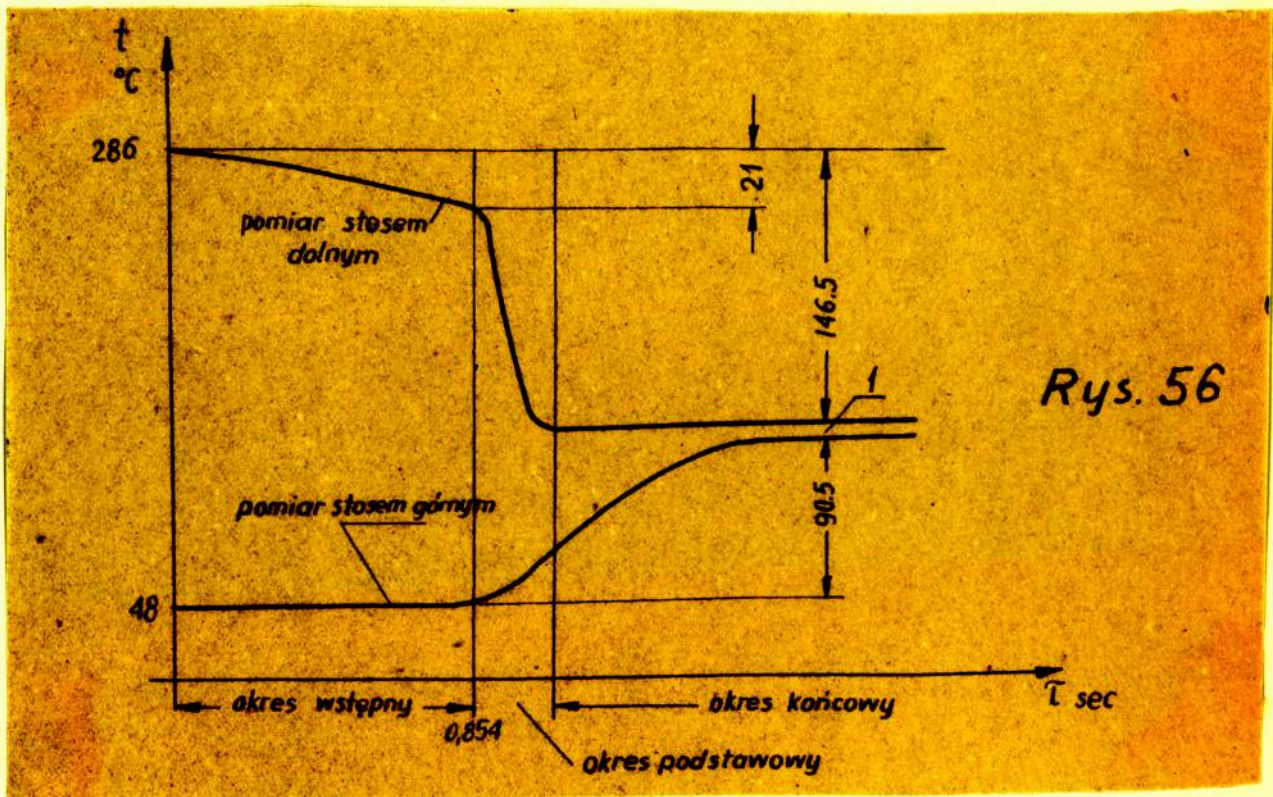


$\tau = 0,854$  sec. W tym czasie spadek temperatury powierzchni wyniósł

$$\Delta t_w = \Delta t' \cdot \tau = 24,5 \cdot 0,854 = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

#### 6.4. Rysunek przebiegów temperatur

Zestawienie pomierzonych przebiegów temperatur wykreślono poniżej na rys.56.



#### 7. Obliczenie odstępów czasów $\Delta\tau$ zgodnie z metodą Schmidta-Bindera (patrz str.28.)

##### 7.1. Dane pomierzone

Gęstość substancjalna średnia w zakresie temperatur  $20 - 300 \text{ } ^\circ\text{C}$  ze wzoru na str 66

$$\rho_{20-300} = 2570 \text{ Mkg/m}^3$$

średnia grubość badanych płytek

$$b = 3,693 \text{ mm}$$



## 7.2. Dane wzięte z literatury

Z podręcznika "Tepłofizyczne Swoistwa Wszczęstw" wyd. 1956 r. dla szkła lustrzanego z tabeli 14 - 10 na str. 327

$$\text{ciepło właściwe} \quad c_p = 0,186 \text{ kcal/Nkg } 1^\circ$$

$$\text{współczynnik przewodzenia ciepła} \quad \lambda = 0,715 \text{ kcal/m h } 1^\circ$$

przyjęto wartość średnią z podanych wartości granicz.

## 7.3. Obliczenie

### 7.3.1. Współczynnik przewodzenia temperatury

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} = \frac{0,715}{0,186 \cdot 2570} = 1,495 \cdot 10^{-3}$$

### 7.3.2. Odstępy $\Delta \tau_1$ czasu dla okresu wstępnego

Dla tego okresu przyjęto podział ścianki na 20 warstw o grubości jednej warstwy  $\Delta x_1$

$$\Delta x_1 = \frac{3,693}{20} = 0,1846 \text{ mm} = 1,846 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\Delta \tau_1 = \frac{x_1^2}{2a} = \frac{1,846^2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 1,495 \cdot 10^{-3}} = 1,142 \cdot 10^{-5} \text{ h}$$

$$\Delta \tau_1 = 0,0411 \text{ sec}$$

### 7.3.3. Odstępy $\Delta \tau_2$ czasu dla okresu podstawowego

Dla tego okresu przyjęto podział ścianki na 40 warstw o grubości jednej warstwy  $\Delta x_2$

$$\Delta x_2 = \frac{3,693}{40} = 0,0923 \text{ mm} = 0,923 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\Delta \tau_2 = \frac{x_2^2}{2a} = \frac{0,923^2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 1,495 \cdot 10^{-3}} = 0,2863 \cdot 10^{-5} \text{ h}$$

$$\Delta \tau_2 = 0,0103 \text{ sec}$$

8. Obliczenie spadków temperatury studzonej próbki szkła w okresie podstawowym  $\Delta t_p$ , °C oraz całkowitych spadków temperatury  $\Delta t_c$  w tym okresie

Obliczeń tych dokonano w tabeli 12 na podstawie pomierzonych odpowiednich wychyleń plamki świetlnej na papierze oscylograficznym. Tabelę 12 załączono w dziale VII.

9. Wykreślne wyznaczenie rozkładów temperatury i naprężeń  $\sigma$  w badanej próbce szkła podczas studzenia oraz obliczenie wydłużeń pochodzących od tych naprężeń

Rozkłady te zostały wyznaczone wykreślnie zgodnie z metodą Schmidta-Bindera na rys. nr 57 i 58.

Tabelę obliczeniową wydłużeń nr 13 umieszczono na rys. 58.

10. Wyznaczenie wykreślno-analityczne momentów gnących pochodzących od sił termicznych, oraz określenie wydłużeń spowodowanych tymi momentami.

Tok obliczenia analitycznego przebiegów momentów gnących w czasie podano w tabeli nr 14. Wyniki z tej tabeli naniesiono na rys. 59. Na rysunku tym umieszczono w tabeli nr 15 wyniki <sup>f<sub>M</sub> potrzebne do</sup> obliczeń wydłużeń  $\varepsilon_{\max}$ .

11. Określenie krytycznego rozkładu temperatur, przez określenie różnicy temperatur na skraju badanej próbki.

W tabeli nr 16 podano tok przeliczenia maksymalnego wydłużenia  $\varepsilon_{\max}$  na skrajnej powierzchni próbki w zależności od różnicy temperatur  $\Delta t_{\text{skr}}$ .



Na rysunku 60 określono różnicę temperatur, przy której dochodzi do krytycznego rozkładu temperatur. Różnica ta odczytana z rys. 60 wynosi 96 °C.

**E. OBLICZENIE BŁĘDÓW W OKRESLENIU NIĘKOTORYCH  
WIELKOSCI**

1. Obliczenie rozbieżności średniej arytmetycznej wyników pomiarów doraźnego naprężenia rozrywającego przy zginaniu  $\sigma_r$  oraz współczynnika sprężystości podłużnej  $E$ .

Obliczenia te przedstawiono w tabelach 18 + 21.

2. Obliczenie błędu z jakim określono współczynnik wydłużalności mechanicznej przy zerwaniu  $\mathcal{E}_r$

Współczynnik ten obliczono ze wzoru  $\mathcal{E}_r = \frac{\sigma_r}{E}$ , gdzie  $\sigma_r$  zmierzono z błędem  $\sigma_{rG}$  zaś  $E$  z błędem  $\sigma_{rE}$ .

Błąd wartości  $\mathcal{E}_r$  obliczono ze wzoru

$$\sigma_{\mathcal{E}}^2 = \pm \sqrt{\sum \left( \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial i} \sigma_i \right)^2} = \pm \sqrt{\left( \frac{\sigma_{rG}}{E} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_r \sigma_{rE}}{E^2} \right)^2}$$

- 2.1. Obliczenie dla pomiarów przeprowadzonych przy  
 $t = 20^\circ\text{C}$

$$\sigma_{\mathcal{E}_{20}} = \sqrt{\left( \frac{1}{8014} \cdot 0,25 \right)^2 + \left( \frac{6,84}{8014^2} \cdot 56 \right)^2} = \pm 0,000032$$

- 2.2. Obliczenie dla pomiarów przeprowadzonych przy  
 $t = 120^\circ\text{C}$

$$\sigma_{\mathcal{E}_{120}} = \sqrt{\left( \frac{0,21}{7686} \right)^2 + \left( \frac{6,78 \cdot 5,5}{7686^2} \right)^2} = \pm 0,000028$$

2.3. Obliczenie dla pomiarów przeprowadzonych przy  
 $t = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\delta_{\varepsilon_{220}} = \sqrt{\left(\frac{0,15}{7401}\right)^2 + \left(\frac{6,63 \cdot 71}{7401^2}\right)^2} = \pm 0,000022$$

2.4. Obliczenie dla pomiarów przeprowadzonych przy  
 $t = 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\delta_{\varepsilon_{320}} = \sqrt{\left(\frac{0,29}{7205}\right)^2 + \left(\frac{6,67 \cdot 70}{7205^2}\right)^2} = \pm 0,000041$$

3. Obliczenie błędu  $\delta_{\beta}$  pomiaru współczynnika średniego wydłużalności termicznej  $\beta$

T a b e l a 22

Lp	$10^6 \beta_w$	b	$10^6 b^2$	obliczenia	Uwagi
1	9,125	-0,159	25 281	$\delta_{\beta} = \frac{214669}{3} \cdot 10^{-6}$ $= \pm 0,268$	
2	9,650	+0,366	133956		
3	9,310	+0,026	676	$\delta_{\beta} = \frac{0,268}{4} = \pm 0,134$	
4	9,050	-0,234	54756		
	37,135	-0,001	214669		suma
	9,284				średnio

$$\beta_w = (9,284 \pm 0,134) \cdot 10^{-6} \text{ co daje } 1,45 \% \text{ błędu}$$

$$\beta = \beta_w + \beta_{kw} = (9,8 \pm 0,134) \cdot 10^{-6} \text{ co daje } 1,37 \% \text{ błędu}$$

Przyjmuję, że  $\beta$  obarczone jest tym samym błędem bezwzględnym co  $\beta_w$ , gdyż w tablicy 14 - 11 str 323 podręcznika "Termofizyczne Swoistwa Wszczęstw" nie jest podany błąd z jakim przytoczono wartość współczynnika wydłużalności termicznej dla kwarcu topionego  $\beta_{kw}$ .



4. Orientacyjna ocena opóźnienia pomiaru stosem dolnym  
temperatury studzonej powierzchni szkła, która wynika  
z pojemności cieplnej termopary.

Przyjmuje się, że rozkład temperatury wewnątrz drutu termopary jest tautotermiczny, co jest uzasadnione wysokimi wartościami współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  dla metalu (termopara Cu-konst)

Temperatura otoczenia drutów termopary nie jest stała i zmienia się od  $+15$  do  $+138^{\circ}\text{C}$ . Do obliczenia orientacyjnego przyjmuję stałą temperaturę otoczenia równą średniej arytmetycznej wynoszącej ok.  $76^{\circ}\text{C}$ . Przyjmując tę temperaturę w ten sposób wyliczymy dla okresu poprzedzającego osiągnięcie temperatury otoczenia  $76^{\circ}\text{C}$ , większą wartość opóźnienia temperatury od rzeczywiście występującego, zaś dla końcowego przekroju temperatury wartość opóźnienia mniejszą.

Po takich przyjęciach słuszny jest wzór określający czas studzenia drutu zaczerpnięty z podręcznika T.Hoblera "Ruch ciepła i wymienniki" str.110 wzór 2 - 139, który po prostym przekształceniu przyjmuje postać

$$\tau = \frac{\rho c s_m}{\alpha} \ln \frac{v - t_0}{v_p - t_0}$$

gdzie  $t_0$  - temperatura otoczenia

$v$  - temperatura ciała studzonego po upływie czasu  $\tau$

$v_p$  - temperatura ciała studzonego na początku

$\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła

$c_p$  - ciepło właściwe

$s_m = \frac{V}{F}$  stosunek objętości  $V$  studzonego ciała do jego powierzchni zewnętrznej

Dla drutu o średnicy  $d$  i długości  $L$  przy pominięciu powierzchni czółowych

$$s_m = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4 \cdot \pi \cdot d \cdot L} = \frac{d}{4}$$

Obliczenie przeprowadzam dla drutu miedzianego termopary, który nieco szybciej się nagrzewa co stanowi o faktycznym opóźnieniu wskazań temperatury.

Wg podręcznika Hobler - "Ruch ciepła i wymienniki" z tablicy 14 na str. 724 dla miedzi przyjmuję

$$\rho = 8930 \text{ Nkg/m}^3$$

$$c = 0,0954 \text{ kcal/Nk } 1^\circ$$

$$\lambda = 332 \pm 3 \% \text{ kcal/m h } 1^\circ$$

Wielkość współczynnika przejmowania ciepła oblicza się z przebiegu pola temperaturowego na skraju studzonej powierzchni. Dla tej powierzchni obowiązuje wzór

$$\frac{\alpha}{\lambda} Q_{skr} = (tg \varphi)_{skr}$$

czyli

$$\alpha = (tg \varphi)_{skr} \frac{\lambda}{v_{skr} - t_0}$$

Z rysunku 80 określa się  $(tg \varphi)_{skr} \approx \left(\frac{\Delta v}{\Delta X}\right)_{skr}$

Dla dwu rozkładów temperatur występujących mniej więcej w środku okresu podstawowego, oblicza się

$$tg \varphi_1 = \frac{102 - 54}{0,0923 \cdot 10^{-3}} = 520 \cdot 10^3$$

$$tg \varphi_2 = \frac{138 - 97}{0,0923 \cdot 10^{-3}} = 444 \cdot 10^3$$

więc

$$\alpha_1 = \frac{520}{286 - 102 - 76} \cdot 10^3 = 4800 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } 1^\circ$$

$$\alpha_2 = \frac{444}{286 - 138 - 76} \cdot 10^3 = 6200 \text{ - " -}$$

średnio przyjmuje się

$$\alpha = \frac{4800 + 6200}{2} = 5500 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } 1^\circ$$



Wstawiając otrzymane wartości do wzoru na  $\tau$ , otrzymamy

$$\tau_h = \frac{8930 \cdot 0,0954 \cdot 0,00018}{4,5500} \cdot \ln \frac{140 - 76}{286 - 76} = 825 \cdot 10^{-6} \text{ h}$$

co stanowi

$$\tau_s = 0,0297 \text{ sec}$$

Cały okres podstawowy trwa około 0,17 sec więc opóźnienie bodźca 0,0297 sec stanowi ok 17% tego okresu.

Obliczenie krytycznego rozkładu temperatur przeprowadzone jest więc słusznie z tym, że wyliczone odstępy czasów są dłuższe ok 17% od rzeczywiście występujących; czyli wyliczony średni spadek temperatury w czasie jest bezpieczniejszy.

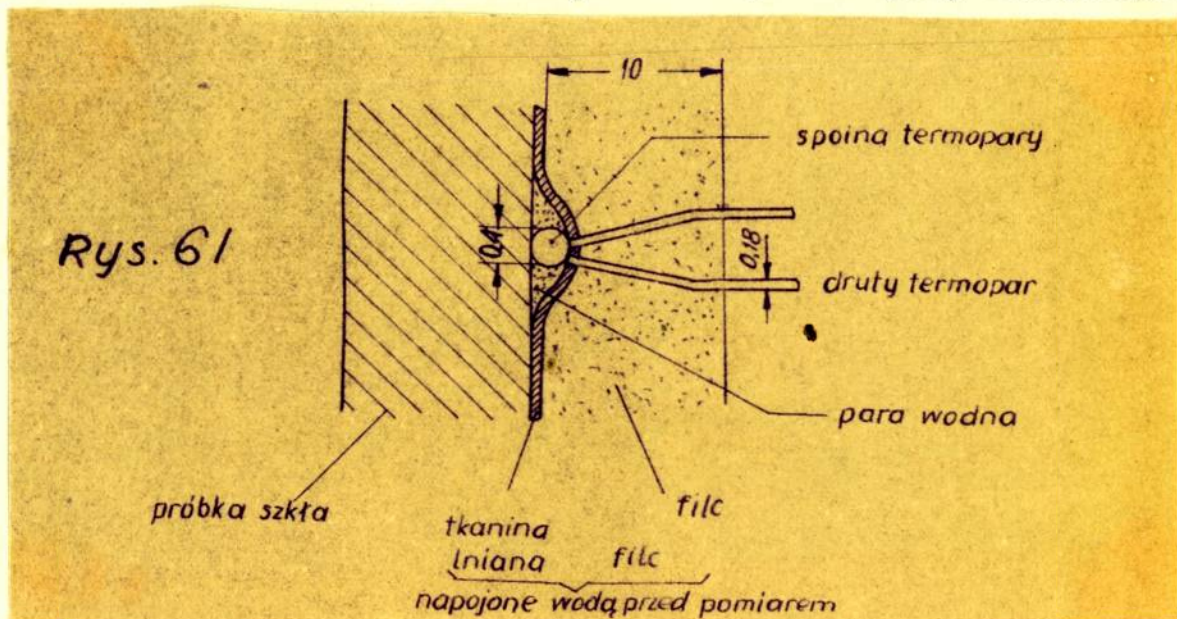
##### 5. Orientacyjne określenie błędu pomiaru temperatury stosem górnym

Jak wynika z rys. 56. na str 69 czas nagrzewania stosu górnego trwa dłużej niż dolnego. Pomiar temperatury powierzchni studzonej płytki szkła dokonany stosem górnym jest pomiarem kontrolnym. Z pomiaru tego wynika, że na końcu okresu studzenia sumaryczny błąd wskazań wynosi  $1^\circ$ , więc bezwzględna wartość tego błędu jest w granicach dokładności pomiaru temperatury termoparą. Natomiast na początku okresu studzenia (tj. w okresie podstawowym i na początku okresu końcowego) błąd wskazania temperatury stosem górnym jest duży i wynika z intensywnego chłodzenia spoin termostosu górnego, co jest wywołane przewodzeniem ciepła wzdłuż drutów termopary. W miarę wyparowywania wody ze skrajnych warstw płytki dociskowej górnej chłodzenie spoin maleje i wskazanie temperatury rośnie do wartości temperatury powierzchni skrajnej płytki. Dla uzasadnienia tych rozważań przeprowadzam poniżej orientacyjne obliczenie



błędu pomiaru temperatury wywołanego intensywnym chłodzeniem spoiny termopar na przekroju między okresem podstawowym i końcowym.

Po upływie czasu  $\tau = 0,12$  sec licząc od początku okresu podstawowego średnia temperatura spoin termostosu górnego wyliczona w tabeli nr 17 wynosi  $t_s = 98^\circ \text{C}$ . Wynika stąd, że w tym czasie zachodzi intensywne skraplanie pary na spoinie

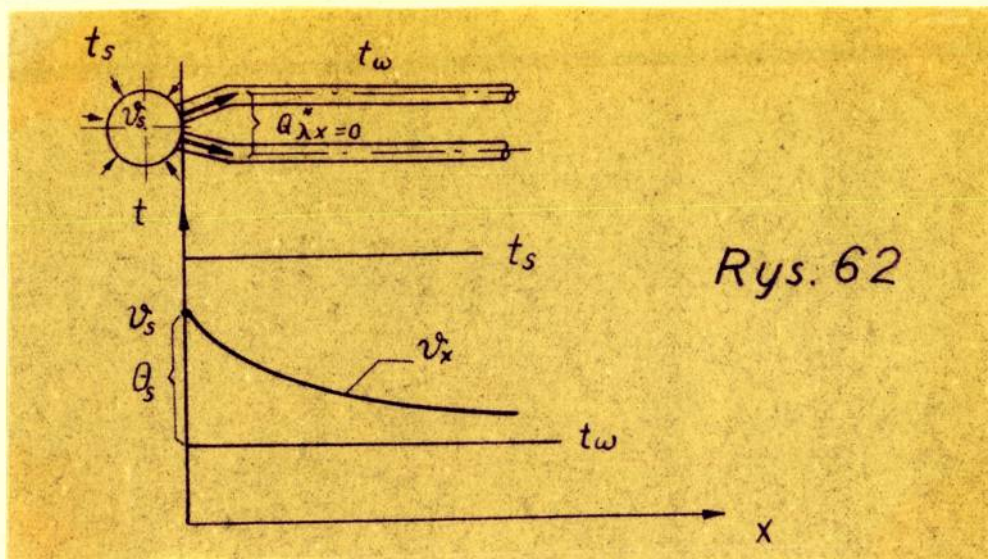


Do obliczeń orientacyjnych przyjmuję <sup>dla</sup> przejmowania ciepła przy skraplaniu  $\alpha_1 = 10\,000 \text{ kcal/m}^2\text{h } 1^\circ$  zaś dla przejmowania ciepła od drutów termopar do wody w filcu  $\alpha_2 = 1000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h } 1^\circ}$

Druty termopar traktuję jako pręty o nieskończonej długości, gdyż ich grubość wynosi 0,18 mm w porównaniu z długością chłodzoną drutu 10 mm. Spoinę termopary traktuję jako kulkę o zmierzonej średnicy  $D_{sr} = 0,4 \text{ mm}$ .

Przez  $t_s$  oznaczam temperaturę styku płytki szkła z płytką dociskową górną,  $t_0$  stanowi temperaturę otoczenia dla spoiny





Rys. 62

$f$  - powierzchnia przekroju poprzecznego drutu termopary  $m^2$

$O$  - obwód zewnętrzny przekroju  $f$   $m$

$v_s$  - temperatura spoiny  $^{\circ}C$

$t_w$  - temperatura wody chłodzącej otaczającej drutu termopary  $^{\circ}C$

Dla prętów o  $L = \infty$

$$Q_{\lambda x=0}^* = \sum f \lambda \theta_s = \theta_s (\sqrt{\alpha_2 \lambda_{cu} O f'} + \sqrt{\alpha_2 \lambda_{ko} O f'}) \frac{kcal}{h}$$

Pomijając zmianę entermii pręta wraz ze spoiną, wywołaną zmianami temperatury  $v_s$  w porównaniu z ciepłem przejętym przez spoinę, można napisać na podstawie bilansu energetycznego, że ciepło przejęte przez zewnętrzną powierzchnię spoiny  $F_s$  jest przewodzone u nasady prętów (drutów termopary) i przekazane do wody chłodzącej. Na tej podstawie można napisać

$$F_s \alpha_1 (t_s - v_s) = (v_s - t_w) (\sqrt{\alpha_2 \lambda_{cu} O f'} + \sqrt{\alpha_2 \lambda_{ko} O f'}) \frac{kcal}{h}$$

skąd

$$t_s - v_s = \frac{v_s - t_w}{F_s \alpha_1} (\sqrt{\alpha_2 \lambda_{cu} O f'} + \sqrt{\alpha_2 \lambda_{ko} O f'}) \quad ^{\circ}C$$

po wstawieniu liczb ogólnych

$$t_s - v_s = \frac{v_s - t_w}{\pi D^2 \alpha_1} \left( \sqrt{\alpha_2 \lambda_{cu} \frac{\pi^2 d^3}{4}} + \sqrt{\alpha_2 \lambda_{ko} \frac{\pi^2 d^3}{4}} \right) \quad ^{\circ}C$$



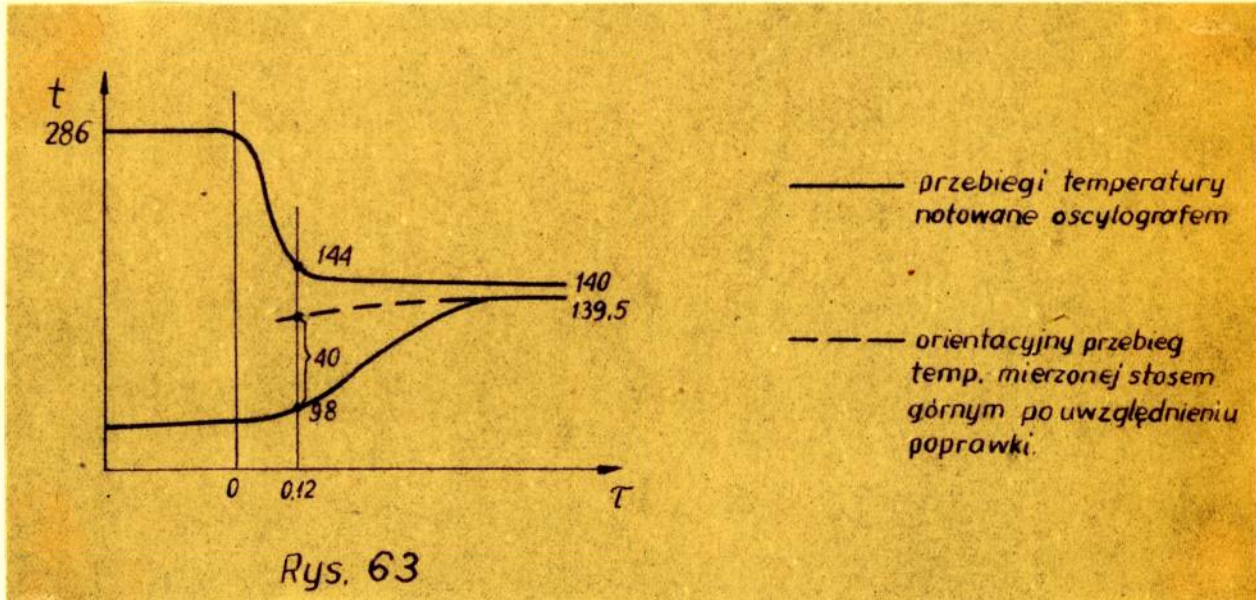
Dane dla miedzi przyjęto jak w obliczeniu 4 niniejszego działu, zaś dla konstantanu po przeliczeniu jednostek  $\lambda_{ko} = 17,2$  kcal/m h  $1^\circ$

(Na podstawie danych z Poradnika Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego wyd 1959 str 137)

Po wstawieniu danych szczegółowych otrzymamy

$$t_s - \sqrt{\frac{98-21}{0,0004 \cdot 10000}} \left( \sqrt{1000 \cdot 323 \cdot \frac{2 \cdot 0,00018^3}{4}} + \sqrt{1000 \cdot 17,2 \cdot \frac{2 \cdot 0,00018^3}{4}} \right) = 40,5 \quad 40^\circ \text{C}$$

Obliczenie to potwierdza przypuszczenie, że opóźnienie wskazania temperatury mierzonej stosem górnym wynika z intensywnego chłodzenia spoin.





### F. WYNIKI BADAŃ KONTROLNYCH

Z badań tych wynika, że pękanie termiczne następuje przy danym sposobie studzenia płytki szkła jeżeli temperatura skrajnej warstwy obniży się o  $97 \pm 1.^\circ\text{C}$

Z obliczeń 11 rozdziału D wynika, że winno ono wystąpić, jeżeli obniżenie temperatury wynosi  $96 \pm 2,6^\circ\text{C}$

Różnica między wielkością przewidywaną a pomierzoną wynosi  $1^\circ\text{C}$  co stanowi  $1,04\%$

Rozbieżność wyników wyliczonych i pomierzonych można uznać za technicznie dopuszczalną.

Kopie kontrolnych przebiegów temperatur zdjęte na oscylografie załączono w dziale VII pod nr rys. 64, 65.

Fotografie próbek kontrolnych po studzeniu załączone w dziale VII. str. 162 Pęknięcia widoczne na zdjęciu są przypadkowe, wynikające z działania karbu oraz intensywniejszego nieco studzenia na obrzeżach. Na powierzchni studzonej typowych pęknięć termicznych nie ma.

Błąd określenia różnicy temperatur na skraju płytki szkła dokonanego w rozdziale D poz. 11 obliczono przy założeniu, że

$$\mathcal{E}_{\max} = \bar{\mathcal{E}} + \bar{\mathcal{E}} + \bar{\mathcal{E}} \approx \bar{\mathcal{E}} \quad \text{gdyż} \quad \bar{\mathcal{E}} + \bar{\mathcal{E}} \ll \bar{\mathcal{E}} \quad (\text{patrz tabela 16})$$

Ponieważ  $\bar{\mathcal{E}} = \beta \Delta t_{\text{skr}}$  czyli  $\Delta t_{\text{skr}} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{\beta}$ , stąd

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{skr}} &= \pm \sqrt{\left(\frac{\mathcal{E}_r}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\mathcal{E} \mathcal{E}_r}{\beta^2}\right)^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{0,022 \cdot 10^{-3}}{9,8 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + \left[\frac{0,895 \cdot 0,134 \cdot 10^{-6}}{(9,8 \cdot 10^{-6})^2}\right]^2} \\ &= \pm 2,56 \approx \pm 2,6^\circ\text{C} \end{aligned}$$

( $\mathcal{E}_r$  dla  $v_{\text{skr}} \approx 220^\circ\text{C}$  przyjęto z tabeli 7 str. 56, zaś  $\mathcal{E}_r$  z tabeli 22 str. 73).



## V. WNIOSKI KONCOWE

Dekohezję cząstek materiału kruchego wywołuje krytyczny rozkład temperatury. Sposób stwierdzenia, czy dany rozkład temperatury spowoduje pęknięcia termiczne, jest podany w części teoretycznej opracowania. Wykonano takie obliczenie w sposób wykreślno-analityczny w części obliczeniowej do przeprowadzonych pomiarów.

W przypadku szczególnym, jakim jest sztywne umocowanie studzonego ciała kruchego, krytyczny rozkład temperatury sprowadza się do krytycznej różnicy temperatur. Znaczy to, że jeśli będziemy studzić tak umocowane ciało, a spadek temperatury ciała przekroczy  $\Delta t_{kr}$ , wtedy nastąpi dekohezja cząstek materiału. Równocześnie jest to najmniejsza różnica temperatury mogąca doprowadzić do takiego zniszczenia. (Mowa tylko o naprężeniach termicznych).

O krytycznej różnicy temperatur można mówić także w przypadku ciała zupełnie swobodnego, ale tylko dla ściśle określonego sposobu studzenia. Znaczy to, że przebieg współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$ , oraz przebieg temperatury otoczenia w czasie jest ściśle określony. Wtedy krytyczny rozkład temperatury można poznać po zaistniałej różnicy temperatur w danym punkcie pola temperaturowego. Najwygodniej to uczynić po maksymalnej różnicy temp. w ciele.

W przypadku liniowości rozkładu temperatury uzyskujemy dla ciała jednorodnego i izotropowego stan beznapięciowy. (Patrz dz. III. str. 15). Wtedy ani wielkość spadku temperatury ciała, ani wielkość gradientu temperaturowego nie ma wpływu na powstanie pęknięć termicznych. Występującą w danym ciele różnicę temperatur ograniczają jedynie właściwości

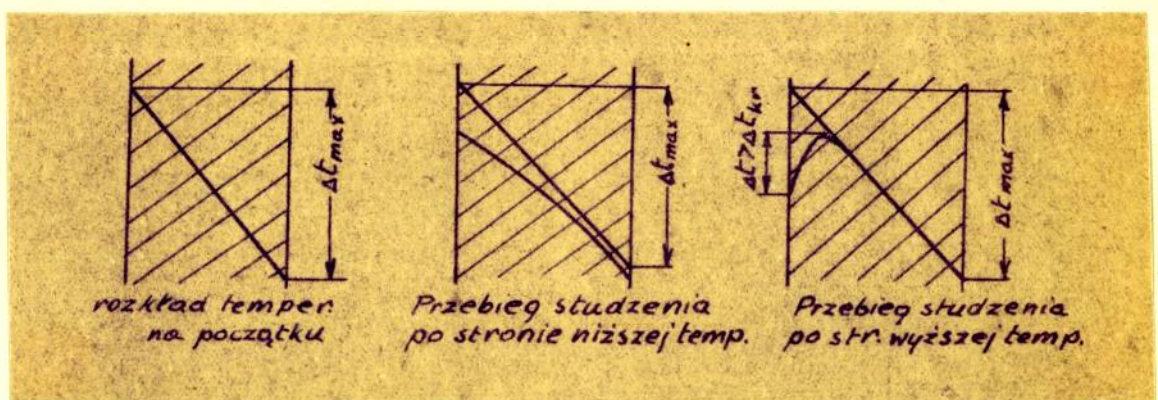


fizyczne ciała (temperatura topnienia lub lepkiego płynięcia). Z powyższych rozważań można wysnuć następujące wnioski praktyczne:

1. Jeżeli z jakichś względów nie możemy ocenić swobodności umocowania, tzn. że istniejące dylatacje nie dają pewności swobodnego odkształcenia się ciała na skutek działań termicznych, bądź nie jesteśmy o tym przekonani, wtedy należy ten przypadek potraktować jako sztywne umocowanie i przy studzeniu nie przekraczać krytycznej różnicy temperatur  $\Delta t_{kr}$  (dla badanego szkła lustrzanego  $\Delta t_{kr} = 91 \text{ }^\circ\text{C}$  - przy maksymalnej występującej temperaturze  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

2. Gwałtowne studzenie ściany znajdującej się w stanie beznaprężeniowym, powodujące strome gradienty temperaturowe na skraju ściany (przy czym zaburzenia temperaturowe wynikające z tego studzenia nie sięgają głębiej niż 15% grubości ściany) można traktować jako zachodzące przy sztywnym umocowaniu. Błąd popełniony na  $\Delta t_{kr}$  nie przekroczy 5%.

3. Jeżeli mamy studzić ścianę znajdującą się w stanie beznaprężeniowym, a poddaną działaniu silnego gradientu temperaturowego (przy czym maksymalna różnica temperatur jest przynajmniej dwukrotnie większa od  $\Delta t_{kr}$  dla sztywnego mocowania), wtedy bezpieczniej jest początkową fazę studzenia przeprowadzić po stronie niższej temperatury.





Parametry opisujące własności badanego ciała w występującym zakresie temperatur nie były stałe, ale wpływ zmian wielkości tych parametrów na tzw. nieliniowość zjawiska jest technicznie pomijalny. Widać to po zgodności badań kontrolnych z wynikami obliczeń opartymi na liniowości zjawiska.

Dużą zgodność wyników pomiarów kontrolnych należy poza tym przypisać dokładnemu przeprowadzeniu pomiarów, oraz cechowaniu przyrządów użytych do pomiarów.

Wyniki niniejszej pracy można zastosować:

1. do bezpośredniego zwiększenia produkcji ciał kruchych np. w przemyśle szklarskim, gdzie szybkość studzenia decyduje o szybkości posuwu taśmy szklanej,
  2. do określenia pola temp. tej części tunelu odprężającego szkło, gdzie mamy do czynienia już z ciałem kruchym tj. od temperatur ok.  $450 \pm 350$  °C w dół, zależnie od gatunku szkła,
  3. do pośredniego zwiększenia produkcji przez skrócenie czasu postoju urządzeń, warunkowanego czasem studzenia np. w przemyśle metalurgicznym, gdzie po wytopie należy usunąć bieżące uszkodzenia wymurówki,
- Ad 1. Stosując wyniki tej pracy można zwiększyć produkcję szkła przez zwiększenie szybkości przesuwu taśmy szklanej. Dokonać tego można stosując dopuszczalną szybkość studzenia w tej części tunelu odprężającego, gdzie temperatury spadną poniżej ok.  $400$  °C (zależnie od rodzaju szkła). Stosowanie tej szybkości pozwoli skrócić długość części tunelu



o niskich temperaturach, a przez to wydłużyć część o wysokich temperaturach, gdzie ulegają zamrożeniu naprężenia, czyli powstają tzw. naprężenia trwałe. Stosując zwiększoną szybkość przesuwu taśmy uzyskamy większą produkcję, a wielkość naprężeń trwałych nie wzrośnie, a to wskutek wydłużenia tej części tunelu, gdzie one powstają i zastosowanie tam nowego, łagodniejszego profilu temperatury. Chcąc ocenić ekonomię takiego postępowania należy zbadać istniejący profil temperatur w tunelu i wielkość naprężeń trwałych w uzyskiwanym obecnie produkcie. Następnie istniejący profil temperatur w zakresie wysokich temperatur rozciągnąć na zwiększoną długość tunelu, o długość wygospodarowaną w zakresie niskich temperatur. Z kołami można zwiększyć szybkość przesuwu taśmy szklanej o tyle, by czas przebywania szkła w tej części tunelu, gdzie zamrażają się naprężenia na skutek krzepnięcia, nie został skrócony.

Ad 2. Do zaprojektowania długości tunelu odprężającego szkło należy znać najekonomiczniejszy profil temperatury w tunelu. Obecnie długość tę projektuje się w oparciu o istniejące urządzenia, a następnie drogą prób i regulacji ustala się profil temperatur.

Stosowanie wyników tej pracy pozwoli na określenie teoretyczne tej części profilu temperatury w tunelu, gdzie mamy do czynienia z ciałem

kruchym. To pozwoli na obliczenie długości tej części tunelu odprężającego.

Ad 3. Intensyfikację procesu metalurgicznego można uzyskać skracając czas przestoju urządzeń, konieczny do przeprowadzenia bieżących napraw i konserwacji.

Wnętrza pieca po wytopie posiada bardzo wysoką temperaturę i naprawy można dokonać dopiero wtedy, gdy temperatura spadnie na tyle, by człowiek mógł tam wejść. Temperatura ta zależy od sposobu ochrony człowieka przed nagrzewaniem go od gorących ścian.

Tak więc intensyfikacja procesu metalurgicznego wiąże się tutaj z intensyfikacją studzenia. Stosując zwiększoną szybkość studzenia należy jednak sprawdzić w sposób podany w niniejszej pracy, czy nie jest ona większa od dopuszczalnej.



VI. WYKAZ PRZESTUDIOWANEJ LITERATURY

wraz z wykazem literatury podstawowej, którą posłużono się przy wykonywaniu niniejszej pracy.

Lp.	Autor	Tytuł	Rok wydania
1.	Praca zbiorowa	Podstawy szklarstwa t.I	1954
2.	Praca zbiorowa	Podstawy szklarstwa t.II	1955
3.	Henryk Berinson	Jak walczyć z naprężeniami w szkłe	1954
4.	Witold Nowacki	Zagadnienia termosprężystości	1960
5.	Marek Zakrzewski	Hipoteza złomu kruchego	1958
6.	B.E. Gatewood	Temperaturnyże naprężenia (tłum.z angielskiego - tytuł oryginalu Thermal Stresses)	1959
7.	Ernst Melan, H.Parkus	Termouprugłyże naprężenia wyzywajemyje stacjonarnymi temperaturnymi polami	1958
8.	Edmund Karaśkiewicz	Zarys teorii wektorów i tensorów	1958
9.	P.Kobeko	Ciała bezpostaciowe tłum.z rosyjskiego tytuł oryg. "Amorfnyże weszczestwa"	1955
10.	B.G.Koreniew	Niektoryje zadaczi Teorii Uprugosti i tepłoprowodnosti reszajemyje w Besselewych funkcjach.	1960
11.	Ernst Eckert	Einführung in den Wärme u. Stoffaustausch.	1959
12.	Gröber/Erk/Grigull	Wärmeübertragung	1955

Lp.	Autor	Tytuł	Rok wyd.
13.	M.Jacob	Woprosy tepłoperedaczi tłum.z ang.- tytuł oryg. "Heat Transfer"	1960
14.	T.Hobler	Ruch ciepła i wymienniki	1959
15.	Ochęduszek St.	Teoria maszyn cieplnych t.III	1955
16.	Michiejew	Asnowy tepłoperedaczi	1949
17.	M.T.Huber	Wytrzymałość materiałów (Mechanik t.I).	1948
18.	Praca zbiorowa	Poradnik Materiałoznawstwa elektrotechnicznego	1959
19.	Praca zbiorowa	Tepłofizyczne swistwa weszczestw	1956

20.



Wykaz ważniejszych wzorów zaczerpniętych  
z literatury wg. odnośników przy numeracji  
wzorów w tekście.

Odnośnik	Autor	Tytuł	str.	nr wzoru w podręcz
1	T.Hobler	Ruch ciepła i wymienniki	101	2 - 107
2	W.Nowacki	Zagadnienia ter- mosprężystości	17	2.1
3	W.Nowacki	Zagadnienia ter- mosprężystości	17	2.2
4	E.Melan, H.Parkus	Termouprugłyje naprężenia wyzy- wajemyje stacjo- narnymi polami	15	2.5
6	- " -	- " - "	16	2.7
7.	- " -	- " - "	17	2.10
8.	- " -	- " - "	21	3.2.
9.	B.E.Gatewood	Temperaturnyje na- prężenia	31	-
10.	- " -	- " -	30	1.22
11.	T.Hobler	Ruch ciepła i wy- mienniki	121	2 - 153
12.	P.Kobeko	Ciała bezposta- ciowe	84	7
13	P.Kobeko	Ciała bezposta- ciowe	85	10
14	P.Kobeko	Ciała bezposta- ciowe.	85	12



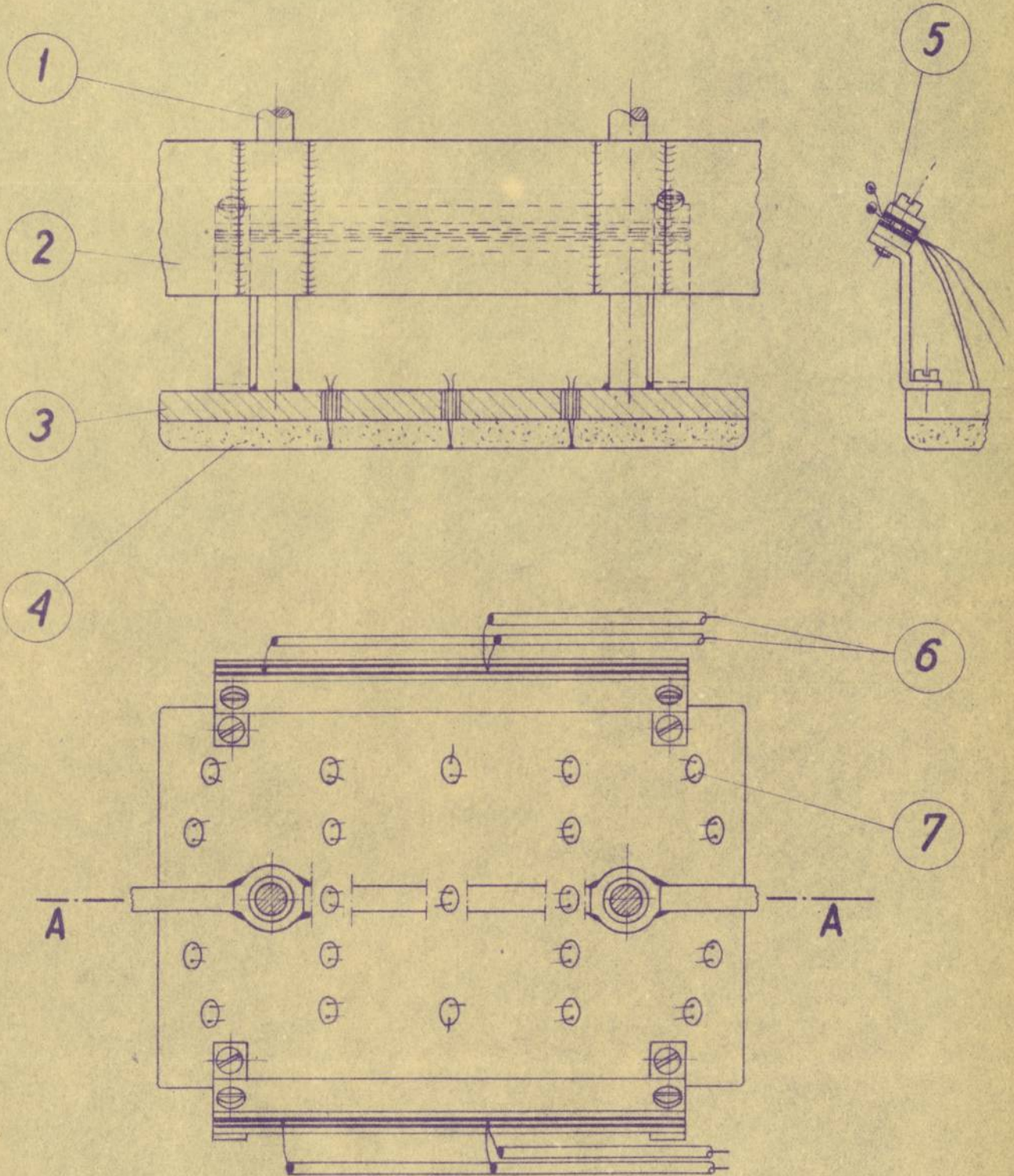
VII. RYSUNKI I TABELE

(nie umieszczone w tekście)

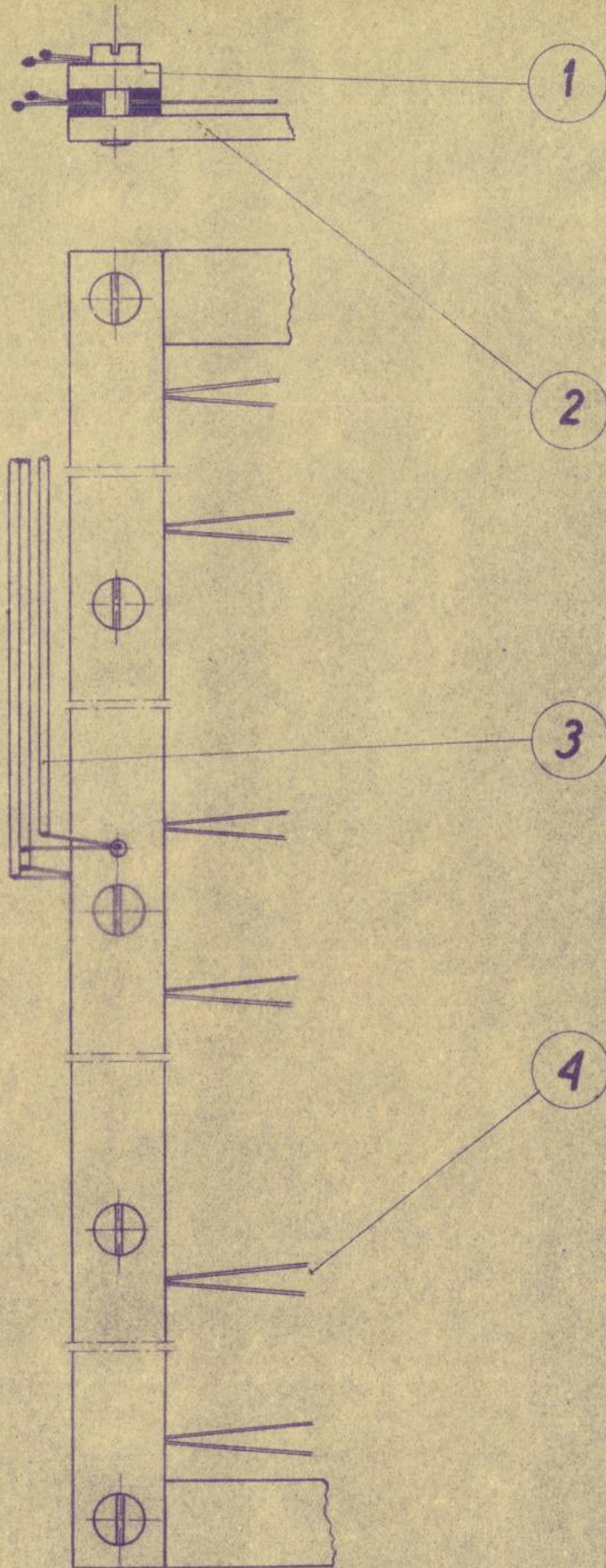
Z A Ł A C Z N I K I



A - A

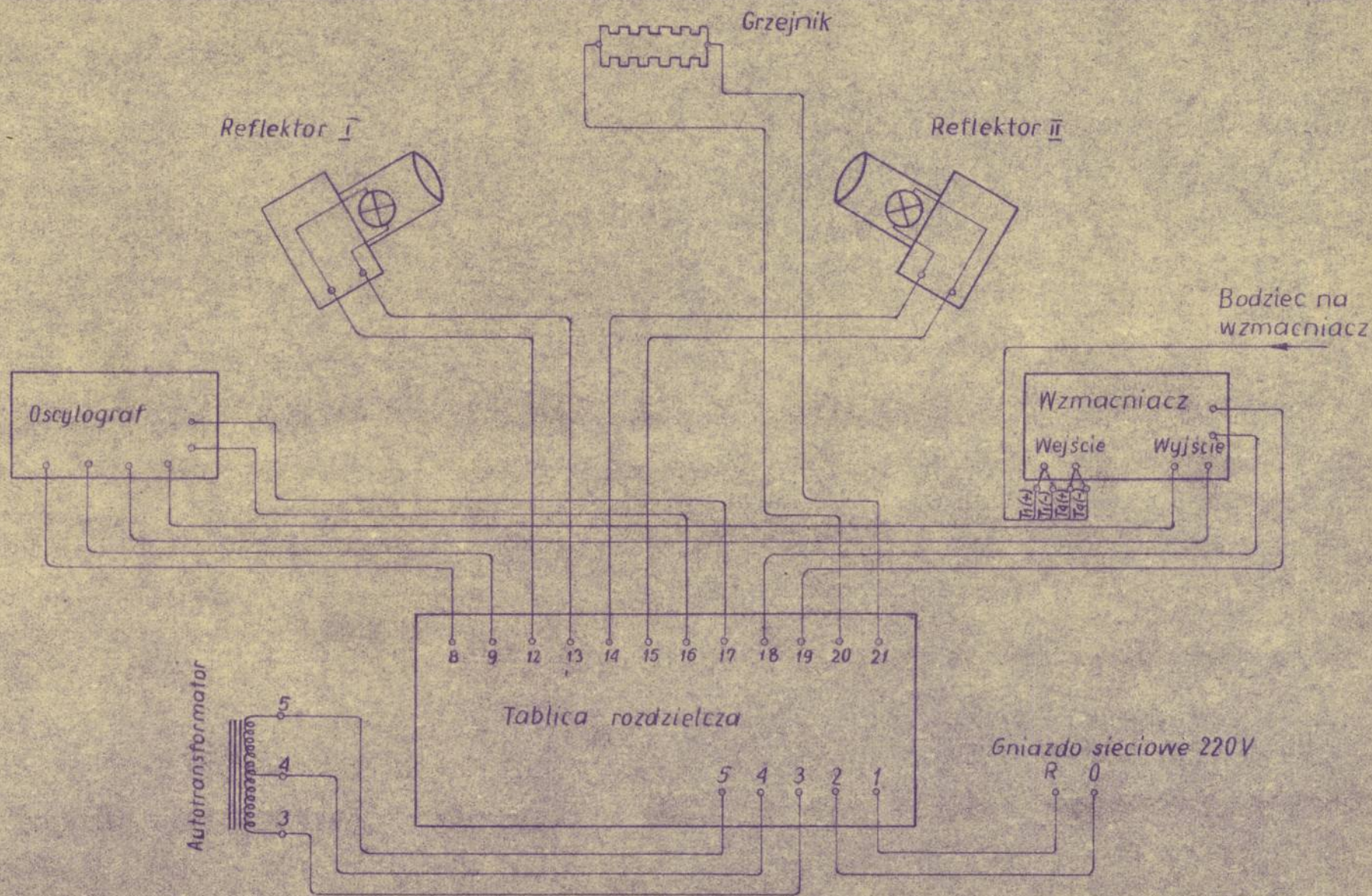






Rys. 17





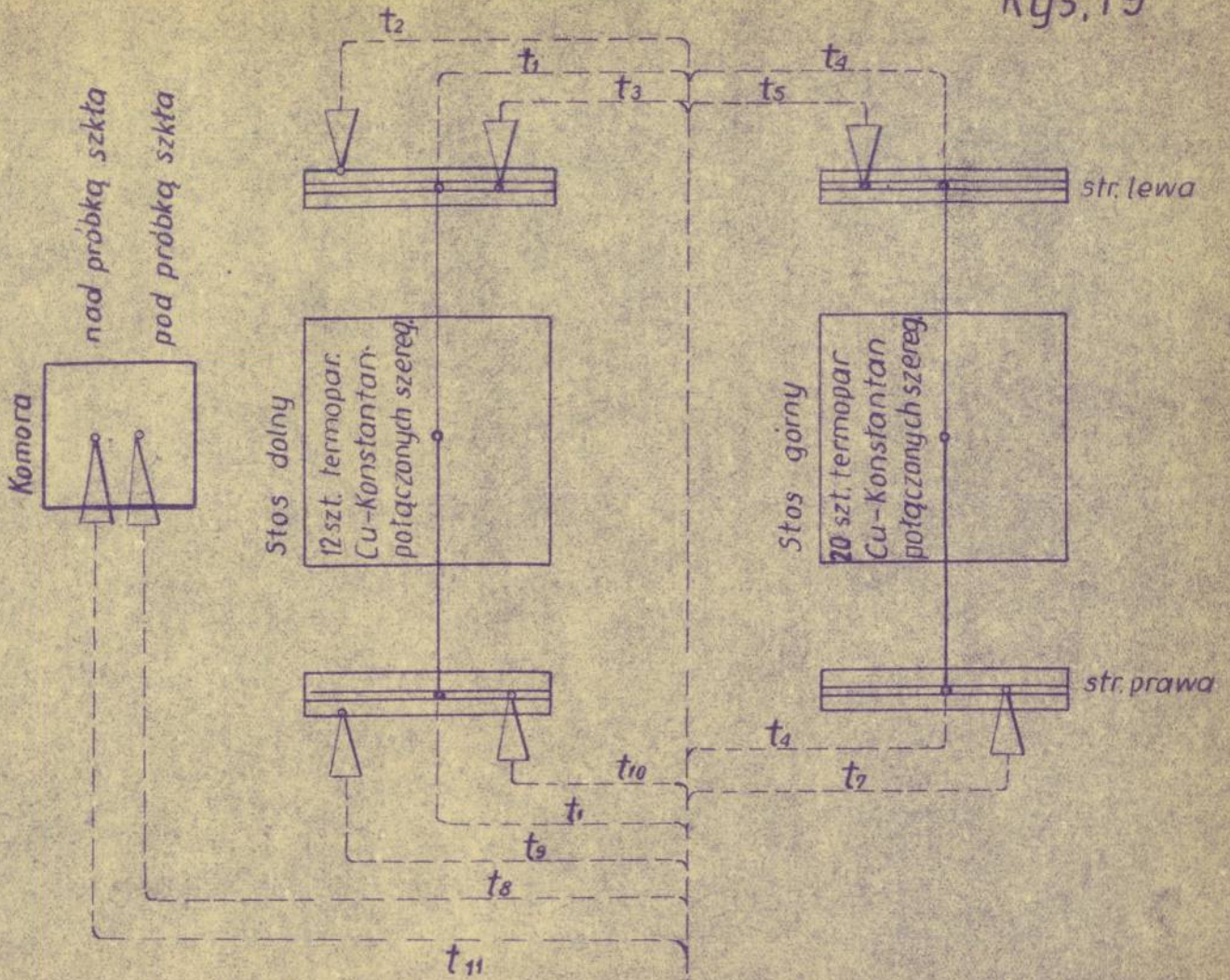
Schemat połączeń elektrycznych  
(silno-prądowych)

Rys. 18



Schemat pomiarowy temperatur

Rys. 19



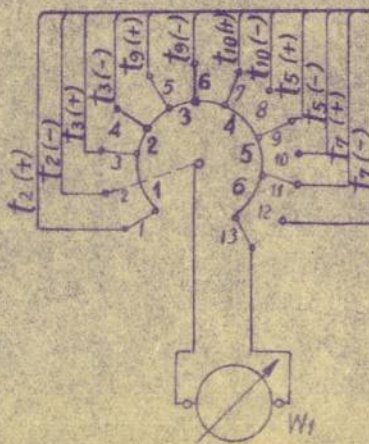
W<sub>1</sub> - wskaźnik Nr 2203146  
 W<sub>2</sub> - wskaźnik Nr 2508514

t <sub>1</sub> (+)	t <sub>1</sub> (-)	t <sub>2</sub> (+)	t <sub>2</sub> (-)	t <sub>3</sub> (+)	t <sub>3</sub> (-)	t <sub>4</sub> (+)	t <sub>4</sub> (-)	t <sub>5</sub> (+)	t <sub>5</sub> (-)	t <sub>11</sub> (+)	t <sub>11</sub> (-)	t <sub>7</sub> (+)	t <sub>7</sub> (-)	t <sub>8</sub> (+)	t <sub>8</sub> (-)	t <sub>9</sub> (+)	t <sub>9</sub> (-)	t <sub>10</sub> (+)	t <sub>10</sub> (-)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

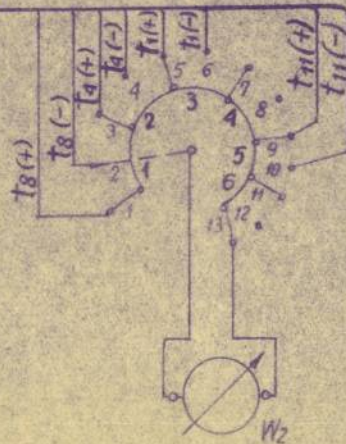
t <sub>7</sub> (+)	t <sub>7</sub> (-)	t <sub>5</sub> (+)	t <sub>5</sub> (-)	t <sub>10</sub> (+)	t <sub>10</sub> (-)	t <sub>9</sub> (+)	t <sub>9</sub> (-)	t <sub>3</sub> (+)	t <sub>3</sub> (-)	t <sub>2</sub> (+)	t <sub>2</sub> (-)	t <sub>8</sub> (+)	t <sub>8</sub> (-)	t <sub>4</sub> (+)	t <sub>4</sub> (-)	t <sub>1</sub> (+)	t <sub>1</sub> (-)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

bodziec na wzmacniacz

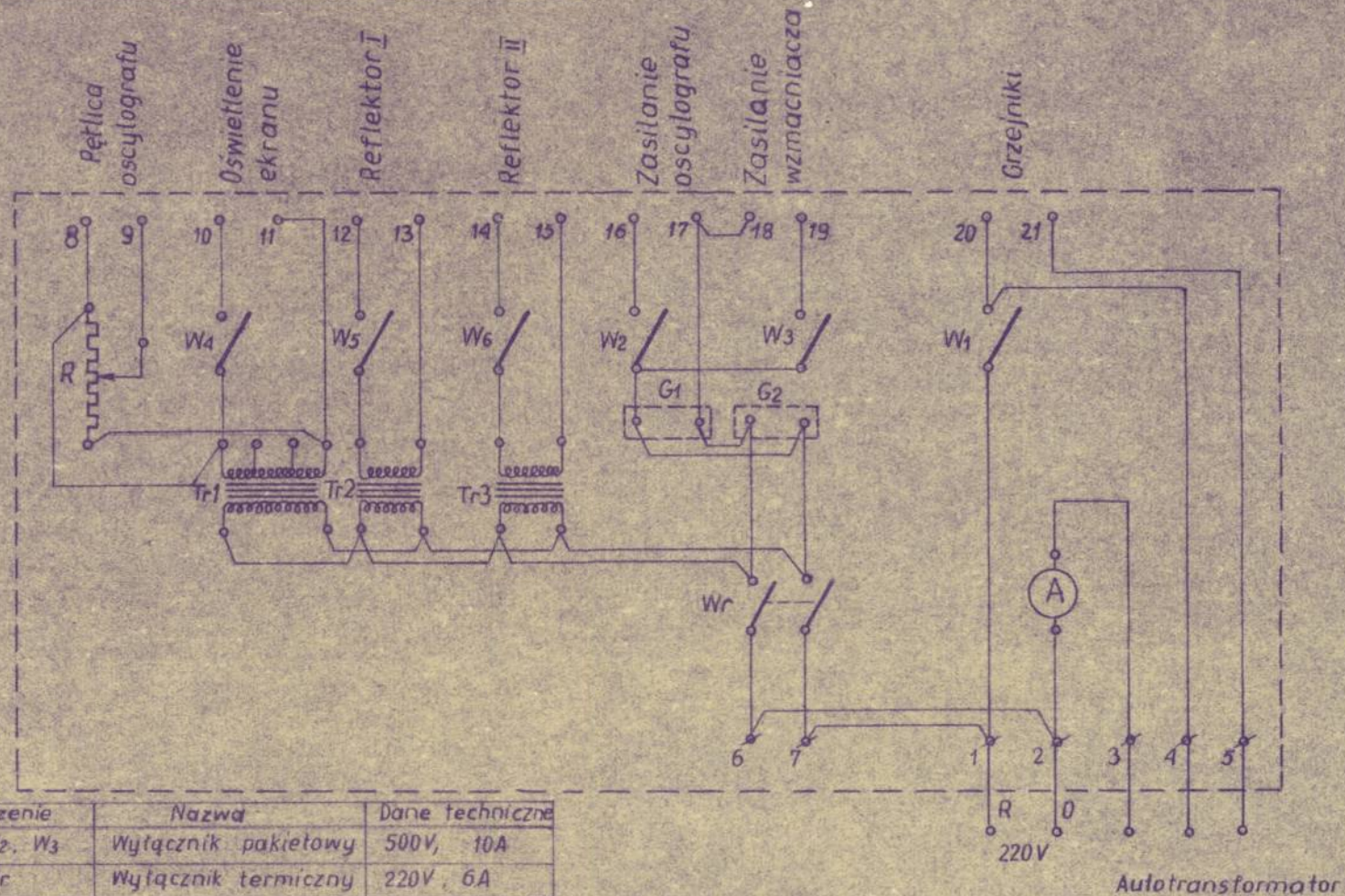
P<sub>I</sub>



P<sub>II</sub>







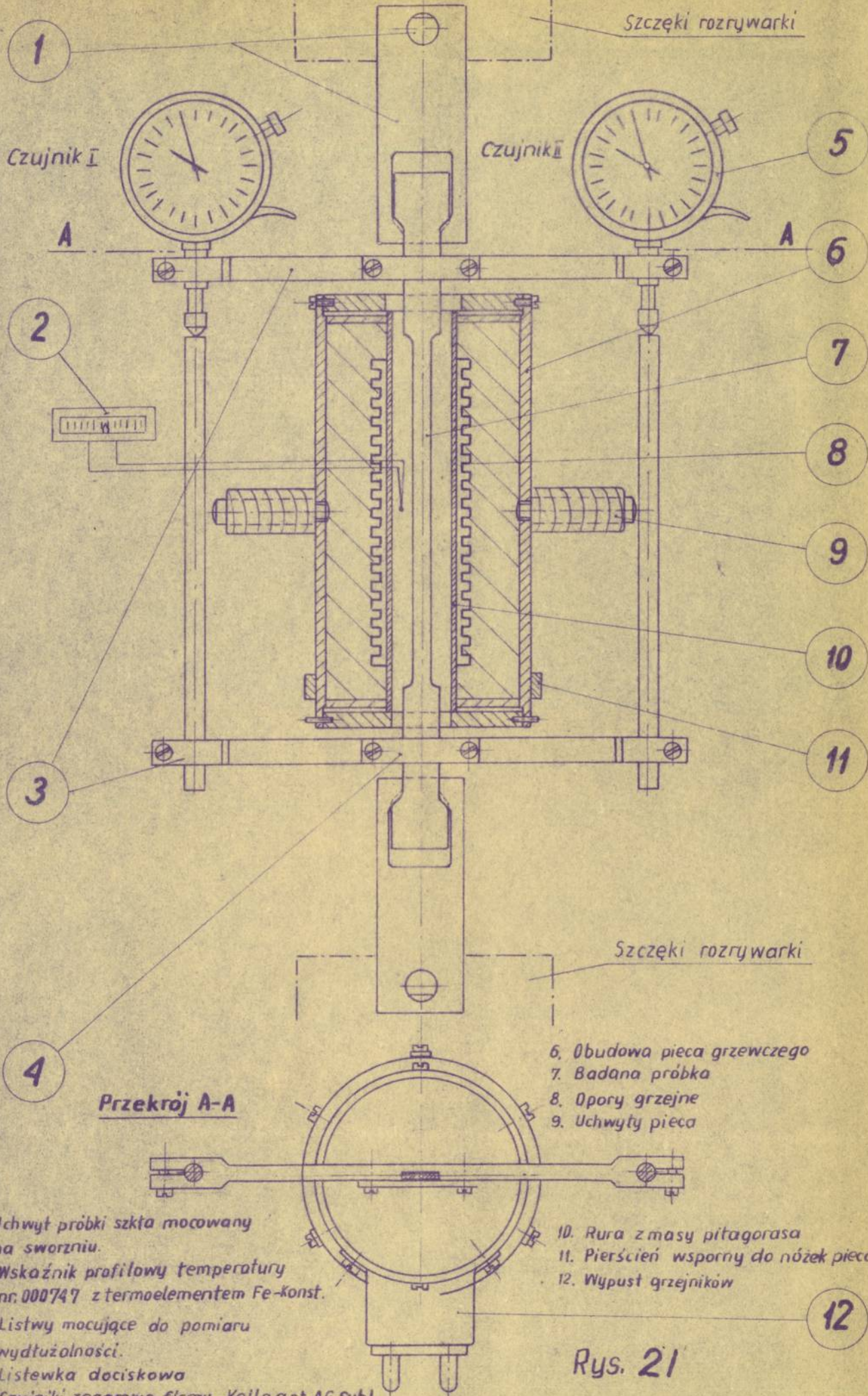
Objaśnienie:

Oznaczenie	Nazwa	Dane techniczne
W1, W2, W3	Wytącznik pakietowy	500V, 10A
Wr	Wytącznik termiczny	220V, 6A
A	Amperomierz	0-10A, Nr 05523606
Tr-1	Transformator	220/6, 4, 2V
Tr-2, Tr-3	Transformator	220/12V
W4, W5, W6	Wytącznik błysk.	
G1, G2	Gniazdko	
R	Opornica suwakowa	3000Ω, 0,23A
•	Zaciski laboratoryjne	
•	Zaciski osprzętu el.	

Schemat połączeń elektrycznych  
na tablicy rozdzielczej.

Rys. 20





1

Szczęki rozrywarki

Czujnik I

Czujnik II

5

A

A

6

2

7



8

9

10

3

11

4

Szczęki rozrywarki

Przekrój A-A

- 6. Obudowa pieca grzewczego
- 7. Badana próbka
- 8. Opory grzejne
- 9. Uchwyty pieca

- 1. Uchwyt próbki szkła mocowany na sworzniu.
- 2. Wskaźnik profilowy temperatury nr. 000747 z termoelementem Fe-Konst.
- 3. Listwy mocujące do pomiaru wydłużalności.
- 4. Listewka dociskowa
- 5. Czujniki zegarowe firmy Kellpart AG.Suhl o dokładności 0,001 mm

- 10. Rura z masy pitagorasa
- 11. Pierścien wsporny do nóżek pieca.
- 12. Wypust grzejników

12

Rys. 21



P  
KG

$\Delta P$

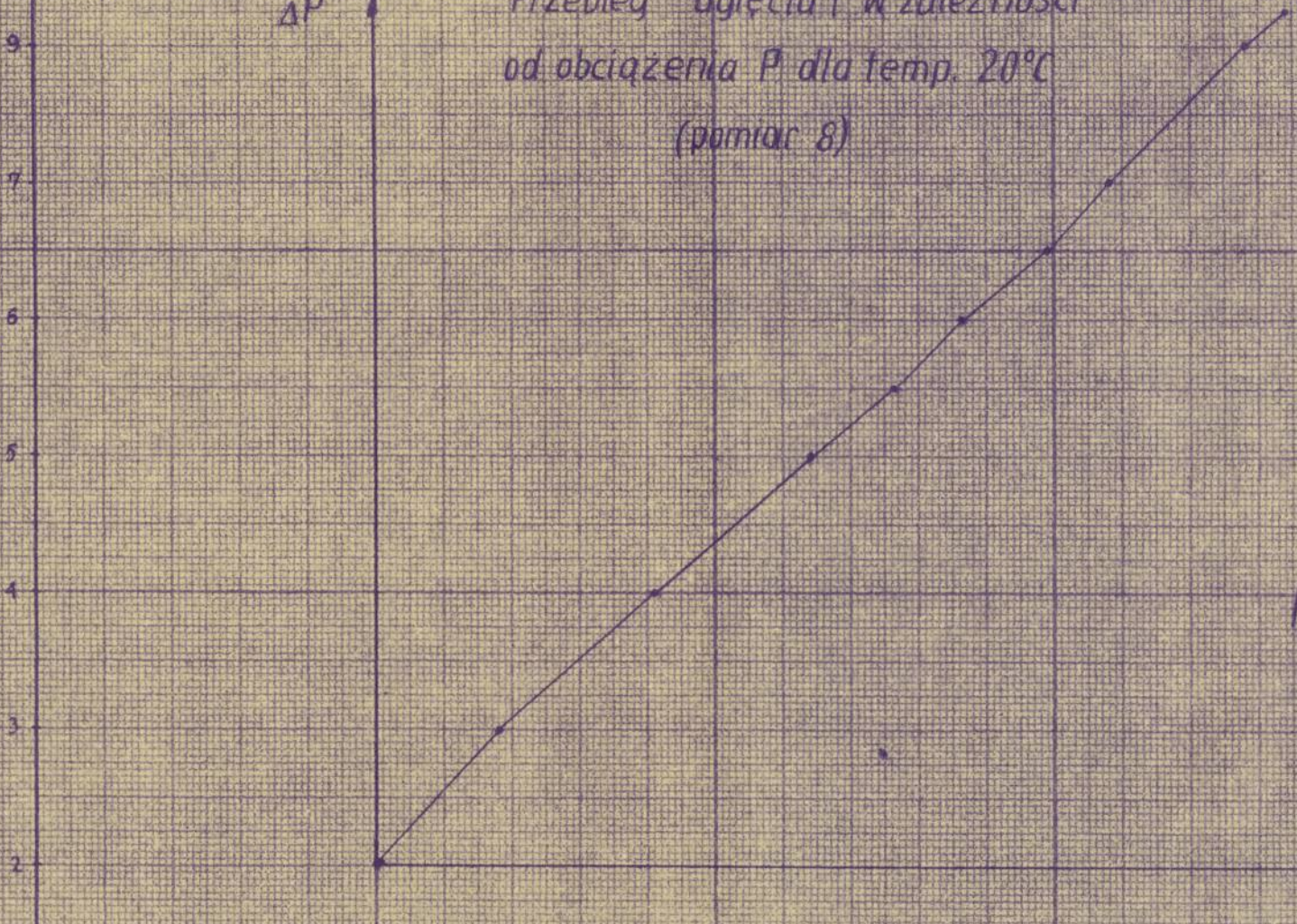
Przebieg ugięcia  $f$  w zależności  
od obciążenia  $P$  dla temp.  $20^{\circ}\text{C}$   
(pomiar 8)

9  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 120 140 160 180 200  $100 \cdot f$  mm

$\Delta f$

Rys. nr. 24



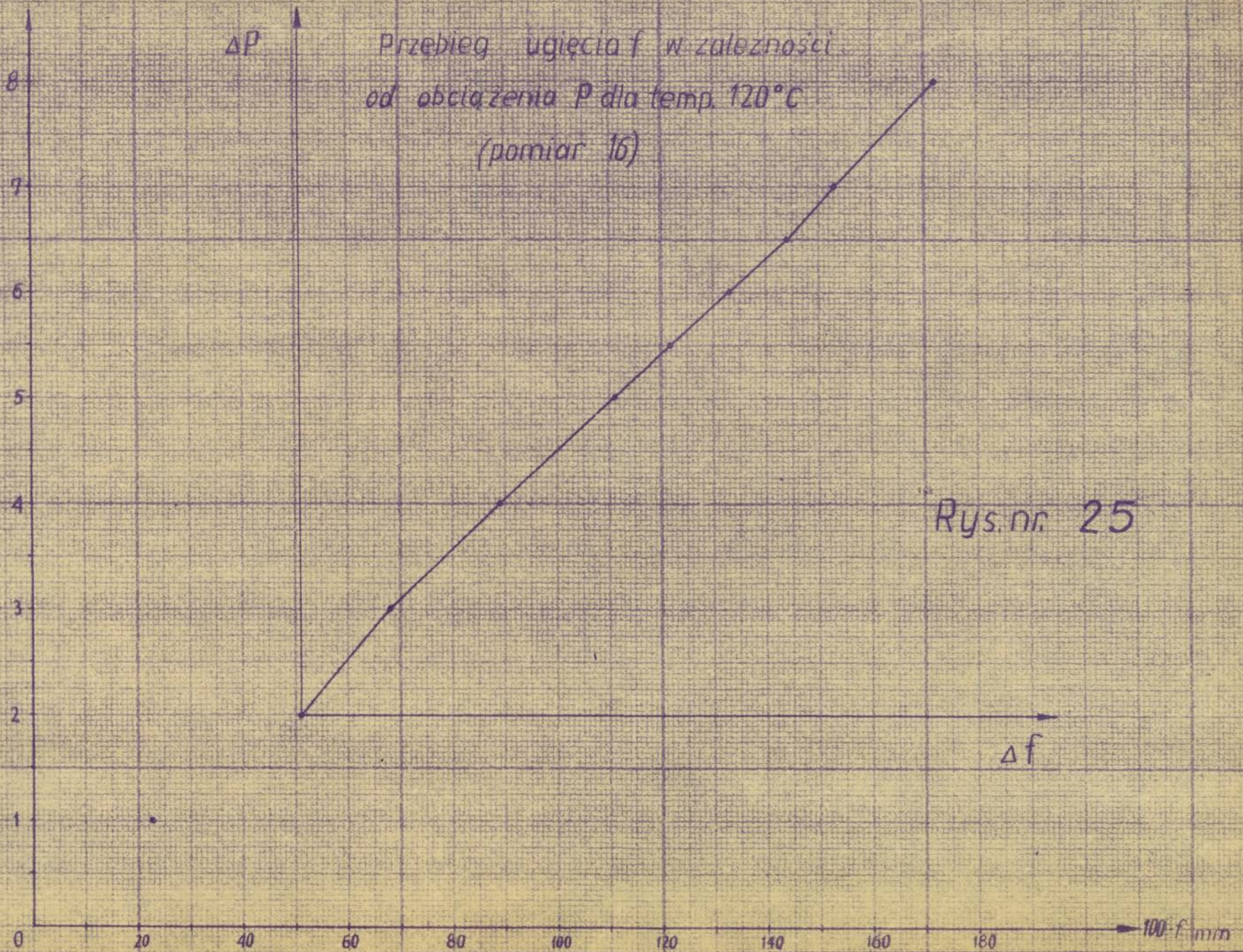
18



$P$   
kG

$\Delta P$

Przebieg ugięcia  $f$  w zależności  
od obciążenia  $P$  dla temp.  $120^{\circ}\text{C}$   
(pomiar 16)

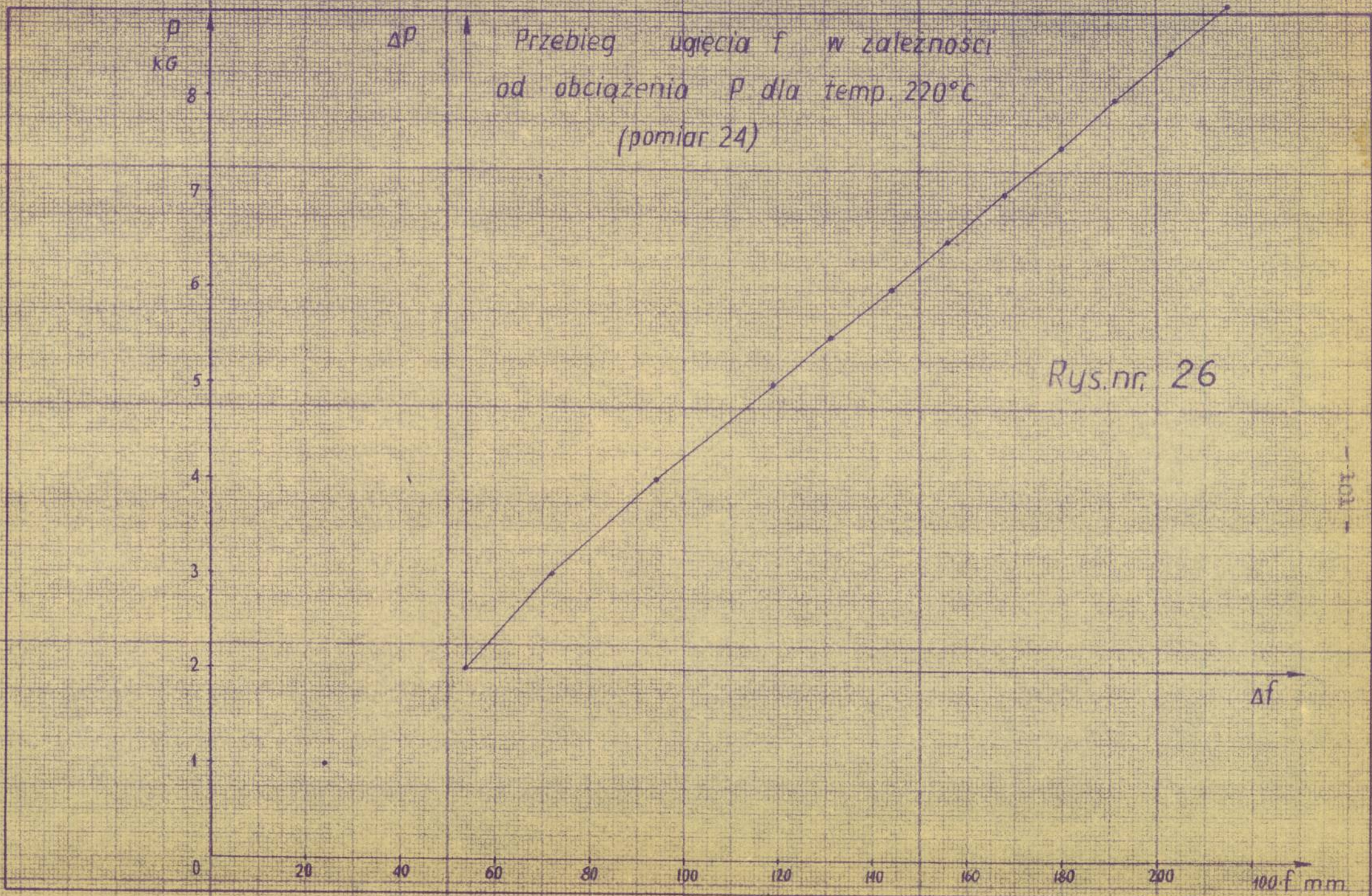


Rys. nr. 25

100

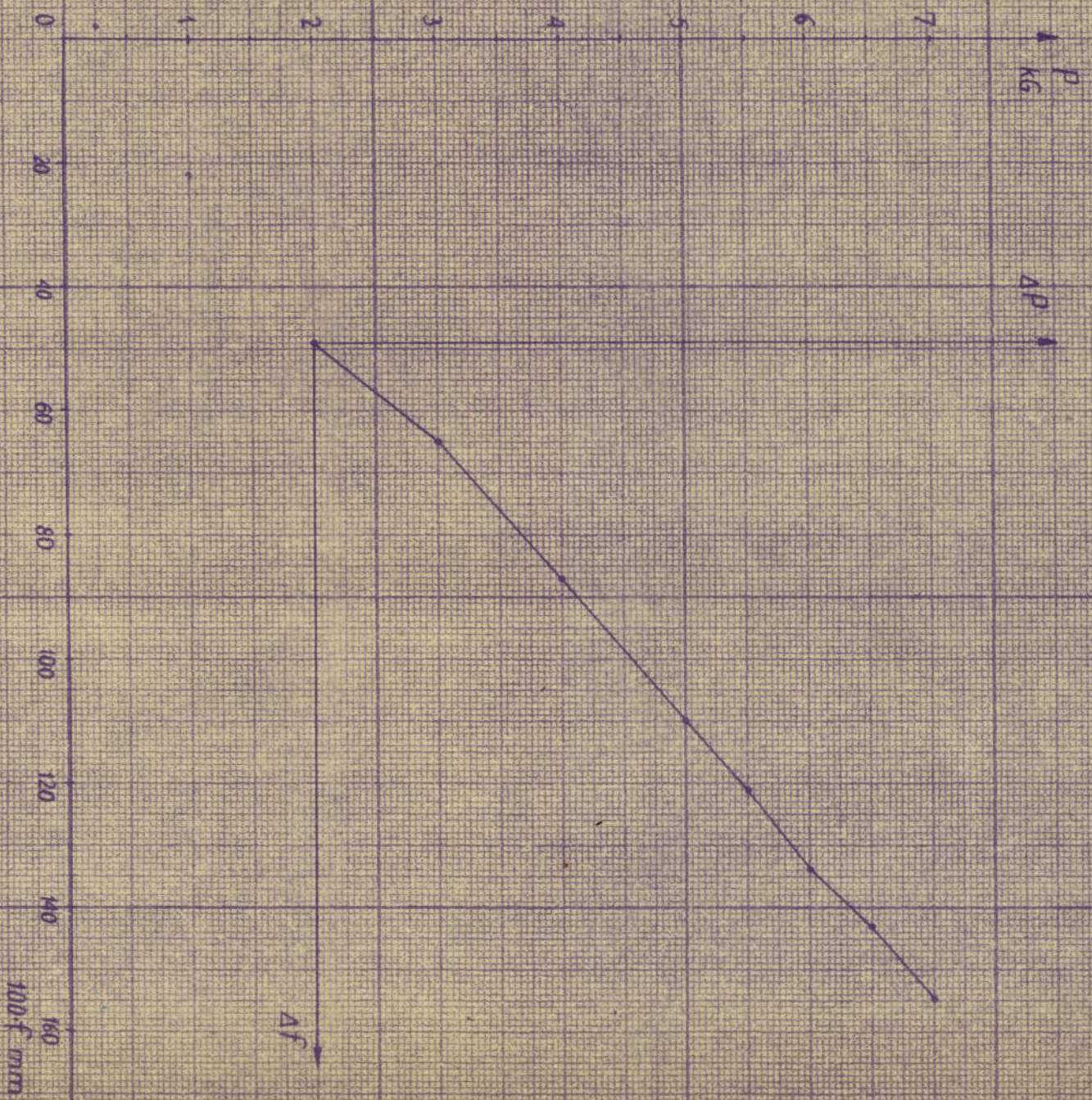
100 f mm





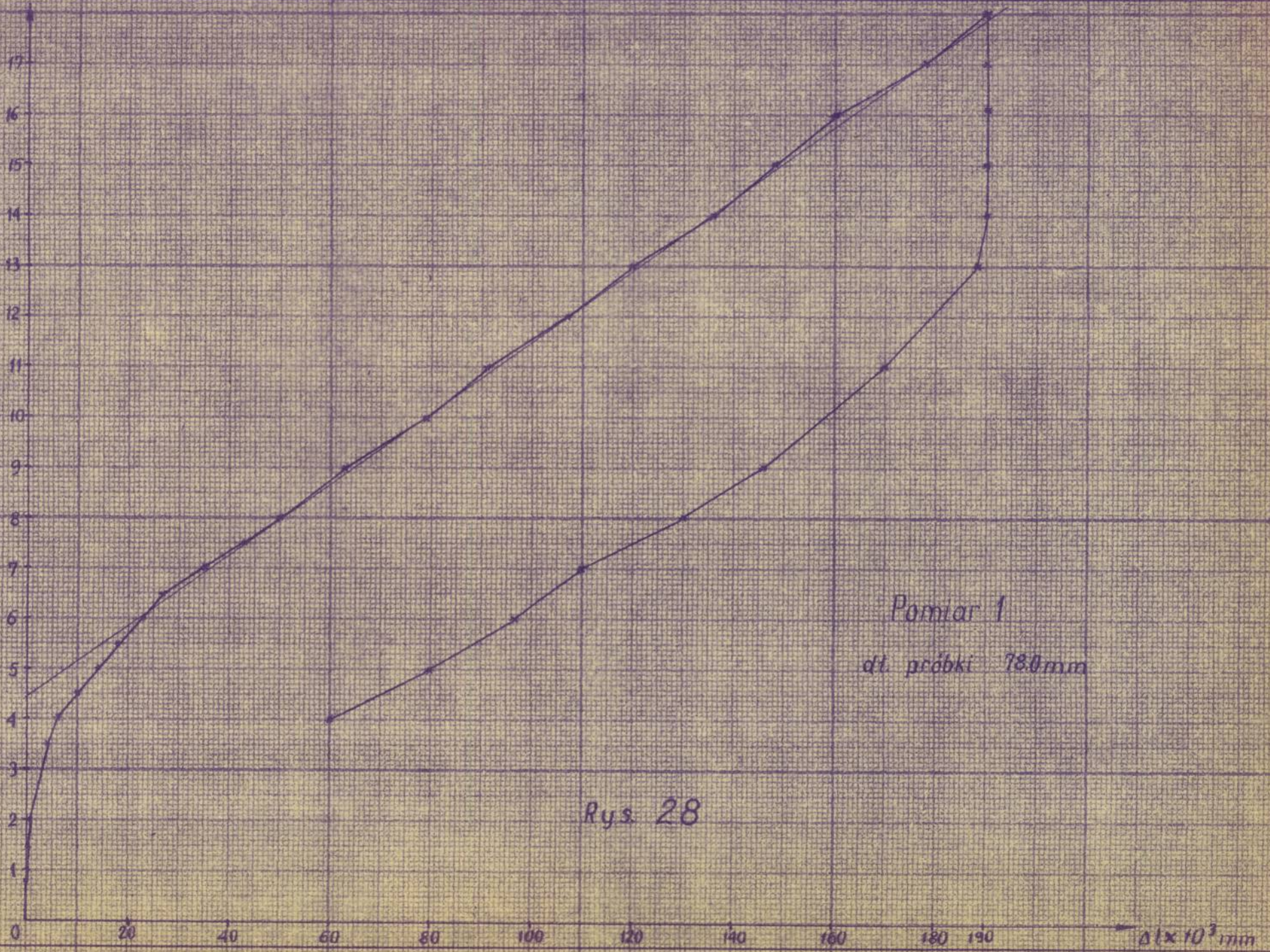


Przebieg ugięcia  $f$  w zależności  
od obciążenia  $P$  dla temp.  $320^{\circ}\text{C}$   
(pomiar 32)



Rys. nr 27





Pomiar 1  
dl próbki 780mm

Rys. 28

- 103 -



t  
mV

17  
16  
15  
14  
13  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2

0

20

40

60

80

100

120

140

160

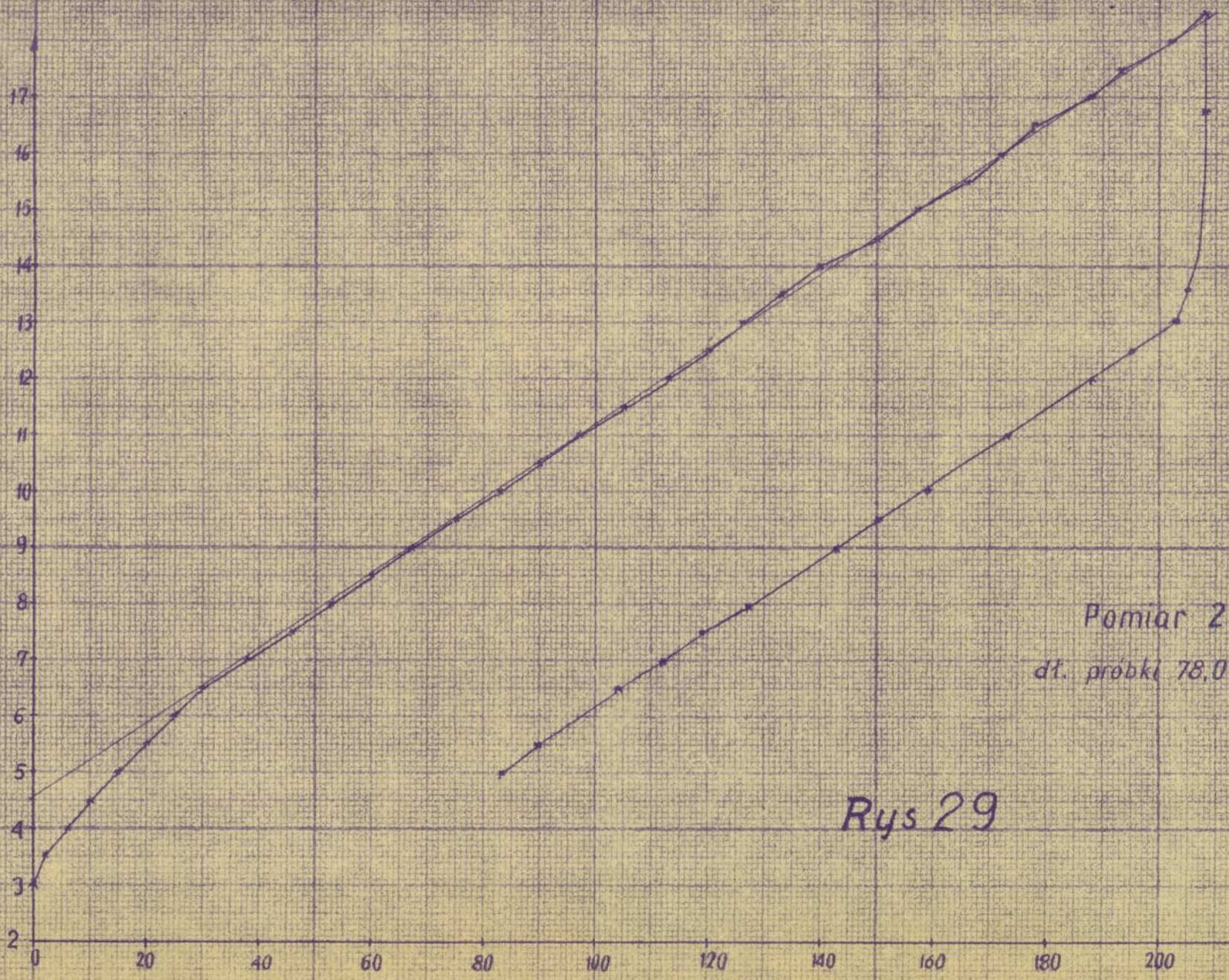
180

200

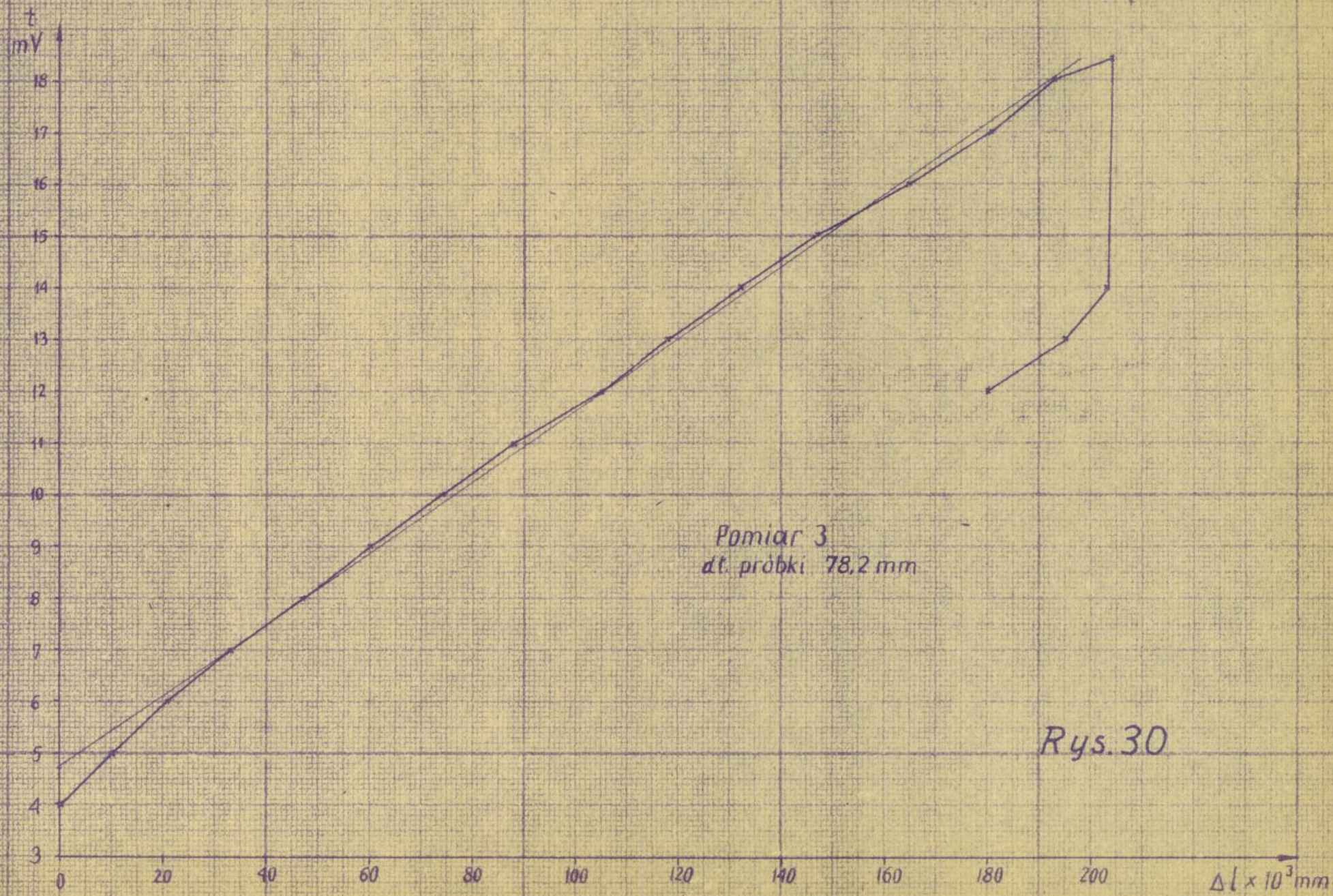
$\Delta l \times 10^3 \text{ mm}$

Pomiar 2  
dł. próbki 78,0m

Rys 29







Pomiar 3  
dt. próbki 78,2 mm

Rys. 30



t  
mV

17  
16  
15  
14  
13  
12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

20

40

60

80

100

120

140

160

180

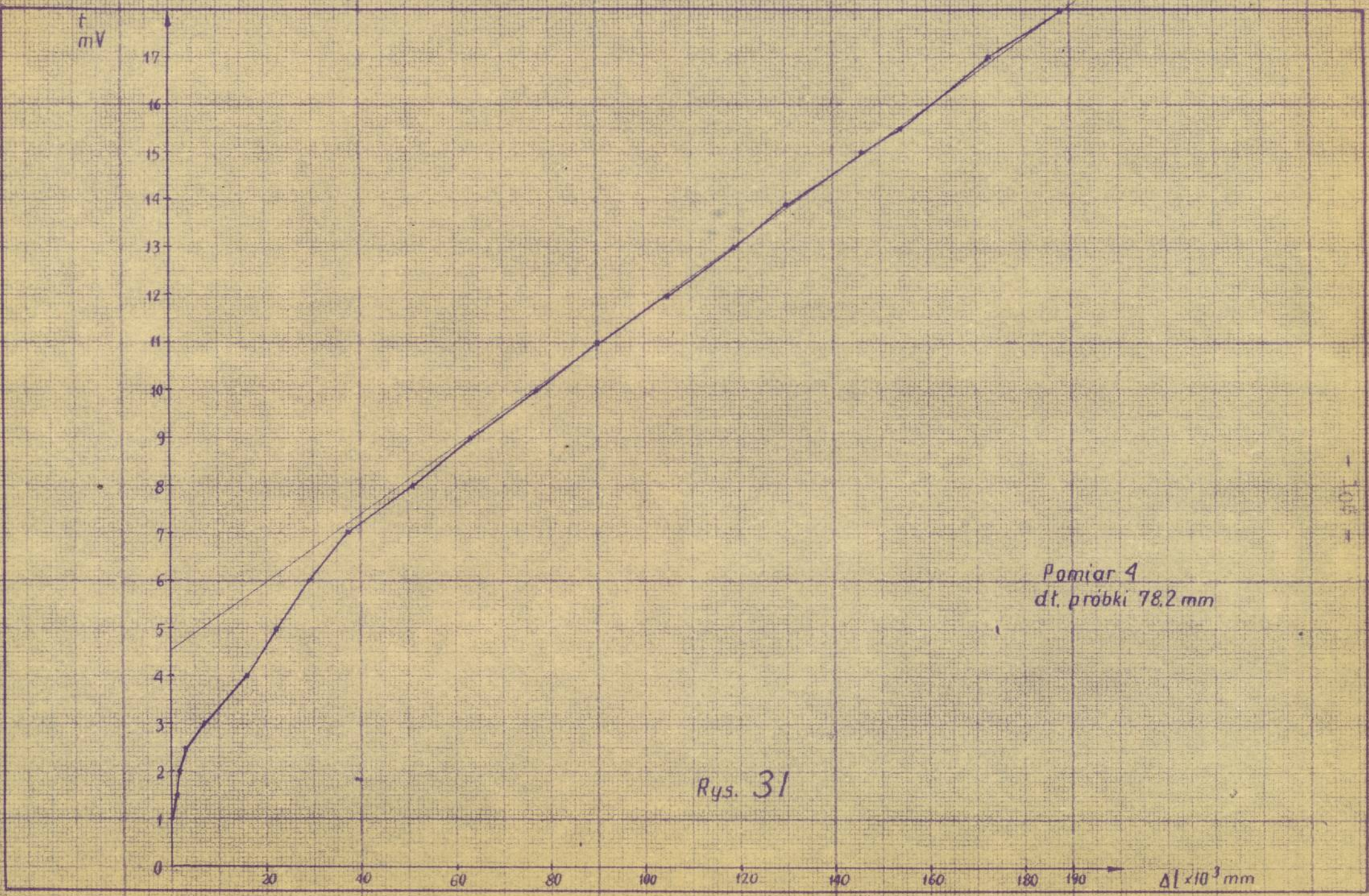
190

$\Delta l \times 10^3 \text{ mm}$

Pomiar 4  
dt. próbki 78.2 mm

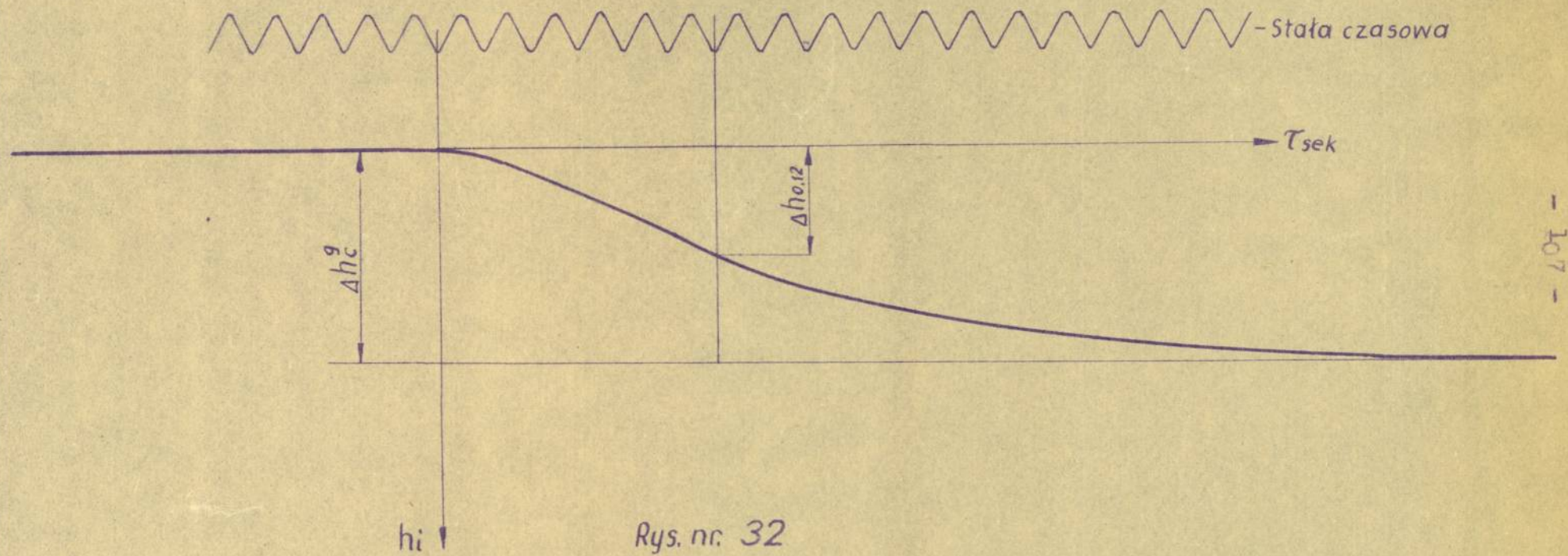
Rys. 31

100





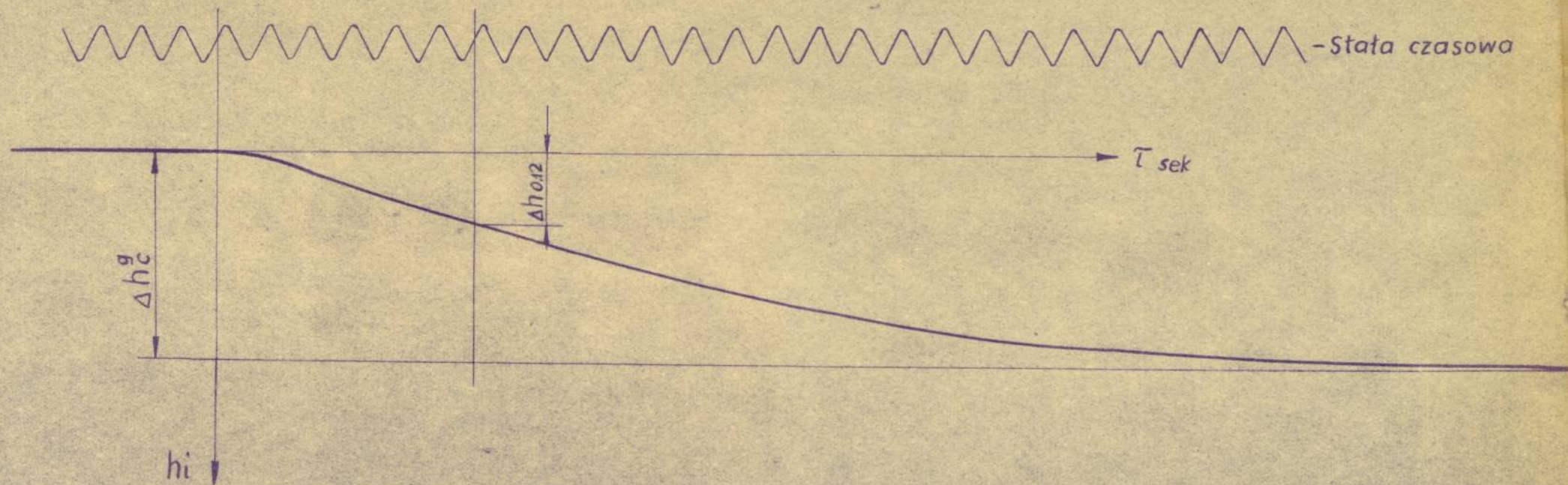
Nr. pom. 39



Rys. nr. 32



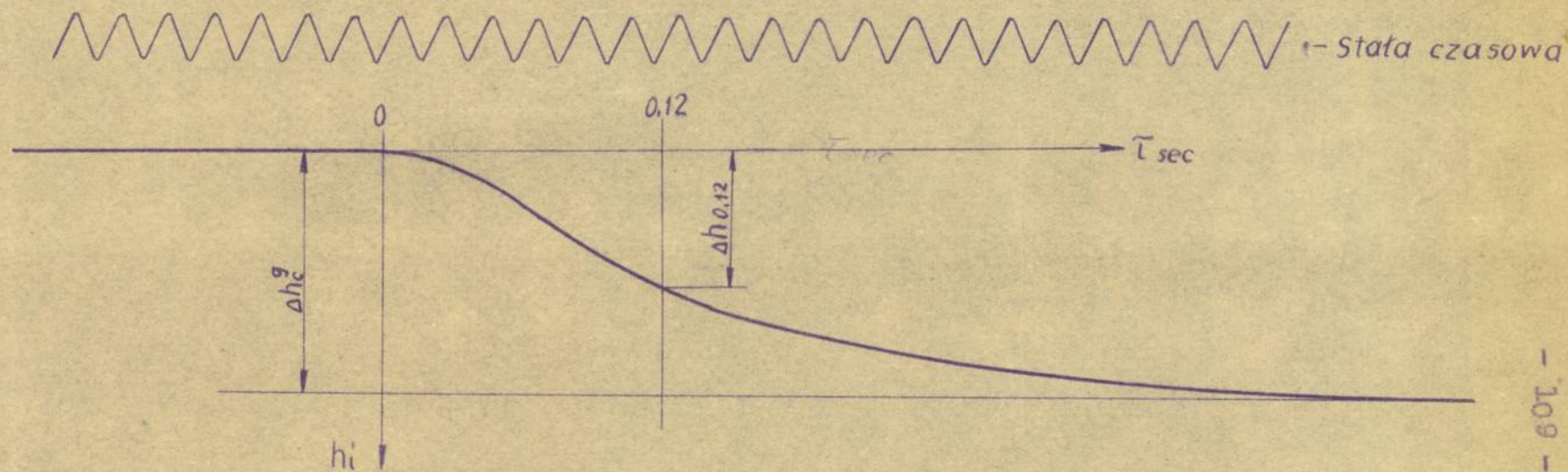
Nr. pom. 38



Rys. nr. 33



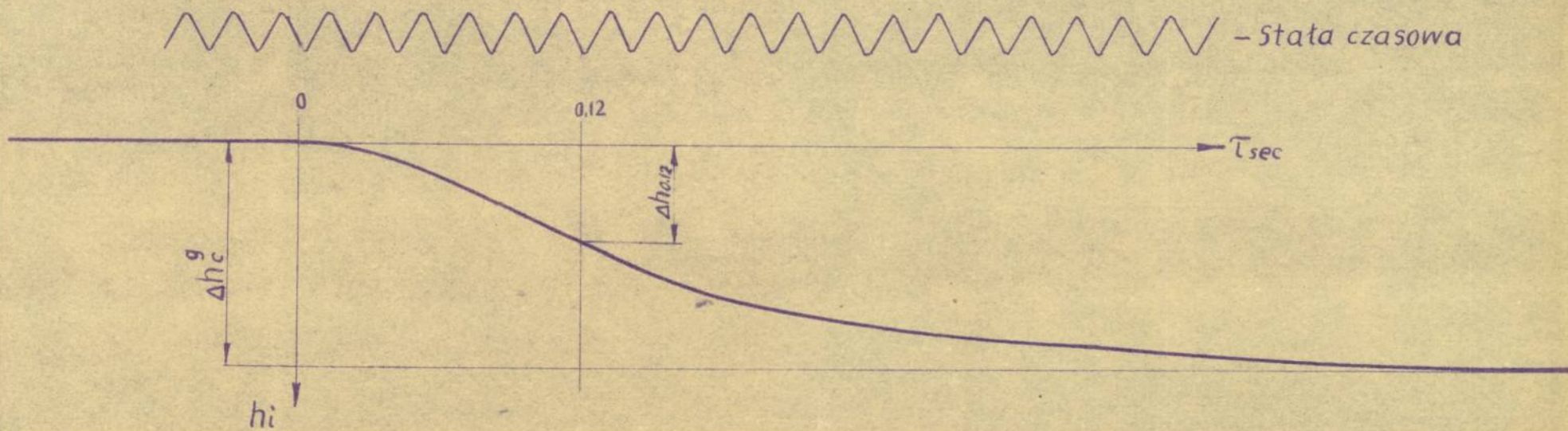
Nr. pom. 36



Rys. nr. 34



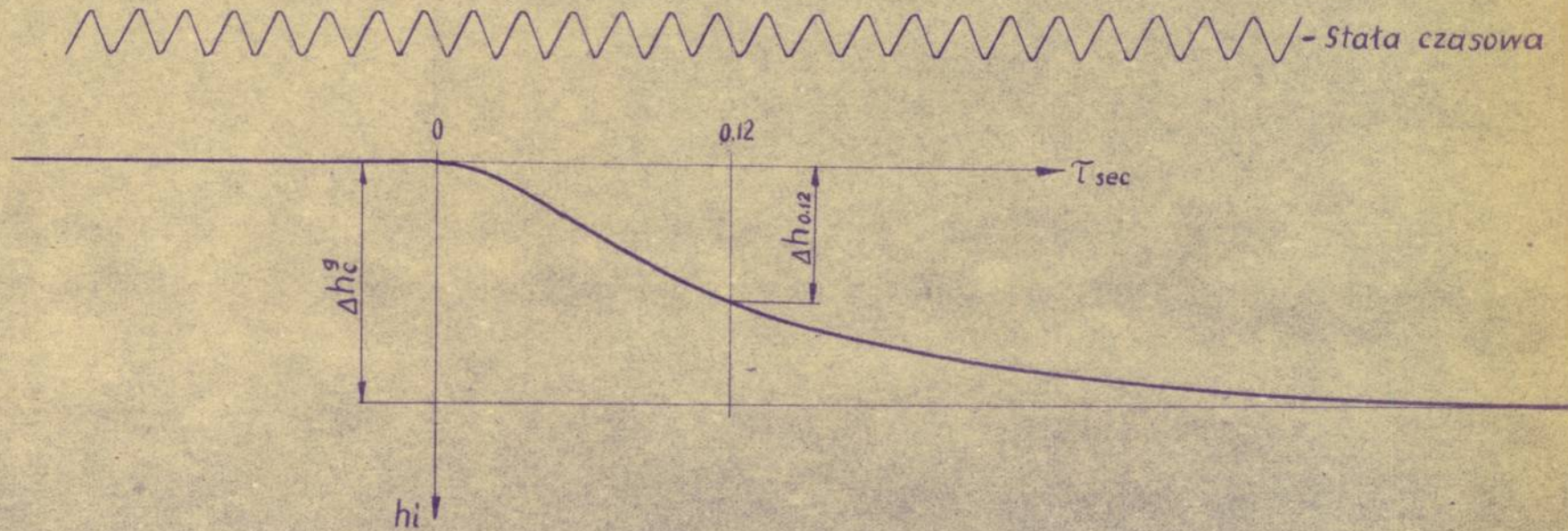
Nr. pom. 40



Rys. nr. 35



Nr. pom. 37

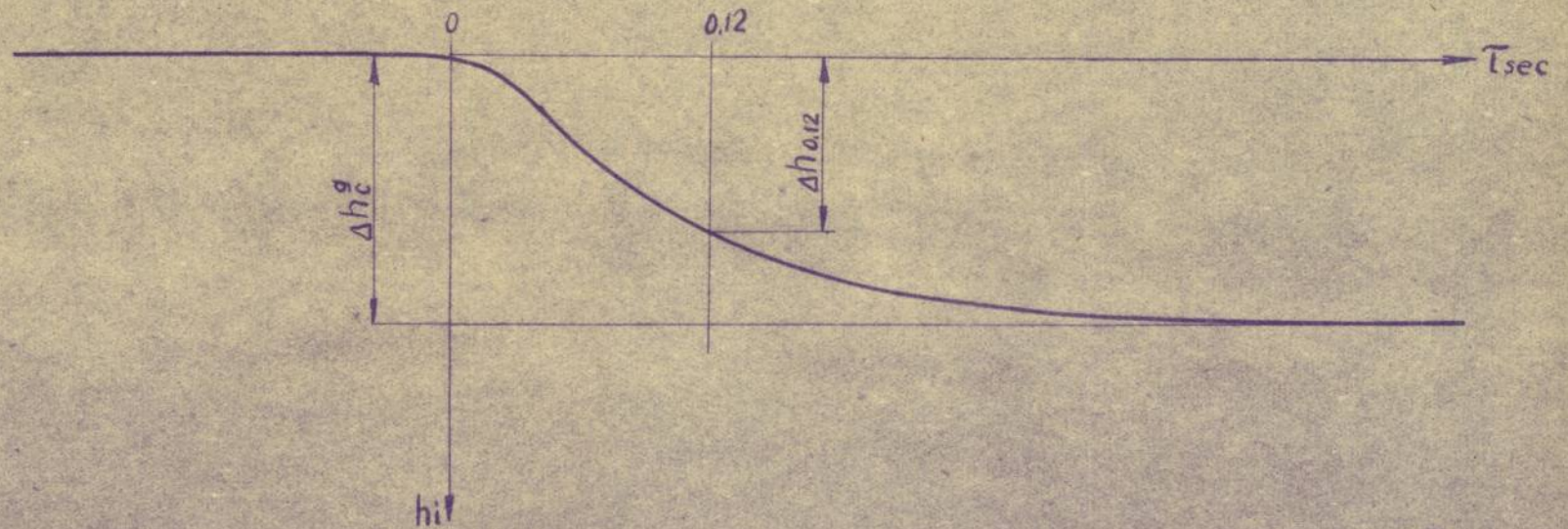


Rys. nr 36



Nr. pom. 33

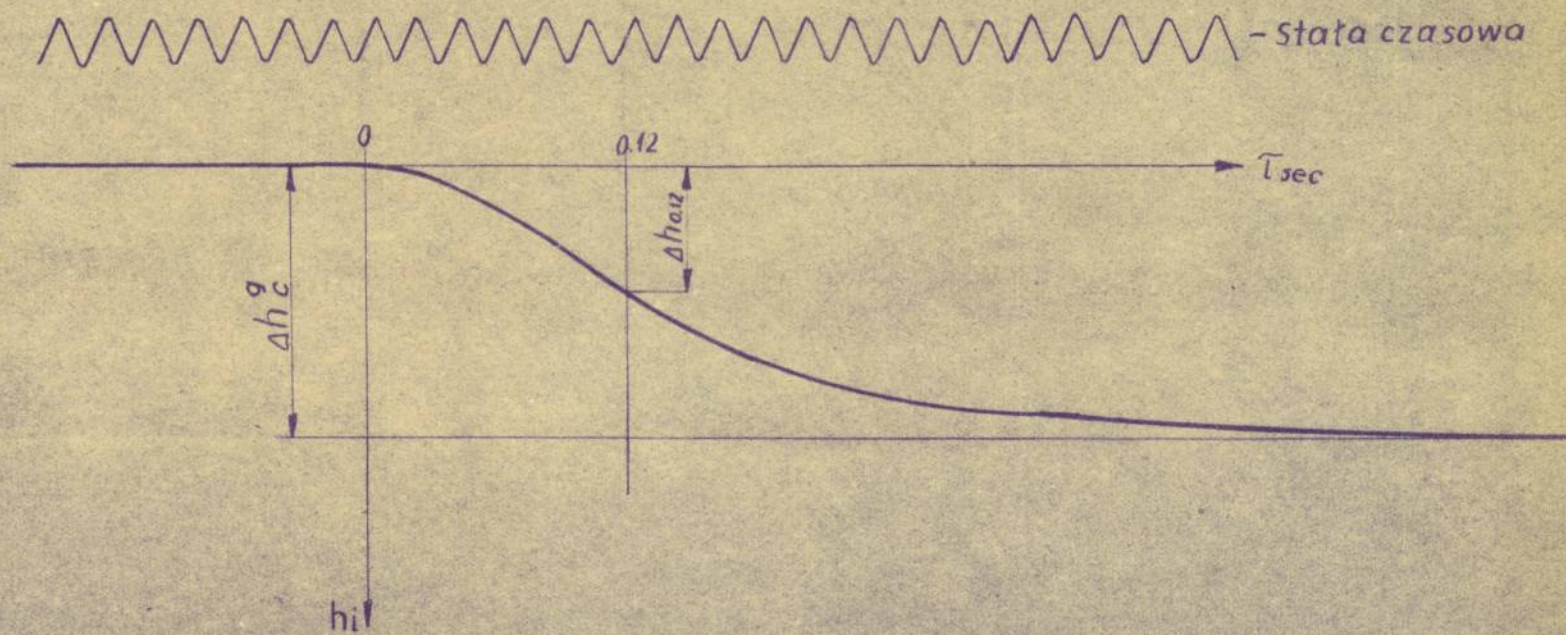
~~~~~ - stała czasowa



Rys. nr. 37



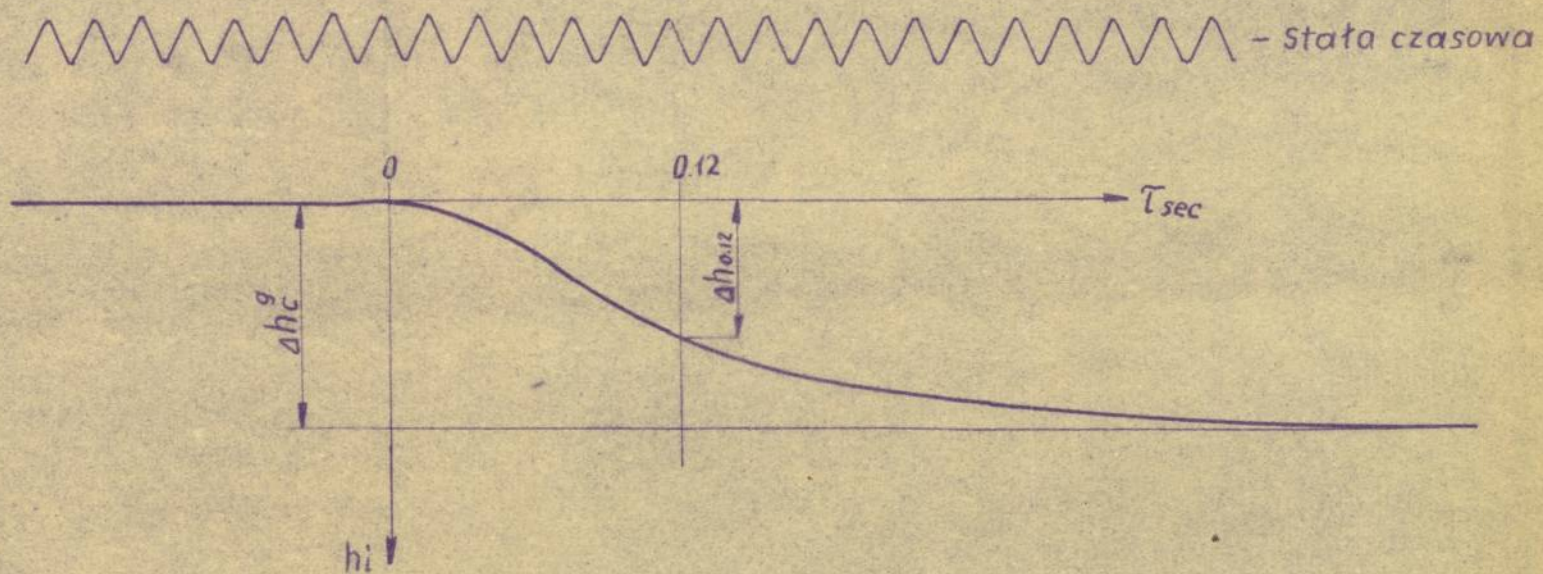
Nr. pom. 34



Rys. nr. 38



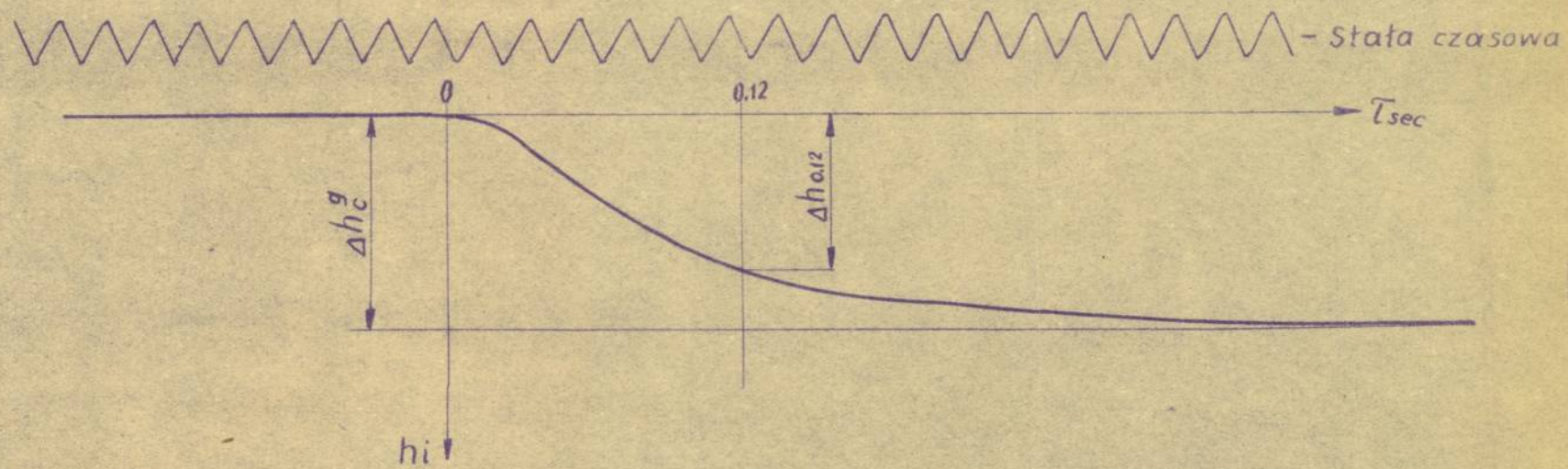
Nr. pom. 51



Rys.nr. 39



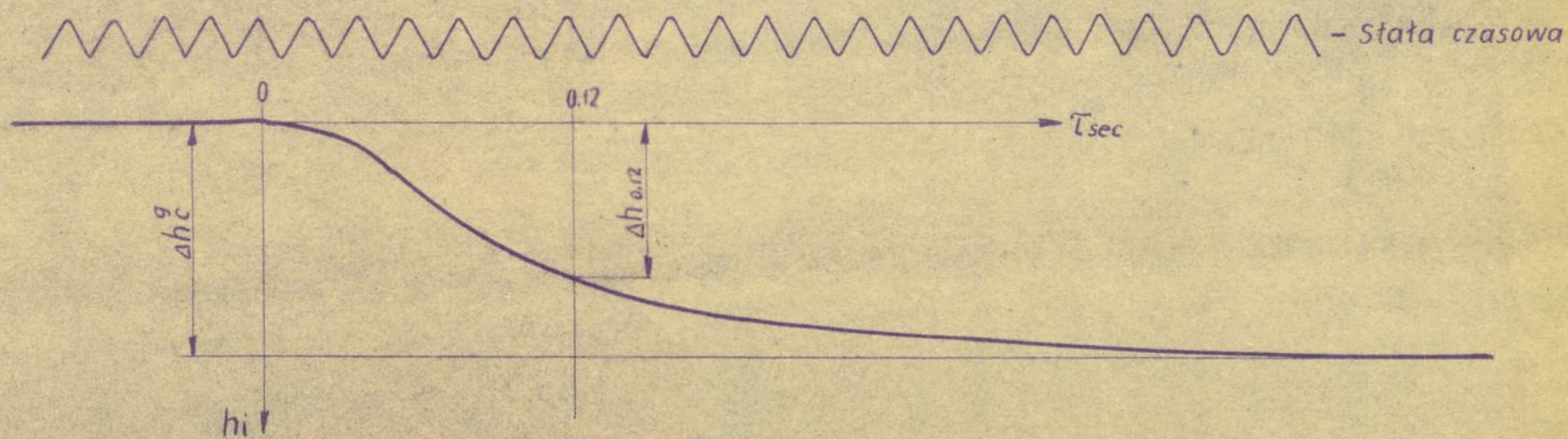
Nr. pom. 19



Rys. nr. 40



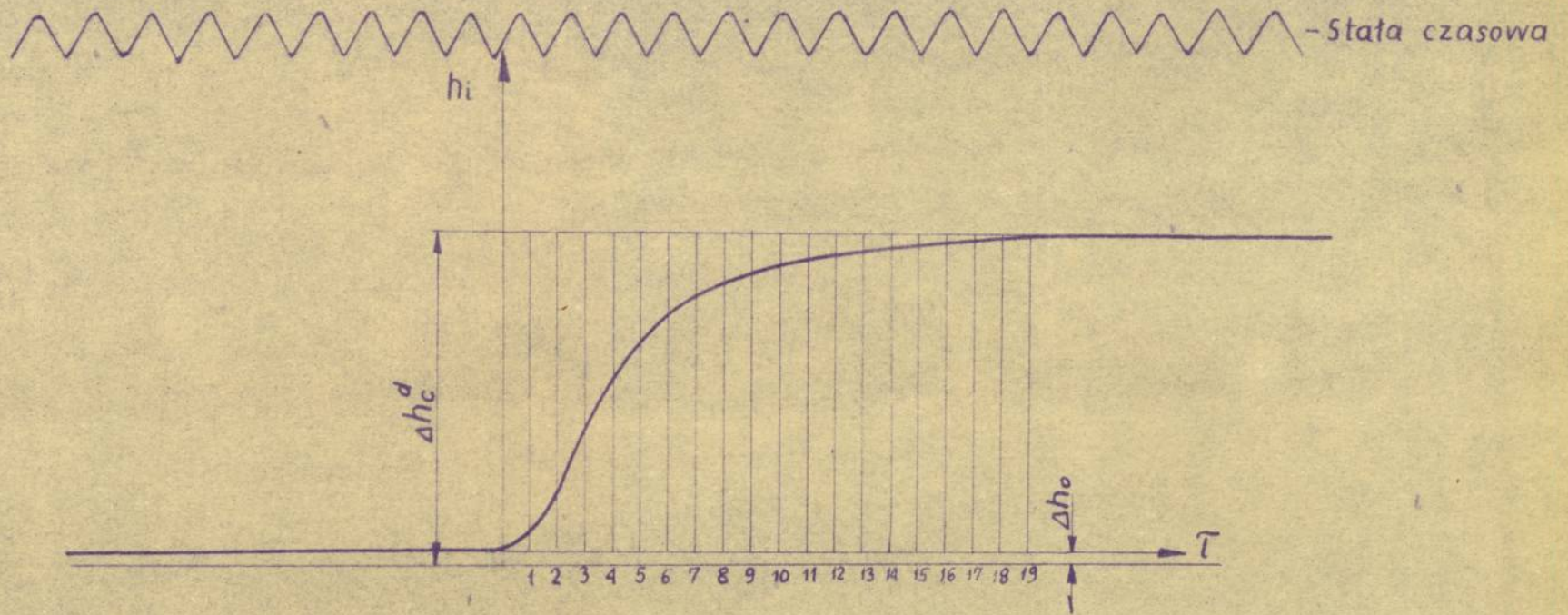
Nr. pom. 20



Rys. nr. 41



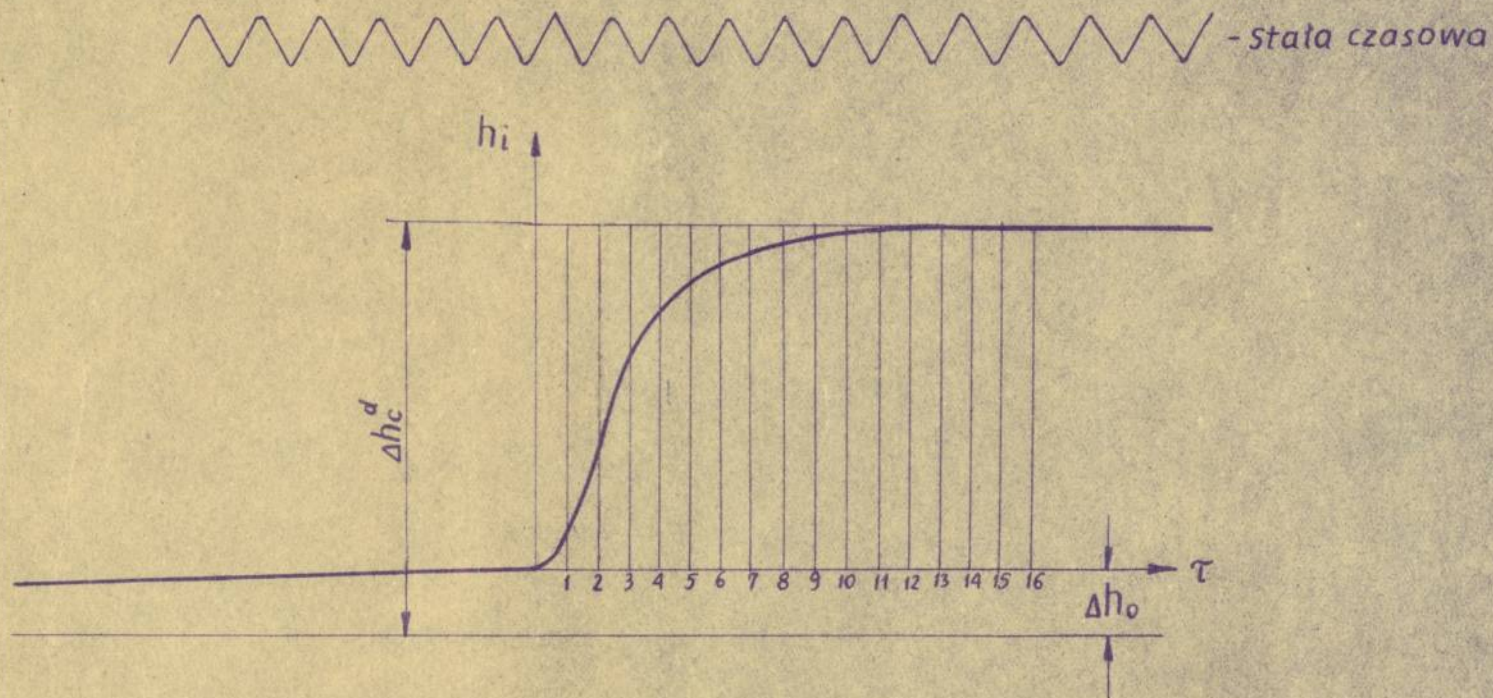
Nr. pomiaru 49



Rys. nr. 42



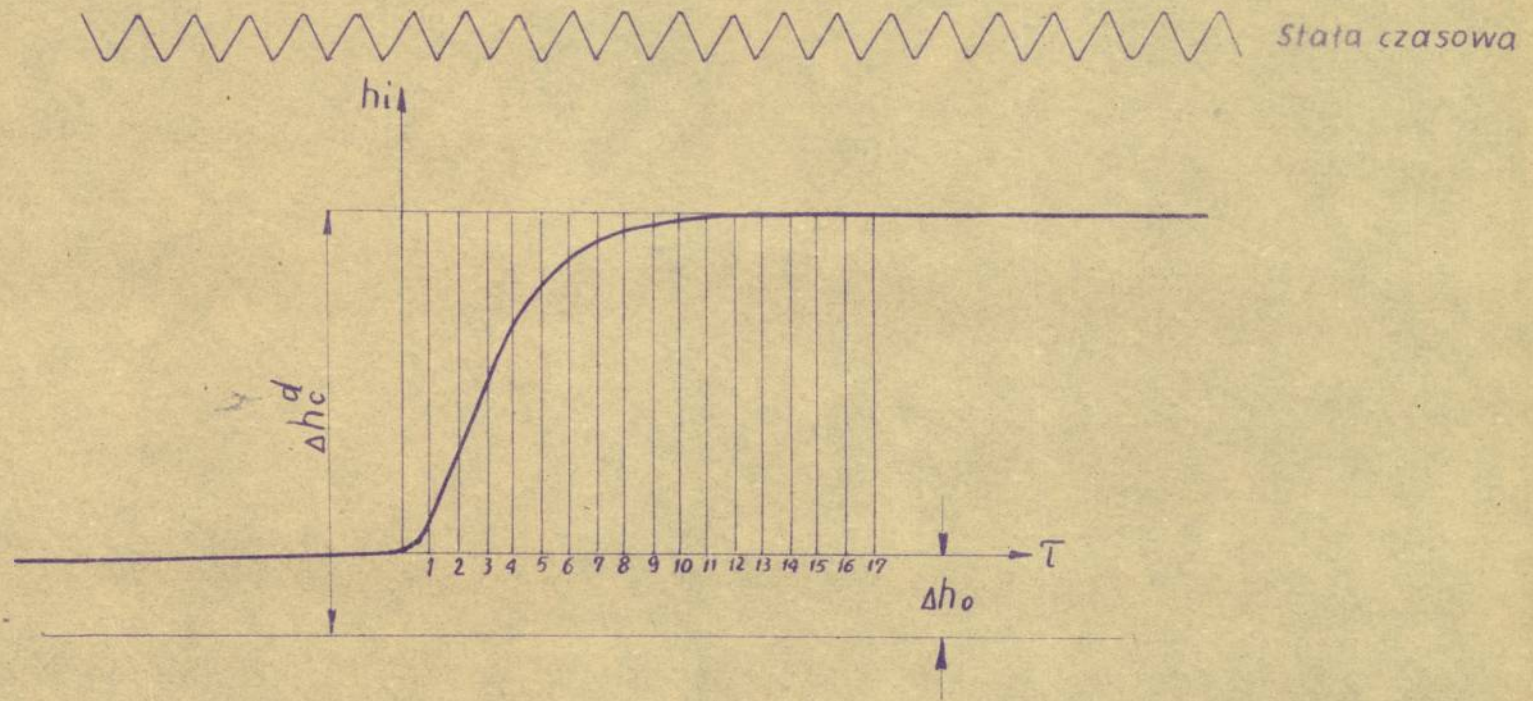
Nr. pom. 30



Rys. nr. 43



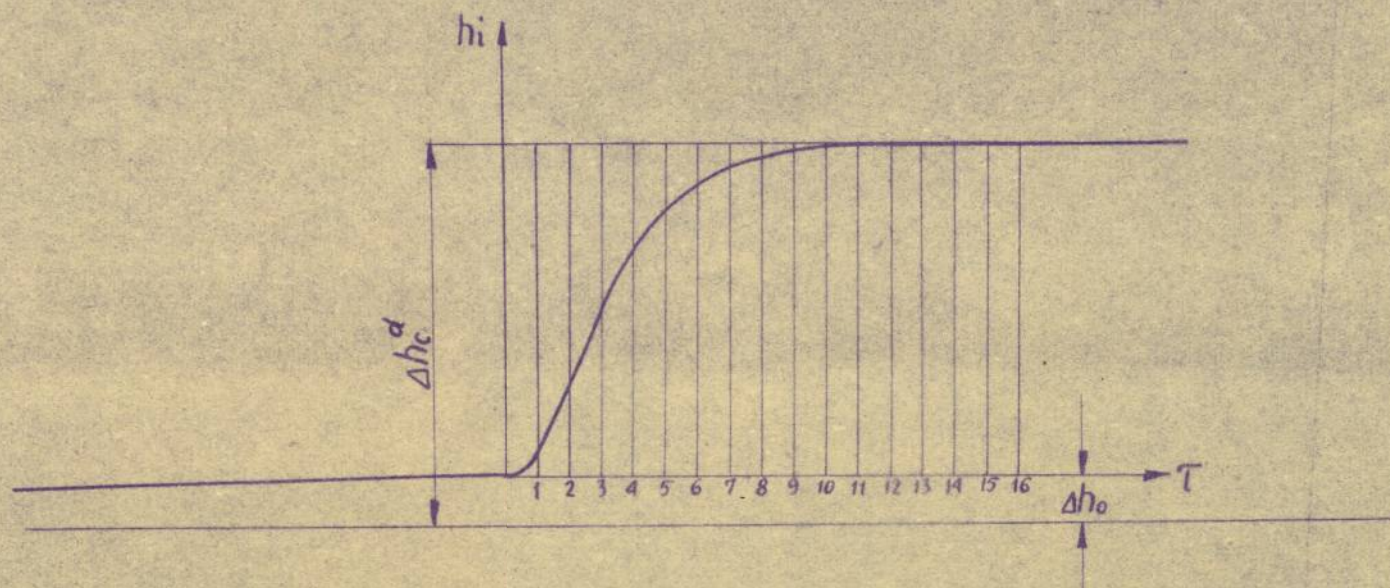
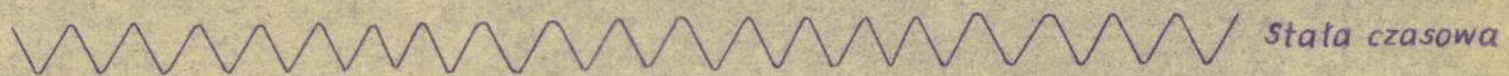
Nr. pom. 28



Rys. nr. 44



Nr. pom. 42

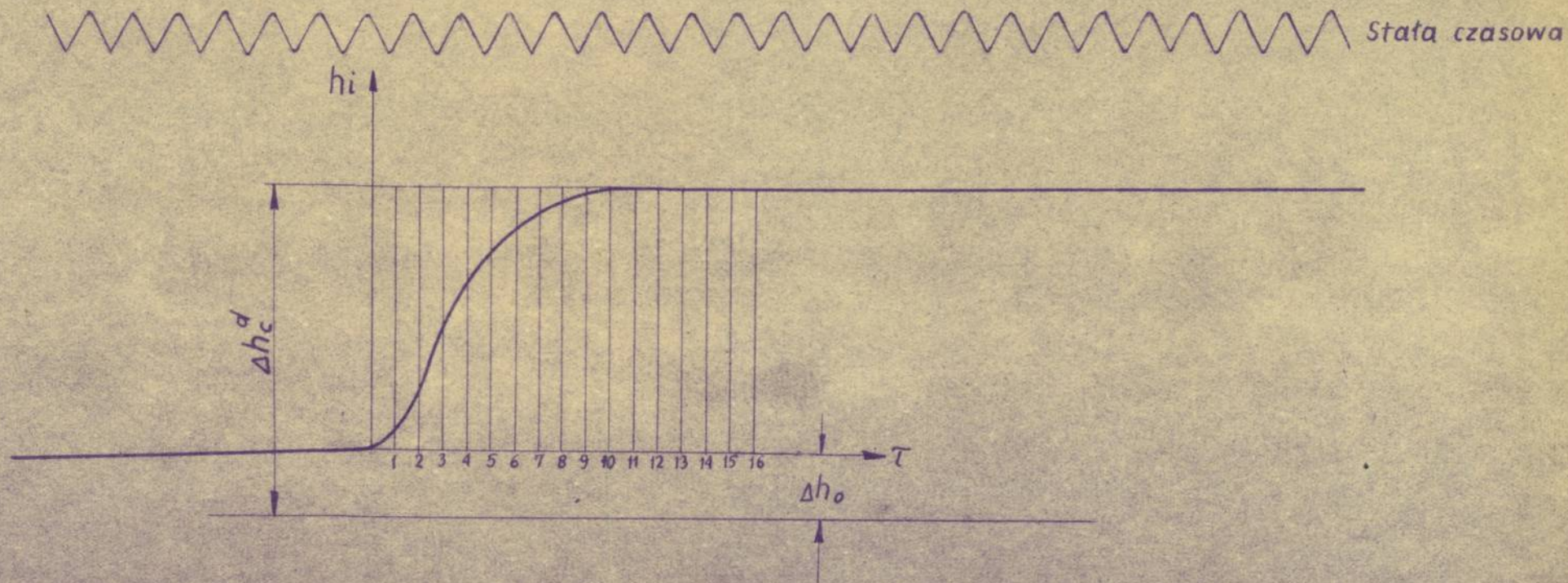


Rys. nr. 45

- 120 -



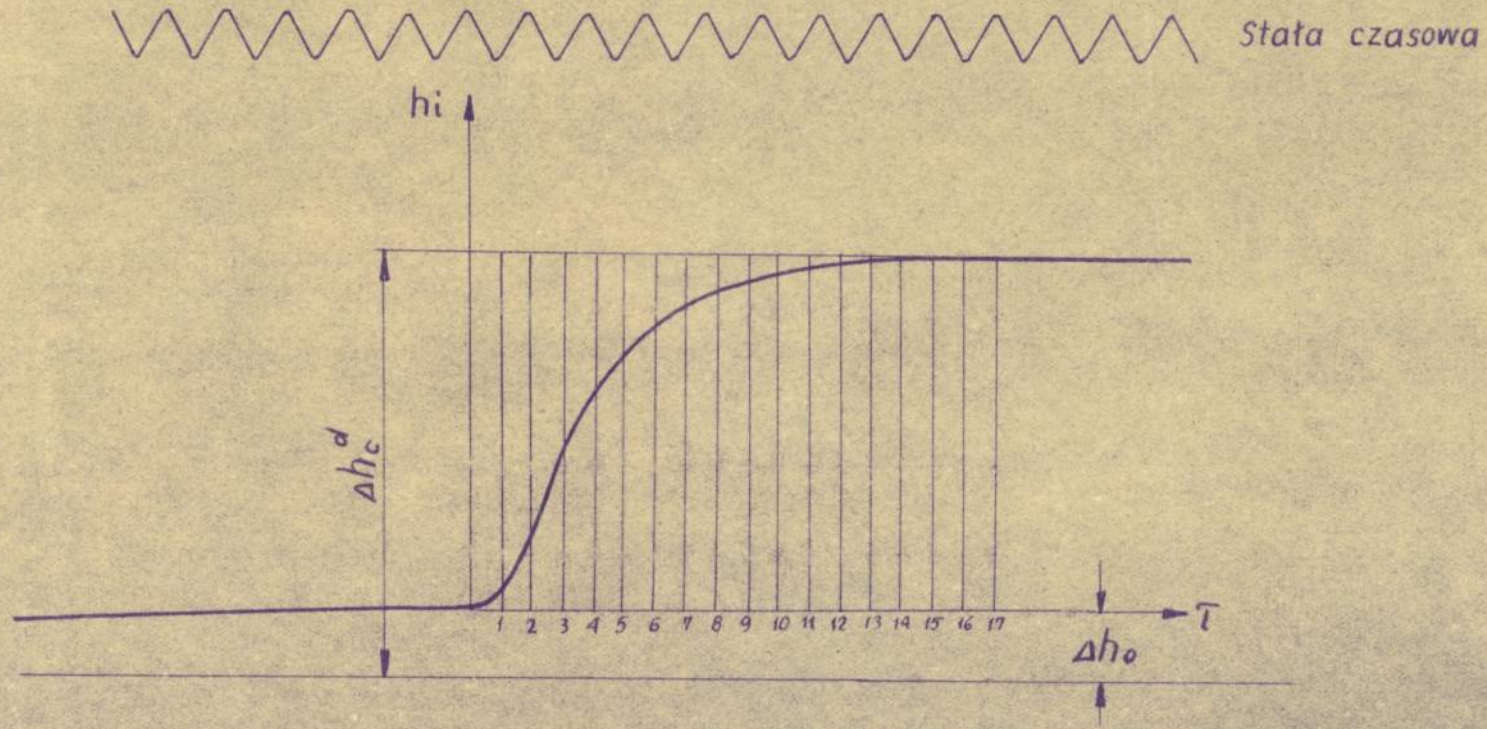
Nr. pom. 29



Rys. nr. 46



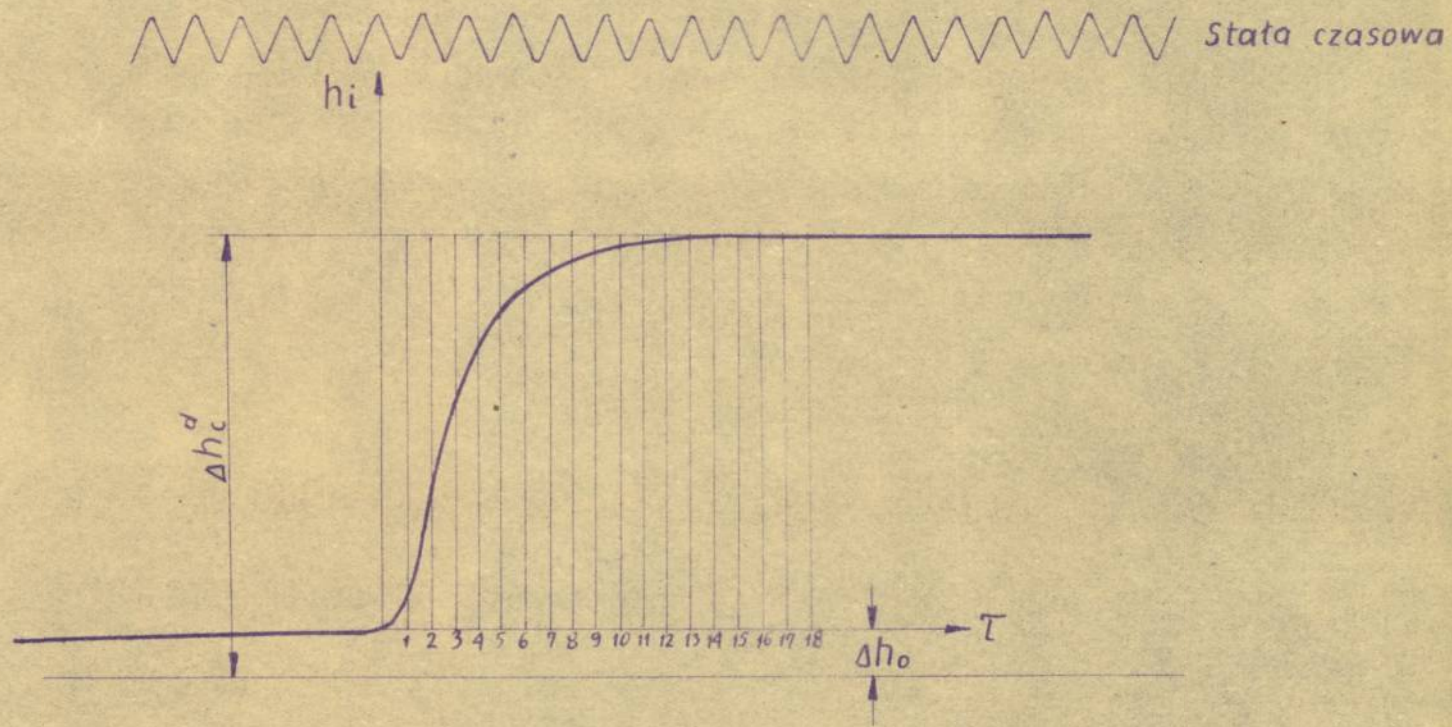
Nr pom. 48



Rys.nr. 47



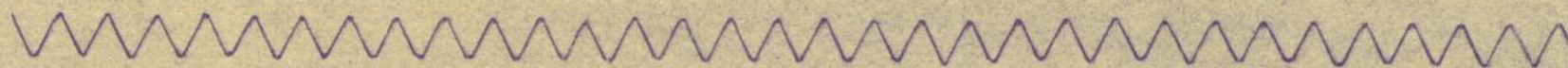
Nr pom. 43

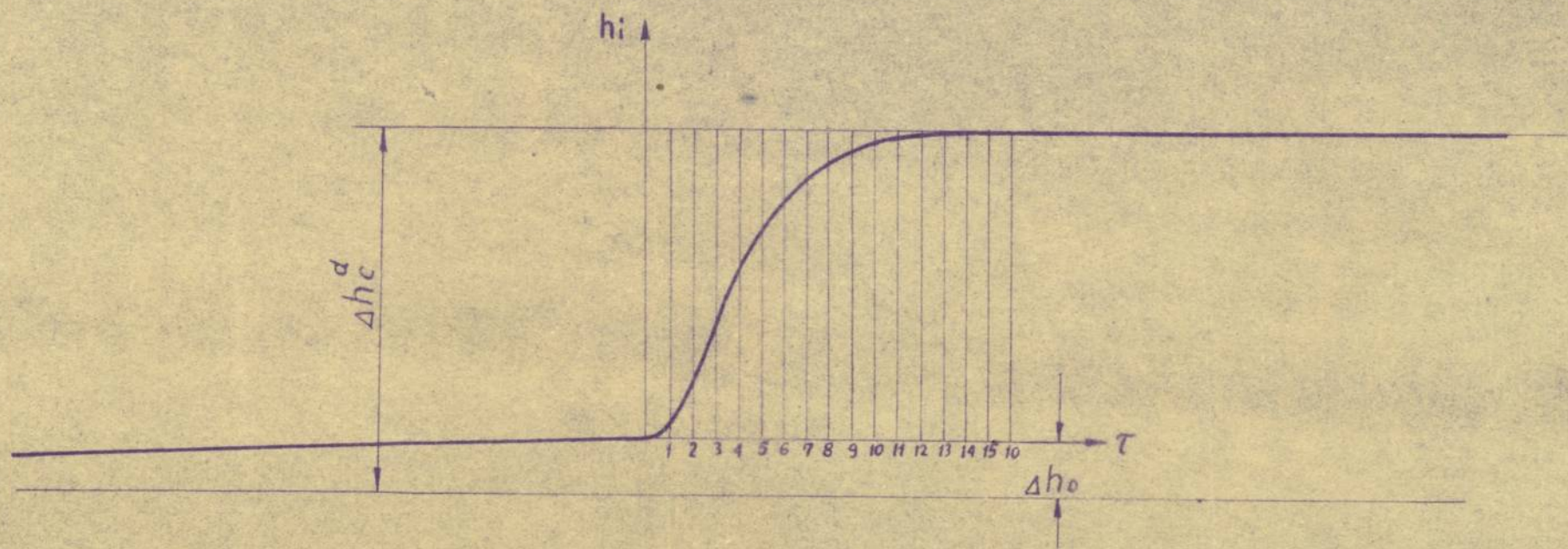


Rys. nr. 48



Nr. pom. 45

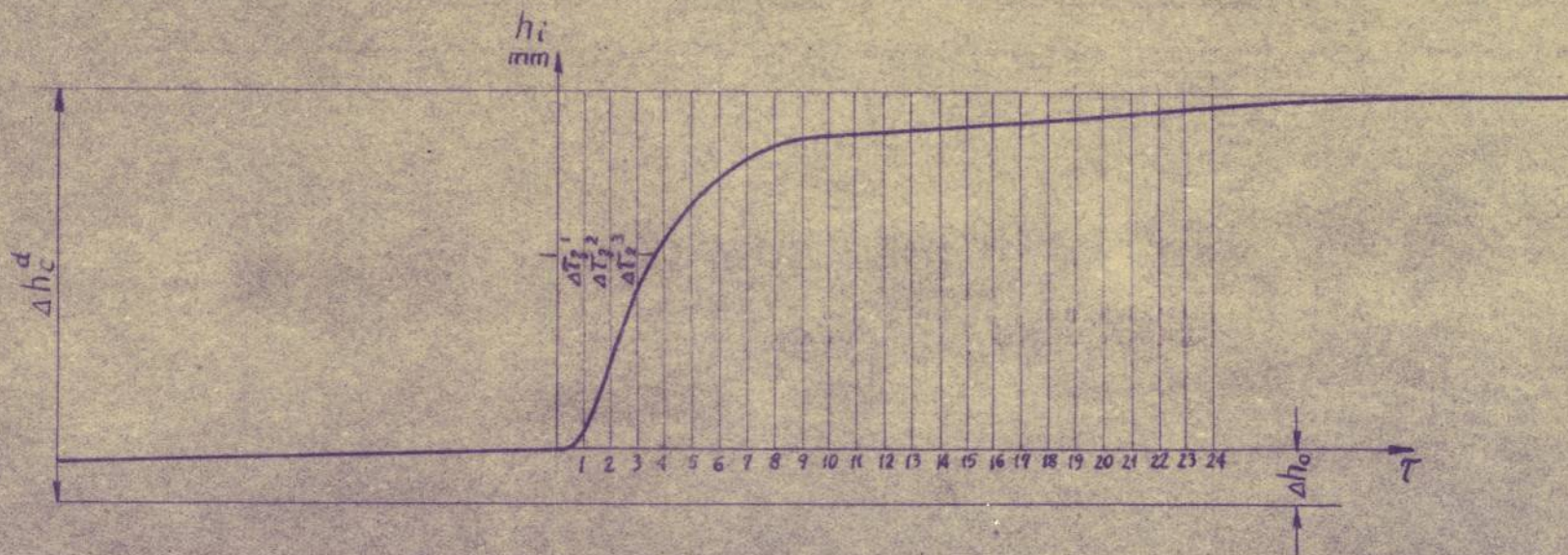
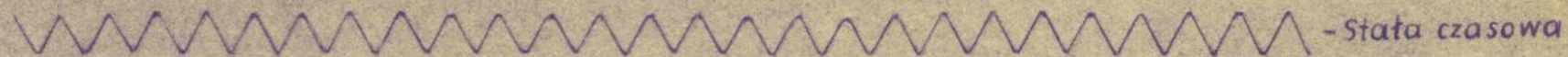
 - Stała czasowa



Rys. nr. 49



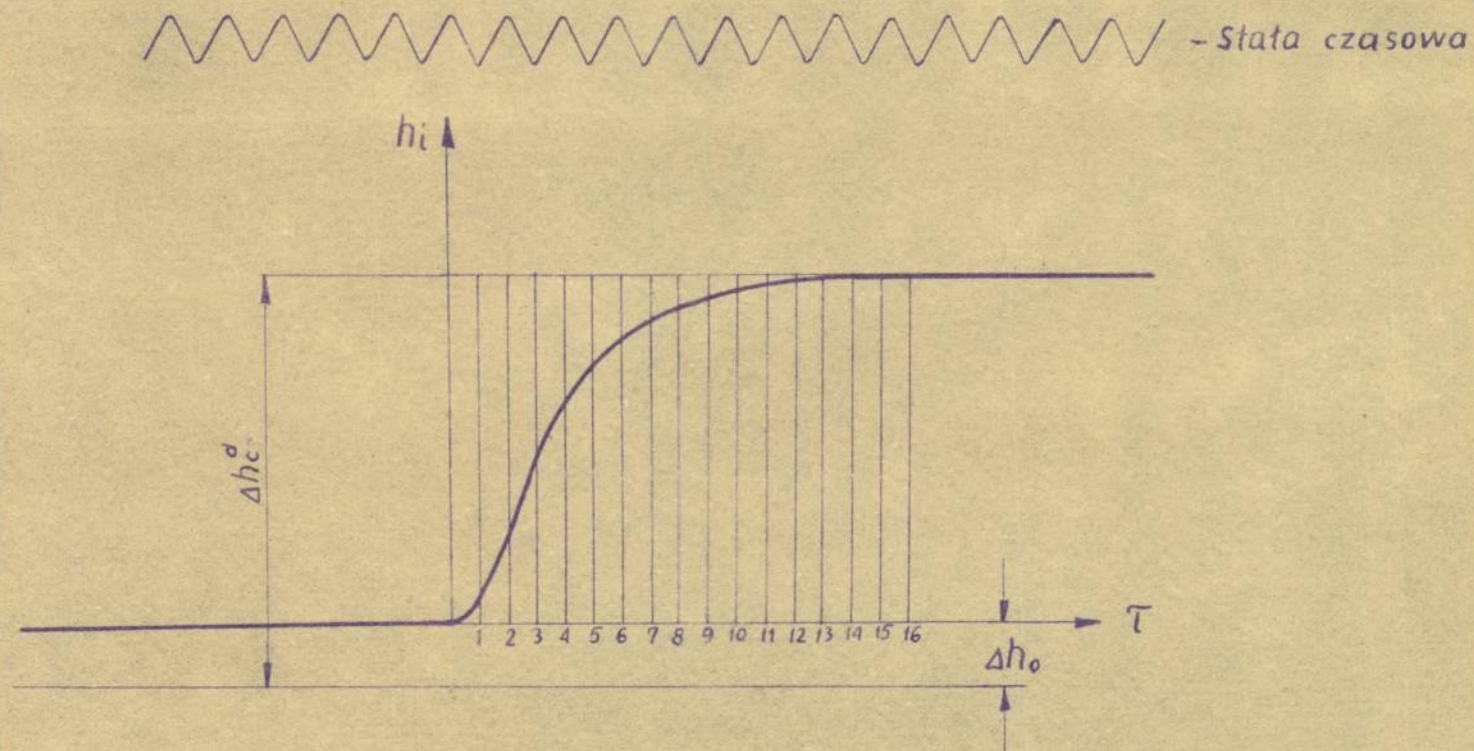
Nr. pom. 46



Rys. nr. 50



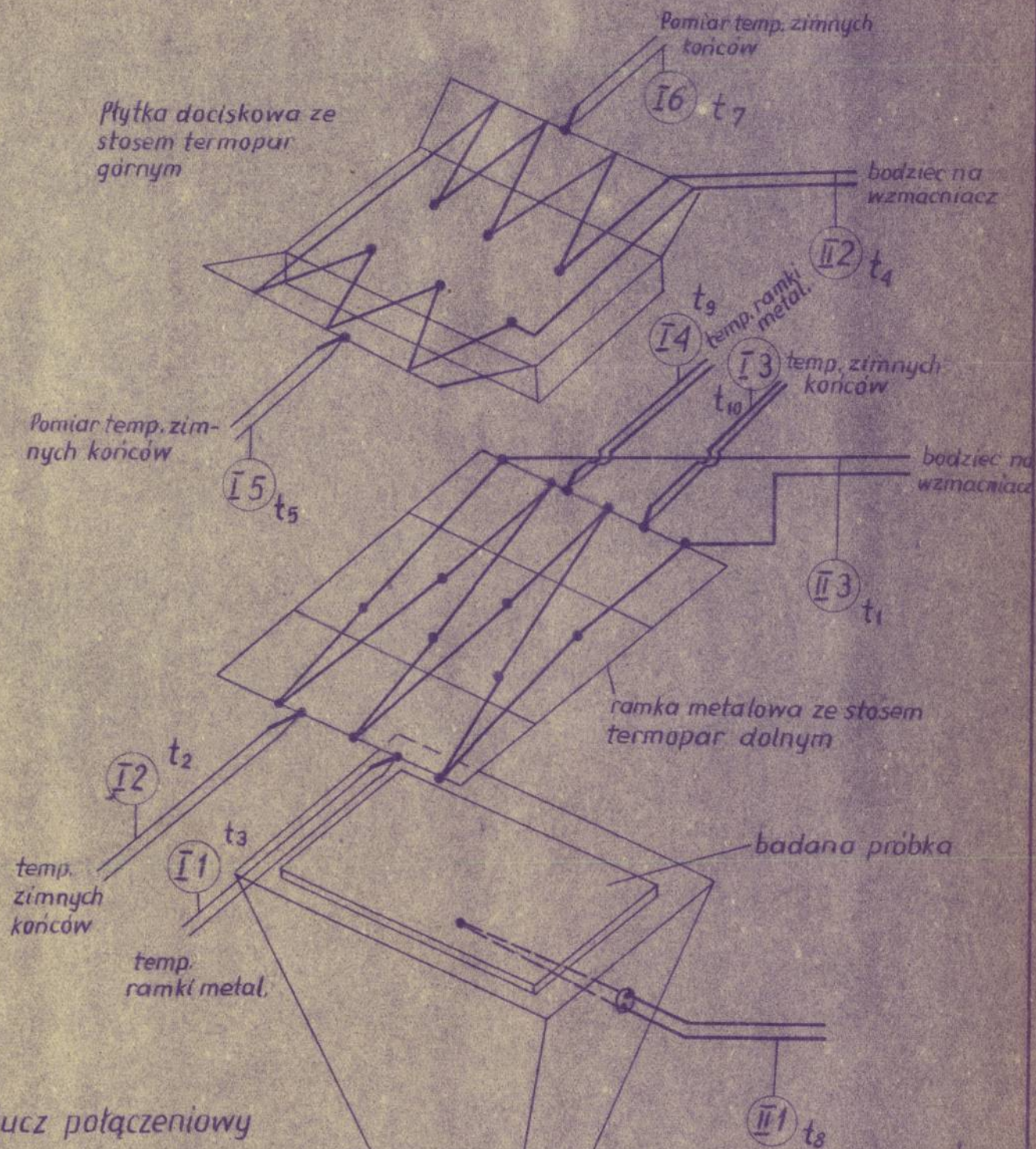
Nr. pom. 47



Rys. nr. 51



Perspektywiczny schemat kluczowy rozmieszczenia termopar  
na stoisku pomiarowym podstawowym



### Klucz potężeniowy

$\bar{I}$  - termopara przyłączona do przetwornika  $\bar{I}$  (lewego) ze wskaźnikiem  $W_1$  nr. 2203146

$\bar{II}$  - termopara przyłączona do przetwornika  $\bar{II}$  (prawego) ze wskaźnikiem  $W_2$  nr. 2508514

1, 2, 3, ... liczba określająca położenie danego przetwornika

np.  $\bar{I}1$  - odczyt dokonać na wskaźniku  $W_1$  przy położeniu przetwornika  $\bar{I}$  (lewego) na 1

$t_1, t_2, \dots$  oznaczenia mierzonych temperatur (patrz rys. 19)



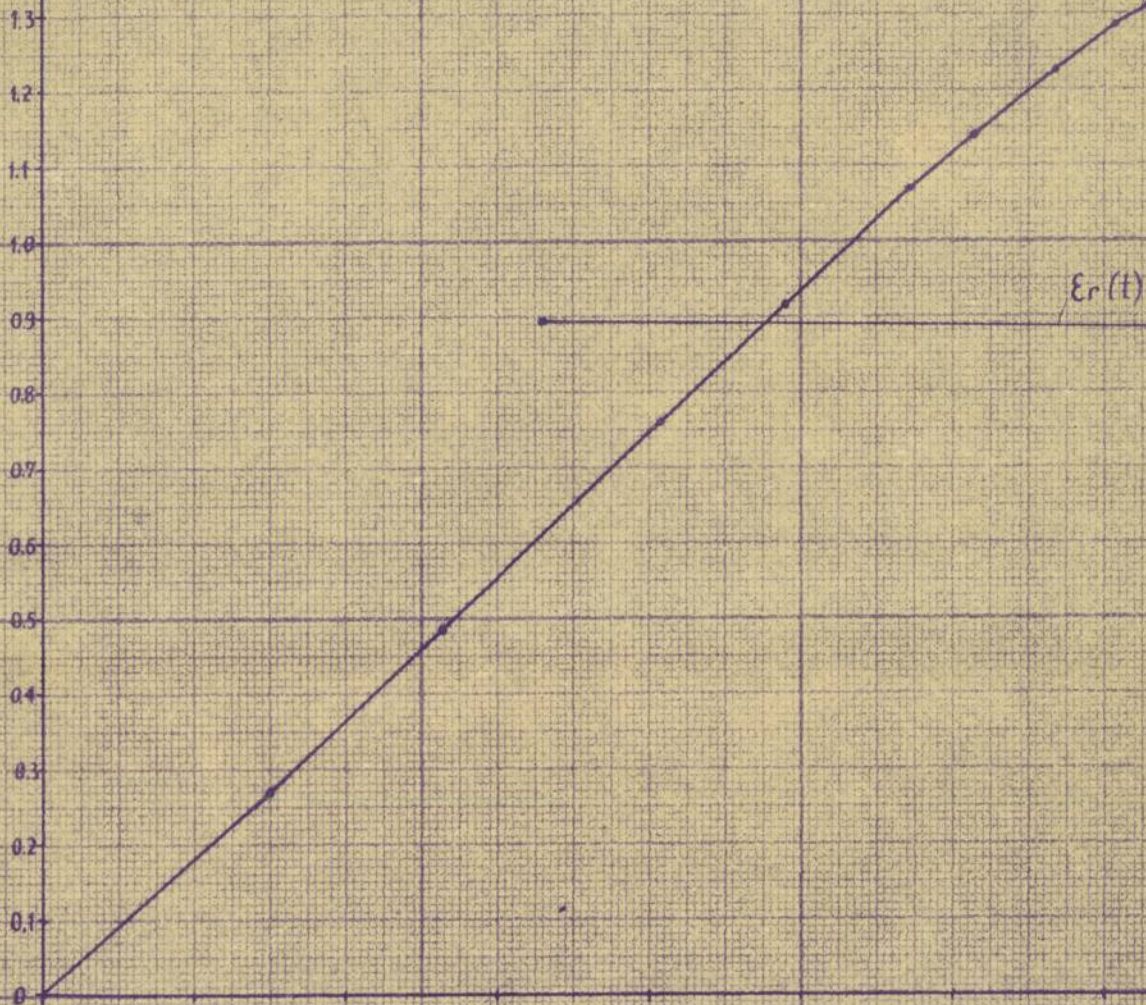
$10^3 \epsilon_{max}$

1.3  
1.2  
1.1  
1.0  
0.9  
0.8  
0.7  
0.6  
0.5  
0.4  
0.3  
0.2  
0.1  
0

0 20 40 60 80 100 120 140  $\Delta t_{skr}$   
286 266 246 226 206 186 166 146  $t_{skr}$

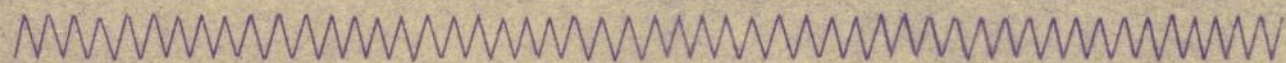
$\epsilon_r(t)$

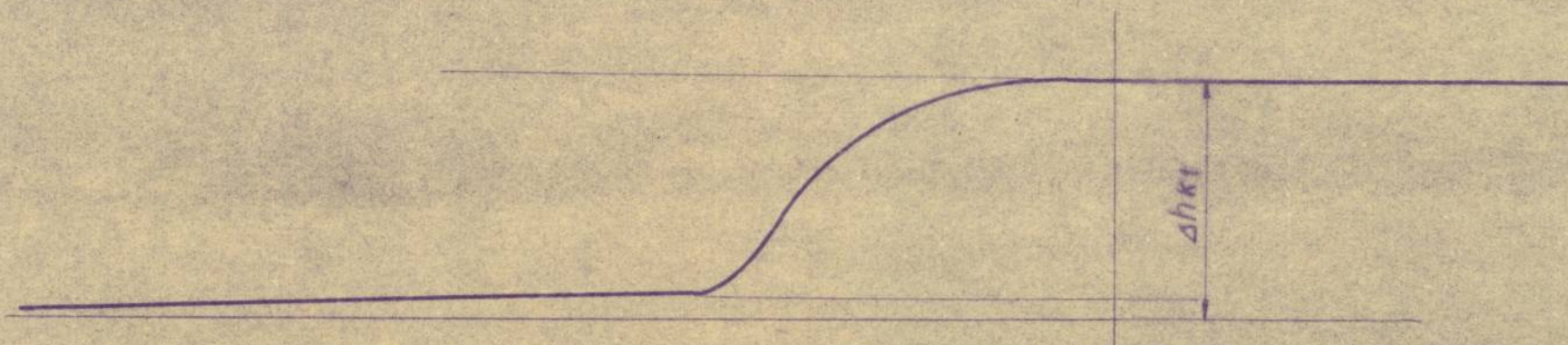
Rys. nr 60





Pomiar kontrolny 2

 - stała czasowa

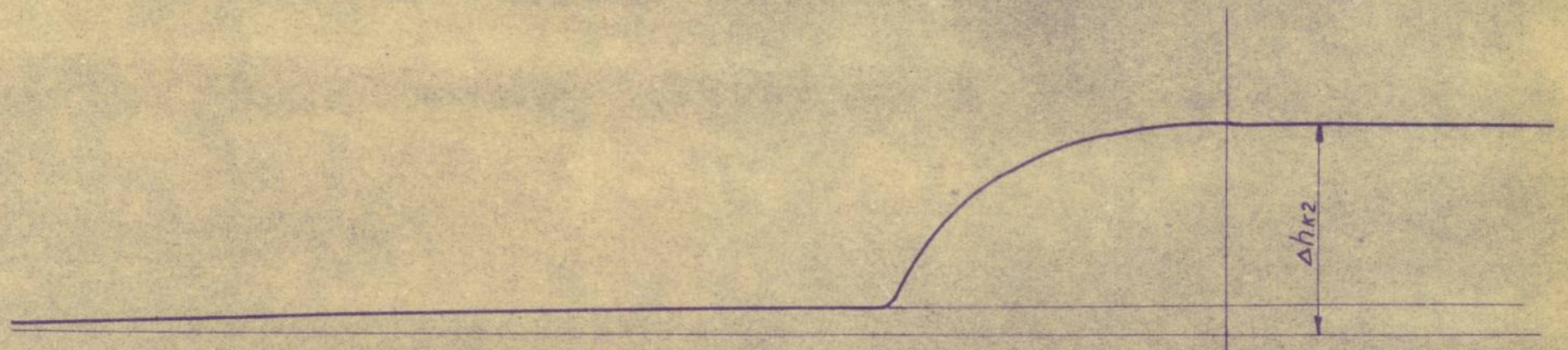


Rys. nr. 64



Pomiar kontrolny 1

~~~~~ - Stała czasowa



Rys.nr. 65



## Wyniki pomiarów przeprowadzonych na rozrywance

Tabela 1

| 1  | 2                    | 3       | 4  | 5         | 6          | 7         | 8         | 9          | 10          | 11          | 12          | 13          | 14         | 15         | 16                   | 17                                      | 18          | 19      | 20                   | 21                                   | 22                                       |
|----|----------------------|---------|--|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|----------------------|---|-------------|---------|----------------------|--------------------------------------|--|
| Lp | t <sub>p</sub><br>°C |         | Wskaźniki czujników przy obciążeniu w kg |           |            |           |           |            |             |             |             |             |            |            | P <sub>r</sub><br>kg | 4 l <sub>r</sub><br>x10 <sup>6</sup> mm | wyn. próbki |         | F<br>mm <sup>2</sup> | σ <sub>r</sub><br>kg/mm <sup>2</sup> | Uwagi                                    |
|    |                      |         | 2  | 5         | 10         | 15        | 20        | 25         | 30          | 35          | 40          | 45          | 50         | 55         |                      |   | h<br>mm     | s<br>mm |                      |                                      |  |
| 1  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 0<br>5    | 0<br>11    | 0<br>18   | 9<br>18   | 16<br>18   | 28<br>18    | 36<br>18    |             |             |            |            | 38,8                 | 45<br>18                                | 3,21        | 6,7     | 21,4                 | 1,81                                 |  |
| 2  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 4<br>8    | 15<br>8    | 25<br>8   | 35<br>10  | 40<br>25   | 35<br>38    |             |             |             |            |            | 43,0                 | 10<br>90                                | 3,27        | 6,8     | 22,2                 | 1,93                                 |  |
| 3  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 8<br>0    | 50<br>-20  | 80<br>-25 |           |            |             |             |             |             |            |            | 21,0                 |   | 3,45        | 7,2     | 24,8                 | 0,85                                 | silne ście-<br>cie próbki<br>/asymetria/ |
| 4  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 10<br>-5  | +70<br>-60 |           |           |            |             |             |             |             |            |            | 27,0                 |   | 3,29        | 6,5     | 21,4                 | 1,27                                 | - " -                                    |
| 5  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   |           |            |           |           |            |             |             |             |             |            |            | 23,0                 |   | 3,50        | 7,0     | 24,5                 | 0,94                                 | - " -                                    |
| 6  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 5<br>0    | 15<br>0    | 30<br>-8  | 58<br>-22 | 93<br>-52  | 110<br>-62  | 115<br>-72  | 140<br>-72  | 160<br>-74  | 165<br>-74 | 179<br>-74 | 54,0                 | 179<br>-74                              | 3,45        | 7,4     | 25,5                 | 2,12                                 |  |
| 7  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 5<br>0    | 8<br>30    |           |           |            |             |             |             |             |            |            | 32,0                 |   | 2,70        | 6,8     | 18,3                 | 1,75                                 | czujniki<br>zacięły się                  |
| 8  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 20<br>-10 | 65<br>-30  | 50<br>-30 | 90<br>-35 | 125<br>-55 | 150<br>-80  | 200<br>-165 | 230<br>-165 |             |            |            | 43,0                 | 245<br>-165                             | 2,68        | 6,5     | 17,5                 | 2,46                                 |  |
| 9  | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   |           |            |           |           |            |             |             |             |             |            |            | 38,8                 |   | 2,80        | 6,8     | 19,0                 | 2,04                                 | obciążenie<br>nie do mo-<br>cow. czujn.  |
| 10 | 20                   | I<br>II | 0<br>0                                   | 2<br>0    | 5<br>10    | 8<br>20   | -20<br>70 | -95<br>130 | -120<br>190 | -150<br>230 | -190<br>300 | -130<br>240 |            |            | 47,0                 | -140<br>250                             | 2,70        | 6,5     | 1,75                 | 2,68                                 |  |
| 11 | 100                  | I<br>II | 0<br>0                                   | 4<br>14   | 4<br>16    | 14<br>17  | 30<br>17  | 40<br>17   | 60<br>17    | 70<br>17    | 72<br>17    | 77<br>25    | 77<br>48   |            | 55,0                 | 78<br>48                                | 3,45        | 7,3     | 24,7                 | 2,22                                 |  |
| 12 | 100                  | I<br>II | 0<br>0                                   | 2<br>0    | 10<br>0    | 20<br>0   | 25<br>0   | 30<br>0    | 50<br>-15   | 85<br>-15   | 100<br>-15  | 120<br>-15  | 140<br>-15 |            | 52,0                 | 140<br>-15                              | 3,43        | 7,4     | 25,4                 | 2,05                                 |  |
| 13 | 100                  | I<br>II | 0<br>0                                   | -5<br>25  | -5<br>50   | -17<br>60 | -30<br>80 | -30<br>93  | -30<br>110  | -30<br>120  |             |             |            |            | 35,6                 | -30<br>120                              | 3,25        | 7,0     | 22,7                 | 1,59                                 |  |



c.d. tabeli 1

| 1  | 2   | 3       | 4      | 5          | 6          | 7           | 8           | 9           | 10          | 11         | 12         | 13          | 14          | 15          | 16   | 17          | 18   | 19  | 20   | 21   | 22   |
|----|-----|---------|--------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|------|-----|------|------|--|
| 14 | 100 | I<br>II | 0<br>0 | 70<br>-20  | 100<br>-80 | 150<br>-120 | 190<br>-170 | 200<br>-170 |             |            |            |             |             |             | 30,0 |             | 3,95 | 6,7 | 22,4 | 1,34 | silne<br>zginanie                          |
| 15 | 100 | I<br>II | 0<br>0 | 0<br>0     | 5<br>3     | 5<br>20     | 5<br>35     | 10<br>43    | 23<br>43    | 38<br>43   | 52<br>43   |             |             |             | 44,0 | 65<br>43    | 2,88 | 6,9 | 19,9 | 2,21 |  |
| 16 | 100 | I<br>II | 0<br>0 | -1<br>0    | -1<br>0    | +5<br>0     | 40<br>0     | 80<br>0     | 120<br>0    | 148<br>0   | 168<br>-90 | 200<br>-100 | 250<br>-170 | 260<br>-170 | 65,0 | 285<br>-177 | 3,00 | 7,3 | 21,9 | 2,97 | na początku<br>czujnik II<br>zaciął się    |
| 17 | 100 | I<br>II | 0<br>0 | 5<br>5     | 15<br>25   | 15<br>42    | 15<br>55    | 20<br>60    | 34<br>61    | 49<br>61   | 65<br>61   | 80<br>61    |             |             | 49,0 | 96<br>61    | 2,97 | 6,7 | 19,9 | 2,47 |  |
| 18 | 100 | I<br>II | 0<br>0 | 4<br>0     | 33<br>0    | 50<br>0     | 93<br>0     | 137<br>0    | 170<br>0    | 197<br>0   | 220<br>0   | 238<br>0    | 243<br>0    |             | 52,0 |             | 3,03 | 7,6 | 23,0 | 2,26 | czujnik II<br>zaciął się                   |
| 19 | 100 | I<br>II | 0<br>0 |            |            |             |             |             |             |            |            |             |             |             | 31,0 |             | 2,83 | 6,0 | 17,0 | 1,83 | czujniki<br>obluzowa-<br>ły się            |
| 20 | 100 | I<br>II | 0<br>0 | 0<br>5     | 0<br>10    | -20<br>35   | -50<br>70   | -75<br>100  | -120<br>150 |            |            |             |             |             | 31,0 | -125<br>156 | 2,71 | 7,2 | 19,5 | 1,59 |  |
| 21 | 200 | I<br>II | 0<br>0 | 20<br>-20  | 17<br>-10  | -30<br>-10  | 50<br>-10   | 120<br>-70  |             |            |            |             |             |             | 27,0 | 140<br>-80  | 3,28 | 7,0 | 22,9 | 1,18 |  |
| 22 | 200 | I<br>II | 0<br>0 | -10<br>10  | +50<br>100 | -60<br>120  | -64<br>145  |             |             |            |            |             |             |             | 20,6 | -65<br>142  | 3,48 | 6,9 | 24,0 | 0,86 | silne<br>gięcie                            |
| 23 | 200 | I<br>II | 0<br>0 | -30<br>+10 |            |             |             |             |             |            |            |             |             |             | 16,2 |             | 3,40 | 7,0 | 23,8 | 0,68 | peka w u-<br>chwycie pom.<br>wyklucz.      |
| 24 | 200 | I<br>II | 0<br>0 | 20<br>0    | 60<br>0    | 100<br>-3   | 127<br>-3   | 145<br>-3   | 158<br>-3   | 170<br>-3  | 181<br>-5  |             |             |             | 42,2 | 190<br>-5   | 3,55 | 7,1 | 25,2 | 1,68 |  |
| 25 | 200 | I<br>II | 0<br>0 |            |            |             |             |             |             |            |            |             |             |             | 41,2 |             | 3,21 | 6,4 | 20,5 | 2,01 | uchwyty czuj-<br>ników oblu-<br>zowały się |
| 26 | 200 | I<br>II | 0<br>0 |            |            | -170<br>210 | -170<br>225 | -170<br>242 |             |            |            |             |             |             | 29,0 | -170<br>270 | 3,50 | 6,7 | 23,4 | 1,20 |  |
| 27 | 200 | I<br>II | 0<br>0 | 5<br>0     | 20<br>0    | 30<br>0     | 45<br>0     | 56<br>0     | 70<br>0     | 80<br>10   | 85<br>30   |             |             |             | 43,0 | 87<br>30    | 3,19 | 6,7 | 21,3 | 2,02 |  |
| 28 | 200 | I<br>II | 0<br>0 |            |            |             | 70<br>-40   | 100<br>-55  | 120<br>-60  | 140<br>-60 | 160<br>-60 |             |             |             | 43,0 | 192<br>-60  | 3,48 | 7,1 | 24,7 | 1,74 |  |







## Wyniki pomiarów wykonanych na zginarce

Tabela 2

| Lp | t<br>°C | 100 . f mm - Ugięcie przy obciążeniu P kG |      |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |        | Pr<br>kG | Wymiary<br>100.f próbki |      |              |  | Uwagi |
|----|---------|---|------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|----------|-------------------------|------|--------------|--|-------|
|    |         | 1   | 2    | 3  | 4  | 5   | 5,5 | 60  | 6,5 | 70  | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10  | 11  | mm     |          | mm                      | mm   | mm           |  |       |
| 1  | 20      | 24  | 52   | 70 | 93 | 115 | 127 | 138 | 150 | 160 | -   | 179 | -   | 202 |     |     |     | 9,320  | 228      | 19,7                    | 3,71 | 19,5.<br>62. |  |       |
| 2  | 20      | 23  | 54   | 72 | 96 | 120 | 131 | 144 | 157 | 169 | -   | 192 | -   | 217 | -   | 236 | 258 | 11,880 | 276      | 20,5                    | 3,63 |              |  |       |
| 3  | 20      | 20,5                                      | 48   | 65 | 85 | 105 | 116 | 126 | 139 | 146 | -   | 165 | -   |     |     |     |     | 8,270  | 169      | 22,0                    | 3,65 |              |  |       |
| 4  | 20      | 22,5                                      | 50   | 65 | 87 | 108 | 119 | 130 | 142 | 151 | -   | 170 | -   | 191 | 202 |     |     | 9,670  | 206      | 19,8                    | 3,77 |              |  |       |
| 5  | 20      | 21,0                                      | 49   | 64 | 87 | 108 | 119 | 129 | 142 | 151 | -   | 171 | -   |     |     |     |     | 8,030  | 174      | 19,5                    | 3,77 |              |  |       |
| 6  | 20      | 22  | 50   | 66 | 90 | 112 | 124 | 135 | 147 | 157 | -   | 179 |     |     |     |     |     | 8,00   | 179      | 20,0                    | 3,68 |              |  |       |
| 7  | 20      | 22  | 51   | 68 | 91 | 111 | 124 | 134 | 147 | 155 | -   | 174 | -   | 194 |     |     |     | 9,010  | 195      | 22,5                    | 3,55 |              |  |       |
| 8  | 20      | 22  | 50   | 68 | 91 | 114 | 126 | 136 | 149 | 158 | -   | 178 | -   |     |     |     |     | 8,230  | 184      | 19,6                    | 3,71 |              |  |       |
| 9  | 20      | 22  | 50   | 68 | 90 | 114 | 125 | 135 | 148 | 158 | -   | 178 |     |     |     |     |     | 8,00   | 178      | 19,9                    | 3,72 |              |  |       |
| 10 | 20      | 22  | 50,5 | 65 | 88 | 109 | 120 | 130 | 144 | 152 | -   | 172 | -   | 192 |     |     |     | 9,150  | 198      | 20,3                    | 3,73 |              |  |       |
| 11 | 20      | 21  | 49   | 65 | 87 | 106 | 117 | 128 | 140 | 149 | -   | 166 | -   | 186 |     |     |     | 9,280  | 192      | 20,3                    | 3,73 |              |  |       |
| 12 | 20      | 21,5                                      | 50   | 65 | 90 | 109 | 120 | 131 | 144 | 152 | -   | 171 | -   | 192 |     |     |     | 9,500  | 204      | 19,8                    | 3,75 |              |  |       |
| 13 | 120     | 20,5                                      | 18   | 65 | 86 | 108 | 120 | 130 | 142 | 150 | -   | 171 | -   |     |     |     |     | 8,780  | 187      | 19,7                    | 3,76 | 22,5.<br>62. |  |       |
| 14 | 120     | 22,5                                      | 52   | 70 | 92 | 111 | 127 | 145 | 154 | 161 | -   | 181 |     |     |     |     |     | 8,130  | 184      | 20,0                    | 3,72 |              |  |       |



c.d.tabeli 2

| 1  | 2   | 3    | 4  | 5  | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17 | 18 | 19    | 20  | 21   | 22   | 23           |
|----|-----|------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-------|-----|------|------|--------------|
| 15 | 120 | 22,0 | 51 | 70 | 91  | 114 | 125 | 135 | 143 | 158 | -   |     |     |     |     |    |    | 7,960 | 178 | 20,0 | 3,74 | 22,5.<br>62. |
| 16 | 120 | 22,5 | 51 | 68 | 89  | 111 | 122 | 133 | 144 | 153 | -   | 172 |     |     |     |    |    | 8,77  | 188 | 20,3 | 3,78 |              |
| 17 | 120 | 24,0 | 53 | 70 | 92  | 115 | 127 | 138 | 150 | 159 | 169 | 179 | 190 | 212 |     |    |    | 9,000 | 212 | 19,8 | 3,71 |              |
| 18 | 120 | 23   | 52 | 70 | 91  | 117 | 127 | 137 | 150 | 160 | 169 |     |     |     |     |    |    | 7,780 | 174 | 20,0 | 3,79 |              |
| 19 | 120 | 25   | 60 | 79 | 108 | 133 | 144 | 161 | 173 | 182 | 194 | 206 | 223 |     |     |    |    | 9,280 | 241 | 20,4 | 3,53 |              |
| 20 | 120 | 24   | 54 | 72 | 95  | 118 | 130 | 145 | 156 | 165 | 175 | 187 | 200 | -   | 223 |    |    | 9,550 | 225 | 19,7 | 3,70 | 5,6.<br>62.  |
| 21 | 120 | 23   | 52 | 70 | 92  | 117 | 128 | 142 | 153 | 162 | 171 | 182 | 193 | -   | 215 |    |    | 9,640 | 220 | 20,0 | 3,72 |              |
| 22 | 120 | 23   | 50 | 69 | 90  | 113 | 124 | 140 | 150 | 159 | 169 | 179 | 190 | 202 |     |    |    | 9,850 | 221 | 19,5 | 3,78 |              |
| 23 | 220 | 24   | 53 | 70 | 91  | 115 | 125 | 135 | 149 | 157 | 171 |     |     |     |     |    |    | 7,990 | 179 | 20,1 | 3,72 |              |
| 24 | 220 | 24   | 54 | 72 | 94  | 119 | 131 | 144 | 156 | 168 | 180 | 191 | 203 | 215 | -   |    |    | 9,640 | 230 | 20,2 | 3,71 |              |
| 25 | 220 | 24   | 55 | 73 | 95  | 122 | 134 | 150 | 159 | 169 | 183 | 194 | 206 | 218 | -   |    |    | 9,020 | 220 | 20,0 | 3,71 |              |
| 26 | 220 | 24   | 53 | 72 | 93  | 120 | 130 | 140 | 156 | 164 | 179 | 190 |     |     |     |    |    | 8,375 | 198 | 19,8 | 3,74 |              |
| 27 | 220 | 24   | 55 | 73 | 98  | 123 | 135 | 152 | 162 | 171 | 185 | 196 |     |     |     |    |    | 8,085 | 200 | 20,3 | 3,67 |              |
| 28 | 220 | 25   | 56 | 76 | 99  | 127 | 139 | 149 | 165 | 179 | 193 | 204 | 212 | 229 |     |    |    | 9,300 | 236 | 19,5 | 3,68 |              |
| 29 | 220 | 23   | 52 | 69 | 90  | 115 | 126 | 140 | 151 | 164 | 174 | 184 | 195 |     |     |    |    | 8,560 | 196 | 20,0 | 3,75 |              |
| 30 | 220 | 23   | 52 | 68 | 91  | 114 | 126 | 140 | 152 | 164 | 173 | 183 | 194 |     |     |    |    | 8,995 | 205 | 19,8 | 3,75 |              |



e.d.tabeli 2

| 1  | 2   | 3    | 4  | 5  | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16 | 17 | 18 | 19    | 20  | 21   | 22   | 23          |
|----|-----|------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-------|-----|------|------|-------------|
| 31 | 220 | 26   | 55 | 72 | 95  | 119 | 132 | 146 | 156 | 167 | 180 | 192 | 203 |     |    |    |    | 8,575 | 205 | 20,0 | 3,72 |             |
| 32 | 220 | 24   | 54 | 73 | 96  | 121 | 134 | 145 | 159 | 168 | 184 | 195 | 205 |     |    |    |    | 8,500 | 205 | 19,7 | 3,73 |             |
| 33 | 320 | 23   | 53 | 71 | 94  | 118 | 130 | 143 | 155 | 165 | 181 | 190 | 204 | 215 |    |    |    | 9,090 | 219 | 19,8 | 3,73 | 9.8.<br>62. |
| 34 | 320 | 25   | 55 | 73 | 98  | 123 | 135 | 147 | 159 |     |     |     |     |     |    |    |    | 7,070 | 173 | 19,1 | 3,72 |             |
| 35 | 320 | 27,5 | 60 | 80 | 110 | 135 | 148 | 160 | 175 | 187 | 205 | 217 | 228 | 243 |    |    |    | 9,310 | 250 | 19,2 | 3,60 |             |
| 36 | 320 | 28   | 61 | 81 | 109 | 138 | 150 | 162 | 175 |     |     |     |     |     |    |    |    | 6,500 | 175 | 21,5 | 3,46 |             |
| 37 | 320 | 22   | 49 | 65 | 87  | 110 | 121 | 134 | 143 | 155 |     |     |     |     |    |    |    | 7,090 | 156 | 20,7 | 3,73 |             |
| 38 | 320 | 23   | 53 | 73 | 98  | 123 | 134 | 146 | 161 | 168 | 183 | 195 | 205 | 218 |    |    |    | 10,00 | 240 | 19,7 | 3,72 |             |
| 39 | 320 | 25   | 56 | 76 | 100 | 124 | 137 | 153 | 163 | 177 | 189 |     |     |     |    |    |    | 8,075 | 202 | 20,0 | 3,70 |             |
| 40 | 320 | 23   | 45 | 65 | 87  | 108 | 119 | 130 | 141 | 151 | 162 | 173 | -   |     |    |    |    | 8,130 | 176 | 20,4 | 3,78 |             |
| 41 | 320 | 28   | 61 | 83 | 110 | 139 | 152 | 171 | 181 | 193 | 206 | 220 | 231 | 260 |    |    |    | 9,050 | 265 | 19,1 | 3,61 |             |
| 42 | 320 | 26   | 60 | 80 | 105 | 132 | 143 | 158 | 175 | 184 |     |     |     |     |    |    |    | 7,890 | 204 | 20,4 | 3,60 |             |
| 43 | 320 | 24   | 58 | 77 | 102 | 126 | 136 | 144 | 171 | 180 | 197 | 209 | 221 | 232 |    |    |    | 9,080 | 236 | 20,3 | 3,60 |             |
| 44 | 320 | 28   | 60 | 80 | 107 | 135 | 150 | 167 | 177 | 188 | 205 | 218 | 230 | 245 |    |    |    | 9,800 | 265 | 19,8 | 3,59 |             |
| 45 | 320 | 27   | 58 | 80 | 105 | 132 | 146 | 160 | 170 | 180 | 197 | 209 | 222 |     |    |    |    | 8,500 | 223 | 20,6 | 3,55 |             |

s - szerokość próbki

h - grubość próbki

t - temperatura próbki



## Wyniki badań kontrolnych wykonanych na zginarce

Tabela 3

| Lp | t °C | P <sub>F</sub> | 100.f <sub>F</sub> | Wymiary próbki |      | Uwaga    |
|----|------|----------------|--------------------|----------------|------|----------|
|    |      | kG             | mm                 | s mm           | h mm |          |
| 1  | 24   | 3,750          | 200                | 9,7            | 3,54 | 25.8.62  |
| 2  | 24   | 4,500          | 218                | 10,8           | 3,53 |          |
| 3  | 24   | 4,730          | 193                | 12,2           | 3,56 |          |
| 4  | 24   | 5,350          | 175                | 14,0           | 3,65 |          |
| 5  | 24   | 4,990          | 200                | 11,1           | 3,76 |          |
| 6  | 24   | 4,000          | 172                | 10,9           | 3,64 |          |
| 7  | 24   | 4,550          | 165                | 11,8           | 3,77 |          |
| 8  | 24   | 4,750          | 245                | 10,0           | 3,53 |          |
| 9  | 24   | 5,750          | 270                | 10,9           | 3,52 |          |
| 10 | 24   | 4,500          | 230                | 10,0           | 3,53 |          |
| 11 | 20   | 13,030         | 195                | 29,6           | 3,70 | 28.8.62. |
| 12 | 20   | 11,000         | 195                | 28,8           | 3,57 |          |
| 13 | 20   | 12,010         | 216                | 29,1           | 3,54 |          |
| 14 | 20   | 14,300         | 225                | 31,3           | 3,65 |          |
| 15 | 20   | 9,950          | 226                | 24,6           | 3,55 |          |
| 16 | 20   | 13,405         | 192                | 29,4           | 3,76 |          |



Tabela 4

| Pomiar 1 |                 | Pomiar 2 |                 |               |                         | Pomiar 3 |                 | Pomiar 4       |                 |
|----------|-----------------|----------|-----------------|---------------|-------------------------|----------|-----------------|----------------|-----------------|
| temp.    | $10^2 \Delta l$ | temp.    | $10^2 \Delta l$ | c.d.<br>temp. | c.d.<br>$10^2 \Delta l$ | temp.    | $10^2 \Delta l$ | temp.          | $10^2 \Delta l$ |
| mV       | mm              | mV       | mm              | mV            | mm                      | mV       | mm              | mV             | mm              |
| 0,8      | 0               | 1,6      | 0               | 13            | 203                     | 3,2      | 0               | 0,2            | 0               |
| 1,5      | 0               | 2,7      | 0               | 12,5          | 195                     | 4        | 0               | 0,4            | 0               |
| 2        | 0,5             | 3        | 0               | 12            | 183                     | 5        | 10              | 0,6            | 0               |
| 3,5      | 4               | 3,5      | 2               | 11            | 173                     | 6        | 21              | 0,8            | 0               |
| 4        | 6               | 4        | 6               | 10            | 159                     | 7        | 33              | 1              | 0               |
| 4,5      | 10              | 4,5      | 10              | 9,5           | 150                     | 8        | 47              | 1,5            | 1               |
| 5        | 14              | 5        | 15              | 9             | 142                     | 9        | 60              | 2              | 45              |
| 5,5      | 18              | 5,5      | 20              | 8             | 127                     | 10       | 74              | 2,5            | 4               |
| 6,0      | 23              | 6        | 25              | 7,5           | 119                     | 11       | 88              | 3              | 7               |
| 6,5      | 27              | 6,5      | 30              | 7             | 112                     | 12       | 105             | 4              | 16              |
| 7,0      | 35              | 7        | 38              | 6,5           | 104                     | 13       | 118             | 5              | 22              |
| 7,5      | 43              | 7,5      | 46              | 5,5           | 90                      | 14       | 132             | 6              | 29              |
| 8        | 50              | 8        | 53              | 5             | 83                      | 15       | 147             | 7              | 37              |
| 9        | 63              | 9        | 67              |               |                         | 16       | 165             | 8              | 51              |
| 10       | 79              | 9,5      | 75              |               |                         | 17       | 181             | 9              | 63              |
| 11       | 91              | 10       | 83              |               |                         | 18       | 195             | 10             | 77              |
| 12       | 107             | 10,5     | 90              |               |                         | 18,4     | 204             | 11             | 90              |
| 13       | 120             | 11       | 97              |               |                         | 18,4     | 204             | 12             | 105             |
| 14       | 136             | 11,5     | 105             |               |                         | 14       | 203             | 13             | 119             |
| 15       | 148             | 12       | 113             |               |                         | 13       | 195             | 14             | 130             |
| 16       | 160             | 12,5     | 120             |               |                         | 12       | 180             | 15             | 146             |
| 17       | 178             | 13       | 126             |               |                         |          |                 | 16             | 159             |
| 18       | 190             | 13,5     | 133             |               |                         |          |                 | 17             | 173             |
| 18       | 190             | 14       | 140             |               |                         |          |                 | 18             | 188             |
| 17       | 190             | 14,5     | 150             |               |                         |          |                 | 18,05          | 190             |
| 16       | 190             | 15       | 157             |               |                         |          |                 | 17             | 190             |
| 15       | 190             | 15,5     | 166             |               |                         |          |                 | 16,3           | 190             |
| 14       | 190             | 16       | 172             |               |                         |          |                 | 16,5           | 190             |
| 13       | 188             | 16,5     | 178             |               |                         |          |                 | 16,5           | 190             |
| 11       | 170             | 17       | 188             |               |                         |          |                 | na drugi dzień |                 |
| 9        | 146             | 17,5     | 193             |               |                         |          |                 | 0,15           | 20              |
| 8        | 130             | 18       | 202             |               |                         |          |                 |                |                 |
| 7        | 110             | 18,5     | 208             |               |                         |          |                 |                |                 |
| 6        | 97              | 18       | 208             |               |                         |          |                 |                |                 |
| 5        | 80              | 16,7     | 208             |               |                         |          |                 |                |                 |
| 4        | 60              | 13,5     | 206             |               |                         |          |                 |                |                 |



Tabela 5

| Nr. pom.       | Pozycja przełącznika I |          |             |          |        |          | Pozycja przełącznika II |             | Uwagi  |
|----------------|------------------------|----------|-------------|----------|--------|----------|-------------------------|-------------|--------|
|                | 1                      | 2        | 3           | 4        | 5      | 6        | 1                       | 5           |        |
|                | $t_3$ °C               | $t_2$ °C | $t_{10}$ °C | $t_9$ °C | $t_5$  | $t_7$ °C | $t_8$ °C                | $t_{11}$ °C |        |
| 1              | 90                     | 83       | 87          | 92       | 77     | 85       | 280                     | -           |        |
| 2              | 92                     | 89       | 87          | 92       | 78     | 85       | 280                     | -           |        |
| 3              | 92                     | 90       | 88          | 96       | 75     | 78       | 285                     | -           |        |
| 4              | 90                     | 88       | 85          | 92       | 74     | 79       | 282                     | -           | stos   |
| 5              | 92                     | 91       | 89          | 97       | 70     | 70       | 279                     | -           | górnny |
| 6              | 83                     | 83       | 82          | 83       | 72     | 72       | 275                     |             |        |
| 7              | 87                     | 84       | 83          | 90       | 72     | 75       | 280                     | -           |        |
| 8              | 85                     | 84       | 70          | 88       | 73     | 73       | 275                     | -           |        |
| 9              | 92                     | 90       | 87          | 95       | 80     | 85       | 280                     | -           |        |
| 10             | 87                     | 86       | 83          | 90       | 68     | 69       | 270                     | -           |        |
| 11             | 90                     | 89       | 85          | 93       | 80     | 78       | 274                     | 222         |        |
| 12             | 92                     | 90       | 87          | 93       | 80     | 81       | 280                     | 224         |        |
| 13             | 88                     | 86       | 83          | 90       | 69     | 73       | 280                     | 225         |        |
| 14             | 90                     | 88       | 82          | 90       | 75     | 76       | 280                     | 225         | stos   |
| 15             | 96                     | 96       | 95          | 102      | 83     | 90       | 270                     | 219         | dol-   |
| 16             | 92                     | 90       | 90          | 98       | 76     | 78       | 270                     | 219         | ny     |
| 17             | 90                     | 88       | 87          | 97       | 75     | 83       | 268                     | 218         |        |
| 18             | 88                     | 87       | 84          | 93       | 70     | 80       | 265                     | 217         |        |
| 19             | 90                     | 87       | 87          | 94       | 82     | 87       | 268                     | 217         |        |
| 20             | 92                     | 91       | 88          | 97       | 80     | 81       | 270                     | 219         |        |
| śred.          | -                      | 89,2     | 86,8        | -        | 73,9   | 77,1     | 275,6                   | 220,5       |        |
| dla poz. od-10 | -                      | 11+20    | 11+20       | -        | 1 + 10 | 1 + 10   | 1 + 20                  | 11+20       |        |



T a b e l a 6

| 1     | 2            | 3   | 4    | 5    | 6     | 7               | 8               | 9               | 10              | 11              | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|-------|--------------|-----|------|------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_T$ | $f_T$        | $e$ | $h$  | $s$  | $b$   | $q$             | $h^2$           | $s^3$           | $b^3$           | $q^3$           | $h^3$ | $s^4$ | $b^4$ | $q^4$ | $h^4$ |
| kg    | $\times 100$ | mm  | mm   | mm   | mm    | mm <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup> | kg/mm | kg/mm | kg/mm | kg/mm | kg/mm |
| 1     | 9,320        | 223 | 19,7 | 3,71 | 73,09 | 271,15          | 1006,0          | 45,19           | 83,83           | 326,2           | 55555 | 48780 | 47619 | 46667 | 45512 |
| 2     | 11,880       | 276 | 20,5 | 3,63 | 74,62 | 270,87          | 983,1           | 45,14           | 81,92           | 415,8           | 55555 | 47619 | 45454 | 45454 | 44444 |
| 3     | 8,270        | 169 | 22,0 | 3,65 | 79,86 | 291,49          | 1063,9          | 48,58           | 88,66           | 289,4           | 58823 | 54054 | 52631 | 51471 | 51282 |
| 4     | 9,650        | 206 | 19,8 | 3,77 | 74,65 | 281,43          | 1061,0          | 46,90           | 88,42           | 337,7           | 62500 | 54054 | 51724 | 50725 | 50000 |
| 5     | 8,030        | 174 | 19,5 | 3,77 | 73,51 | 277,13          | 1044,8          | 46,18           | 87,07           | 281,0           | 66667 | 52631 | 50847 | 50000 | 50000 |
| 6     | 9,000        | 179 | 20,0 | 3,68 | 73,60 | 270,85          | 996,7           | 45,14           | 83,06           | 280,0           | 62500 | 50000 | 48387 | 47297 | 47059 |
| 7     | 9,010        | 195 | 22,5 | 3,55 | 79,87 | 283,54          | 1006,7          | 47,25           | 83,89           | 315,3           | 58823 | 50000 | 50000 | 47945 | 48193 |
| 8     | 8,230        | 184 | 19,6 | 3,71 | 72,72 | 269,79          | 1000,9          | 44,96           | 83,41           | 288,0           | 55555 | 48780 | 46875 | 46053 | 46512 |
| 9     | 8,000        | 173 | 19,9 | 3,72 | 74,03 | 275,39          | 1024,4          | 45,89           | 85,37           | 280,0           | 55555 | 50000 | 46875 | 46667 | 47059 |
| 10    | 9,150        | 198 | 20,3 | 3,73 | 75,72 | 282,44          | 1053,5          | 47,07           | 87,79           | 320,2           | 66667 | 52631 | 50847 | 50000 | 50000 |
| 11    | 9,280        | 192 | 20,3 | 3,73 | 75,72 | 282,44          | 1053,5          | 47,07           | 87,79           | 324,8           | 62500 | 52631 | 52631 | 51471 | 50633 |
| 12    | 9,500        | 204 | 19,8 | 3,75 | 74,25 | 276,44          | 1044,1          | 46,40           | 87,01           | 332,5           | 66667 | 50000 | 50847 | 50000 | 49383 |
| 13    | 8,780        | 187 | 19,7 | 3,76 | 74,07 | 278,50          | 1047,2          | 46,41           | 87,27           | 307,3           | 62500 | 52631 | 50000 | 48611 | 48780 |

Uwaga: Obliczenia dokonano przyjmując jako obciążenie wstępne obciążenie 2 kg.

G.S.D.



e.d. tabell 6

| 1  | 2     | 3   | 4    | 5    | 6     | 7      | 8      | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----|-------|-----|------|------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 14 | 8,130 | 184 | 20,0 | 3,72 | 74,40 | 276,77 | 1029,6 | 46,12 | 85,80 | 284,5 | 55555 | 50000 | 48387 | 46667 | 43010 |
| 15 | 7,960 | 178 | 20,0 | 3,74 | 74,80 | 279,75 | 1046,3 | 46,62 | 87,19 | 278,6 | 52631 | 50000 | 47619 | 47297 | 47619 |
| 16 | 8,770 | 188 | 20,3 | 3,78 | 76,73 | 290,04 | 1096,3 | 48,40 | 91,36 | 306,9 | 58823 | 52631 | 50000 | 49296 | 48780 |
| 17 | 9,000 | 212 | 19,8 | 3,71 | 73,46 | 272,54 | 1011,1 | 45,42 | 84,26 | 315,0 | 58823 | 51282 | 48387 | 47297 | 47059 |
| 18 | 7,780 | 174 | 20,0 | 3,73 | 74,60 | 278,26 | 1037,9 | 46,37 | 86,49 | 272,3 | 55555 | 51282 | 46154 | 46667 | 47059 |
| 19 | 9,280 | 241 | 20,4 | 3,53 | 72,01 | 254,19 | 897,3  | 42,36 | 78,77 | 324,8 | 52631 | 41667 | 41096 | 41667 | 39604 |
| 20 | 9,550 | 225 | 19,7 | 3,70 | 72,89 | 269,69 | 997,8  | 44,94 | 83,15 | 334,2 | 55555 | 48780 | 46875 | 46053 | 49383 |
| 21 | 9,640 | 220 | 20,0 | 3,72 | 74,40 | 276,77 | 1029,6 | 46,12 | 85,80 | 337,4 | 55555 | 50000 | 46154 | 46053 | 44444 |
| 22 | 9,850 | 221 | 19,5 | 3,78 | 73,71 | 278,62 | 1053,2 | 46,43 | 87,77 | 344,7 | 52631 | 50000 | 47619 | 47297 | 44444 |
| 23 | 7,990 | 179 | 20,1 | 3,72 | 74,77 | 278,14 | 1034,7 | 46,35 | 86,22 | 279,6 | 58823 | 51282 | 48387 | 48611 | 48780 |
| 24 | 9,640 | 230 | 20,2 | 3,71 | 74,94 | 278,05 | 1031,5 | 46,34 | 85,96 | 337,4 | 55555 | 50000 | 45154 | 45454 | 44444 |
| 25 | 9,025 | 198 | 20,0 | 3,71 | 74,20 | 275,29 | 1021,3 | 45,88 | 85,11 | 333,9 | 55555 | 50000 | 44776 | 44304 | 42105 |
| 26 | 8,375 | 198 | 19,8 | 3,74 | 74,05 | 276,95 | 1035,8 | 46,16 | 86,32 | 293,1 | 52631 | 50000 | 44776 | 45454 | 45977 |
| 27 | 8,085 | 200 | 20,3 | 3,57 | 74,50 | 273,41 | 1003,4 | 45,57 | 83,62 | 283,0 | 55555 | 46512 | 44118 | 43750 | 41237 |
| 28 | 9,300 | 236 | 19,5 | 3,68 | 71,76 | 264,08 | 971,8  | 44,01 | 80,98 | 325,5 | 50000 | 46512 | 42253 | 42169 | 43011 |
| 29 | 8,560 | 196 | 20,0 | 3,75 | 75,00 | 281,25 | 1054,7 | 46,87 | 87,89 | 299,6 | 58823 | 51282 | 47619 | 47297 | 45454 |



## c.d.o. tabeli 6

| 1  | 2      | 3   | 4    | 5    | 6     | 7      | 8      | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----|--------|-----|------|------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30 | 8,995  | 205 | 19,8 | 3,75 | 74,25 | 278,44 | 1044,1 | 46,41 | 87,01 | 314,8 | 62500 | 51282 | 48387 | 47297 | 45454 |
| 31 | 8,575  | 205 | 20,0 | 3,72 | 74,40 | 276,77 | 1029,6 | 46,13 | 85,80 | 300,1 | 58823 | 50000 | 46875 | 45454 | 43966 |
| 32 | 8,500  | 205 | 19,7 | 3,73 | 73,48 | 274,08 | 1022,3 | 45,68 | 85,19 | 297,5 | 52631 | 47619 | 44776 | 43750 | 43966 |
| 33 | 9,090  | 219 | 19,8 | 3,73 | 73,85 | 275,46 | 1027,5 | 45,91 | 85,62 | 318,1 | 55555 | 48980 | 46154 | 45454 | 44444 |
| 34 | 7,075  | 173 | 19,1 | 3,72 | 71,05 | 264,31 | 983,2  | 44,05 | 81,93 | 247,6 | 55555 | 46512 | 44118 | 43750 | 43478 |
| 35 | 9,310  | 250 | 19,2 | 3,60 | 69,12 | 248,83 | 895,8  | 41,47 | 74,65 | 325,8 | 50000 | 40000 | 40000 | 39773 | 40000 |
| 36 | 6,500  | 175 | 21,5 | 3,46 | 74,39 | 257,39 | 890,6  | 43,06 | 74,22 | 227,5 | 50000 | 41667 | 38961 | 39326 | 39604 |
| 37 | 7,090  | 156 | 20,7 | 3,76 | 77,83 | 292,64 | 1100,3 | 48,77 | 91,69 | 248,1 | 62500 | 51282 | 49180 | 48611 | 47059 |
| 38 | 10,000 | 240 | 19,7 | 3,72 | 73,28 | 272,60 | 1014,1 | 45,43 | 84,51 | 350,0 | 50000 | 44444 | 42857 | 43210 | 43011 |
| 39 | 8,075  | 192 | 20,0 | 3,70 | 74,00 | 273,80 | 1013,1 | 45,65 | 84,42 | 282,6 | 50000 | 45454 | 44118 | 43210 | 41237 |
| 40 | 8,130  | 176 | 20,4 | 3,78 | 77,11 | 291,48 | 1101,8 | 48,98 | 91,82 | 284,5 | 50000 | 47619 | 47619 | 47297 | 47059 |
| 41 | 9,050  | 265 | 19,1 | 3,61 | 68,95 | 248,91 | 898,6  | 41,48 | 74,88 | 316,7 | 45454 | 40816 | 38461 | 38461 | 36364 |
| 42 | 7,690  | 204 | 20,4 | 3,60 | 73,44 | 264,33 | 951,8  | 44,06 | 79,32 | 269,1 | 50000 | 44444 | 41667 | 42169 | 40816 |
| 43 | 9,080  | 236 | 20,3 | 3,60 | 73,08 | 263,09 | 947,1  | 43,84 | 78,92 | 317,8 | 52631 | 45454 | 44118 | 44872 | 46512 |
| 44 | 9,805  | 265 | 19,3 | 3,59 | 69,29 | 248,75 | 893,0  | 41,46 | 74,42 | 343,2 | 50000 | 42553 | 40000 | 38889 | 37383 |
| 45 | 8,500  | 223 | 20,6 | 3,55 | 73,13 | 259,61 | 921,6  | 43,27 | 76,80 | 297,5 | 45454 | 42553 | 40540 | 39773 | 39216 |



d.c. tabeli 6

| Typ | 17                    | 18                    | 19                    | 20                    | 21                    | 22                    | 23                    | 24                    | 25                    | 26                    | 27                    | 28  | 29            | 30                                   | 31                  |
|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------|--------------------------------------|---------------------|
|     | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10 \frac{4A_P}{A_I}$ | $10^4 \left( \frac{\Delta P}{\Delta I} \right)_i$ | $\frac{G}{I}$ | $E = \frac{9(A_B)}{3r \sqrt{G F_1}}$ | $6 = \frac{M_G}{W}$ |
|     | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm                 | kg/mm   | 1/mm          | kg/mm <sup>2</sup>                   | kg/mm <sup>2</sup>  |
| 1   | 45918                 | 46296                 | —                     | 47244                 | —                     | 46667                 | —                     | —                     | —                     | 41591                 | 472049                | 47285   | 1,6453        | 7784                                 | 7,218               |
| 2   | 43689                 | 43478                 | —                     | 43478                 | —                     | 42945                 | —                     | 43956                 | 44118                 | 44504                 | 544594                | 45391   | 1,6847        | 7647                                 | 9,211               |
| 3   | 49450                 | 51020                 | —                     | 51282                 | —                     | —                     | —                     | —                     | —                     | 51818                 | 471831                | 52426   | 1,5570        | 8163                                 | 5,957               |
| 4   | 48913                 | 49505                 | —                     | 50000                 | —                     | 49645                 | 49342                 | —                     | —                     | 49167                 | 565575                | 51416   | 1,5609        | 8025                                 | 7,200               |
| 5   | 48387                 | 49020                 | —                     | 49180                 | —                     | —                     | —                     | —                     | —                     | 48240                 | 464972                | 51653   | 1,5851        | 8189                                 | 6,084               |
| 6   | 45392                 | 46729                 | —                     | 46512                 | —                     | —                     | —                     | —                     | —                     | 46512                 | 441388                | 49043   | 1,6616        | 8149                                 | 6,201               |
| 7   | 46875                 | 48077                 | —                     | 48780                 | —                     | 48951                 | —                     | —                     | —                     | 48680                 | 496326                | 49633   | 1,6452        | 8166                                 | 6,673               |
| 8   | 45454                 | 46296                 | —                     | 46875                 | —                     | —                     | —                     | —                     | —                     | 46492                 | 428892                | 47655   | 1,6546        | 7885                                 | 6,406               |
| 9   | 45918                 | 46296                 | —                     | 46875                 | —                     | —                     | —                     | —                     | —                     | 46875                 | 432120                | 48013   | 1,6166        | 7762                                 | 6,102               |
| 10  | 47872                 | 49020                 | —                     | 49180                 | —                     | 49296                 | —                     | —                     | —                     | 48311                 | 513824                | 51382   | 1,5721        | 8078                                 | 6,803               |
| 11  | 49450                 | 50000                 | —                     | 51282                 | —                     | 51095                 | —                     | —                     | —                     | 50909                 | 522602                | 52260   | 1,5721        | 8216                                 | 6,900               |
| 12  | 47872                 | 49020                 | —                     | 49587                 | —                     | 49296                 | —                     | —                     | —                     | 48701                 | 511375                | 51136   | 1,5845        | 8403                                 | 7,166               |
| 13  | 47872                 | 49020                 | —                     | 48780                 | —                     | —                     | —                     | —                     | —                     | 48777                 | 456971                | 50774   | 1,5814        | 8029                                 | 6,621               |

Uwaga: Obliczenia dokonano przyjmując jako obciążenie wstępne obciążenie 2 kg. c.d.n.



c.d. tabell 6

| 10 | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24 | 25 | 26    | 27     | 28    | 29     | 30   | 31    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|-------|--------|-------|--------|------|-------|
| 14 | 44118 | 45871 | —     | 46512 |       |       |       |    |    | 46439 | 426559 | 47395 | 1,5085 | 7623 | 6,169 |
| 15 | 46392 | 46729 | —     |       |       |       |       |    |    | 46929 | 385216 | 48152 | 1,5829 | 7622 | 5,976 |
| 16 | 48387 | 49020 | —     | 49587 |       |       |       |    |    | 49416 | 455940 | 50660 | 1,5106 | 7653 | 6,340 |
| 17 | 46392 | 47170 | 47414 | 47619 | 47445 | 44025 |       |    |    | 44025 | 576938 | 48078 | 1,6379 | 7875 | 6,935 |
| 18 | 45918 | 46296 | 47008 |       |       |       |       |    |    | 47377 | 433316 | 48146 | 1,5957 | 7683 | 5,872 |
| 19 | 39823 | 40984 | 41045 | 41096 | 39877 |       |       |    |    | 40221 | 459711 | 41792 | 1,8458 | 7714 | 7,668 |
| 20 | 44118 | 45045 | 45454 | 45454 | 44520 | —     | 44379 |    |    | 44152 | 559768 | 46647 | 1,6598 | 7736 | 7,437 |
| 21 | 44354 | 45454 | 46218 | 46154 | 46099 | —     | 46012 |    |    | 45476 | 562173 | 46848 | 1,6085 | 7535 | 7,316 |
| 22 | 45000 | 45871 | 46218 | 46512 | 46429 | 46053 |       |    |    | 45906 | 563980 | 46998 | 1,5724 | 7390 | 7,424 |
| 23 | 46875 | 48077 | 46610 |       |       |       |       |    |    | 47540 | 444985 | 49443 | 1,6007 | 7914 | 6,032 |
| 24 | 44118 | 43860 | 43651 | 43796 | 43624 | 43478 |       |    |    | 43409 | 547543 | 45629 | 1,6055 | 7326 | 7,281 |
| 25 | 43269 | 43860 | 42969 | 43165 | 43046 | 42945 |       |    |    | 42545 | 538539 | 44878 | 1,6216 | 7277 | 6,885 |
| 26 | 43689 | 45045 | 43651 | 43796 |       |       |       |    |    | 43965 | 458984 | 45898 | 1,5988 | 7338 | 6,350 |
| 27 | 42056 | 43103 | 42308 | 42553 |       |       |       |    |    | 41965 | 443157 | 44316 | 1,6505 | 7314 | 6,210 |
| 28 | 41284 | 40650 | 40146 | 40540 | 41667 | 40462 |       |    |    | 40555 | 506249 | 42187 | 1,7043 | 7190 | 7,396 |
| 29 | 45454 | 44643 | 45082 | 45454 | 45454 |       |       |    |    | 45555 | 522117 | 47465 | 1,5687 | 7446 | 6,392 |



## d.o. tabeli 6

| lp | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23 | 24 | 25 | 26    | 27     | 28    | 29     | 30   | 31    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|-------|--------|-------|--------|------|-------|
| 30 | 45000 | 44643 | 45454 | 45801 | 45775 |       |    |    |    | 45719 | 527312 | 47937 | 1,5862 | 7604 | 6,783 |
| 31 | 44554 | 44643 | 44000 | 43796 | 43919 |       |    |    |    | 43833 | 509863 | 46351 | 1,6085 | 7455 | 6,506 |
| 32 | 42857 | 43860 | 42308 | 42553 | 43046 |       |    |    |    | 43046 | 490412 | 44583 | 1,6021 | 7143 | 6,513 |
| 33 | 44118 | 44643 | 42969 | 43796 | 43046 | 43210 |    |    |    | 42711 | 544880 | 45407 | 1,6119 | 7319 | 6,929 |
| 34 | 43269 |       |       |       |       |       |    |    |    | 42965 | 276170 | 39452 | 1,6845 | 6646 | 5,621 |
| 35 | 39130 | 39370 | 34483 | 38216 | 38690 | 37838 |    |    |    | 38474 | 475974 | 39664 | 1,8488 | 7333 | 7,855 |
| 36 | 39474 |       |       |       |       |       |    |    |    | 39474 | 288506 | 41215 | 1,8595 | 7664 | 5,083 |
| 37 | 42872 | 47170 |       |       |       |       |    |    |    | 47570 | 401244 | 50155 | 1,5052 | 7549 | 5,087 |
| 38 | 41667 | 43478 | 42308 | 42253 | 42763 | 42424 |    |    |    | 42781 | 521196 | 43433 | 1,6331 | 7093 | 7,704 |
| 39 | 42056 | 41322 | 41353 |       |       |       |    |    |    | 41609 | 390359 | 43732 | 1,6348 | 7149 | 6,191 |
| 40 | 46875 | 47170 | 47008 | 46875 |       |       |    |    |    | 46794 | 474316 | 47432 | 1,5031 | 7129 | 5,856 |
| 41 | 37500 | 37879 | 37931 | 37736 | 38235 | 35176 |    |    |    | 34559 | 458572 | 38214 | 1,8431 | 7043 | 7,635 |
| 42 | 39130 | 40323 |       |       |       |       |    |    |    | 39514 | 338063 | 42258 | 1,7400 | 7353 | 6,108 |
| 43 | 39823 | 40984 | 39568 | 39735 | 39677 | 40230 |    |    |    | 39775 | 513579 | 42798 | 1,5698 | 6718 | 7,249 |
| 44 | 38461 | 39062 | 37931 | 37975 | 38235 | 37838 |    |    |    | 38049 | 476376 | 39698 | 1,8545 | 7362 | 8,278 |
| 45 | 40178 | 40984 | 39568 | 39973 | 39634 |       |    |    |    | 39394 | 447267 | 40661 | 1,7970 | 7307 | 6,875 |



Wyniki badań kontrol-  
nych wykonanych na zginarce

Tabela 8

| 1  | 2      | 3    | 4    | 5               | 6               | 7                     | 8                 | 9                             |
|----|--------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------|
| Lp | $P_r$  | s    | h    | s h             | $s h^2$         | $W = \frac{s h^2}{6}$ | $M_{zg} = 35 P_r$ | $\sigma_r = \frac{M_{zg}}{W}$ |
|    | kG     | mm   | mm   | mm <sup>2</sup> | mm <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup>       | kG mm             | kG/mm <sup>2</sup>            |
| 1  | 3,750  | 9,7  | 3,54 | 34,34           | 121,56          | 20,26                 | 131,25            | 6,48                          |
| 2  | 4,500  | 10,8 | 3,53 | 38,12           | 134,56          | 22,43                 | 157,50            | 7,02                          |
| 3  | 4,730  | 12,2 | 3,56 | 43,43           | 154,61          | 25,77                 | 165,55            | 6,42                          |
| 4  | 5,350  | 14,0 | 3,65 | 51,10           | 186,51          | 31,08                 | 187,25            | 6,02                          |
| 5  | 4,990  | 11,1 | 3,76 | 41,74           | 156,94          | 26,16                 | 174,65            | 6,68                          |
| 6  | 4,000  | 10,9 | 3,64 | 39,68           | 144,43          | 24,07                 | 140,00            | 5,82                          |
| 7  | 4,550  | 11,8 | 3,77 | 44,49           | 167,73          | 27,95                 | 159,25            | 5,70                          |
| 8  | 4,750  | 10,0 | 3,53 | 35,30           | 124,61          | 20,77                 | 166,25            | 8,00                          |
| 9  | 5,750  | 10,9 | 3,52 | 38,37           | 135,06          | 22,51                 | 201,25            | 8,94                          |
| 10 | 4,500  | 10,0 | 3,53 | 35,30           | 124,01          | 20,77                 | 157,50            | 7,58                          |
| 11 | 13,050 | 29,6 | 3,70 | 109,52          | 405,22          | 67,54                 | 456,75            | 6,76                          |
| 12 | 11,000 | 28,8 | 3,57 | 102,82          | 367,07          | 61,18                 | 385,00            | 6,29                          |
| 13 | 12,010 | 29,1 | 3,54 | 103,01          | 364,65          | 60,77                 | 420,35            | 6,92                          |
| 14 | 14,300 | 31,3 | 3,65 | 114,24          | 416,98          | 69,50                 | 500,50            | 7,20                          |
| 15 | 9,950  | 24,6 | 3,55 | 87,33           | 310,02          | 51,67                 | 348,25            | 6,74                          |
| 16 | 13,405 | 29,4 | 3,76 | 110,54          | 415,65          | 69,27                 | 469,17            | 6,77                          |



Tabela 12

| I       | 2  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 3                                      | 4                                     | 5                          | 6                  | 7  |
|---------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|---------------------------------------|----------------------------|--------------------|--|
|         | Pomiar spadków wychylenia plakki świetlnej odczyt. z wykr. oscyl. spowodowanych spadkami temp. w okresie podstawowym |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |  |                                       |                            |                    |  |
| Nr pom. | 1  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |      |      |      |      |      |      | $h_{sr} = \frac{1}{10} \sum h_i$<br>mm | $\Delta A = \frac{h_{sr}}{3,9}$<br>mA | $\Delta V_i = V_i A$<br>mV | $\Delta v_p$<br>°C | $\Delta v_c = \Delta v_p + \Delta v_h$<br>°C |
|         | 1  | 48   | 28   | 17   | 30   | 42   | 43   | 49   | 29   | 45   | 46   | 4,0  | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 2,5  |  |                                       |                            |                    |  |
| 2       | 10,0   | 14,5 | 12,5 | 17,0 | 12,5 | 17,0 | 8,5  | 10,0 | 9,5  | 11,4 | 17,0 | 8,5  | 10,0 | 9,5  | 11,4 | 11,4 | 12,29                                  | 3,151                                 | 19,30                      | 31,5               | 52,5   |
| 3       | 21,0   | 23,0 | 26,5 | 27,0 | 26,0 | 29,0 | 17,5 | 20,0 | 18,0 | 22,0 | 29,0 | 17,5 | 20,0 | 18,0 | 22,0 | 22,0 | 23,00                                  | 5,897                                 | 36,05                      | 60,5               | 81,5   |
| 4       | 28,5   | 29,0 | 29,0 | 34,0 | 29,0 | 36,5 | 25,0 | 27,0 | 25,5 | 29,0 | 36,5 | 25,0 | 27,0 | 25,5 | 29,0 | 29,0 | 29,25                                  | 7,500                                 | 45,90                      | 77,0               | 98,0   |
| 5       | 33,5   | 35,0 | 34,0 | 38,0 | 35,0 | 41,0 | 30,0 | 32,5 | 31,4 | 38,3 | 41,0 | 30,0 | 32,5 | 31,4 | 38,3 | 38,3 | 34,87                                  | 8,941                                 | 54,70                      | 93,5               | 114,5  |
| 6       | 38,0   | 39,0 | 37,5 | 40   | 37,8 | 44,0 | 34,0 | 36,5 | 36,0 | 36,5 | 44,0 | 34,0 | 36,5 | 36,0 | 36,5 | 36,5 | 37,93                                  | 9,726                                 | 59,50                      | 102,0              | 123,0  |
| 7       | 40,0   | 40,5 | 39,5 | 41,8 | 39,5 | 46,0 | 37,0 | 38,5 | 39,5 | 38,5 | 46,0 | 37,0 | 38,5 | 39,5 | 38,5 | 38,5 | 40,08                                  | 10,277                                | 62,90                      | 107,5              | 128,5  |
| 8       | 41,8   | 42,0 | 41,3 | 43,0 | 40,8 | 47,5 | 39,0 | 40,0 | 42,0 | 40,4 | 47,5 | 39,0 | 40,0 | 42,0 | 40,4 | 40,4 | 41,78                                  | 10,713                                | 65,50                      | 112,5              | 133,5  |
| 9       | 43,0   | 42,8 | 42,8 | 43,8 | 41,8 | 48,4 | 40,3 | 41,0 | 43,2 | 41,5 | 48,4 | 40,3 | 41,0 | 43,2 | 41,5 | 41,5 | 42,86                                  | 10,990                                | 67,20                      | 116,0              | 137,0  |
| 10      | 44,2   | 43,4 | 43,6 | 44,2 | 42,5 | 49,2 | 41,5 | 41,5 | 44,2 | 42,5 | 49,2 | 41,5 | 41,5 | 44,2 | 42,5 | 42,5 | 43,68                                  | 11,200                                | 68,50                      | 118,5              | 139,5  |
| 11      | 45   | 44,0 | 44,3 | 44,7 | 43,0 | 49,8 | 42,2 | 42,0 | 45,1 | 43,0 | 49,8 | 42,2 | 42,0 | 45,1 | 43,0 | 43,0 | 44,31                                  | 11,361                                | 69,50                      | 120,5              | 141,5  |
| 12      | 45,5   | 44,2 | 44,7 | 45,0 | 43,4 | 50,4 | 43,0 | 42,4 | 45,9 | 43,4 | 50,4 | 43,0 | 42,4 | 45,9 | 43,4 | 43,4 | 44,79                                  | 11,485                                | 70,20                      | 122,0              | 143,0  |
| 13/16   | 46   | 44,4 | 45,1 | 45,1 | 43,8 | 51,0 | 43,5 | 42,8 | 46,3 | 43,8 | 51,0 | 43,5 | 42,8 | 46,3 | 43,8 | 43,8 | 45,18                                  | 11,585                                | 70,90                      | 123,0              | 144,0  |
| 14      | 46,3   | 44,6 | 45,6 | 45,2 | 43,9 | 51,2 | 44,0 | 42,8 | 46,7 | 44,0 | 51,2 | 44,0 | 42,8 | 46,7 | 44,0 | 44,0 | 45,43                                  | 11,549                                | 71,30                      | 124,0              | 145,0  |
| 15      | 46,8   | 44,8 | 45,8 | 45,2 | 43,9 | 51,3 | 44,4 | 42,8 | 47,0 | 44,3 | 51,3 | 44,4 | 42,8 | 47,0 | 44,3 | 44,3 | 45,610                                 | 11,695                                | 71,60                      | 124,5              | 145,5  |
| 16      | 45,8   | 44,6 | 45,8 | 45,2 | 43,9 | 51,5 | 44,9 | 42,8 | 47,1 | 44,7 | 51,5 | 44,9 | 42,8 | 47,1 | 44,7 | 44,7 | 45,73                                  | 11,720                                | 71,80                      | 125,0              | 146,0  |

Obliczenia w rubr. 6 dokonano odejmując spadki napięcia od napięcia odpowiadającego spadkowi temperatur na początku okresu podstawowego tj. 228 - 21 = 207° C



Tabela 14

| Lp | $10^3 \cdot x$ | $\Delta t \cdot x = \frac{6 \cdot x}{t} m^{\circ}C$ po upływie czasu |              |              |              |              |              |              |              |              |            |
|----|----------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|
|    |                | m  | 9 $\Delta t$ | 8 $\Delta t$ | 7 $\Delta t$ | 6 $\Delta t$ | 5 $\Delta t$ | 4 $\Delta t$ | 3 $\Delta t$ | 2 $\Delta t$ | $\Delta t$ |
| 1  | 1,8465         | 0,2690   | 0,2610       | 0,2460       | 0,2270       | 0,2110       | 0,1810       | 0,1505       | 0,0970       | 0,0553       | 0,00386    |
| 2  | 1,7542         | 0,2000   | 0,1790       | 0,1535       | 0,1270       | 0,1062       | 0,0859       | 0,0588       | 0,0386       | 0,0298       |            |
| 3  | 1,6619         | 0,1410   | 0,1148       | 0,0882       | 0,0631       | 0,0515       | 0,0365       | 0,0274       | 0,0224       |              |            |
| 4  | 1,5696         | 0,0955   | 0,0680       | 0,0478       | 0,0325       | 0,0243       | 0,0202       | 0,0172       |              |              |            |
| 5  | 1,4773         | 0,0612   | 0,0398       | 0,0251       | 0,0170       | 0,0148       | 0,0132       |              |              |              |            |
| 6  | 1,3850         | 0,0405   | 0,0221       | 0,0145       | 0,0111       | 0,0097       |              |              |              |              |            |
| 7  | 1,2927         | 0,0226   | 0,0129       | 0,0084       | 0,0071       |              |              |              |              |              |            |
| 8  | 1,2004         | 0,0137   | 0,0078       | 0,0055       |              |              |              |              |              |              |            |
| 9  | 1,1081         | 0,0083   | 0,0033       |              |              |              |              |              |              |              |            |
| 10 | 1,0158         | 0,0055   | 0,0025       |              |              |              |              |              |              |              |            |
| 11 | 0,9235         | 0,0028   |              |              |              |              |              |              |              |              |            |
| 12 | 0,8312         | 0,0021   |              |              |              |              |              |              |              |              |            |
| 13 | 0,7389         | 0,0001   |              |              |              |              |              |              |              |              |            |



Tabela 16

| Lp | $\Delta t_{\text{skr.}}$<br>°C | $10^3 \bar{\varepsilon}_{\text{max}} = \beta \Delta t_{\text{skr.}}$ | $10^3 \bar{\varepsilon} = -h_{\text{sr.}} \cdot 0,49 \cdot 10^{-4}$ | $10^3 \bar{\varepsilon} = 40^{-6} \cdot f_{\text{M}} \cdot 0,503$ | $10^3 / \bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}$ | $10^3 \varepsilon_{\text{max}} = \sum \varepsilon_i$ |
|----|--------------------------------|--|---|---|--|--|
| 1  | 30                             | 0,294  | 0,023   | 0,003   | 0,026  | 0,268  |
| 2  | 52,5                           | 0,514  | 0,027   | 0,004   | 0,031  | 0,483  |
| 3  | 81,5                           | 0,799  | 0,034   | 0,005   | 0,039  | 0,760  |
| 4  | 98,0                           | 0,960  | 0,042   | 0,006   | 0,048  | 0,912  |
| 5  | 114,5                          | 1,122  | 0,049   | 0,007   | 0,056  | 1,066  |
| 6  | 123                            | 1,205  | 0,057   | 0,008   | 0,065  | 1,140  |
| 7  | 133,5                          | 1,308  | 0,071   | 0,010   | 0,081  | 1,227  |
| 8  | 141,5                          | 1,387  | 0,087   | 0,012   | 0,099  | 1,288  |
| 9  | 146,0                          | 1,431  | 0,110   | 0,015   | 0,125  | 1,306  |

Tabela 17

| Lp | $\Delta h_{0,12}$ | Nr pom. |
|----|-------------------|---------|
| 1  | 20                | 36      |
| 2  | 17                | 40      |
| 3  | 18                | 39      |
| 4  | 18                | 51      |
| 5  | 17                | 34      |
| 6  | 20,5              | 37      |
| 7  | 22                | 19      |
| 8  | 12                | 38      |
| 9  | 24                | 20      |
| 10 | 23                | 33      |

śred. 19,15

$$\Delta V = \frac{19,15}{2,9} \cdot 6,12 = 39,1 \text{ mV}$$

z wykř. 84 -  $\Delta t \approx 50 \text{ }^\circ\text{C}$



Obliczenie średniej rozbieżności wyników pomiarów  $\sigma$  i E przeprowadzonych dla  $t = 20^{\circ}\text{C}$

T a b e l a 18

| Lp   | $b_E$ | $b_E^2$ | $b_\sigma$ | $b_\sigma^2$ | Obliczenie  | Uwagi  |
|------|-------|---------|------------|--------------|---|--|
| 1    | -230  | 52.900  | +0,391     | 152.881      | $\sigma_E = \frac{414831}{11} = \pm 194,5$ $\sigma_{rE} = \frac{194,5}{12} = \pm 56$ $\sigma_\sigma = \frac{8525186}{11} = 0,88$ $\sigma_{r\sigma} = \frac{0,88}{12} = 0,254$ | $\sigma_{rE(\sigma)}$ - rozbieżność średniej arytmetycznej dla jednego pomiaru E względnie $\sigma$<br><br>$\sigma_{rE(\sigma)}$ - średnia rozbieżność wyników pomiarów E lub $\sigma$<br><br>$b_E(\sigma)$ - względna wartość odchyłki danego wyniku pomiaru E lub $\sigma$ od średniej arytmetycznej |
| 2    | -367  | 134.689 | +2,384     | 5683.456     |   |  |
| 3    | +149  | 22.201  | -0,870     | 756.900      |   |  |
| 4    | + 11  | 121     | +0,373     | 139.129      |   |  |
| 5    | +175  | 30.625  | -0,744     | 553.536      |   |  |
| 6    | +135  | 18.225  | -0,626     | 391.876      |   |  |
| 7    | +152  | 23.104  | -0,154     | 23.716       |   |  |
| 8    | -129  | 16.641  | -0,421     | 177.241      |   |  |
| 9    | -252  | 63.504  | -0,725     | 525.625      |   |  |
| 10   | * 64  | 4.096   | -0,024     | 576          |   |  |
| 11   | +202  | 40.804  | +0,073     | 5.329        |   |  |
| 12   | + 89  | 7.921   | +0,339     | 114.921      |   |  |
| Suma | - 1   | 414.831 | -0,004     | 8525.186     |   |  |



Obliczenie średniej rozbieżności wyników pomiarów  $\delta$  i  $E$  przeprowadzonych dla  $t = 120^{\circ}\text{C}$

T a b e l a 19

| $I_p$ | $b_E$ | $b_E^2$ | $b_\delta$ | $b_\delta^2$ | Obliczenie   | Uwagi   |
|-------|-------|---------|------------|--------------|--|---|
| 1     | +343  | 117.649 | -0,155     | 24.025       | $\tilde{\sigma}_E = \frac{276234}{9} = 176$ $\tilde{\sigma}_{TE} = \frac{176}{10} = 55,5$ $\tilde{\sigma}_\delta = \frac{4009156}{9} = 0,664$ $\tilde{\sigma}_{r\delta} = 0,210$ | $\tilde{\sigma}_{E(\delta)}$ - rozbieżność średniej arytmetycznej dla jednego pomiaru $E$ względnie $\delta$<br><br>$\tilde{\sigma}_{TE(\delta)}$ - średnia rozbieżność wyników pomiarów $E$ lub $\delta$<br><br>$b_{E(\delta)}$ - względna wartość odchyłki danego wyniku pomiaru $E$ lub $\delta$ od średniej arytmetycznej |
| 2     | - 63  | 3.969   | -0,607     | 368.449      |  |   |
| 3     | - 64  | 4.096   | -0,800     | 640.000      |  |   |
| 4     | - 33  | 1.089   | -0,436     | 190.096      |  |   |
| 5     | +189  | 35.721  | +0,159     | 25.281       |  |   |
| 6     | - 3   | 9       | -0,904     | 817.216      |  |   |
| 7     | + 28  | 784     | +0,892     | 795.564      |  |   |
| 8     | + 50  | 2.500   | +0,661     | 436.921      |  |   |
| 9     | -151  | 22.801  | +0,540     | 291.600      |  |   |
| 10    | -296  | 87.616  | +0,648     | 419.904      |  |   |
| Suma  | 0     | 276.234 | -0,002     | 4009.156     |  |   |



Obliczenie średniej rozbieżności wyników pomiarów  $\delta$  i  $E$  przeprowadzonych dla  $t = 220^{\circ}\text{C}$

Tabela 20

| Imp  | $b_E$ | $b_E^2$ | $b_\delta$ | $b_\delta^2$ | Obliczenie                                    | Uwagi   |
|------|-------|---------|------------|--------------|---|---|
| 1    | +513  | 263.169 | -0,603     | 363.609      | $\sigma_E = \frac{452943}{9} = 225$           | $\sigma_{E(\delta)}$ - rozbieżność średniej arytmetycznej dla jednego pomiaru $E$ względnie $\delta$          |
| 2    | - 75  | 5.625   | +0,646     | 417.316      |   |   |
| 3    | -124  | 15.376  | +0,250     | 62.500       |   |   |
| 4    | - 63  | 3.969   | -0,285     | 81.225       | $\sigma_{rE} = \frac{225}{10} = 71$           | $\sigma_{rE(\delta)}$ - średnia rozbieżność wyników pomiarów $E$ lub $\delta$                                 |
| 5    | - 87  | 7.569   | -0,425     | 180.625      |   |   |
| 6    | -211  | 44.521  | +0,761     | 579.121      | $\sigma_\delta = \frac{1796874}{9} = 0,447$   | $b_{E(\delta)}$ - względna wartość odchyłki danego wyniku pomiaru $E$ lub $\delta$ od średniej arytmetycznej. |
| 7    | + 45  | 2.025   | -0,243     | 59.049       |   |   |
| 8    | +263  | 41.209  | +0,148     | 21.904       |   |   |
| 9    | + 54  | 2.916   | -0,129     | 16.641       | $\sigma_{r\delta} = \frac{0,447}{10} = 0,141$ |   |
| 10   | -258  | 66.564  | -0,122     | 14.884       |   |   |
| Suma | - 3   | 452.943 | -0,002     | 1796.874     |   |   |



Obliczenie średniej rozbieżności wyników pomiarów  $\sigma$  i  $E$  przeprowadzonych dla  $t = 320 \text{ }^\circ\text{C}$

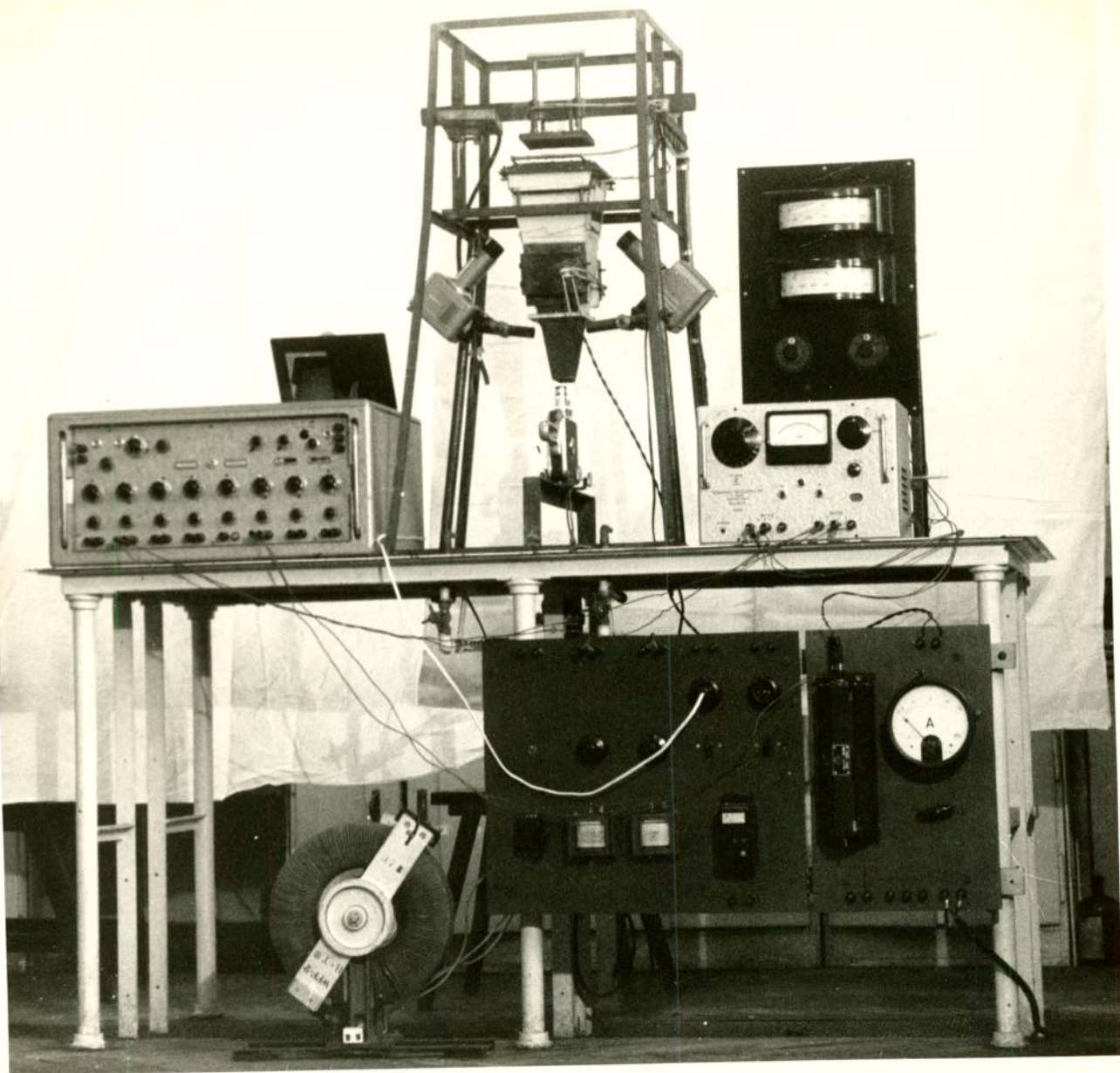
T a b e l a 21

| lp   | $b_E$ | $b_E^2$  | $b_\sigma$ | $b_\sigma^2$ | Obliczenie                                    |   | U w a g i  |
|------|-------|----------|------------|--------------|---|---|--|
| 1    | +114  | 12.996   | +0,262     | 68.644       | $\sigma_E = \frac{1012714}{12} = 290$         | $\sigma_{RE} = \frac{290}{13} = 70,5$   | $\sigma_E(\sigma)$ - rozbieżność średniej arytmetycznej dla jednego pomiaru $E$ względnie $\sigma$ |
| 2    | -559  | 312.481  | -1,046     | 1094.116     |   |   |  |
| 3    | +128  | 16.384   | +1,189     | 1413.721     |   |   |  |
| 4    | +459  | 210.681  | -1,384     | 1915.456     |   |   |  |
| 5    | +344  | 118.336  | -1,580     | 2496.400     | $\sigma_\sigma = \frac{13174817}{12} = 1,046$ | $b_E(\sigma)$ - względna war- tość odchył- niku pomia- ru $E$ lub $\sigma$ od średniej arytmetycz- nej. |  |
| 6    | -112  | 12.544   | +1,037     | 1075.369     |   |   |  |
| 7    | - 56  | 3.136    | -0,476     | 226.576      |   |   |  |
| 8    | - 76  | 5.776    | -0,811     | 657.721      |   |   |  |
| 9    | -162  | 26.244   | +0,968     | 937.024      | $\sigma_{RE} = \frac{1,046}{13} = 0,29$       |   |  |
| 10   | +148  | 21.904   | -0,559     | 312.481      |   |   |  |
| 11   | -487  | 237.169  | +0,582     | 338.724      |   |   |  |
| 12   | +157  | 24.649   | +1,611     | 2595.321     |   |   |  |
| 13   | +102  | 10.404   | +0,208     | 43.264       |   |   |  |
| Suma | 0     | 1012.714 | +0,001     | 13174.817    |   |   |  |



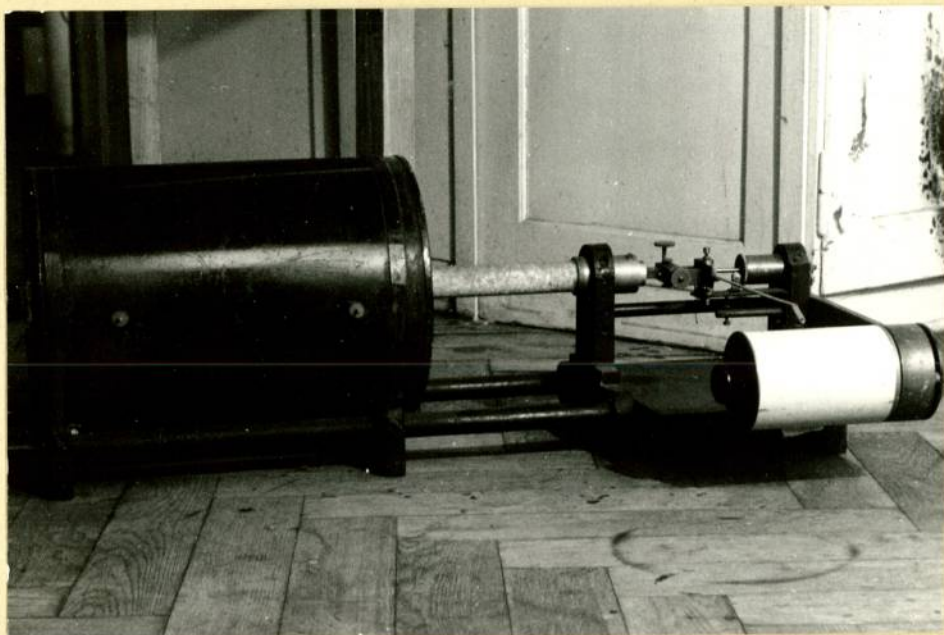


Rys.66. Fotografia próbek szkła w świetle spolaryzowanym



Rys.67. Fotografia stoiska badawczego podstawowego



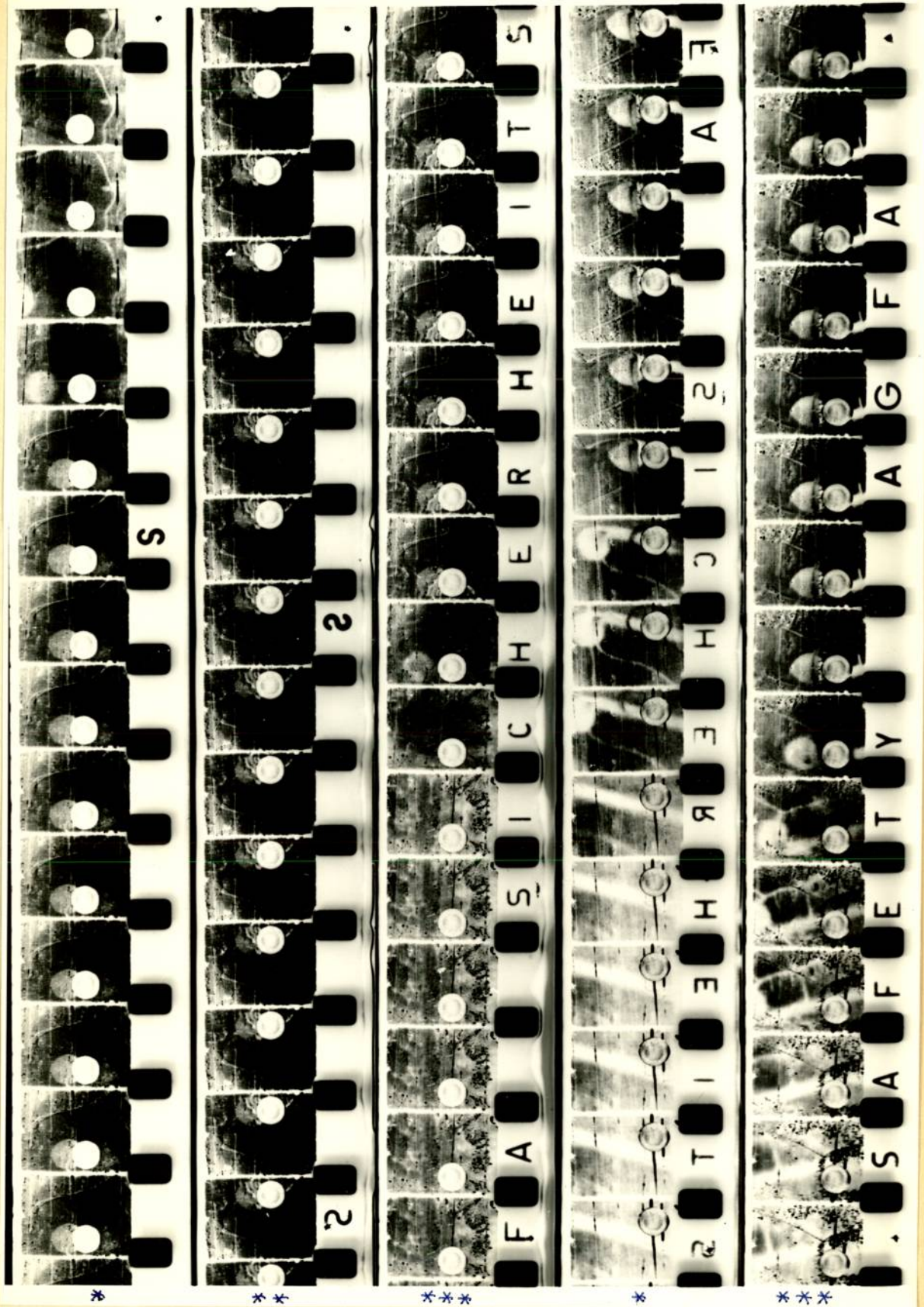


Rys.68. Fotografia dilatometru



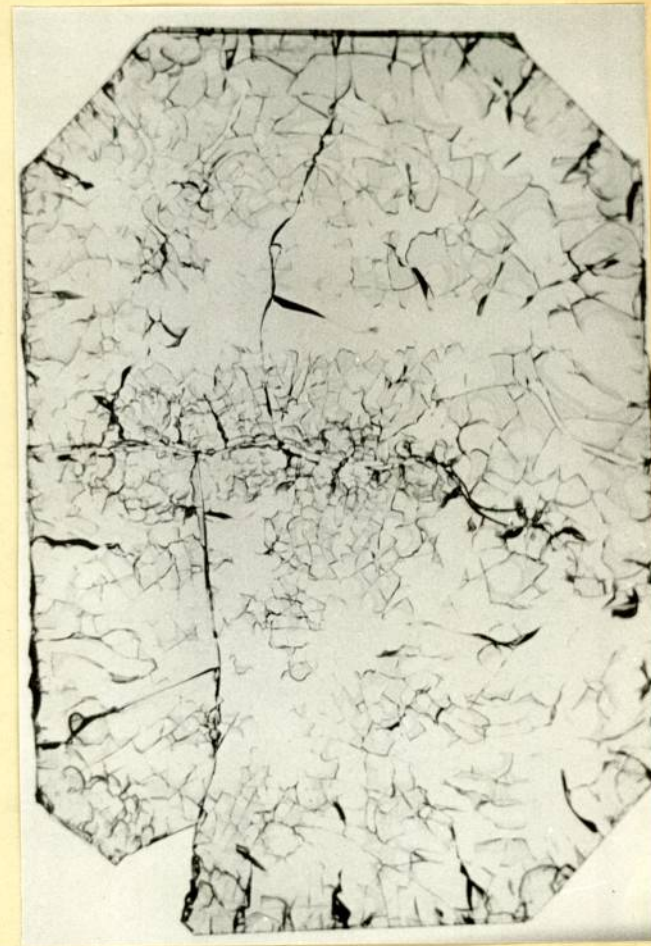
Rys.69. Fotografia stoiska do badania doraźnej wytrzymałości na zginanie  $\sigma_r$  oraz modułu Yunga E.





Rys.70 - kopie z odcinków taśmy filmowej zawierające:  
x) moment zetknięcia płytki studzącej z badaną próbką szkła  
x)x) przebieg studzenia  
x)x)x) moment zajęcia płytki studzącej z badaną próbką szkła.





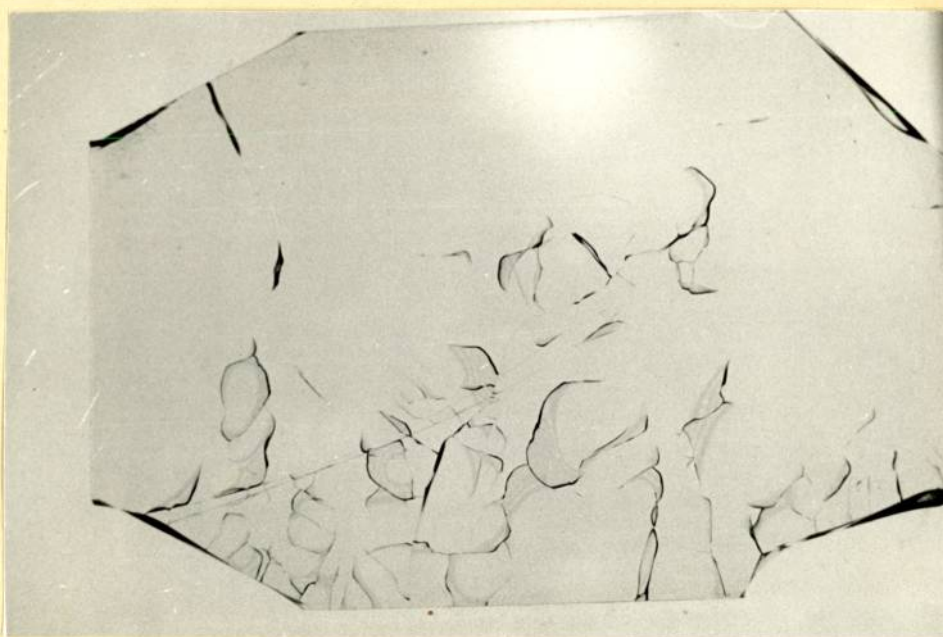
Rys.71. Pęknięcia wywołane studzeniem przy maksymalnym spadku temperatury powierzchni

$$\Delta t_{\text{skr}} = 146 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



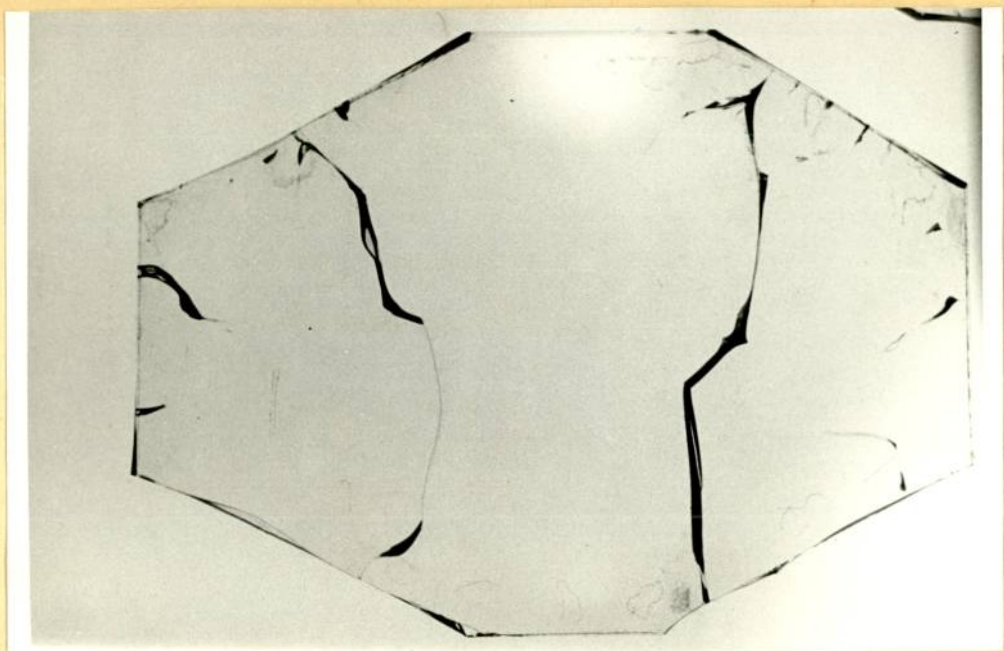


Rys. 72. Pęknięcia wywołane studzeniem przy maksymalnym spadku temperatury powierzchni  
 $\Delta t_{\text{skr}} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$

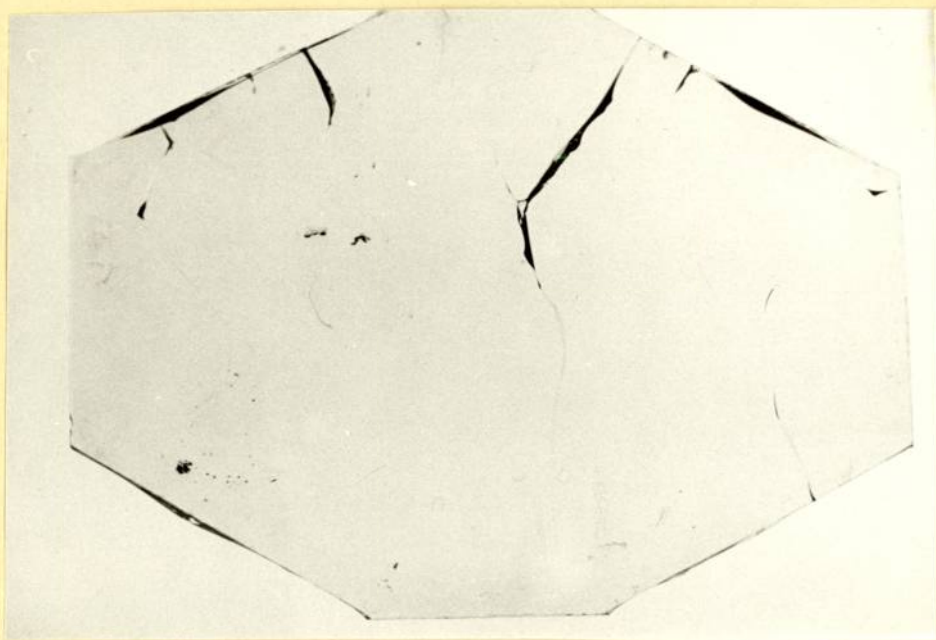


Rys. 73. Pęknięcia wywołane studzeniem przy maksymalnym spadku temperatury powierzchni  
 $\Delta t_{\text{skr}} = 102 \text{ }^{\circ}\text{C}$





Rys. 74. Pęknięcia wywołane spadkiem podczas pomiaru kontrolnego I.  
( $\Delta t_{\text{skr}} = 98^{\circ}\text{C}$ )



Rys. 75. Pęknięcia wywołane spadkiem podczas pomiaru kontrolnego II.  
( $\Delta t_{\text{skr}} = 96^{\circ}\text{C}$ )



VIII. WYNIKI CECHOWANIA

PRZYRZĄDOW

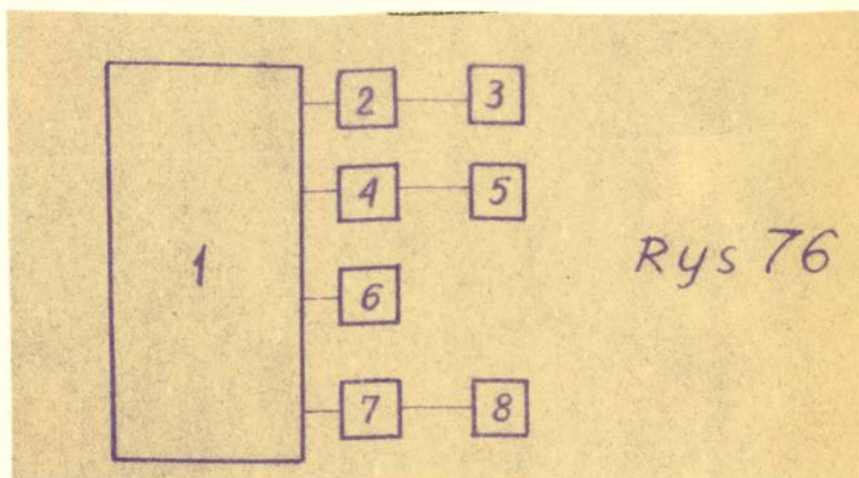
ZĄBACZNIK II



### VI. WYNIKI CECHOWANIA PRZYRZĄDÓW (załącznik II)

#### 1. Wskaźniki do termopar

1.1. Schemat blokowy aparatury do cechowania wskaźników i termopar.



Rys 76

Opis:

1. Kompensator Siemens Halskie typ Rapsa kl 0,2 nr3053607
2. Galwanometr  $R_i = 150 \Omega$   $C_i = 2,2 \cdot 10^{-8}$  A/działkę nr757894
3. Transformator zasilający
4. Przełącznik
5. Badany wskaźnik lub termopara
6. Ogniwo normalne 10183 V UNRRA Nr 50
7. Bateria akumulatorów
8. Opornica regulacyjna.

1.2. Wyniki cechowania wskaźnika profilowego do termopar nr fabr.2203146

Tabela 23

| W s k a z a n i e |                    | W s k a z a n i e |                 |
|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| przrządu badan.   | ! przyrz.kontrol.! | przrządu badanego | ! przyrz.kontr. |
| °C                | ! mV               | ! °C              | ! mV            |
| 40                | 0                  | 400               | 10,0            |
| 100               | 1,75               | 500               | 13,0            |
| 200               | 4,5                | 600               | 15,7            |
| 300               | 7,3                |                   |                 |



Wyniki cechowania są naniesione w formie wykresu na rys. nr 77

1.3. Wyniki cechowania wskaźnika profilowego do termopar nr fabr. 2508514.

Tabela 24

| W s k a z a n i e |                  |      | W s k a z a n i e |                  |      |    |
|-------------------|------------------|------|-------------------|------------------|------|----|
| przycz. badan. !  | przycz. kontr. ! |      | przycz. badan. !  | przycz. kontr. ! |      |    |
| °C                | !                | mV   | !                 | °C               | !    | mV |
| 0                 |                  | 0    | 500               |                  | 27,0 |    |
| 100               |                  | 5,1  | 600               |                  | 32,4 |    |
| 200               |                  | 10,8 | 700               |                  | 38,4 |    |
| 300               |                  | 16,2 | 800               |                  | 45,0 |    |
| 400               |                  | 21,5 |                   |                  |      |    |

Wyniki cechowania są ujęte w formie wykresu na rys 78

1.4. Wyniki cechowania wskaźnika M/28 Nr fabr. 00747

o zakresie 0 - 45 mV kl 1.

Wskaźnik sprawdzono na kompensatorze w całym zakresie pomiarowym nastawiając bodziec wg Kompensatora poczym przełączano się na badany wskaźnik. Nie stwierdzono żadnych odchyłek, tak że przy dokładnym odczycie można uznać klasę przyrządu na 0,5 .

## 2. Termopary i stosy termopar

2.1. Charakterystyka termoelementów Cu-konst o grubości drutów  $\varnothing = 0,6$  i  $\varnothing 0,2$  mm

Charakterystykę termopar zdjęto w układzie blokowym aparatury jak w poz.1.1., z tym, że pod pozycją 5 schematu blokowego (rys 76) umieszczono termoparę. Koniec termopary przyłączono do aparatury kontrolnej zaś spoinę umieszczono w kąpeli olejowej w ultratermostacie Höplera (nr VI-274). Temperaturę kąpeli sprawdzono wzorcowym termometrem rtęciowym



(nr 726) o dokładności  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Zimne końce termopary umieszczono w kąpielu wodnej, której temperaturę kontrolowano wzorcowym termometrem rtęciowym (nr 728) o dokładności  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Wyniki cechowania są ujęte w poniższej tabelce.

Tabela 25

| Lp | temper. spoiny<br>$^{\circ}\text{C}$ | temp. zimnych końców<br>$^{\circ}\text{C}$ | różnica temperatur<br>$^{\circ}\text{C}$ | S.T.E. termoelementu<br>$\text{mV}$ | S.T.E. termoelementu<br>$\text{mV}$ | Uwagi  |
|----|--------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1  | 2                                    | 3  | 4  | 5                                   | 6                                   | 7  |
| 1  | 41                                   | 31   | 10                                       | 0,35                                | 0,36                                | lp 1 + 6   |
| 2  | 51                                   | 31   | 20                                       | 0,78                                | 0,79                                | zimne końce umieszczone w otoczeniu którego temperatura rośnie |
| 3  | 62                                   | 31,5                                       | 30,5                                     | 1,19                                | 1,19                                |  |
| 4  | 72                                   | 31,5                                       | 40,5                                     | 1,59                                | 1,61                                |  |
| 5  | 82                                   | 32   | 50                                       | 2,06                                | 2,07                                |  |
| 6  | 92                                   | 32   | 60                                       | 2,44                                | 2,47                                |  |
| 7  | 115                                  | 25   | 90                                       | 3,75                                | 3,77                                | lp 7 + 13  |
| 8  | 175                                  | 25   | 150                                      | 6,52                                | 6,55                                | zimne końce umieszczone w kąpielu wodnej w temperaturze        |
| 9  | 205                                  | 25   | 180                                      | 7,86                                | 7,88                                |  |
| 10 | 229                                  | 25   | 204                                      | 9,24                                | 9,26                                |  |
| 11 | 260                                  | 25   | 235                                      | 11,12                               | 11,15                               |  |
| 12 | 280                                  | 25   | 255                                      | 12,32                               | 12,35                               |  |
| 13 | 305                                  | 25   | 280                                      | 14,15                               | 14,19                               |  |

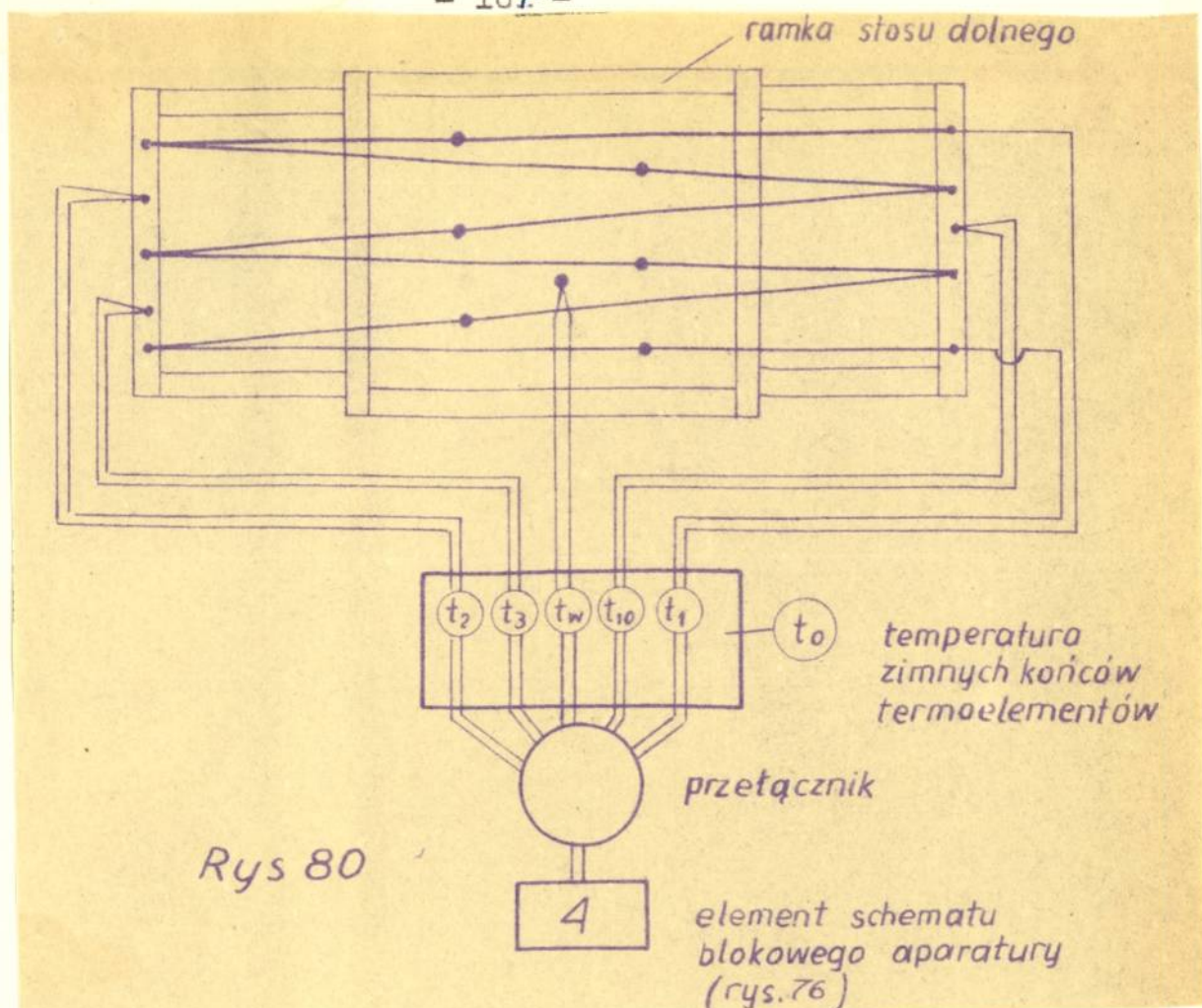
Ponieważ różnice w <sup>siłach</sup> termoelektrycznych (STE) termopar o grubościach drutów  $\phi = 0,2$  <sup>mm</sup> są minimalne sporządzono tylko jeden wykres dla obu termopar (rys. 79).

## 2.2. Charakterystyka stosu termopar dolnego

### 2.2.1. Schemat pomiarowy

Punkty pomiarowe oznaczono jak na załączonym niżej rys. 80.



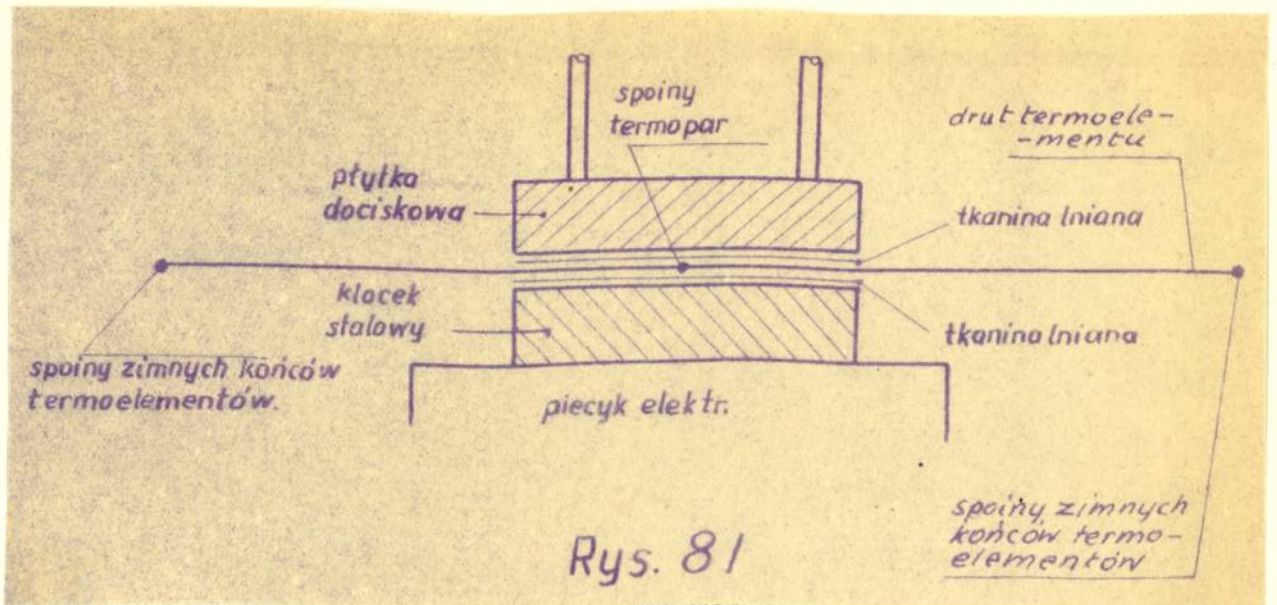


- $t_1$  = - temperatura <sup>stosu</sup> stosu dolnego
- $t_2$  - temperatura ramki, w której zamocowano zimne końce termopar stosu
- $t_3, t_{10}$  - temperatury zimnych końców termopar stosu
- $t_w$  - termopara kontrolna Cu-konst

### 2.2.2. Przebieg cechowania

Spoiny termopar stosu umieszczono na klocku stalowym przełożonym cienką tkaniną lnianą dla uniknięcia zwarcia przewodów termoelementów. Spoiny te dociśnięto do klocka płytką dociskową. Kłoczek metalowy umieszczono na piecyku elektrycznym. Cechowanie stosu odbyło się więc w warunkach bardzo zbliżonych do warunków pomiaru badanego na urządzeniu podstawowym.





Rys. 81

Temperaturę zimnych końców termopar stosu mierzono za pomocą termopar Cu-konst wykonanych z tego samego drutu co termopara kontrolna o charakterystyce <sup>na</sup> rys. 79.

Do pomiaru temperatury spoin termopar użyto jako termometru kontrolnego termopary Cu-konst o zdjętej na kompensatorze charakterystyce (rys. nr 79).

### 2.2.3. Wyniki cechowania

Wskazania termopar odczytano na galwanometrze w mV i odczyty te umieszczono w tabeli 26. Wyniki z tej tabeli naniesiono na wykres umieszczony pod rys. nr 82. (Tabela 26 załączona obok).

### 2.3. Charakterystyka górnego stosu termopar

Górny stos termopar składa się z 21 sztuk termopar Cu-konst. Termoelementy te zostały umocowane w filcowej płytce obszytej tkaniną lnianą. (Patrz rys. 16).

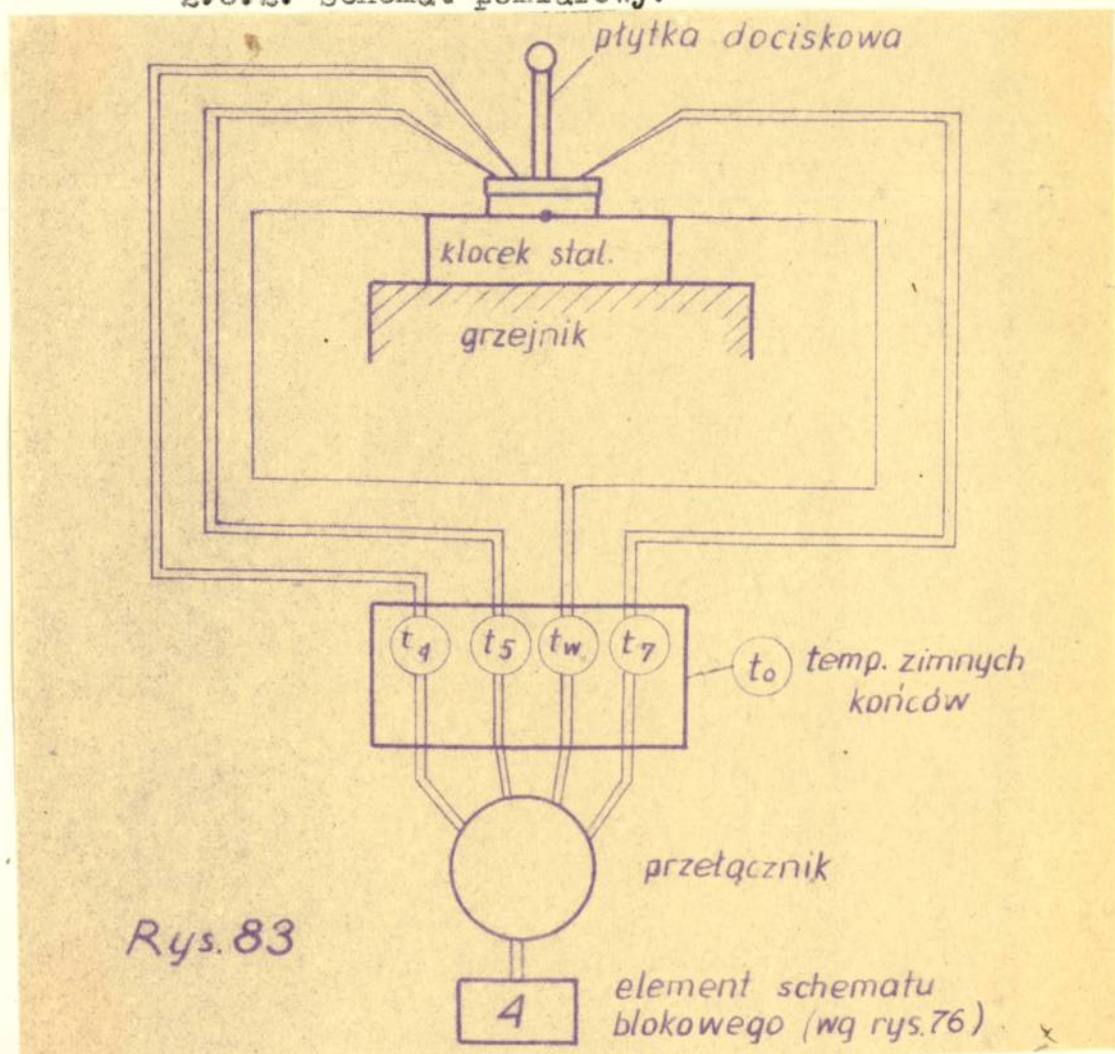
#### 2.3.1. Przebieg cechowania.

Płytkę dociskową z termoparami cechowano równocześnie ze stosem dolnym na klocku stalowym dociskając bezpośrednio płytkę do klocka. Kłócek ten ogrzewano grzejnikiem elektrycznym. Jako termometru wzorcowego użyto termoelementu Cu-konst o zna-



nej charakterystyce. (Wyniki w tabeli 27). Dla kontroli sprawdzono cechowanie stosu w wodzie podgrzewając ją do  $85^{\circ}\text{C}$ . Jako termometru wzorcowego użyto przy tym badaniu termometru rtęciowego z metryczką o dokładności  $0,1^{\circ}\text{C}$ . (Wyniki umieszczono w tabeli 28).

2.3.2. Schemat pomiarowy.



Rys. 83

2.3.3. Wyniki cechowania

Poniżej podaje się wyniki cechowania stosu górnego w formie tabeli 27. i tabeli 28. Wyniki z tych obu tabel naniiesiono na wykres umieszczony na rys.84.

2.4.2. Charakterystyka termopary Fe-konst o grubości drutów  $\varnothing = 0,6$ .

Termopar z tego drutu użyto do dilatometru, zginarki i do pomiaru temperatury próbki.

2.4.1. Przebieg cechowania

Spoiny termopary badanej i wzorcowej umieszczono w bloku



metalowym podgrzewanym w piecu oporowym muflowym z termoregulacją. Pomiar przeprowadzono wg schematu blokowego umieszczonego na rys. 76.

Jako termometru wzorcowego użyto termopary Pt-Pt-Rh. atestowanej przez Główny Urząd Miar.

Wyniki cechowania ujęto w tabeli 29 i naniesiono na wykres umieszczony na rys. 85.

Tabela 29

| Lp | Termoparia wzorcowa Pt-Pt-Rh |                                     | termopara bad. Fe-konst                          |
|----|------------------------------|-------------------------------------|--|
|    | odczyt na kompensatorze mV   | odpowiadająca różnica temperatur °C | S.T.E. odpowiadająca danej różnicy temperatur mV |
| 1  | 0,64                         | 100                                 | 5,04   |
| 2  | 1,01                         | 150                                 | 7,38   |
| 3  | 1,42                         | 200                                 | 9,80   |
| 4  | 1,86                         | 250                                 | 12,14  |
| 5  | 2,31                         | 300                                 | 15,21  |
| 6  | 2,77                         | 350                                 | 17,68  |
| 7  | 3,24                         | 400                                 | 20,37  |
| 8  | 3,72                         | 450                                 | 22,77  |
| 9  | 4,21                         | 500                                 | 25,36  |

### 3. Wzmacniacz WF-70

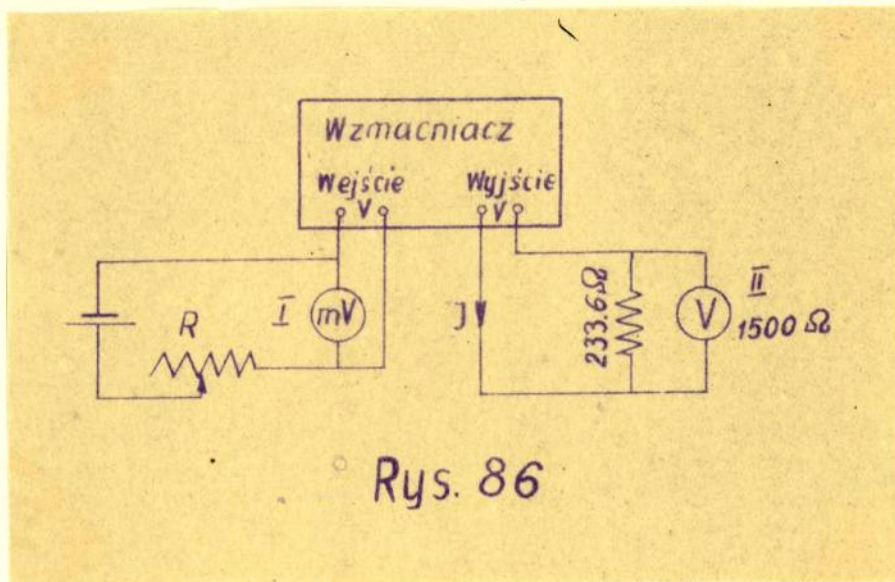
Ze względu na zakres pomiarowy pętlicy dobrano drogą prób odpowiednie wzmocnienie dołączając na wyjściu napięciowym wzmacniacza opór łączny  $202 \Omega$  (opór regulacyjny + opór pętlicy).

W takim układzie cechowano wzmacniacz używając jako bodźca na wejściu napięciowym akumulatora o napięciu 2 V



połączanego z oporem regulacyjnym R. Do cechowania użyto dwu woltomierzy produkcji Zakładów A3 typu TLME-2 kl 0,5 o zakresach pomiarowych 0-3 V i 0-60 mV. Przyrząd I o numerze fabr.5302150 i przyrząd II o nr. fabr.5307483.

### 3.1. Schemat pomiarowy



### 3.2. Przebieg cechowania

Przesuwając zwieracz opornicy R zmieniano bodziec. Napięcie to odczytywano na przyrządzie I. Przy ustalonym napięciu wejściowym robiono odczyt napięcia wyjściowego na przyrządzie II. Odczyty przyrządów oraz wyniki obliczeń podano w załączonej w dziale VII tabeli nr 30.



Rys. nr 77

mV

15

10

5

0

100

200

300

400

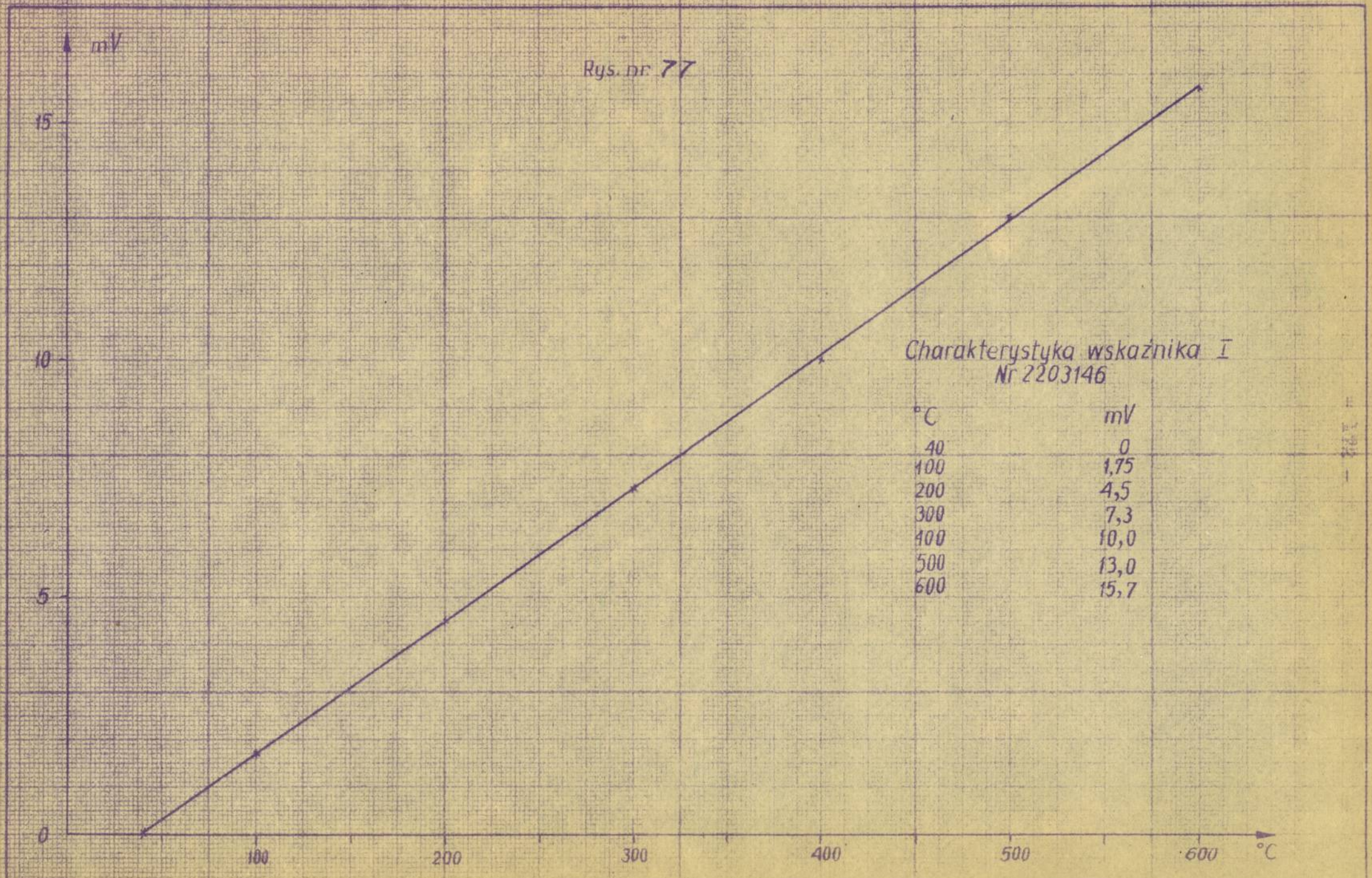
500

600

°C

Charakterystyka wskaźnika I  
Nr 2203146

| °C  | mV   |
|-----|------|
| 40  | 0    |
| 100 | 1,75 |
| 200 | 4,5  |
| 300 | 7,3  |
| 400 | 10,0 |
| 500 | 13,0 |
| 600 | 15,7 |





Wyniki cechowania dolnego  
stosu termopar Cu-konst /12 szt.termopar/

Tabela 26

| Ip | Pomiar temp.termop.wzorcowa |                   |       |          | STE stosu | Pomiar różnicy temp.między temp.zimnych końców stosu a temp.otoczenia |       |          |                                   |                   |                   | temp.zim.kon.stosu | różn.temp na stosie |
|----|-----------------------------|-------------------|-------|----------|-----------|---|-------|----------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
|    | mV                          | $\Delta t_w$      | $t_o$ | $t_w$ °C |           | mV  | $t_2$ | $t_{10}$ | $t_{sr} = \frac{t_2 + t_{10}}{2}$ | $t_o$ °C          | $t_{sr}$ mV       |                    |                     |
| 1  | 0,00                        | 0                 | 17,8  | 17,8     | 0,00      | 40  | 40    | 40       | 17,8                              | 0,00              | 0,0               | 17,8               | 0,0                 |
| 2  | 3,22                        | 65                | 18,2  | 83,2     | 25,51     | 53  | 52    | 52,5     | 18,0                              | 0,38              | 10,0              | 28,0               | 55,2                |
| 3  | 4,64                        | 95                | 18,2  | 113,2    | 40,55     | 54  | 53    | 53,5     | 18,2                              | 0,40              | 10,8              | 29,0               | 84,2                |
| 4  | 5,27                        | 107               | 18,3  | 125,3    | 45,22     | 59  | 58    | 58,5     | 18,3                              | 0,55              | 14,5              | 32,8               | 92,5                |
| 5  | 6,85                        | 139               | 18,3  | 157,3    | 61,03     | 65  | 63    | 64,0     | 18,3                              | 0,70              | 18,0              | 36,3               | 121,0               |
| 6  | 7,57                        | 157               | 18,5  | 175,5    | 67,90     | 72  | 61    | 61,5     | 18,6                              | 0,65              | 17,0              | 35,6               | 139,9               |
| 7  | 10,06                       | 204               | 19,0  | 223,0    | 94,90     | 75  | 75    | 75,0     | 19,5                              | 1,00              | 26,0              | 45,5               | 177,5               |
| 8  | 11,65                       | 237               | 19,9  | 256,9    | 111,13    | 80  | 79    | 79,5     | 20,2                              | 1,10              | 28,0              | 48,2               | 208,7               |
| 9  | 12,01                       | 243               | 20,0  | 263,0    | 114,70    | 82  | 79    | 80,5     | 20,4                              | 1,15              | 29,5              | 49,9               | 213,1               |
| 10 | 12,08                       | 245               | 20,1  | 265,1    | 115,70    | 82  | 80    | 81,0     | 20,6                              | 1,20              | 30,5              | 51,1               | 214,0               |
|    |                             | odczyt.<br>z r.85 |       |          |           |   |       |          |                                   | odczyt.<br>ryś.77 | odczyt.<br>ryś.79 |                    |                     |

Opór wewnętrzny stosu przy:  $t = 15$  °C

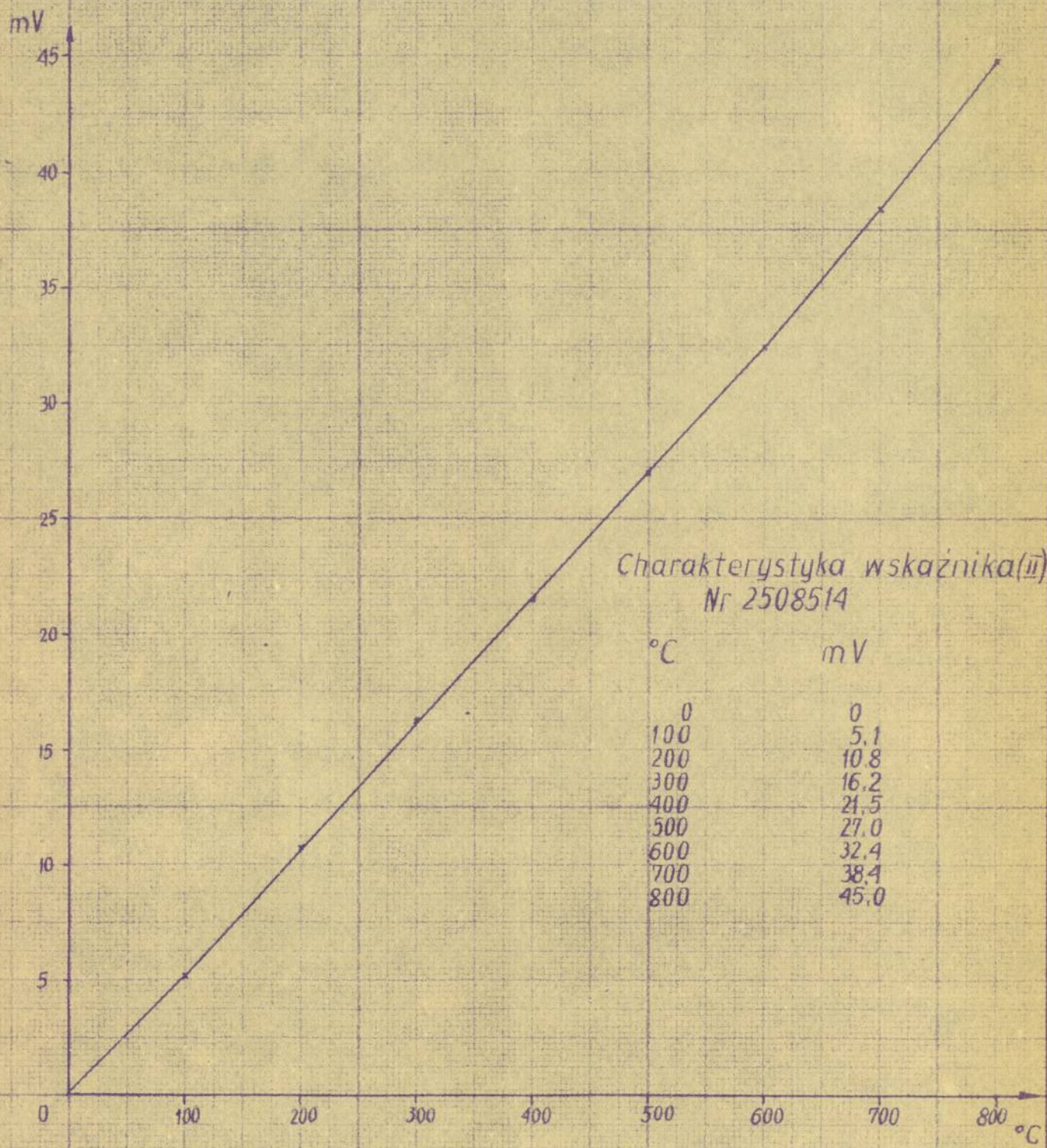
$$R_{sd} = 27,7 \Omega$$

 $t = 120$  °C

$$R_{sd} = 26,5 \Omega$$



Rys. Nr. 78





- Str 174 -

Rys. 79

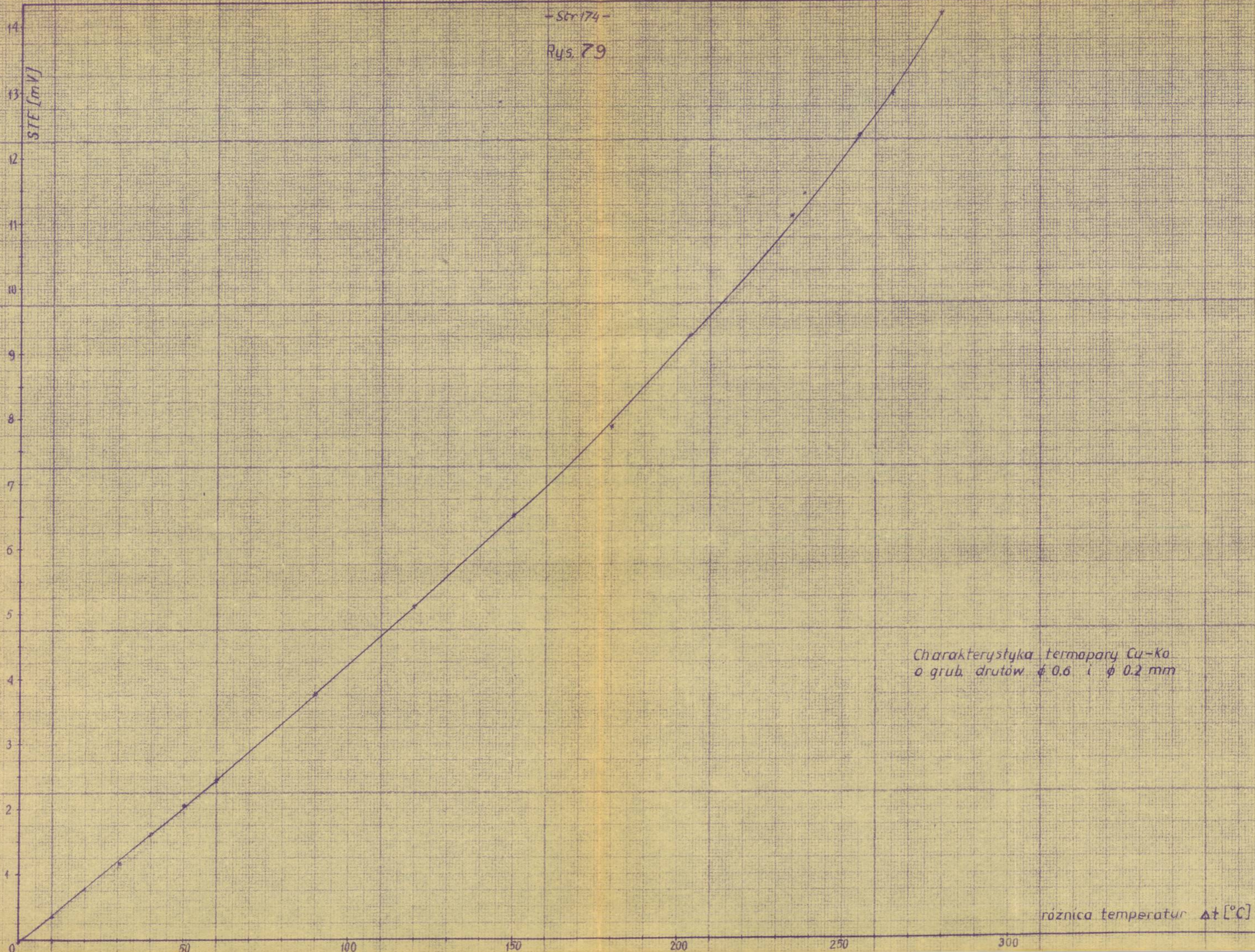




Tabela 27 Wyniki cechowania górnego stosu termopar Cu-konst /21 skt termopar umieszczonych w płytce dociskowej/

| Lp | temperat. na wzorcu  | Odczyty na wskaźniku nr 2205145 |       | Odczyt. sr. temp. z. k         | Temp. zimn. konc. termopary Cu-konst | SIE termopary Cu-konst | róż. temp. a. ten. zimn. | temp. zimn. konc. stosu        | różn. tem. na stosie        | SIE na stosie | Uw.                               |
|----|----------------------|---------------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|
|    | $t_w$ °C             | $t_5$                           | $t_7$ | $t_{sr} = \frac{t_5 + t_7}{2}$ | $t_0$                                | $t_{sr}$ mV            | $\Delta t_{sr}$ °C       | $t_{zs} = \Delta t_{sr} + t_0$ | $\Delta t_s = t_w - t_{zs}$ | mV            |                                   |
| 1  | 17,8                 | 40                              | 40    | 40,0                           | 17,8                                 | 0,00                   | 0,00                     | 17,8                           | 0,0                         | 0,0           | cechowano na bloku meta-<br>łowym |
| 2  | 83,2                 | 59                              | 61    | 60,0                           | 18,0                                 | 0,60                   | 14,2                     | 32,2                           | 51,0                        | 31,2          |                                   |
| 3  | 113,2                | 61                              | 67    | 64,0                           | 18,2                                 | 0,68                   | 17,0                     | 35,2                           | 78,0                        | 47,7          |                                   |
| 4  | 125,3                | 64                              | 73    | 68,5                           | 18,3                                 | 0,80                   | 20,5                     | 38,8                           | 86,5                        | 52,5          |                                   |
| 5  | 157,3                | 71                              | 69    | 70,0                           | 18,3                                 | 0,87                   | 21,8                     | 40,1                           | 117,2                       | 72,0          |                                   |
| 6  | 175,5                | 92                              | 74    | 83,0                           | 18,6                                 | 1,22                   | 30,5                     | 49,1                           | 126,4                       | 79,2          |                                   |
|    | obliczenie w tab. 26 |                                 |       |                                |                                      | odeczyt. z rys. 77     | odeczyt. z rys. 79       |                                |                             |               |                                   |

Tabela

| Lp | $t_w$ °C | $t_0$ °C | $\Delta t_4$ mV | $\Delta t_5$ mV | $\Delta t_7$ mV | $\Delta t_5$ °C | $\Delta t_7$ °C | $t_5 \approx t_7$ | $\Delta t_4$ | Uwagi              |
|----|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------------|
| 1  | 36       | 27       | 5,4             | 0,00            | 0,00            | 0,0             | 0,0             | 27,0              | 9            | cechowano w wodzie |
| 2  | 48       | 27,4     | 11,8            | 0,03            | 0,03            | 0,8             | 0,9             | 28,2              | 19,8         |                    |
| 3  | 61       | 27,8     | 18,4            | 0,10            | 0,10            | 2,8             | 2,8             | 30,6              | 30,4         |                    |
| 4  | 70       | 28,2     | 23,6            | 0,10            | 0,12            | 2,8             | 3,4             | 31,3              | 38,7         |                    |
| 5  | 81       | 28,6     | 29,5            | 0,12            | 0,12            | 3,4             | 3,4             | 32,0              | 49,0         |                    |
| 6  | 85       | 29,0     | 31,8            | 0,13            | 0,13            | 3,7             | 3,7             | 32,7              | 52,3         |                    |

Opór wewnętrzny stosu w  $t = 15$  °C  $R_{s\ g} = 19,7 \Omega$



Tabela 30

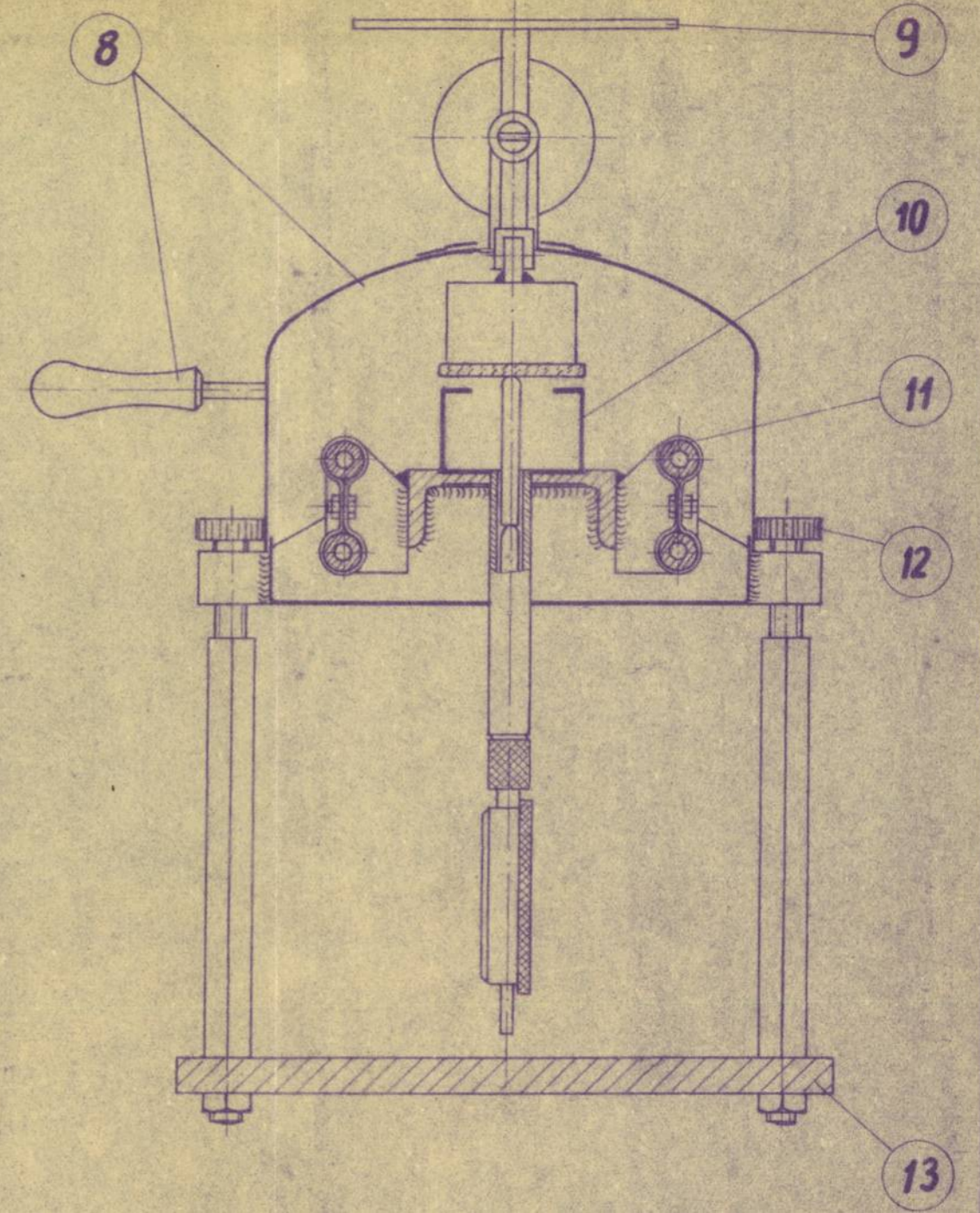
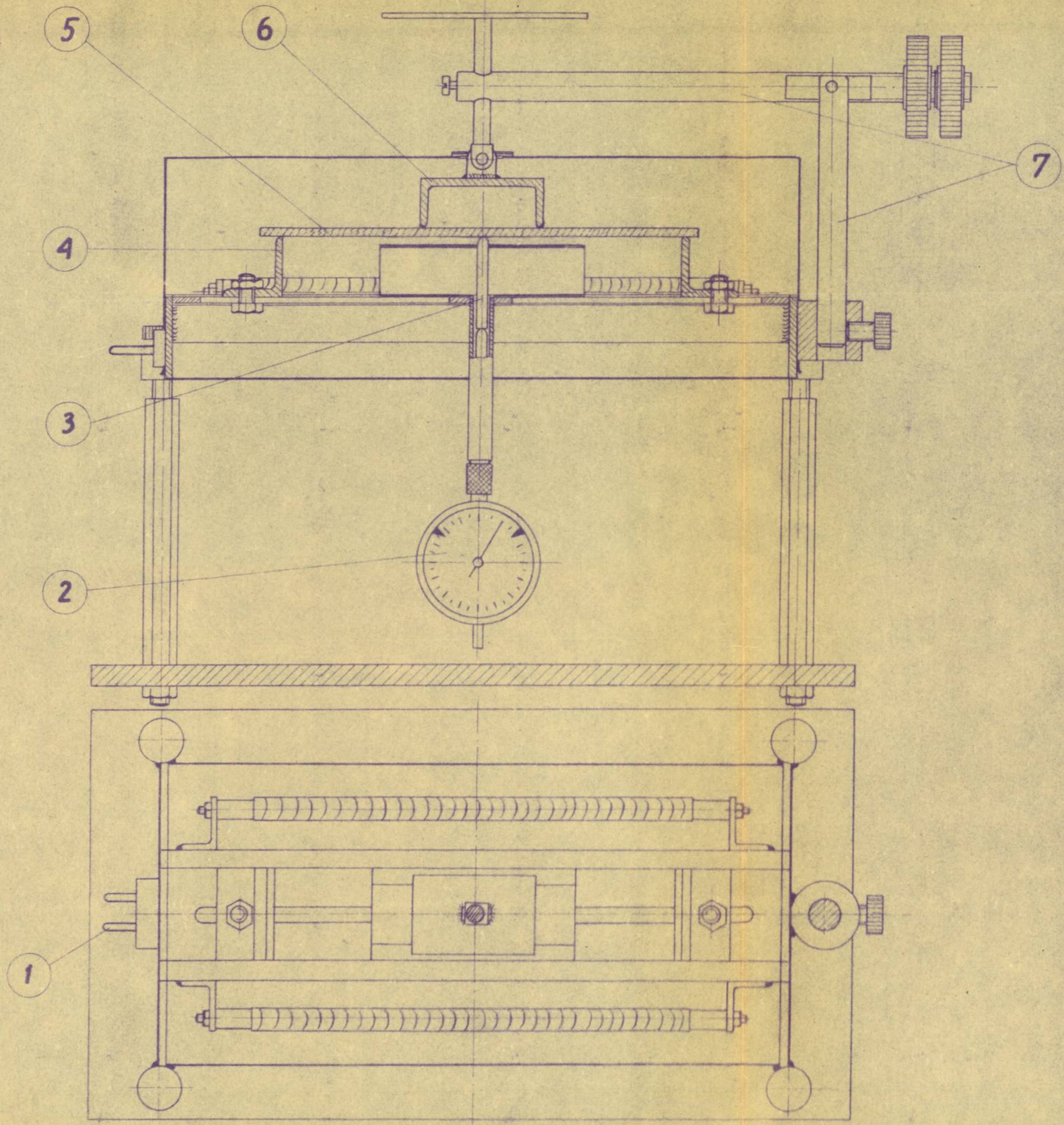
| Lp | Przyrząd I   |    | Przyrząd II |       | Mnożnik<br>napięcia<br>X | Prąd<br>wyjściowy<br>I mA | wzmocnie<br>nie Y<br>mV/mA |
|----|--------------|----|-------------|-------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
|    | dzia-<br>łek | mV | działek     | V     |                          |                           |                            |
| 1  | 0            | 0  | 0           | 0     | -                        | 0                         | -                          |
| 2  | 5            | 4  | 3,3         | 0,132 | 33,00                    | 0,652                     | 6,14                       |
| 3  | 10           | 8  | 6,7         | 0,268 | 33,50                    | 1,32                      | 6,06                       |
| 4  | 15           | 12 | 10,0        | 0,398 | 33,15                    | 1,97                      | 6,09                       |
| 5  | 20           | 16 | 13,2        | 0,528 | 33,00                    | 2,61                      | 6,13                       |
| 6  | 25           | 20 | 16,4        | 0,656 | 32,80                    | 3,25                      | 6,15                       |
| 7  | 30           | 24 | 19,8        | 0,792 | 33,00                    | 3,92                      | 6,14                       |
| 8  | 35           | 28 | 23,1        | 0,922 | 32,90                    | 4,56                      | 6,14                       |
| 9  | 40           | 32 | 26,5        | 1,060 | 33,15                    | 5,25                      | 6,10                       |
| 10 | 45           | 36 | 30,0        | 1,198 | 33,35                    | 5,83                      | 6,17                       |
| 11 | 50           | 40 | 33,1        | 1,325 | 33,10                    | 6,56                      | 6,10                       |
| 12 | 55           | 44 | 36,2        | 1,452 | 33,00                    | 7,19                      | 6,12                       |
| 13 | 60           | 48 | 39,8        | 1,592 | 33,15                    | 7,88                      | 6,10                       |
| 14 | 65           | 52 | 43,0        | 1,720 | 33,10                    | 8,52                      | 6,10                       |
| 15 | 70           | 56 | 46,4        | 1,856 | 33,15                    | 9,20                      | 6,09                       |

Wartości średnie:

Mnożnik napięcia X = 33,09

Wzmocnienie Y = 6,12 mV/mA



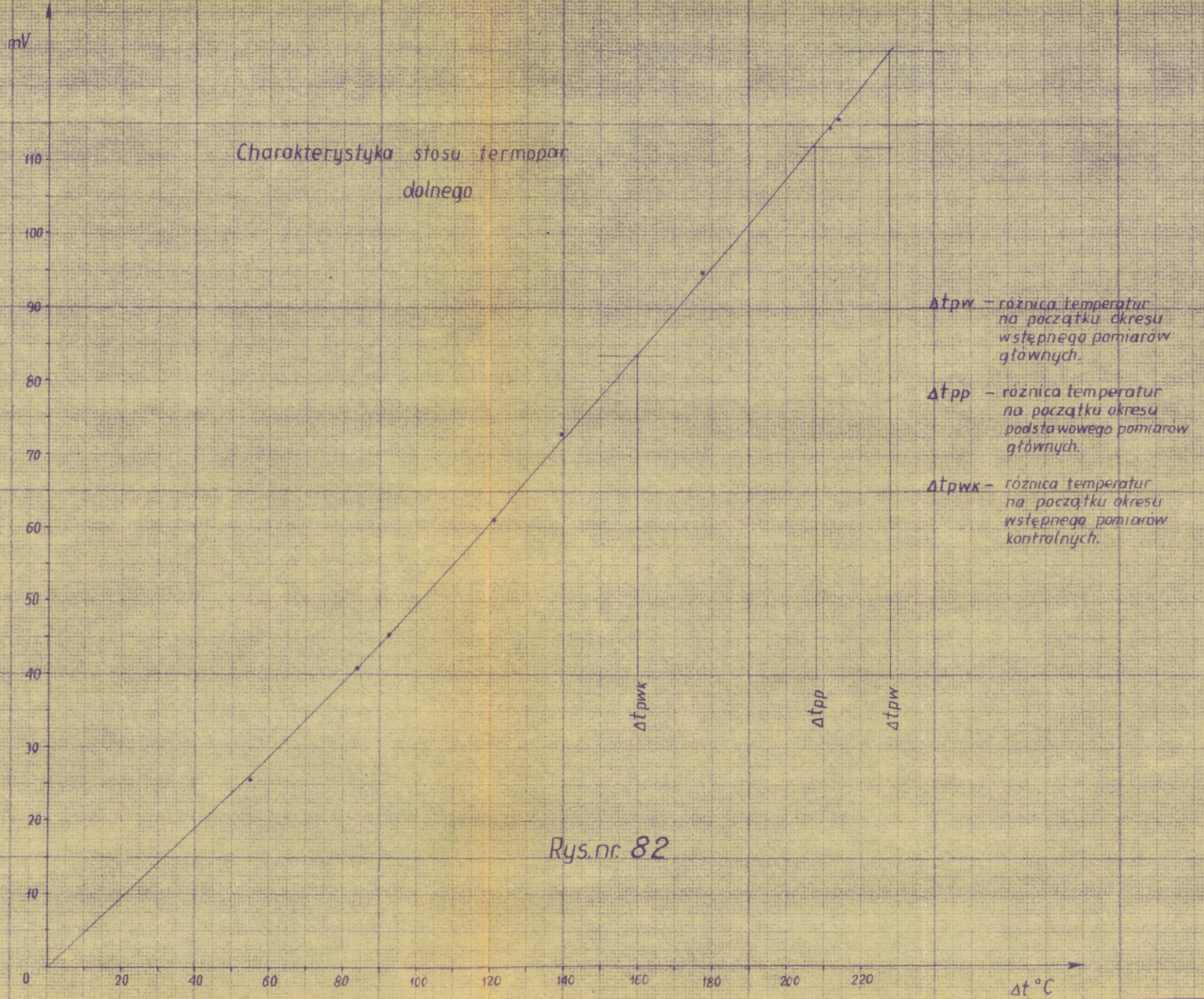


- |                      |                                |
|----------------------|--------------------------------|
| 1. Wypust grzejników | 7. Mechanizm prowadzący        |
| 2. Czujnik zegarowy  | 8. Pokrywa z uchwytem          |
| 3. Pręt dystansowy   | 9. Płytkę do obciążników       |
| 4. Podpory zginania  | 10. Zderzak zabezpieczający    |
| 5. Badana próbka     | 11. Opory grzejne              |
| 6. Szczęki dociskowe | 12. Śruba do regulacji poziomu |
|                      | 13. Podstawa                   |

Stoisko do badania wytrzymałości szkła przez zginanie

Rys. 22





Rys. nr 82



Charakterystyka stosu termopar  
górnego

mV

80

70

60

50

40

30

20

10

0

20

30

40

50

60

70

80

90

100

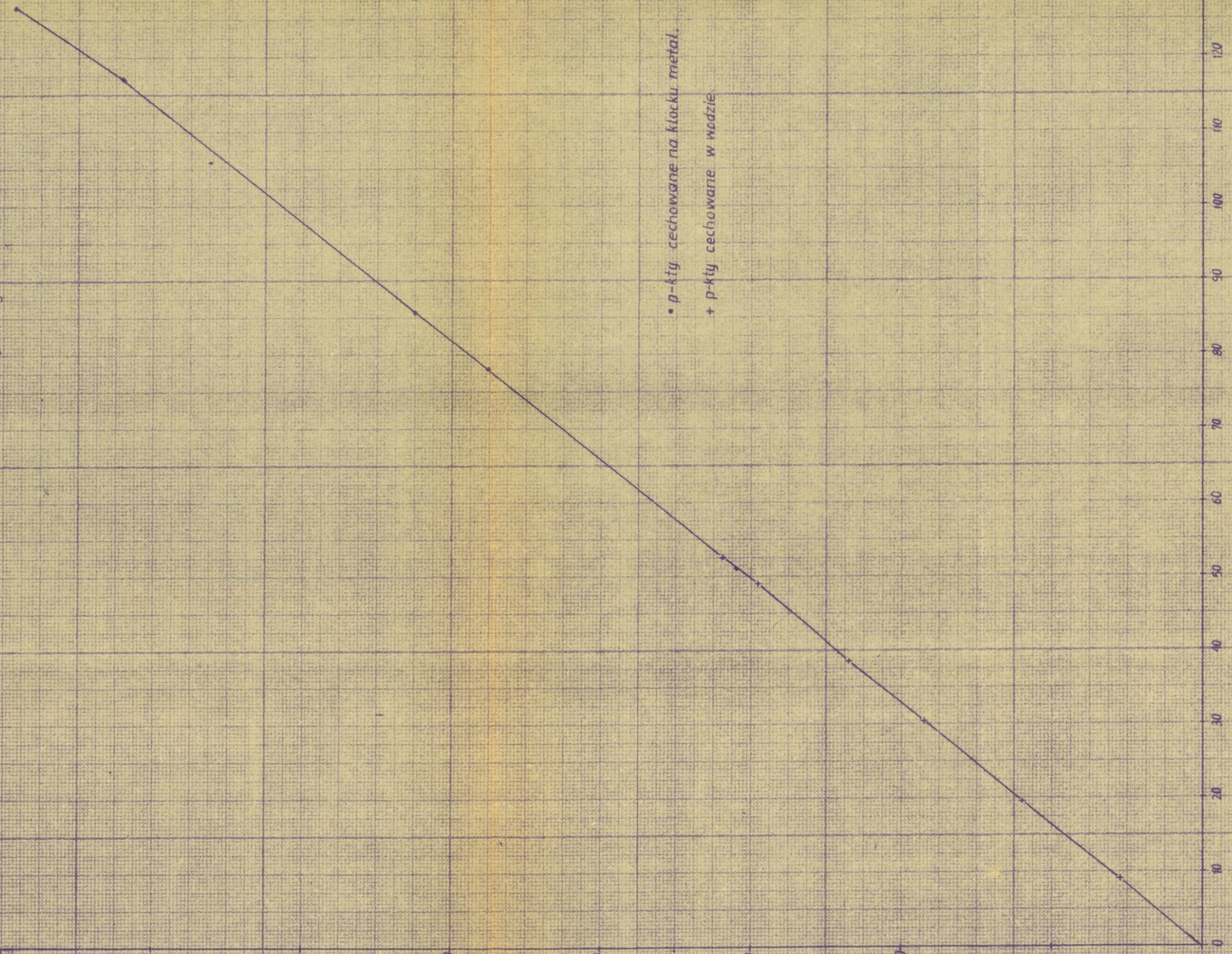
110

120

$\Delta t$

• p-kty cechowane na klocku metal.

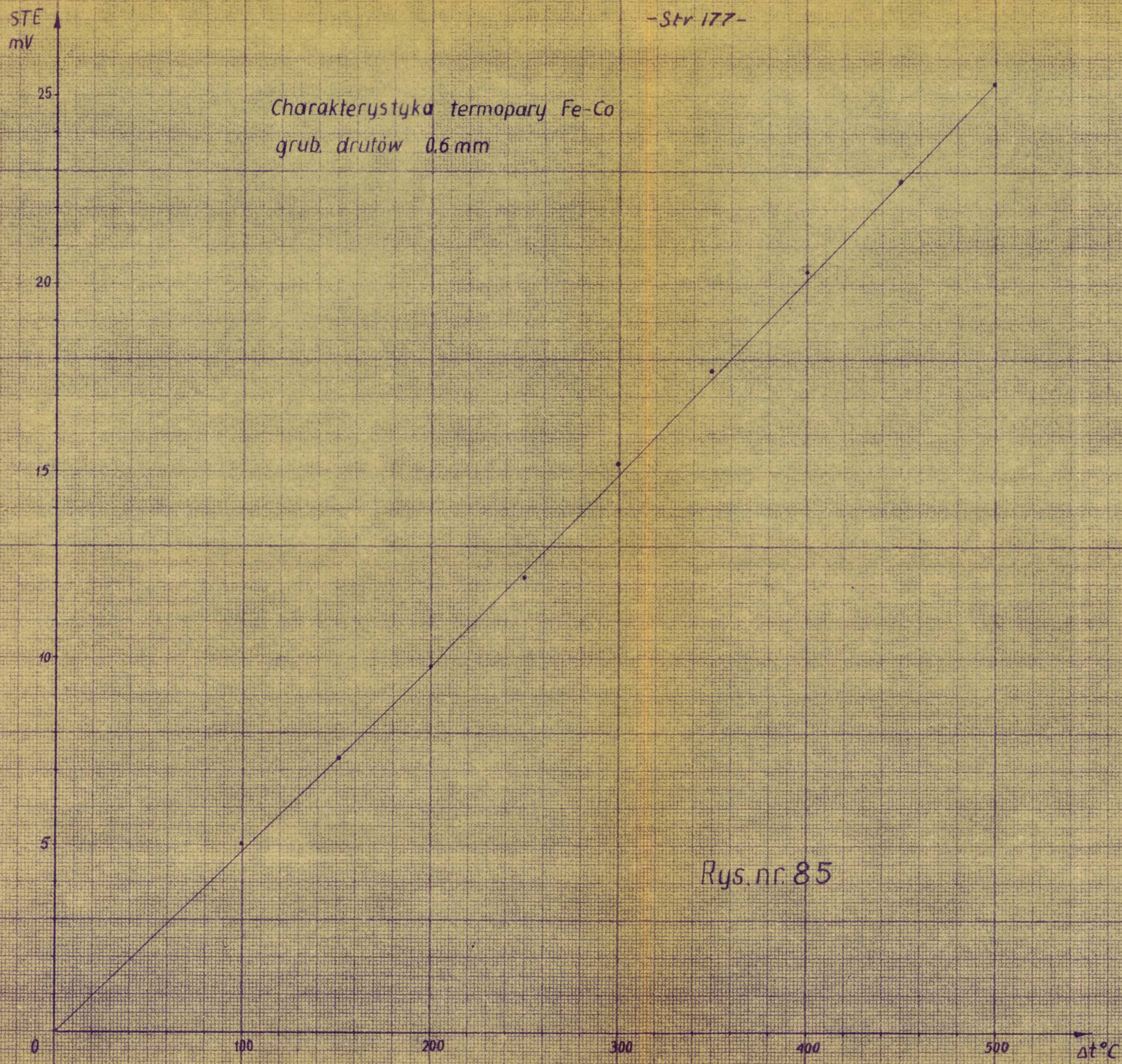
+ p-kty cechowane w wodzie



Rys. nr. 84

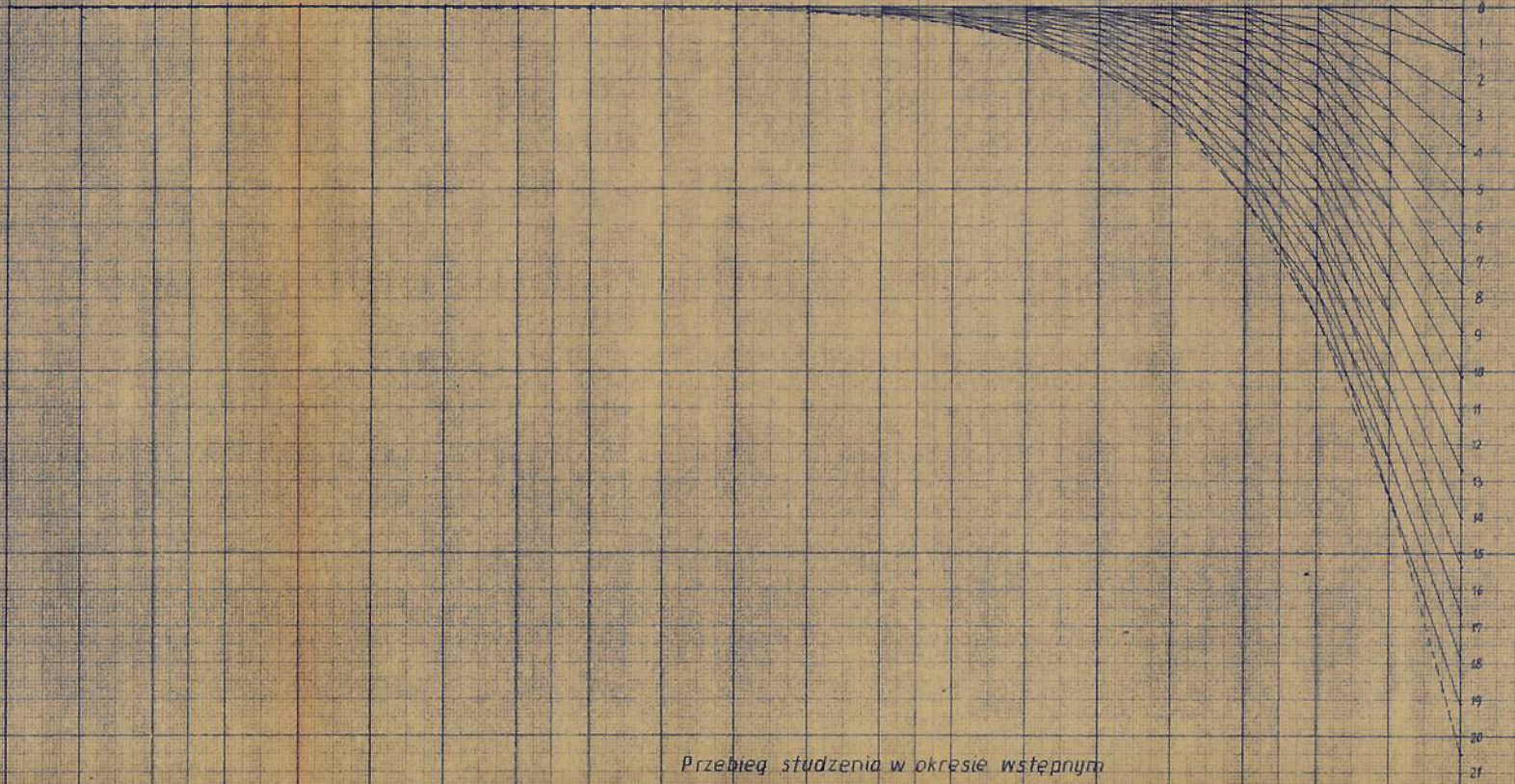


Charakterystyka termopary Fe-Co  
grub. drutów 0,6 mm



Rys. nr. 85





Przebieg studzenia w okresie wstępnym

Rys. nr 57

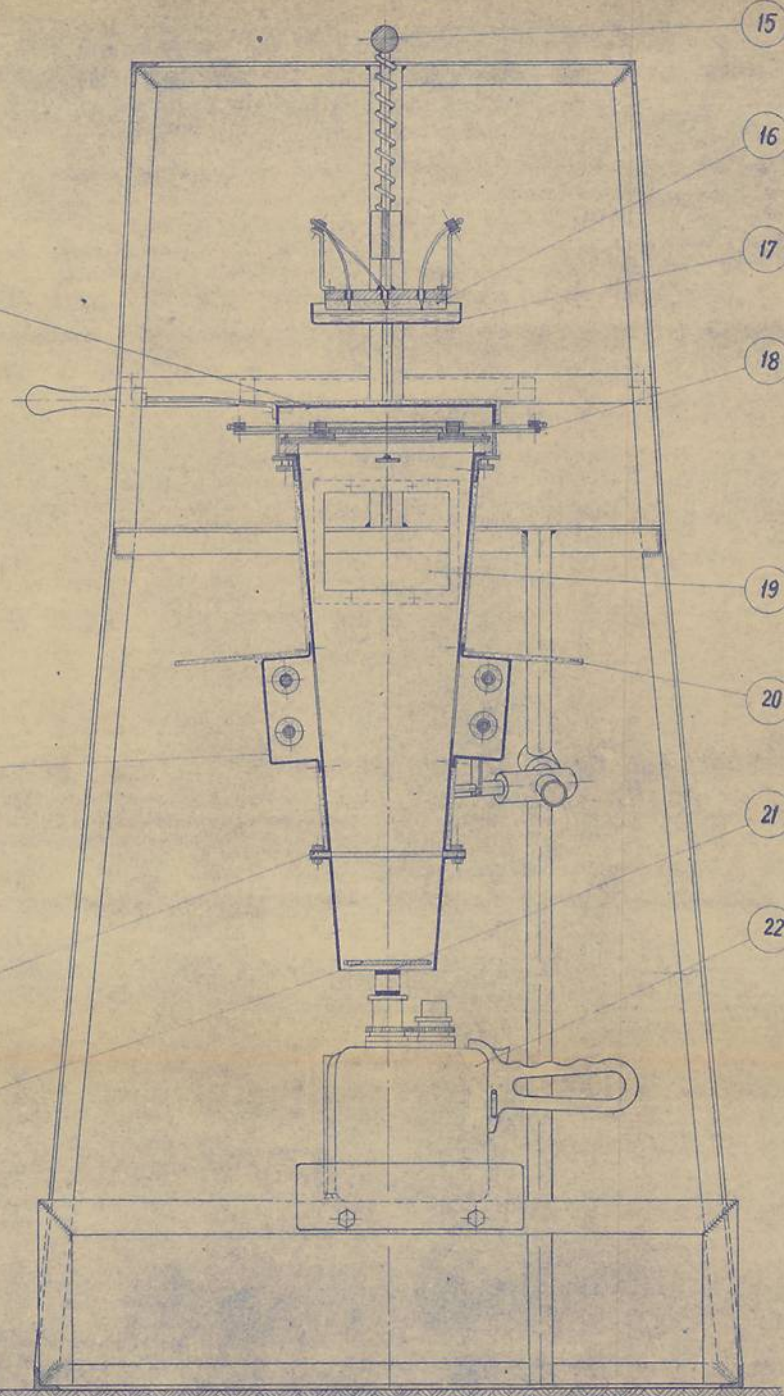
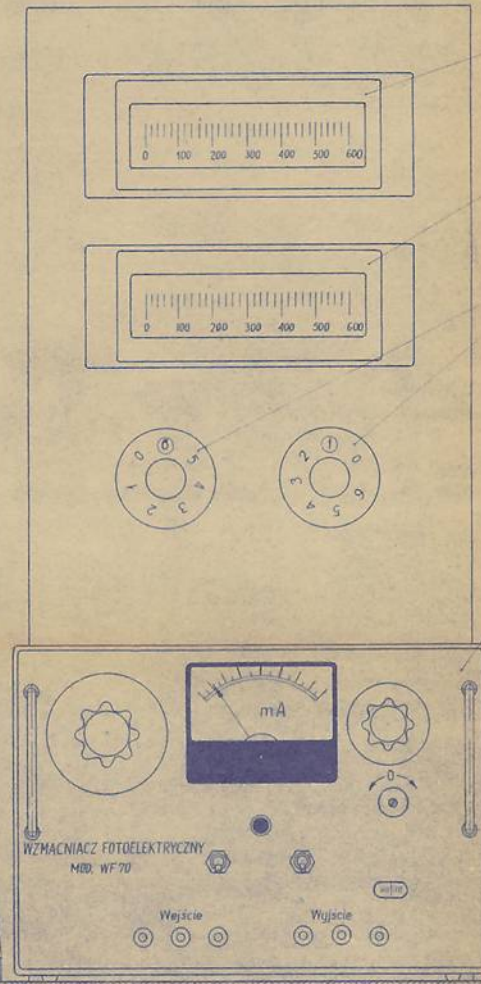
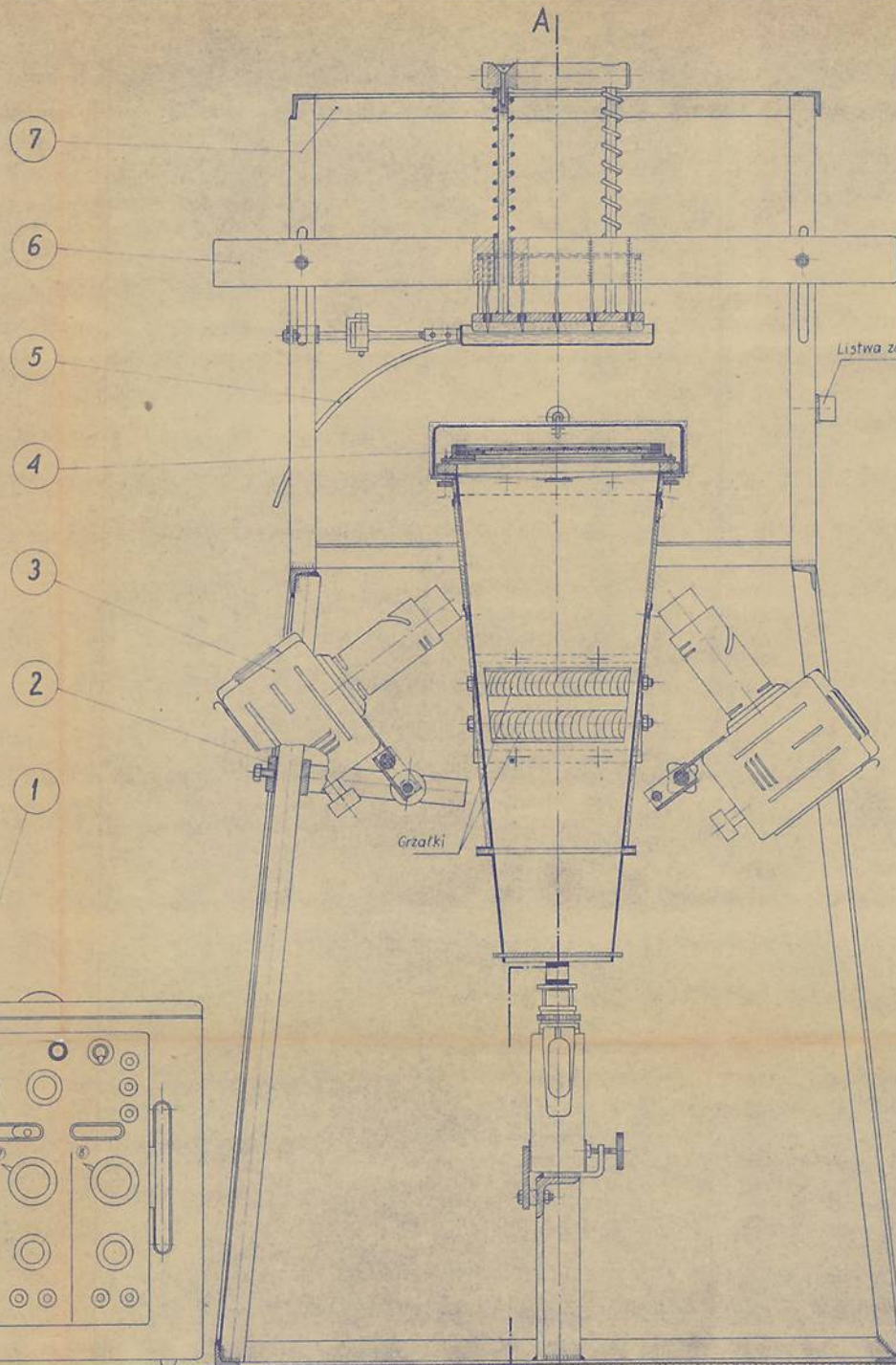
$t^{\circ}C$

$$f_{sr} = \frac{330 \cdot 2}{5} = 132 \approx 130 \text{ mm}^2$$



Stoisko podstawowe  
do badania dopuszczalnej szybkości studzenia.

- 1) Oscylograf pętlicowy typ OP-8
- 2) Konstrukcja mocowania lampy oświetlającej
- 3) Lampa oświetlająca
- 4) Badana próbka
- 5) Odptyw nadmiar wody studzącej
- 6) Konstrukcja nosna płytki dociskowej
- 7) Konstrukcja nosna stoiska
- 8, 9) Wskaźniki profilowe do termopar
- 10) Przełączniki termopar
- 11) Grzejniki oporowe wbudowane
- 12) Wzmacniacz fotoelektryczny WF-70
- 13) Izolacja termiczna między górną a dolną częścią tubusa
- 14) Szkło zabezpieczające kamerę
- 15) Rączka płytki dociskowej studzącej
- 16) Płytki dociskowa z wmontowanym górnym stosem termopar
- 17) Zbiorniczek wody studzącej płytkę dociskową
- 18) Stos termopar dolny
- 19) Okno do oświetlania badanej próbki
- 20) Osłona zabezpieczająca przed grzaniem zimnych końców termopar stosu termopar dolnego
- 21) Nasadka na obiektyw kamery
- 22) Kamera matoobrazkowa - Admira 8
- 23) Pokrywa



A



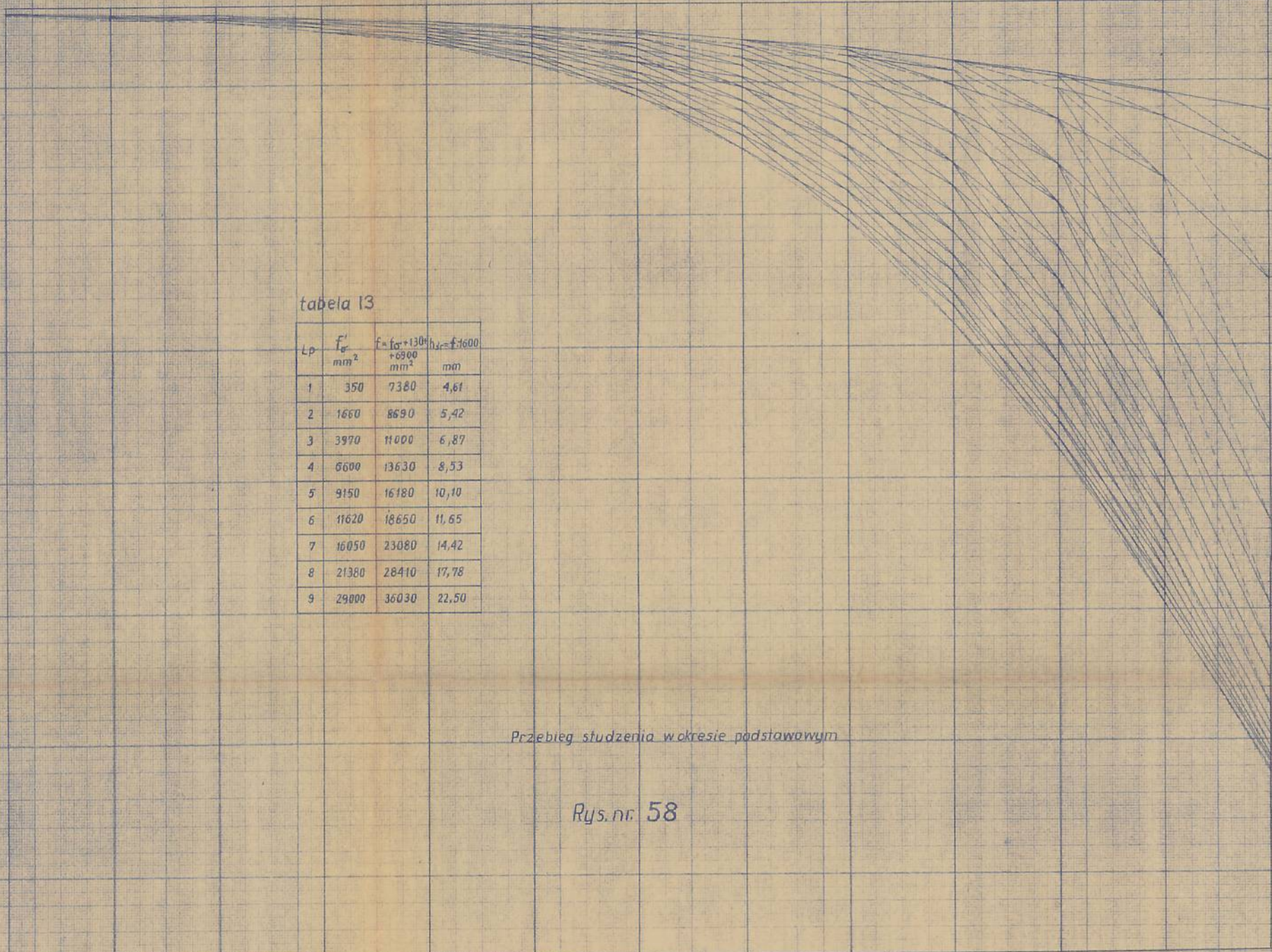
tabela 13

| $Lp$ | $F'_p$<br>mm <sup>2</sup> | $f = f_{cr} + 130 \sqrt{f_{cr} + 6900}$<br>mm <sup>2</sup> | $h_{cr} = f / 1600$<br>mm |
|------|---------------------------|--|---------------------------|
| 1    | 350                       | 7380   | 4,61                      |
| 2    | 1660                      | 8690   | 5,42                      |
| 3    | 3970                      | 11000  | 6,87                      |
| 4    | 6600                      | 13630  | 8,53                      |
| 5    | 9150                      | 16180  | 10,10                     |
| 6    | 11620                     | 18650  | 11,65                     |
| 7    | 16050                     | 23080  | 14,42                     |
| 8    | 21380                     | 28410  | 17,78                     |
| 9    | 29000                     | 36030  | 22,50                     |

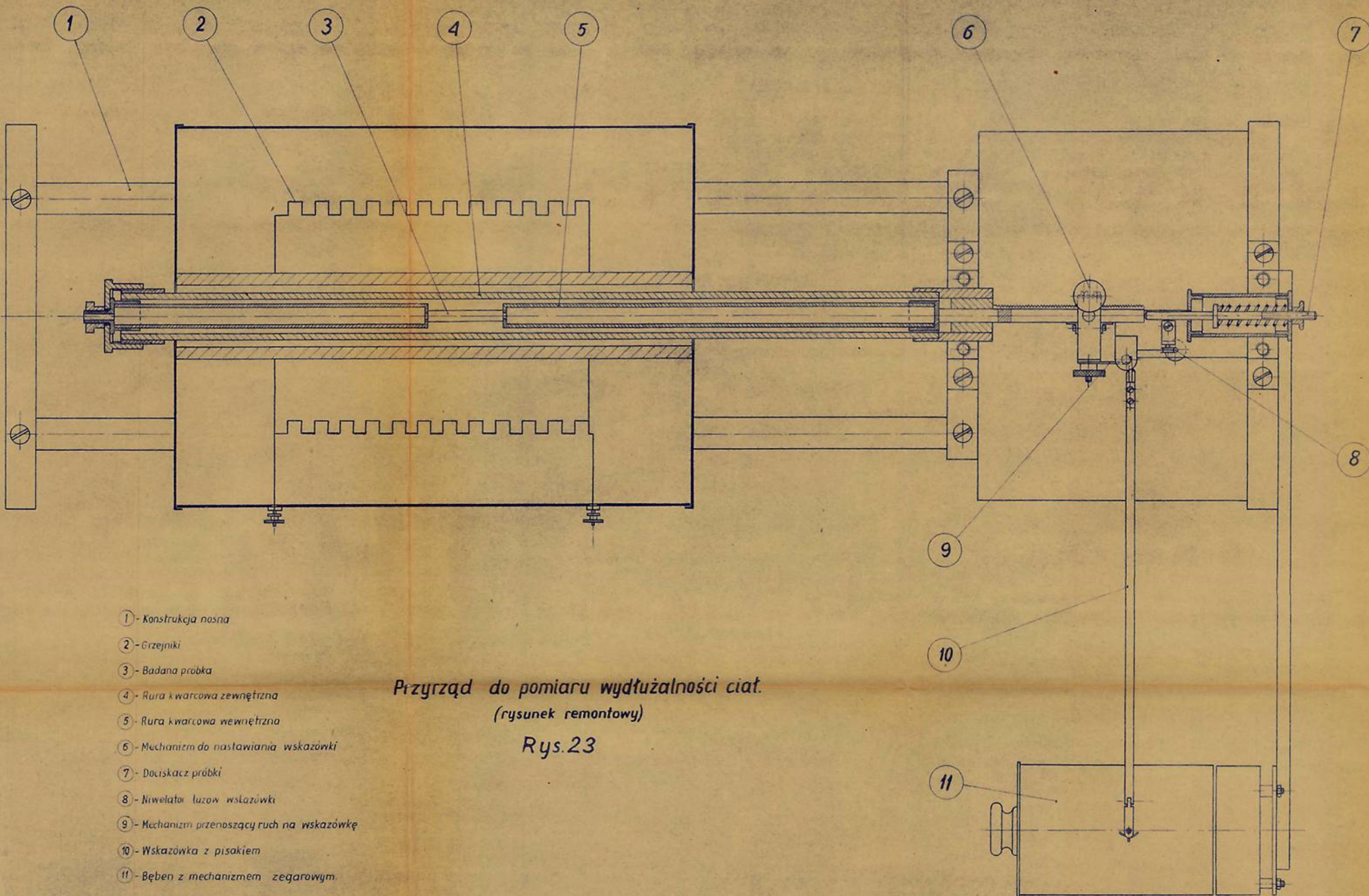
Przebieg studzenia w okresie podstawowym

Rys. nr. 58

0  
10  
20  
30  
40  
50  
60  
70  
80  
90  
100  
110  
120  
130  
140  
150  
160  
170  
 $\Delta t$  °C







- 1 - Konstrukcja nosna
- 2 - Grzejniki
- 3 - Badana próbka
- 4 - Rura kwarcowa zewnętrzna
- 5 - Rura kwarcowa wewnętrzna
- 6 - Mechanizm do nastawiania wskazówki
- 7 - Dociskacz próbki
- 8 - Niwelator luzów wskazówki
- 9 - Mechanizm przenoszący ruch na wskazówkę
- 10 - Wskazówka z pisakiem
- 11 - Bęben z mechanizmem zegarowym

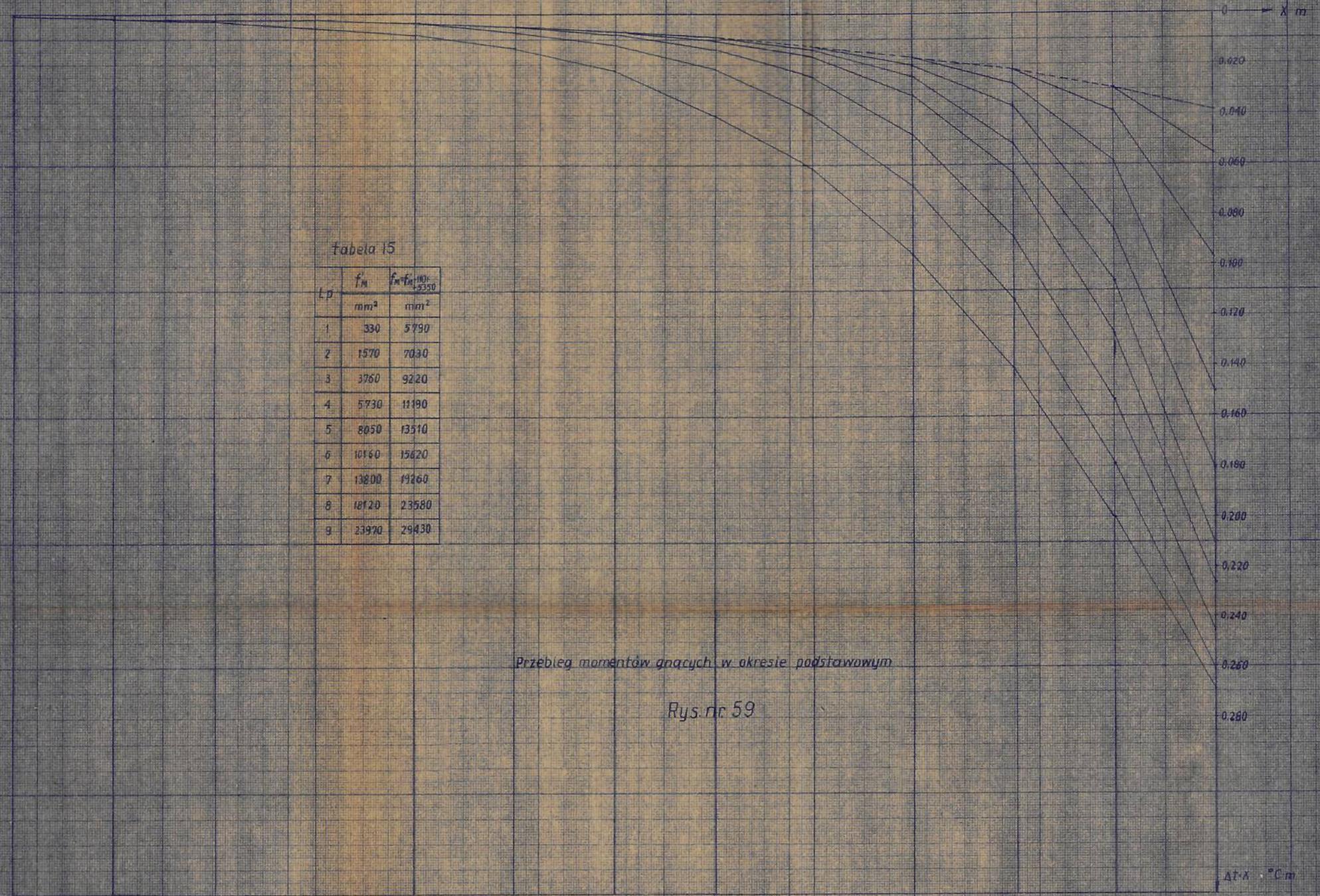
Przyrząd do pomiaru wydłużalności ciał.  
(rysunek remontowy)

Rys. 23



tabela 15

| Lp | $f_m$<br>mm <sup>2</sup> | $f_m \cdot \sigma_{\text{dopuszcz}} \cdot 10^6$<br>mm <sup>2</sup> |
|----|--------------------------|--|
| 1  | 330                      | 5790   |
| 2  | 1570                     | 7030   |
| 3  | 3760                     | 9220   |
| 4  | 5730                     | 11190  |
| 5  | 8050                     | 13510  |
| 6  | 10160                    | 15620  |
| 7  | 13800                    | 19260  |
| 8  | 18120                    | 23580  |
| 9  | 23970                    | 29430  |



Przebieg momentów gnących w okresie podstawowym

Rys. nr 59